

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

Ecole Nationale Supérieure Agronomique

(El-Harrach Alger)

**Thèse pour l'obtention du diplôme de**

**Doctorat en Sciences Agronomiques**

*Présentée et soutenue par*

*LAABOUDI Abdelkader*

***Modélisation de l'évapotranspiration de référence  
pour l'optimisation de l'efficience de l'eau  
d'irrigation du blé (*Triticum durum* L.)***

Devant le Jury composé de :

|                         |                   |   |
|-------------------------|-------------------|---|
| Président :             | Mr A. Abdelguerfi | Professeur (Ecole nationale supérieure agronomique) |
| Directeur de thèse :    | Mr B. Mouhouche   | Professeur (Ecole nationale supérieure agronomique) |
| Co directeur de thèse : | Mr B. Draoui      | Professeur (Université de Bechar)                   |
| Examineurs :            | Mr L. Zella       | Professeur (Université de Blida)                    |
|                         | Mr M. Hammouda    | Maitre de conférences (Université d'Adrar)          |

Année Universitaire  
2012/2013

## **Avant propos**

L'objectif principal de ce travail vise l'optimisation de l'efficience de l'eau d'irrigation de blé. C'est à dire une meilleure utilisation de l'eau pour réaliser la rentabilité des investissements et la valorisation des ressources en eau disponibles.

Cet objectif ne peut être atteint sans avoir une connaissance correcte des besoins en eau de la culture. Ceci exige une estimation exacte de l'évapotranspiration de référence selon les caractéristiques climatiques de différentes régions.

Le travail de recherche est constitué de deux parties

- Partie climatologique
- Partie agronomique

### **1- Partie climatologique**

Bien qu'il existe plusieurs méthodes qui estiment l'ETP (évapotranspiration potentielle). Nous avons jugé que dans leur ensemble, ces méthodes ne donnent pas des valeurs de l'ETP qui reflètent la réalité. Certaines entre elles surestiment les valeurs de l'ETP et d'autres les sous estiment. La méthode de Penman Monteith qui est jugée la meilleure, elle exige beaucoup de paramètres météorologiques, rarement tous disponibles dans les stations météorologiques. A cet effet, on tente par le biais de la modélisation de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  à modéliser cette formule pour estimer les valeurs de l' $ET_0$  d'une manière précise sans recours à un nombre important des données météorologiques.

Il suffit d'avoir un nombre limité de paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et la durée d'ensoleillement pour estimer des valeurs de l'ETP ayant le même degré de précision que celles estimées par la méthode de Penman Monteith. Les données nécessaires sont donc disponibles dans toutes les stations météorologiques.

### **2- Partie agronomique**

Elle traite les trois grands facteurs limitants qui ont une influence directe sur le rendement de la récolte, notamment la culture du blé, donc sur l'efficience de l'eau d'irrigation. Il s'agit de la gestion de l'irrigation, fertilisation raisonnée et lutte contre les adventices.

La méthode adopter pour réaliser les objectifs visés par ce travail réside dans ;

- La modélisation en utilisant l'approche des réseaux de neurones implémentés par la programmation sur Matlab. La régression linéaire multiple est utilisée pour comparer les résultats de la modélisation obtenus par l'approche des réseaux de neurones, elle est utilisée aussi pour la modélisation et l'analyse multivariée en cas de bases de données réduites.

- Des essais expérimentaux effectués sur terrain, pour quantifier l'effet des apports d'eau, des éléments fertilisants sur le rendement d'une culture de blé seine et dépourvue des adventices.

L'irrigation comporte 5 traitements hydriques effectués selon la fréquence d'arrosage (tour d'eau) et la fertilisation comporte 4 traitements ; N, Nk, NP et NPK.

Le suivi de la culture s'effectue continuellement et ce, pour dégager des renseignements sur les paramètres suivants.

- Développement racinaire et apparition des stades phénologiques
- Croissance aérienne et coefficient de tallage
- Homogénéité de développement et longueur des tiges
- La précocité et la fertilité de l'épi
- Longueur de l'épi et le poids de 1000 grains
- Le rendement pur en grains et le rendement en biomasse totale.

Le bilan hydrique est déterminé par l'utilisation des cases lysimétriques.

## DÉDICACES

À mon très cher père Mohamed.

À ma très chère mère Fatima.

Je ne vous remercierai jamais assez pour votre amour, soutien, bienveillance, conseil etc..., je vous offre ce travail.

À mes frères et mes sœurs.

Je suis très fière de vous offrir ce résultat de mes efforts et de mes sentiments pour exprimer mon amour envers vous. Vous avez constitué toujours un point de repère et un guide.

À mes beaux frères ; Je suis très honoré de vous offrir ce travail. Merci pour vos encouragements et vos soutiens.

A tous les habitants de mon petit village, À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

## *Remerciements*

Cette thèse de doctorat a été dirigée par Monsieur le professeur Mouhouche Brahim à L'Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'El Harrach. Je tiens à exprimer mon grand respect vers lui et mes sincères remerciements d'avoir accepté à diriger ce travail, malgré son plan de charge et ses occupations. Je tiens à lui exprimer mes vives gratitudee par son soutien physique et moral, ses conseils et ses orientations.

Je tiens à exprimer mes remerciements et reconnaissances au co-directeur de cette thèse, Monsieur le professeur Draoui Belkacem de l'Université de Bechar d'avoir accepté à m'aider pour réaliser ce travail, pour son accueil chaleureuse à l'Université de Bechar et pour ses directives et ses orientations.

Mes remerciements sont vivement adressées à monsieur le professeur Aissa Abdelguerfi d'avoir accepté à présider le jury et de nous offrir l'opportunité pour bénéficier de son savoir et ses directives précieuses.

Merci plus particulièrement à monsieur le professeur Zella Lakhdar d'avoir nous honoré par son acceptation à examiner ce travail et nous ouvrir une porte assez large pour apprendre davantage et d'éclaircir sans doute notre chemin vers l'avenir.

Je tiens à exprimer également mes gratitudee à Monsieur le docteur Hamouda Messaoud de l'université d'Adrar pour son soutien moral et physique depuis le début de mes travaux de recherche et d'avoir accepté à examiner ce travail malgré son plan de charge.

Je suis fière et heureux d'être dirigé et examiné par cette illite d'enseignants chercheurs de différentes universités d'Algérie.

Ce travail a été réalisé au sein de la station expérimentale de l'INRAA d'Adrar. Je tiens à exprimer mon respect vers son directeur au siège de l'INRAA, sans oublier le directeur de la station pour leurs facilités pour réaliser ce travail dans de bonnes conditions.

Je remercie également messieurs Zaki Abdennebi et Moussaoui Boudjemâa membres de projet de recherche pour leurs efforts fournis lors de réalisation de différentes taches du projet.

A l'issue de ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements à tous les collègues de la station expérimentales d'Adrar messieurs Boudeffeur Said, Tareb Said, Kharsi Mohamed, Bouzid M'hamed. Sans oublier mes collègues de la station Mahdi boualem ; Semiani, Chaâbane Belkhiri et tous les autres collègues pour leurs soutien physique et moral.

En fin, je tiens à exprimer mes gratitudes à tous ceux qui ont participé pour réaliser ce travail de près ou de loin, même avec un mot bien.

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Avant propos           | I   |
| Remerciements          | II  |
| Table des matières     | III |
| Liste des figures      | X   |
| Liste des tableaux     | XII |
| Liste des symboles     | XIV |
| Liste des abréviations | XVI |

## **TABLE DES MATIERES**

### **INTRODUCTION**

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1. Le problème de l'eau en Algérie | A |
| 2. Plan du document                | D |

### **PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

#### **Chapitre I : SECURITE ALIMENTAIRE ET IMPORTANCE DE**

#### **L'EAU POUR LES VEGETAUX**

|  |    |
|--|----|
| <b>A. SECURITE ALIMENTAIRE</b>                                   | 01 |
| 1. L'eau et la sécurité alimentaire                              | 02 |
| 2. le blé et la sécurité alimentaire en Algérie                  | 02 |
| 2.1. La culture du blé   | 03 |
| 2.1.1. La production du blé en Algérie                           | 04 |
| 2.1.2. La production du blé dans la région d'Adrar               | 05 |
| 2.1.3. Contraintes face au développement des cultures du blé     | 07 |
| <b>B. IMPORTANCE DE L'EAU POUR LES VEGETAUX</b>                  | 07 |
| 1. L'eau en Algérie  | 07 |
| 2. Gestion des ressources en eau                                 | 08 |
| 3. Disponibilité de l'eau du sol pour les végétaux               | 08 |
| 4. Circulation de l'eau dans le continuum sol-plante- atmosphère | 09 |
| 5. L'eau et la culture du blé                                    | 11 |
| 6. Besoins en eau des cultures                                   | 12 |

|  |    |
|--|----|
| 6.1. Détermination des besoins en eau des cultures | 12 |
| 6.1.1. L'évapotranspiration de référence (ET0)     | 13 |
| 6.1.1.1. Etablissement de la formule de PENMAN     | 14 |
| 6.1.1.2. Critique de la formule                    | 15 |
| 6.1.2. Notion du coefficient cultural              | 16 |
| 6.2. Besoins en eau du blé                         | 16 |

## **Chapitre II : OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU**

### **A- MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE 17**

|  |    |
|--|----|
| 1. Etat de l'art sur la modélisation                                 | 17 |
| 2. Approche de régression linéaire multiple                          | 17 |
| 2.1. Forces et limites de la méthode de régression linéaire multiple | 17 |
| 3. Approche des réseaux de neurones                                  | 18 |
| 3.1. Notions générales sur les réseaux de neurones                   | 18 |
| 3.2. Aperçu historique   | 19 |
| 3.3. Le neurone formel   | 20 |
| 3.4. Caractéristiques des réseaux de neurones artificiels            | 22 |
| 3.5. Fonction d'activation   | 22 |
| 3.6. Formulation mathématique de neurone                             | 23 |
| 3.7. Les différents types de réseaux de neurones artificiels         | 23 |
| 3.7.1. Les réseaux feed-forward                                      | 23 |
| 3.7.1.1. Le perceptron monocouche                                    | 23 |
| 3.7.1.2. Les perceptrons multicouches (PMC)                          | 24 |
| 3.7.2. Les réseaux "feedback"  | 25 |
| 4. Modélisation à l'aide de réseaux de neurones                      | 25 |
| 4.1. Modèle «boîte noire»  | 25 |
| 4.2. Modèle «boîte grise» ou hybride                                 | 25 |
| 5. Architecture des réseaux de neurones                              | 26 |
| 5.1. Réseaux de neurones statiques (ou acycliques, ou non bouclés)   | 26 |
| 5.2. Réseaux de neurones dynamiques (ou récurrents, ou bouclés)      | 26 |
| 6. Apprentissage des réseaux de neurones                             | 27 |
| 6.1. Types d'apprentissage   | 27 |
| 6.2. Algorithme d'apprentissage                                      | 27 |

|  |    |
|--|----|
| 6.1. 1. Algorithme de rétro propagation      | 28 |
| 7. Tests et Validation                       | 28 |
| 8. Forces et limites des réseaux de neurones | 29 |

## **B : OPTIMISATION DE L'EFFICIENCE DE L'EAU D'IRRIGATION**

|  |    |
|--|----|
| 1. Préservation et optimisation de l'utilisation des ressources en eau | 31 |
| 2. Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation | 31 |
| 2.1. Définitions   | 31 |
| 2.1.1 Efficacité d'irrigation  | 32 |
| 2.1.2 Efficacité de l'eau d'irrigation                                 | 32 |
| 2.1.3. Efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (EUE)         | 32 |
| 3. Facteurs d'amélioration de l'efficacité d'irrigation du blé         | 33 |
| 3.1. Facteurs liés à l'irrigation                                      | 33 |
| 3.1.1. Facteurs liés aux systèmes d'irrigation                         | 33 |
| 3.1.2. Irrigation selon les besoins de la culture                      | 34 |
| 3.2. Facteurs liés à la fertilisation                                  | 36 |
| 3.2.1. Fertilisation raisonnée   | 36 |
| 3.2.1.1. Fertilisation azotée  | 38 |
| 3.2.1.2. Fertilisation phosphorée                                      | 38 |
| 3.2.1.3. Fertilisation potassique                                      | 40 |
| 3.2.1.4. Interaction entre les éléments (NPK)                          | 41 |
| 3.2.1.5. Correction des carences                                       | 42 |
| 3.3. Facteurs liés au végétal  | 43 |
| 3.3.1. Le potentiel génétique  | 44 |
| 3.3.2. Tolérance à la salinité   | 44 |
| 3.4. Date de semis   | 44 |
| 3.5. Facteurs liés au sol  | 45 |
| 3.5.1. Fertilité du sol  | 45 |
| 3.5.2. Lutte contre la salinisation du sol                             | 46 |
| 3.6. Lutte contre les adventices                                       | 48 |
| 3.7. Adaptation au changement climatique                               | 49 |

# DEUXIEME PARTIE : ETUDE DU MILIEU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE LA ZONE D'ETUDE

## Chapitre III : CARACTERISTIQUES DU SOL, DE L'EAU ET DU CLIMAT

### A. LE SOL ET L'EAU D'IRRIGATION

|  |    |
|--|----|
| 1. Situation géographique et administrative        | 51 |
| 2. La Géologie                                     | 52 |
| 3. Aspect géomorphologique de la région d'Adrar    | 53 |
| 4. Aspect pédologique                              | 54 |
| 5. Hydrologie et hydrogéologie                     | 55 |
| 6. Les eaux d'irrigation                           | 55 |
| 7. Les foggaras                                    | 56 |
| 8. Types des sols et systèmes de production        | 59 |
| 8.1. Sols du système traditionnel                  | 59 |
| 8.1.1. Les sols irrigués par les foggaras          | 59 |
| 8.1.2. Sols irrigués par le système du «Ghaoutte » | 60 |
| 8.2. Sols du système de mise en valeurs            | 60 |
| 8.2.1. La petite mise en valeur                    | 60 |
| 8.2.2. La grande mise en valeurs                   | 60 |
| 9. Le pH et la capacité d'échange cationique       | 61 |
| 10. La salure                                      | 62 |
| 11. La matière organique                           | 62 |
| 12. Le rapport Carbone-Azote (C/N)                 | 62 |
| 13. Les éléments fertilisants                      | 62 |
| 13.1. L'azote                                      | 62 |
| 13.2. Le phosphore                                 | 63 |
| 13.3. Le potassium                                 | 63 |
| 14. Conditions pédologique des essais              | 63 |

### B. CARACTERISTIQUE DU CLIMAT 65

|   |    |
|---|----|
| 1. Evolution des paramètres climatiques | 65 |
| 1.1. Diagnose générale de Köppen        | 65 |

|  |    |
|--|----|
| 1.2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson         | 66 |
| 1.3. Indice d'aridité  | 67 |
| 1.4. Evolution de la température                             | 68 |
| 1.4.1. Tendance générale des températures moyennes annuelles | 68 |
| 1.4.2. Evolution des températures extrêmes                   | 69 |
| 1.5. La pluviométrie   | 70 |
| 2. Caractéristique du climat durant la période d'essai       | 70 |
| 2.1. Température   | 70 |
| 2.2. Humidité relative de l'air                              | 72 |
| 2.3. Le vent   | 72 |
| 2.4. Durée d'ensoleillement                                  | 73 |
| 2.5. L'évapotranspiration de référence                       | 73 |

## **TROISIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES**

### **Chapitre IV : MATERIELS ET METHODES DES ESSAIS**

#### **EXPERIMENTAUX ET MODELISATION**

##### **A. MATERIELS ET METHODES DES ESSAIS EXPERIMENTAUX**

|  |    |
|--|----|
| 1. Localisation des sites expérimentaux        | 75 |
| 2. Collecte des données météorologiques        | 75 |
| 3. Matériel végétal                            | 76 |
| 4. Dispositif expérimental                     | 76 |
| 5. Le semis                                    | 77 |
| 6. Lutte contre les adventices                 | 77 |
| 7. Traitements hydriques                       | 77 |
| 8. Traitements de fertilisation                | 78 |
| 9. Observations phénologiques                  | 79 |
| 10. Le bilan hydrique                          | 79 |
| 11. Détermination de la réserve utile pratique | 80 |

##### **B. MATERIEL ET METHODES DE LA MODELISATION** **81**

|  |    |
|--|----|
| 1. Estimation de l'évapotranspiration de référence   | 81 |
| 2. Modélisation de l'évapotranspiration de référence | 81 |

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Les étapes de développement des réseaux de neurones             | 81 |
| 2.1.1. Collecte des données  | 81 |
| 2.1.2. Analyse des données   | 82 |
| 2.1.3. Séparation des bases de données                               | 82 |
| 2.1.4. Normalisation des données                                     | 82 |
| 3. Apprentissage du réseau de neurones                               | 82 |
| 3.1. Algorithme d'apprentissage                                      | 82 |
| 4. Fonctions de transfert  | 83 |
| 5. Validation  | 84 |
| 6. Critères de performance du modèle                                 | 84 |
| 7. Les outils et logiciels utilisés pour les traitements des données | 86 |
| 8. Programmation du modèle   | 86 |
| 9. Organigramme du programme   | 87 |

## **QUATRIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### **Chapitre V : RESULTATS DE LA MODELISATION**

|   |    |
|---|----|
| 1. Modèle à pas de temps Mensuel                    | 88 |
| 1.1. Choix de l'architecture du modèle              | 88 |
| 2. Modèle à pas de temps décadaire                  | 90 |
| 3. Modèle à pas de temps journalier                 | 92 |
| 3.1. Utilisation de la régression linéaire multiple | 96 |
| 3.2. Utilisation de réseaux de neurones             | 98 |

### **Chapitre VI : RESULTATS DES ESSAIS EXPERIMENTAUX**

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 1. Développement de la culture        | 108 |
| 1.1. Développement des racines        | 108 |
| 1.1.1. Effet de la fertilisation      | 108 |
| 1.1.2. Effet de l'irrigation          | 109 |
| 2. Développement de parties aériennes | 109 |
| 2.1. Indice de tallage                | 111 |
| 2.2. Indice foliaire                  | 111 |
| 3. Durée du cycle végétatif           | 112 |
| 4. Rendement et ses composantes       | 113 |

|  |                |
|--|----------------|
| 4.1. Rendement et ses composantes sous pivot                                 | 113            |
| 4.2. Rendement et ses composantes à la station expérimentale                 | 113            |
| 5. Contribution des composantes de rendement à l'élaboration du rendement    | 114            |
| 6. Comportement de la culture vis-à-vis des traitements hydriques            | 116            |
| 6.1. Utilisation de l'eau du sol par la culture du blé                       | 116            |
| 5.2. Modélisation de l'évapotranspiration maximale (ETM)                     | 121            |
| 5.3. Effet des traitements hydriques sur les rendements et leurs composantes | 124            |
| 5.3.1. Première campagne   | 124            |
| 5.3.2. Deuxième campagne   | 125            |
| 5.3.3. Troisième campagne  | 126            |
| 6. Comportement végétatif du blé vis-à-vis de la fertilisation               | 127            |
| 6.1. Effet de la fertilisation sur le développement de la culture            | 127            |
| 6.2. Effet de la fertilisation sur le rendement et ses composantes           | 127            |
| 6. 2.1. Importance du potassium  | 129            |
| 6. 2.2. Importance du phosphore  | 131            |
| 6.2.1. Taux d'amélioration des rendements                                    | 131            |
| 6. 3. Coefficient d'utilisation apparent des engrais utilisés                | 132            |
| <br><b>Chapitre VII : AMELIORATION DE L'EFFICIENCE DE L'EAU D'IRRIGATION</b> |                |
| 1. Lutte contre les mauvaises herbes   | 134            |
| 1.1. Infestation des champs de blé par les adventices                        | 134            |
| 1.2. Méthodes de lutte   | 136            |
| 1.2.1. Comparaison entre la lutte chimique et la lutte mécanique             | 137            |
| 1.2.2. Effet du semis sans labour  | 138            |
| 2. Adaptation au climat  | 139            |
| 2.1. Influence de la température sur la culture du blé                       | 139            |
| 2.2. Estimation des rendements   | 144            |
| 2.3. Choix de la date de semis   | 145            |
| <br><b>CONCLUSION GENERALE</b>   | <br><b>147</b> |
| <br><b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>                                       | <br><b>157</b> |
| <br><b>ANNEXES</b>   |                |

|   |   |
|---|---|
| Annexe 1 : Rendement et ses composantes (première campagne)                         | a |
| Annexe 1 : Rendement et ses composantes (première campagne)                         | d |
| Annexe 1 : Rendement et ses composantes (première campagne)                         | e |
| Annexe 4 : Bilans hydrique du blé ; première campagne et deuxième Campagne          | g |
| Annexe 5 : Bases de données utilisées pour l'implémentation des réseaux de neurones | j |

### Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 01 : Modèle du neurone formel  | 21 |
| Figure 02 : Perceptrons multicouches 3-3-2-1                                      | 24 |
| Figure 03 : effet des fréquences d'arrosage sur le rendement                      | 35 |
| Figure 04 : Rendements du blé sous pivots pour deux sites dans la même zone       | 46 |
| Figure 05 : Relation entre la quantité de sel lessivée et le volume d'eau drainé  | 48 |
| Figure 06 : Localisation de la région d'Adrar et de la zone d'étude               | 52 |
| Figure 07 : Aspect morphologique de la région d'Adrar                             | 54 |
| Figure 08 : Carte topographique : Localisation des foggaras et leurs directions   | 57 |
| Figure 09: de partage d'eau de la foggara   | 58 |
| Figure 10 : Bassins d'accumulation des eaux d'irrigation                          | 58 |
| Figure 11 : diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен                       | 67 |
| Figure 12a : Evolution des températures moyennes annuelles                        | 69 |
| Figure 12b : Evolution des minimas absolus (1980-2010)                            | 69 |
| Figure 12c : Evolution des maximas absolus (1980-2010)                            | 70 |
| Figure 13 : Pluies annuelles durant la période 1980 -2010                         | 70 |
| Figure 14 : Evolution de la température au cours de l'année                       | 72 |
| Figure 15 : Evolution de l'humidité relative au cours de l'année                  | 72 |
| Figure 16 : Variation de la vitesse moyenne du vent au cours de l'année           | 73 |
| Figure 17 : Variation de la durée de l'ensoleillement au cours de l'année         | 73 |
| Figure 18 : Evolution de l'évapotranspiration au cours de l'année                 | 74 |
| Figure 19 : Localisation de la station météorologique                             | 76 |
| Figure 20 : Schéma de deux cases lysimétriques                                    | 79 |
| Figure 21 : Allure de fonctions de transfert utilisées                            | 84 |
| Figure 22 : Comparaison graphique entre les séries observées et simulées de l'ET0 | 89 |
| Figure 23 : Corrélacion entre la série observée et simulée de l'ET0               | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 24 : Evolution des valeurs de $R^2$ et MSE en fonction du nombre de neurones         | 91  |
| Figure 25 : Comparaison graphique de la série observée et la série simulée de l'ET0         | 92  |
| Figure 26 : Évolutions des valeurs de $R^2$ et MSE en fonction du nombre de neurones        | 93  |
| Figure 27 : Comparaison graphique de la série observée et la série simulée de l'ET0         | 94  |
| Figure 28 : Comparaison graphique de la série observée et simulée de l'ET0                  | 95  |
| Figure 29 : Comparaison graphique de la série observée et la série simulée de l'ET0         | 97  |
| Figure 30 : Corrélacion entre ET0 observée et ET0 simulée                                   | 98  |
| Figure 31 : Évolutions des valeurs de $R^2$ et MSE en fonction de l'architecture du réseau  |     |
| Figure 32 : Évolutions des RMSE et MARE en fonction de l'architecture du réseau             | 101 |
| Figure 33 : Structure de trios couches du réseau de neurones type « feed forward »          | 101 |
| Figure 34 : Schéma de l'architecture du réseau utilisé dans cette étude                     | 102 |
| Figure 35 : Relation entre ET0 simulée et ET0 observée pendant les 3 phases                 | 104 |
| Figure 36 : Comparaison des valeurs de la série observée et de la série simulée d'ET0       | 105 |
| Figure 37 : Comparaison graphique de la simulation de RNA et celle de RLM                   | 106 |
| Figure 38 : développement aérien du blé sous pivot et à la station                          | 110 |
| Figure 39 : Hétérogénéité de développement entre traitements                                | 112 |
| Figure 40 : Corrélacion entre le rendement réel et le rendement estimé                      | 116 |
| Figure 41: Comparaison graphique entre le rendement réel et le rendement simulé             | 116 |
| Figure 42 : Evolution de l'ETR durant une semaine au stade montaison                        | 117 |
| Figure 43 : Evolution du potentiel hydrique en fonction de l'humidité du sol                | 118 |
| Figure 44 : Evolution de l'humidité du sol cultivé en blé (stade montaison)                 | 119 |
| Figure 45 : Corrélacion entre l'ETM observée et l'ETM simulée de blé                        | 124 |
| Figure 46 : Comparaison graphique entre l'ETM observée et l'ETM simulée                     | 124 |
| Figure 47 : effet de la fertilisation sur le rendement de blé                               | 128 |
| Figure 48 : Effet de la fertilisation sur le rendement de blé pendant les campagnes d'essai |     |
| Figure 49 : Taux d'amélioration du rendement de blé des apports d'engrais                   | 132 |
| Figure 50 : Infestation du champ du blé par les adventices                                  | 135 |
| Figure 51 : Dénombrement des adventices sous pivot (nombre de tiges/m <sup>2</sup> )        | 136 |
| Figure 52 : Evolution de la température moyenne pendant le cycle végétatif de blé           | 140 |
| Figure 53 : Evolution des rendements moyens et rendements pics de blé sous pivots           | 141 |
| Figure 54 : Relation entre les rendements moyens et rendements pics de blé sous pivots      |     |
| Figure 55 : Evolution rendements réels et rendements estimés de blé sous pivots             | 145 |

## Liste des tableaux

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 01: Evolution des rendements du blé sous pivots de la région d'Adrar                 | 06  |
| Tableau 02: Efficience d'eau d'irrigation pour les différents systèmes                       | 34  |
| Tableau 03 : Besoins en eau de la culture des blés exprimés en ETM (mm/j                     | 35  |
| Tableau 04 : Rendements du blé obtenus par les traitements de la fertilisation               | 37  |
| Tableau 05 : Effet des apports de correction en phosphore sur l'amélioration du rendement    |     |
| Tableau 06: Effet des apports de correction sur le rendement et ses composantes              | 43  |
| Tableau 07 : Effet de la date du semis sur l'amélioration des rendements (q/ha)              | 45  |
| Tableau 08 : Analyse de l'eau de la station (Puits de la station INRA)                       | 56  |
| Tableau 09 : Capacité d'échange cationique (CEC en méq/100 g)                                | 61  |
| Tableau 10 : Analyse chimique (sol de la station expérimentale)                              | 63  |
| Tableau 11 : Bases échangeables  | 64  |
| Tableau 12 : Analyse granulométrique (sol de la station expérimentale)                       | 64  |
| Tableau 13 : Analyse chimique sous pivot (Aougrouit)   | 64  |
| Tableau 14: Analyse chimique sous pivot d'Aougrouit (suite)                                  | 65  |
| Tableau 15 : Bases échangeables (site d'Aougrouit)   | 65  |
| Tableau 16 : Analyse granulométrique (site d'Aougrouit)                                      | 65  |
| Tableau 17 : Variation des températures extrêmes et les moyennes mensuelles                  | 71  |
| Tableau 18 : Tour d'eau (jours) durant le cycle végétatif du blé                             | 78  |
| Tableau 19 : Matrice de corrélation des variables (moyenne mensuelle)                        | 88  |
| Tableau 20 : Critères de performance selon le nombre d'entrées                               | 89  |
| Tableau 21 : Critères de performance du modèle à 4 entrées et 8 neurones                     | 91  |
| Tableau 22 : Paramètres retenus pour un modèle à pas de temps mensuel                        | 92  |
| Tableau 23 : Matrice de corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie    | 93  |
| Tableau 24 : Matrice de corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie    | 95  |
| Tableau 25 : Critères de performance obtenus par RLM et ANN                                  | 98  |
| Tableau 26 : Comparaison des critères de performance obtenue par RLM RNA                     | 102 |
| Tableau 27 : Paramètres statistiques de la série observée et simulée d'ET0 (mm/j)            | 105 |
| Tableau 28 : Ecart type des différents paramètres d'entrée                                   | 106 |
| Tableau 29 : Corrélations entre les différents paramètres d'entrée et le paramètre de sortie |     |
| Tableau 30: Extension racinaires (cm) au stade fin tallage (première campagne)               | 108 |
| Tableau 31: Analyse de la variance pour l'extension des racines                              | 109 |

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 32 : Analyse de la variance pour la croissance de la culture                               | 111 |
| Tableau 33 : Evolution de l'indice foliaire du blé durant les stades végétatifs                    | 112 |
| Tableau 34 : Rendement et ses composantes sous pivot   | 113 |
| Tableau 35 : Rendement et ses composantes à la station expérimentale                               | 114 |
| Tableau 36 : R <sup>2</sup> entre les rendements et leurs composantes                              | 114 |
| Tableau 37 : Consommation en eau du blé à l'ETM et l'ETR stade montaison (mm/j)                    | 117 |
| Tableau 38 : Evolution du potentiel d'eau du sol au cours d'une même journée                       | 119 |
| Tableau 39 : ET réelle et maximale du blé (mm/j) selon des stades végétatifs                       | 120 |
| Tableau 40 : Effet d'un stress hydrique court sur la production du blé                             | 121 |
| Tableau 41 : Evolution de l'ETM et du Kc du blé pendant le cycle végétatif                         | 121 |
| Tableau 42 : Modélisation de l'ETM. Paramètres statistiques du modèle (option 1)                   | 122 |
| Tableau 43 : Modélisation de l'ETM. Paramètres statistiques du modèle (option 2)                   | 123 |
| Tableau 44 : Résultats d'analyse statistique du rendement et ses composantes (1 <sup>ière</sup> C) | 125 |
| Tableau 45 : Résultats d'analyse statistique du rendement et ses composantes (2 <sup>ème</sup> C)  | 126 |
| Tableau 46 : Résultats d'analyse statistique du rendement et ses composantes (3 <sup>ème</sup> C)  | 126 |
| Tableau 47 : Analyse statistique pour le rendement et ses composantes (1 <sup>ière</sup> C)        | 127 |
| Tableau 48 : Analyse statistique du rendement sa composante (2 <sup>ème</sup> C)                   | 128 |
| Tableau 49 : Analyse statistique du rendement et ses composantes (3 <sup>ème</sup> C)              | 129 |
| Tableau 50 : Analyse statistique du rendement et ses composantes (effet de la campagne)            |     |
| Tableau 51 : Coefficients d'utilisation apparents des engrais utilisés (%)                         | 132 |
| Tableau 52 : Liste des adventices recensés sous pivot (nombre de pieds /m <sup>2</sup> )           | 135 |
| Tableau 53: Nombre de tiges d'adventices par m <sup>2</sup> (avant traitement)                     | 136 |
| Tableau 54 : Nombre de plants d'adventices par m <sup>2</sup> (après traitements)                  | 137 |
| Tableau 55: Analyse de la variance (techniques de désherbage)                                      | 137 |
| Tableau 56 : Nombre de tiges d'adventices par m <sup>2</sup> (effet de semis direct)               | 138 |
| Tableau 57 : Analyse statistique de l'interaction (effet de semis direct)                          | 139 |
| Tableau 58 : Analyse statistique de l'interaction camp./rép./fertilisation/irrigation              | 140 |
| Tableau 59 : Matrice de corrélation des variables indépendantes                                    | 142 |
| Tableau 60 : Analyse multi variée de l'effet des températures sur les rendements du blé            | 143 |
| Tableau 61 : Paramètres statistiques du modèle d'estimation des rendements s/pivots                | 145 |

## Liste des symboles

B.M : biomasse (g/m<sup>2</sup>)

b : bias (biais)

C : indice de continentalité pluviale

CE : Conductivité électrique (dS/m ou ms/cm)

CEC : Capacité d'échange cationique (meq.g<sup>-1</sup>)

CUP : Coefficient d'utilisation de phosphore

Cv : coefficient de variation (%)

Ee : Efficience économique

ET0 : Evapotranspiration de référence (mm/j)

ETM : Evapotranspiration maximale (mm/j)

ETR : évapotranspiration réelle (mm/j)

EUE : Efficience de l'utilisation de l'eau d'irrigation

hPa : hecto pascalle

Hr : humidité relative (%)

HS: hautement significatif

I : durée d'ensoleillement (nombre d'heures par jour)

Ia : l'indice d'aridité

Inter : interaction

IR : indice de récolte

Irr : irrigation

K : Potassium

Kc : coefficient cultural

L : layer (couche)

LAI : Leaf area index (indice de la surface foliaire)

L. E : Longueur de l'épi (cm)

L.T: longueur des tiges (cm)

MARE :Mean Absolute Relative Error (erreur moyenne absolue et relative)

MS : Matière sèche,

MSE :Mean Squared Error (moyenne des carrés des erreurs)

N.G/EPI : nombre de grains par épi

NS : non significatif

P : Phosphore

pF : point de flétrissement

pH : Potentiel d'hydrogène

PIB : Produit intérieur brut

PMG: poids de 1000 grains (g)

PPDS : plus petite différence significative

R : Coefficient de corrélation

R<sup>2</sup> : Coefficient de détermination

Rd: Rendement (g/m<sup>2</sup>)

Re : Résistance dans de l'eau dans les feuilles

RFU : Réserve facilement utilisable

RLM : Régression linéaire multiple

RMSE : Root Mean Squared Error (erreur moyenne quadratique)

RNA : Réseaux de neurones artificiels

r<sub>st</sub> = résistance stomatique

r<sub>a</sub> = résistance de la couche limite dans l'air

r<sub>p</sub> = résistance du trajet « racine feuilles

S : significatif

T: température (°C)

VIF: variance inflation factor

V.v : Vitesse de vent (m/s)

W: weight (poids)

$\Delta\Psi$  : Chute de potentiel entre deux points

$\Psi_f$  = potentiel hydrique moyen des feuilles,

$\Psi_a$  = potentiel hydrique dans l'air

## Liste des abréviations

AFD : Agence Française de Développement

AFED: Arab Forum for Environment and Development

AIEA : Agence international de l'énergie atomique

APFA : Accession à la Propriété Foncière Agricole

ART : Adaptatif Résonance Théorie

CI : Continentale intercalaire

CCLS : Coopératives des *Céréales* et des *Légumes Secs*

DA : Dinars algériens

CIHAM : Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes

CRSTRA : Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides

*DERD : Direction de l'Enseignement, de la Recherche et du Développement (maroc)*

DSA : Direction des services agricoles

FAO : Food and Agriculture Organization

INRA : Institut national de la recherche agronomique

INSID : Institut National des sols, irrigation et drainage

IPTRID : Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et drainage

MAAAO : Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et les affaires rurales de l'Ontario

MAAO : Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario

MADR : Ministère de l'agriculture du développement rural

*MADREF : Ministre de l'Agriculture du Développement Rural et des Eaux et Forêts (Maroc)*

MATALB : Mathworks laboratory

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

PIB : Produit intérieur brut

PMC : Perceptrons multicouches

PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement

PNTTA : Programme national de transfert de technologies en agriculture

Ppds : Plus petite différence significative

PPIC: *Potash & Phosphate Institute of Canada*

UNIFA : Union des industries de la fertilisation

## INTRODUCTION

### 1. Problème de l'eau en Algérie

Neuf (09) pays se partagent 60 % des ressources en eau mondiales : Brésil, Russie, USA, Canada, Chine, Indonésie, Inde, Colombie et Pérou. A l'inverse, quatre vingt (80) pays représentant 40 % de la population mondiale souffrent du manque d'eau (Afrique du Nord, Moyen Orient, Pakistan, Afrique sahélien). L'Algérie se situe à l'instar des 17 pays africains touchés par le déficit hydrique, dans la catégorie des pays pauvres en ressources hydriques au regard du seuil de rareté fixé par le PNUD ou celui de rareté fixé par la Banque mondiale à savoir 1000 m<sup>3</sup>/habitant/an (Ansari, 2011).

En 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m<sup>3</sup>, elle n'était plus que de 720 m<sup>3</sup> en 1990, 680 m<sup>3</sup> en 1995, 630 m<sup>3</sup> en 1998. Estimée à environ 500 m<sup>3</sup> à l'heure actuelle, elle ne sera que de 430 m<sup>3</sup> en 2020. Il faudrait disposer entre 15 et 20 milliards de m<sup>3</sup> par an, en réservant 70% à l'agriculture (Ansari, 2011).

Selon Hassini (2001), les caractéristiques climatiques et spatiales en Algérie, conditionnent fortement les potentialités en eau du pays. La majeure partie du territoire algérien (87%) correspond à une zone désertique où les précipitations sont quasi nulles.

La pluviométrie est intermittente, mal répartie, avec une récurrence importante des phases de sécheresses et d'inondations. De ce fait, les ressources en eaux superficielles et souterraines, renouvelables du Nord du pays sont limitées. A cause de la topographie et le manque de reboisement des bassins versants, les eaux de pluie se caractérisent par une faible infiltration en faveur d'un fort ruissellement occasionnant l'érosion de terre et un transport solide important. Ce dernier contribue à l'invasion des barrages et réduit leurs capacités de rétention.

Au sud du pays où la pluviométrie est très faible voir négligeable dans certaines régions, l'essentiel de la ressource est contenue dans les grands aquifères du Continental Intercalaire (C.I.) et du Complexe Terminal (C.T.). Cette réserve en eau souterraine est de nature fossile. Le taux moyen annuel de renouvellement des réserves totales de ces aquifères est de  $1,4 \cdot 10^{-5}$ , soit une durée de renouvellement de 70 000 années (Hassani, 2001). Cette faible alimentation

est réalisée grâce aux épandages des oueds descendants de l'Atlas Saharien et à l'infiltration des pluies dans le grand erg occidental.

Ces nappes sont caractérisées par un artésianisme élevé au centre, il est maximum dans la région de l'Oued Rhir. L'aquifère est de plus en plus profond vers le Nord-est, où le toit de la nappe se trouve à 1500 à 2000 m. Vers la périphérie, la nappe est ascendante peu profonde et à température moyenne. Les eaux sont chaudes au Nord-Est du bassin (la température moyenne est de 60°C). La nappe du continental intercalaire affleure dans les régions d'Adrar et de In Salah, Où on trouve les foggaras et des forages qui sont les exutoires artificiels de la nappe albienne, les eaux s'écoulent principalement vers le Sud et l'Ouest de la nappe où se trouvent les zones évaporatoires du Touat du Gourara et du Tidikelt. Une autre direction d'écoulement se fait vers le Nord-est, zone côtière tunisienne, à travers les failles géologiques d'El Hamma et de Médenine (Ouali et al., 2007). La nature de cette eau est malheureusement mauvaise dans sa majorité. La salinité dépasse les seuils tolérables dans la plupart des cas.

A ces contraintes naturelles de disponibilité de la ressource en eau s'est allié une explosion de la demande sous l'effet conjugué de l'importante croissance démographique, de la forte urbanisation et de l'extension de la demande agricole. Cet accroissement de la demande est mal contrôlé et encore peu régulé par les instruments juridiques et économiques.

Pour répondre à cette demande en eau dument croissante, un pompage excessif de beaucoup d'aquifères est enregistré. Ce pompage mal étudié entraîne souvent une augmentation rapide de la minéralisation des eaux et un rabattement des nappes superficielles très remarquable. En effet, dans la région d'Adrar, ce rabattement varie selon les zones, de 5 à 30 m de profondeur, conduisant à un tarissement d'un nombre important de foggaras.

A ces facteurs de limitation quantitative des réserves disponibles, s'ajoutent des contraintes liées à la mauvaise utilisation de ces ressources. On cite :

- La faible efficience d'utilisation de l'eau d'irrigation. Dans ce contexte, (OSS, 2008) a déclaré que l'efficience de l'eau d'irrigation en Algérie est la plus faible en comparaison de celle au Maroc en Tunisie. Cette faiblesse est due essentiellement aux systèmes d'irrigation utilisés et à la mi-connaissance des besoins en eau des cultures.

- L'impact du changement climatique sur les ressources en eau est indiscutable, dans ce sens, les recherches menées par Laaboudi et al. (2011a), ont montré l'effet de celui-ci sur l'accroissement des besoins en eau des cultures.
- La progression continue de la salinité qui gagne de nouveaux hectares chaque année en réduisant la fertilité des sols et en polluant les nappes souterraines elle aggrave la situation.

En conséquence, malgré les importants investissements menés par l'Etat algérien pour mobiliser davantage l'eau potable, l'eau industrielle et l'eau d'irrigation (World Bank, 2007), la récente sécheresse a mis en relief la vulnérabilité de système d'irrigation et accentué la pression sur les ressources en eau souterraines. Si en 1990 (Hassani, 2001), la ressource renouvelable par habitant était de 690 m<sup>3</sup>/ha/an, selon certaines évaluations prospectives, ce taux sera ramené à 378 en 2025 et à 300 en 2050. De leurs coté Hadeff et Hadeff (2000) ont signalé qu'en Algérie, le déficit de cet or bleu est devenu inquiétant confirmant les diverses expertises partant d'hypothèse et utilisant de méthodologies différentes qui ont toutes conclu que notre pays se trouvera entre 2010 et 2025 confronté à cette pénurie quasi-endémique.

Dans ces situations difficiles, plusieurs démarches sont à envisager simultanément ;

- Le recours à l'utilisation des eaux non conventionnelles est une option stratégique qui mérite une considération particulière, dans ce contexte on note le dessalement de l'eau de mer et la réutilisation des eaux usées.
- L'eau virtuelle est une option additionnelle à encourager, en effet, un travail de quantification des flux d'eau virtuelle contenue dans les produits agricoles importés et exportés par l'ensemble des pays méditerranéens met en évidence l'importance quantitative de ces flux au regard des ressources en eau disponibles dans les pays, ainsi que l'intérêt que peut présenter le concept d'eau virtuelle comme outil d'analyse et d'aide à la décision en matière de gestion et de répartition de l'eau en situation de pénurie (FAO, 2008).
- L'amélioration de l'efficacité de l'eau d'irrigation, le but de notre travail, est une option de grande importance, car elle assure en même temps, une amélioration de la production agricole et une utilisation rationnelle des ressources en eau disponibles. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif principal de ce travail. Et ce dans le but de réaliser simultanément une production élevée du blé d'une part et d'assurer la préservation qualitative et quantitative de

la ressource hydraulique d'autre part. D'où la nécessité de mettre en évidence un outil pratique pour connaître d'une manière précise les besoins en eau de blé, et d'assurer une optimisation de l'efficacité de l'eau d'irrigation.

L'approche adoptée est la modélisation de l'évapotranspiration de référence obtenue par la formule de Penman Monteith en utilisant la méthode de réseaux de neurones d'une part et d'étudier les principaux facteurs d'amélioration de l'efficacité de l'eau d'autre part.

Pour réaliser de tels objectifs, le Thème du travail de recherche est intitulé « Modélisation de l'évapotranspiration de référence pour l'optimisation de l'efficacité de l'eau d'irrigation de blé (*Triticum durum* L.) » et le plan du document est organisé de la manière suivante :

## **2. Plan du document**

Le document est subdivisé en quatre parties ;

**La première partie**, c'est une **Synthèse bibliographique**, elle contient deux chapitres ;

**Chapitre I** comporte une synthèse bibliographique sur la culture du blé en Algérie et leur rôle en vue d'assurer la sécurité alimentaire, un tel rôle qui ne peut être joué sans un approvisionnement suffisant en eau.

**Chapitre II** ; il synthétise les différents travaux relatifs à l'optimisation de l'utilisation de des ressources en eau disponibles pour le secteur agricole. Ce chapitre est traité en deux volets : il s'agit pour le premier volet de connaître les besoins en eau des cultures et ce par l'application de la formule de Penman Monteith recommandée par la FAO pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>) , même dans des conditions de paramètres météorologique limités. Cette tâche est réalisée grâce à la modélisation de cette formule en utilisant l'approche des réseaux de neurones. Le deuxième volet s'intéresse à l'application des techniques culturales pour mieux valoriser les quantités en eau destinées à l'irrigation.

**Deuxième partie ; Caractéristiques des sites d'essai et son environnement.** Elle contient ; **Chapitre III** « Etude du milieu et de l'environnement de la zone d'étude où nous avons décrit cette zone qui se caractérise par des conditions spécifiques, elle mérité d'être décrite en détail en donnant un aperçu global sur ses spécificités naturelles. Il contient deux sous chapitres.

**A : Caractéristiques du sol et l'eau d'irrigation:** Dans ce sous chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude du sol, l'eau d'irrigation et les systèmes d'occupation du sol dans la région.

**B : Caractéristique du climat,** dans celui-ci nous nous sommes intéressé à l'étude du climat ; notamment les indices climatiques et l'évolution de la température pendant une longue période. Ainsi que l'étude du climat pendant la période d'essai.

**Troisième partie,** elle décrit le protocole expérimental, elle contient deux sous chapitres. Le premier s'intéresse aux **matériels et méthodes utilisés pour les essais expérimentaux** et les différents traitements appliqués sur la culture du blé. Le deuxième ; **Matériel et méthode de la modélisation.** Il présente en détail les étapes suivies pour l'implémentation des réseaux de neurones pour la modélisation de l'ET0 ainsi que les outils utilisés pour les traitements des données.

**Quatrième partie ; Résultats et discussions,** celle-ci contient trois chapitres.

**Chapitre V :** Il est réservé aux résultats de la modélisation, à travers lequel, des différentes possibilités de la modélisation de l'évapotranspiration de référence sont envisagées.

**Chapitre VI :** Il discute les résultats des essais expérimentaux menés sur terrain et met en évidence l'effet de différents traitements hydriques et de fertilisations sur la culture du blé.

**Chapitre VII.** Il concerne deux principaux facteurs qui contraignent la production de blé dans la région d'Adrar, le problème de mauvaises herbes et l'effet du climat, l'amélioration de l'efficacité de l'eau d'irrigation dépendra donc de la lutte contre les adventices et de l'adaptation aux conditions climatiques.

En fin une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus, les recommandations pour la mise en application de ces résultats et éventuellement les travaux à accomplir pour compléter les lacunes de ce travail.

## **Chapitre I : SECURITE ALIMENTAIRE ET IMPORTANCE**

### **DE L'EAU POUR LES VEGETAUX**

#### **A. SECURITE ALIMENTAIRE**

Le concept de la sécurité alimentaire fait référence à la disponibilité ainsi qu'à l'accès à la nourriture en qualité et en quantité suffisantes. La sécurité alimentaire comporte quatre dimensions :

- disponibilité (production intérieure, capacité d'importation, de stockage et aide alimentaire),
- accès (dépend du pouvoir d'achat et de l'infrastructure disponible)
- stabilité (des infrastructures mais aussi stabilité climatique et politique)
- salubrité et qualité (hygiène, principalement accès à l'eau). Elle dépasse de loin la notion d'autosuffisance alimentaire. Elle est toutefois à distinguer de la seule sécurité sanitaire des aliments, qui a trait à l'hygiène et à l'innocuité des aliments, ainsi qu'au maintien de leur salubrité.

Selon la FAO (2006), La sécurité alimentaire est assurée quand toutes les personnes, en tout temps, ont économiquement, socialement et physiquement accès à une alimentation suffisante, sûre et nutritive qui satisfait leurs besoins nutritionnels et leurs préférences alimentaires pour leur permettre de mener une vie active et saine.

Cependant, à travers le monde, on estime que huit cent cinquante deux millions de personnes souffrent de la faim, avec une ration alimentaire de moins de 2200 calories par jour. Deux milliards d'habitants sont mal nourris et subissent quotidiennement de graves carences nutritionnelles (Dufumier, 2007).

La population mondiale s'est accrue de 2,5 à 7 milliards entre 1950 et 2011 (Bongaarts et Sinding, 2011) et le nombre de personnes sous-alimentées a augmenté de 842 millions en 1990 à 963 millions en 2008 (Ait Kadi, 2009). En effet, avec l'accroissement démographique, les besoins alimentaires de la planète augmentent. Les moteurs de l'accroissement de la demande alimentaire restent principalement la démographie, mai aussi l'urbanisation, l'amélioration du niveau de vie et les changements des régimes alimentaires qui s'en suivent (Ait Kadi, 2009).

Il convient de dire que le grand défi pour les prochaines années est l'amélioration de la production d'aliments pour assurer la sécurité alimentaire pour une population mondiale en croissance continue (Zhao et al., 2005 ; Chuanyan et al., 2005 ; Clemmens et Molden, 2007). Cependant, le manque d'eau dans plusieurs régions du monde est devenu une contrainte majeure pour accroître la production alimentaire.

Actuellement la production mondiale est largement supérieure aux besoins des habitants, néanmoins, malgré cette abondance, plusieurs régions du monde souffrent d'insuffisance alimentaire.

On voit alors que les excédents côtoient les carences. Disposer de denrées alimentaires en quantité ne garantit pas, loin de là, la sécurité alimentaire pour tous. De ce fait, il devient indispensables que les consommateurs puissent accéder aux denrées dont ils ont besoin et ce par le développement de la production agricole dans certains pays du Sud (Guiheneuf, 1997).

Il ne saurait y avoir de réelle « sécurité alimentaire » pour les populations du « Tiers-monde » sans un accroissement sensible de la productivité de leurs agricultures (Dufumier, 2007). Mais cette question ne pourra être véritablement résolue que si les paysannes parviennent à dégager par elles mêmes des revenus suffisants pour équiper davantage leurs exploitations et accroître leur productivité.

## **1. L'eau et la sécurité alimentaire**

Pour nourrir il faut produire, et pour produire, il faut de l'eau, la sécurité alimentaire du pays est, de ce fait, indissociable de sa sécurité hydraulique (Ait Kadi, 2009). Ainsi on constate que pour une grande partie des personnes qui souffrent de la faim dans le monde habitent dans des régions qui manquent d'eau (FAO, 2002). De ce fait, l'eau et la sécurité alimentaire sont étroitement associées et la production végétale est fortement dépendante de la quantité d'eau évapotranspirée par les cultures (Amigues et al., 2006).

## **2. le blé et la sécurité alimentaire en Algérie**

L'importance de la croissance démographique, la forte demande alimentaire, les conséquences du réchauffement planétaire sont des éléments qui indiquent que l'avenir de la sécurité alimentaire en Algérie semble plus que menacée. L'agriculture dans le pays doit se

montrer flexible pour faire face aux défis de la rareté et de dégradation des ressources naturelles de base et à l'instabilité des productions agricoles (Chabane, 2010).

La crise alimentaire de 2008 a été un catalyseur qui a mis à nu la vulnérabilité alimentaire des pays du Maghreb. Elle a révélé les limites des politiques agricoles prenant appui sur le seul secteur dit moderne, mais il y a aussi des limites naturelles, économiques et sociales (Bessaoud, 2011).

Lorsque l'on regarde l'évolution de la disponibilité alimentaire par personne entre 1961 et 2003, celle-ci a augmenté dans les quatre pays. De même, la consommation annuelle moyenne de céréales a fortement augmenté depuis 1961 : ainsi, l'Algérie a connu une augmentation de 65%, l'Egypte de 49%, le Maroc de 30% et la Tunisie de 24%.

Il est évident que les céréales constituent la base de l'alimentation dans la plupart des pays méditerranéens du sud. Elles sont donc, jugées stratégiques dans la sécurité alimentaire des populations. Parmi les céréales, le blé a une place considérable dans la diète alimentaire des pays d'Afrique du Nord et représente souvent plus de 50% des apports énergétiques de la ration alimentaire (INRAA, 2006).

Il convient de noter que deux produits essentiels peuvent contribuer efficacement à l'assurance de la sécurité alimentaire en Algérie : le blé et les dattes, De ce fait, le développement de la céréaliculture et la phoeniciculture nécessitent une attention particulière.

## **2.1. La culture du blé**

Le blé est un des plus importantes cultures qui se comporte bien sous différentes conditions climatiques. La production mondiale est estimée à 582.2 millions de tonnes contre une demande croissante qui atteint 600 millions de tonnes (Alderfas et Refay, 2010).

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en développement, particulièrement dans les pays maghrébins. Elles constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien, et elles fournissent plus de 60% de l'apport calorifique et 75 à 80% de l'apport protéique de la ration alimentaire. C'est ainsi qu'au cours de la période 2001-2003, les disponibilités des blés ont représenté un apport équivalent à 1505,5 Kcal/personne/jour, 45,533 grammes de protéine/personne/j et 5,43 grammes de lipide/personne /J (Djermoun, 2009).

En Algérie, les dépenses publiques liées à la politique alimentaire permettant des prix accessibles à une large couche de la population, ont atteint en 2007 près de 55 milliards de DA (0,5% du PIB) pour les subventions au prix de la farine de blé et près de 90 milliards de DA pour les subventions au prix de la semoule (0,8% du PIB) (Djermoun, 2009).

### **2.1.1. La production du blé en Algérie**

L'Algérie est un pays qui appartient à la zone semi-aride et aride. Elle est située dans une zone de transition climatique qui subit à la fois l'influence des zones humides et tempérées (en hiver) et l'influence du désert. Les zones arides et semi-arides, qui sont sujettes à des sécheresses fréquentes, représentent 85 % de la superficie totale des terres et abritent 60% de la population. Elles sont particulièrement vulnérables aux variations liées aux changements climatiques qui affectent l'ensemble du Maghreb.

La population active agricole s'élève, quant à elle, à 4,4 millions dont 18% de femmes. Cette population compte 2,1 millions de permanents (47,8 %), dont 358 000 femmes et 2,3 millions de saisonniers (52,2 %), dont 440 000 femmes (CIHAM et AFD, 2009).

En Algérie, l'importance socio-économique des céréales est considérable puisqu'elles occupent 60% des terres effectivement cultivées, et représentent l'activité d'une masse importante de la population. Néanmoins, la production demeure faible, et oscille autour de 18 millions de quintaux pour les deux dernières décennies (Boulaâssel, 1998). Le blé dur est la première céréale cultivée en Algérie, mais il est confronté aux stress abiotiques tels que la sécheresse et la salinité (Fercha, 2011).

La production des céréales, (jachère comprise) occupe environ 80% de la superficie agricole utile (SAU) du pays, La superficie emblavée annuellement en céréales se situe entre 3 et 3 ,5 million d'ha. Les superficies annuellement récoltées représentent 63% des emblavures. Elle apparaît donc comme une spéculation dominante, présente dans tous les étages bioclimatiques, y compris dans les zones sahariennes (Djermoun, 2009).

A cause du bas niveau de la productivité, la production de cette culture pluviale ne dépasse pas en moyenne à l'échelle nationale les 10 q/ha (Hamdache et al., 2002). En plus du niveau de technicité assez bas, la sécheresse qui sévit régulièrement marque davantage les faibles rendements. Cette dernière est installée dès qu'il y a un déficit en eau entre la pluviométrie et les besoins en eau des cultures (Riou, 2000).

Ainsi, la couverture des besoins de consommation en céréales (blé et orge) est assurée à hauteur de 37,7 % par la production nationale au cours de la période 1995-2004. L'offre domestique demeure encore faible, le taux d'autosuffisance se situe aux environs de 28,4 % pour les blés (moyenne de 1995 /2004). La satisfaction de la demande intérieure est assurée alors essentiellement par les importations, à la hauteur de 72% environ pour les blés et à 30,4 % en moyenne pour l'orge.

De son côté Reid (2003), signale t-il que la rentabilité de la culture du blé, dépend de plusieurs facteurs, notamment le choix de la bonne variété, l'ensemencement au bon moment et dans de bonnes conditions pédologiques, la lutte contre les mauvaises herbes et la minimisation des pertes de récolte. La gestion des engrais est un élément important qui peut aider à assurer que les investissements portent leurs fruits.

Les réflexions actuelles sur les choix économiques nationaux démontrent en effet, qu'une croissance durable ne peut être assurée sur la base de la seule exploitation des ressources naturelles ou énergétiques nationales. La faible productivité globale du secteur agricole est due en partie aux handicaps naturels. En outre, l'agriculture qui occupe une place dominante dans les sociétés et les économies rurales reste caractérisée par l'existence de structures dualistes qui résultent pour partie de politiques agricoles dont les limites et les signes d'essoufflement se sont clairement manifestés au cours de la dernière crise alimentaire.

En Algérie, les régions les plus productives sont situées sur la partie nord des hauts plateaux, celles-ci reçoivent une pluviométrie relativement suffisante (Constantine, Mila, Skikda, Sétif, Guelma, Bouira). Le rendement dans ces régions est plus élevé, et des pics de 50 q/ha peuvent être atteints, mais reste en deçà des rendements obtenus dans certains pays tels que la France et l'Egypte avec 60 q/ha chacun (Bennai et Benabbas, 2007).

Il est utile de signaler que grâce aux efforts déployés par l'état algérien, les rendements ont connu une amélioration importante durant les dernières années. En effet, d'après les statistiques agricoles, les rendements ont atteint les 16 q/ha (MADR, 2010).

### **2.1.2. La production du blé dans la région d'Adrar**

Les potentialités en ressources hydriques souterraines et en terres recelées dans les régions sahariennes ont incité les pouvoirs publics à encourager l'investissement dans ces

régions, notamment en céréaliculture .Grâce à l'utilisation des rampes pivotantes, les terres agricoles ont connu une hausse remarquable.

Il y a lieu de noter que la technique d'irrigation par centre pivot a été mise au point aux Etats Unis dans les années 50. Elle a permis de nos jours à des pays comme l'Arabie Saoudite d'atteindre leur autosuffisance en matière de céréales, en dépit des conditions climatiques très défavorables (Badraui et Farhat, 1998).

La région d'Adrar renferme des potentialités naturelles lesquelles peuvent consolider une base très forte pour constituer un essor important pour le développement agricole. Cependant, les efforts colossaux déployés par l'état Algérien dans ce contexte en vue de promouvoir l'agriculture, et d'atténuer l'importation massive des produits alimentaires à l'échelle locale et nationale, n'ont pas aboutit aux objectifs attendus. Les résultats réalisés sont toujours instables avec des fluctuations exorbitantes. Les rendements obtenus sont globalement inquiétants : faibles en moyenne avec des pics très élevés (Tableau 1).

Tableau1 : Evolution des rendements de céréales à paille sous pivots dans la région d'Adrar.

| Campagnes agricoles | Rendements (q/ha) |      | Campagnes agricoles | Rendements (q/ha) |      |
|---------------------|-------------------|------|---------------------|-------------------|------|
|                     | moyens            | pics |                     | moyens            | pics |
| 1995/1996           | 28                | 59   | 2003/2004           | 31                | 62   |
| 1996/1997           | 32                | 61   | 2004/2005           | 32                | 59   |
| 1997/1998           | 21                | 52   | 2005/2006           | 24                | 55   |
| 1998/1999           | 31                | 50   | 2006/2007           | 31                | 64   |
| 1999/2000           | 31                | 62   | 2007/2008           | 25                | 52   |
| 2000/2001           | 30                | 60   | 2008/2009           | 30                | 58   |
| 2001/2002           | 36                | 57   | 2009/2010           | 22                | 48   |
| 2002/2003           | 33                | 60   | 2010/2011           | 31                | 55   |

### **2.1.3. Contraintes face au développement des cultures du blé**

L'Algérie, pays de la rive sud de la Méditerranée, connaît, au même titre que ses voisins, des difficultés croissantes pour équilibrer sa balance agro-alimentaire. Celle-ci est largement déficitaire et l'écart entre les importations et les exportations agro-alimentaires ne cessent d'augmenter au fil des années (Bourenane, 1991).

En effet, malgré les efforts déployés en matière de développement de la céréaliculture (Djermoun, 2009), entre autres l'introduction de nouveaux facteurs de production et la tentative de mise en place d'une agriculture intensive, la production céréalière reste caractérisée par des variations notables liées aux paramètres climatiques qui sont difficiles à maîtriser. Cela se traduit d'une année à l'autre par des variations importantes de la SAU, de la production et du rendement. Ainsi, le manque de précipitations, mais aussi la mauvaise répartition des pluies pendant l'année expliquent en grande partie la forte variation de la production céréalière.

## **B. IMPORTANCE DE L'EAU POUR LES VEGETAUX**

### **1. L'eau en Algérie**

Selon Kettab (2001), les données et tendances qui en émergent à présent indiquent que nous allons vers une "crise de l'eau" dans plusieurs régions, notamment au Moyen Orient et en Afrique du Nord, où la disponibilité de l'eau par personne est de 1247 m<sup>3</sup> /an, l'une des plus basses du monde, comparée aux 18742 m<sup>3</sup> en Amérique du Nord et aux 23103 m<sup>3</sup> en Amérique Latine.

Au niveau maghrébin, le problème de l'eau se pose de plus en plus avec acuité, notamment en Algérie qui se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale, à savoir 1000 m<sup>3</sup> d'eau renouvelable par an et par habitant (Oukaci, 2004). Ces régions sont caractérisées par une pénurie d'eau amplifiée par les pratiques d'irrigation inefficaces (Er-Raki et al., 2011).

Au sud algérien où les précipitations sont négligeables, pour ne pas dire inexistantes, les ressources en eau pour alimenter les différents secteurs proviennent exclusivement de nappes souterraines, représentées par le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS),

partagé par l'Algérie, la Libye et la Tunisie. Il renferme des réserves d'eau considérables qui sont cependant très peu renouvelables et ne sont pas exploitables en totalité. Au cours des trente dernières années, l'exploitation des eaux du SASS par forages est passée de 0,6 à 2,5 milliards de mètres cubes par an. En conséquence de cette exploitation non concertée des prélèvements, cette ressource se trouve aujourd'hui confrontée à de nombreux risques tels que : la salinisation des eaux, la réduction de l'artésianisme, le tarissement des exutoires naturels, la baisse du niveau piézométrie et les interférences négatives entre pays, ce qui menace lourdement, à terme, la durabilité du développement socio économique engagé dans l'ensemble de la zone (OSS, 2008).

## **2. Gestion des ressources en eau**

Selon Naeem et Rai (2005), la pénurie de l'eau exige le développement de nouvelles techniques et méthodes d'irrigation qui permettent l'utilisation de cette ressource précieuse, d'une manière efficace et durable. En outre, il est nécessaire d'assurer une bonne gestion de l'eau d'irrigation pour améliorer son efficacité d'utilisation (Bharat, 2006). Ceci implique une recherche innovatrice et un transfert approprié de la technologie (Pereira et al., 2002). Pour cela, il est intéressant de connaître la quantité de l'eau utilisable par les végétaux.

## **3. Disponibilité de l'eau du sol pour les végétaux**

Au niveau du sol, il existe une limite supérieure de stockage appelée capacité de rétention (Ducrocq, 1990). Une fois cette capacité remplie, toute eau supplémentaire s'écoulera en profondeur et sera donc très peu utilisée par les racines. Lorsque l'humidité atteint le point de flétrissement la plupart des végétaux cultivés ne peuvent plus extraire l'eau du sol. Le volume d'eau compris entre ces deux limites s'appelle la ressource utile (RU), il représente la quantité d'eau disponible.

Si l'eau disponible dans le sol diminue (Duchaufour, 1997), la tension de succion du sol augmente, et les racines ont de plus en plus de difficultés d'extraire l'eau utile, l'évapotranspiration diminue ; elle devient inférieure à l'ET<sub>0</sub> : c'est l'évapotranspiration réelle. Au dessous d'une tension de succion de 1 atmosphère (1000 hPa), l'absorption de l'eau par les racines est fortement diminuée ; elle devient nulle lorsque le point de flétrissement est atteint (en général 16 atmosphères, soit  $pF = 4,2$ ).

#### 4. Circulation de l'eau dans le continuum sol-plante- atmosphère

Trois facteurs jouent un rôle important dans les modalités de la nutrition en eau : la saison, les conditions de géomorphologie locales, et enfin l'aptitude de la végétation à utiliser l'eau du sol (Duchaufour, 1997).

D'après Tolk (2003), la destination ultime pour la majorité de l'eau du sol qui circule dans une plante est la surface des feuilles, où elle est perdue sous forme de vapeur à travers les pores des stomates. Le moteur qui provoque leur passage des racines aux feuilles est le gradient de potentiel. Les quantités d'eau transpirées quotidiennement sont en général voisines des quantités absorbées par les racines (Robélin, 1983 ; Katerji, 1988), le flux d'eau traversant le végétal peut être considéré comme conservatif (absorption = transpiration) et traité par un formalisme du type de loi d'Ohm (Katerji, 1988 ; Tolk, 2003).

$$\text{Flux} = \frac{\Delta\Psi}{R} \quad (1)$$

Où  $\Delta\Psi$  est la chute de potentiel entre les deux points considérés et R la résistance correspondante.

La résistance des racines varie avec la perméabilité de la racine à cause de l'âge ou la distance de l'apex de la racine, et les changements dus à la déshydratation, la température et le débit de l'eau. La résistance des feuilles est affectée par l'emplacement, la taille, la forme, et l'abondance des stomates, les conditions environnementales qui affectent l'activité stomatique et la taille de la couche limite entourant la feuille (Tolk, 2003).

La quantité d'eau réellement disponible dans la plante est proportionnelle à la surface foliaire. Elle diminue par la transpiration et augmente grâce à l'absorption par les racines, créée par les différences de potentiel entre le sol et la plante. Un couvert végétal contient beaucoup moins d'eau que ce qui se perd ou gagnée quotidiennement par la transpiration et l'absorption. De ce fait, le réservoir d'eau est remplacé plusieurs fois par jour (Eckersten, 1997).

Pendant la journée, la plante se recharge de l'énergie (rayonnement net,  $R_n$ ). Une petite fraction de cette énergie est utilisée dans la photosynthèse, la plus grande partie d'entre elle doit être dissipées. Si non les feuilles peuvent atteindre une température létale (de 40 ° à 50 ° C ou plus). Cette surcharge en énergie est dissipée via trois canaux physiques : l'albédo, la chaleur sensible et l'énergie latente. Cette dernière est dissipée par la transpiration des plantes (Blum, 2011).

En effet, la plante peut être schématiquement assimilée à une pompe qui puise de l'eau dans le sol (phénomène d'absorption) et la rejette dans l'atmosphère (Ducrocq, 1990) sous forme de vapeur d'eau (phénomène de transpiration).

La transpiration  $T$  imposée par les conditions extérieurs crée le déplacement de l'eau dans le système ; la transpiration n'est en fait que le moteur et le rejet ultime d'un déplacement général de l'eau depuis le sol jusqu'à l'atmosphère, via la plante.

$$T = \frac{\psi_f - \psi_a}{r_{st} - r_a} \quad (2)$$

Avec  $\Psi_f$  = potentiel hydrique moyen des feuilles,  $\Psi_a$  = potentiel hydrique dans l'air,  $r_{st}$  = résistance stomatique et  $r_a$  = résistance de la couche limite dans l'air.

Un équilibre dynamique s'établit entre  $T$  et les débits dans les parties amont du système, les gradients de potentiel moteurs, créés par la perte d'eau initiale, évoluent jusqu'à ce que les débits qu'ils autorisent sur les différents éléments du parcours s'égalisent au flux transpiratoire en particulier l'absorption ( $A$ ).

$$A = \frac{\psi_s - \psi_r}{r_s - r_r} \quad (3)$$

Avec

$\Psi_s$  = potentiel hydrique du sol,  $\Psi_r$  = potentiel hydrique des racines,  $r_s$  = résistance dans le sol, et  $r_r$  = résistance à l'entrée de l'eau dans les racines

Si on applique ( $A$ ) aux différents compartiments du continuum on obtient la relation suivante :

$$\text{Absorption} = \frac{\Psi_s - \Psi_r}{r_s + r_r} = \frac{\Psi_r - \Psi_f}{r_p} = \frac{\Psi_f - \Psi_a}{r_{st} + r_a} = \text{transpiration} \quad (4)$$

Avec  $r_p$  = résistance du trajet « racine feuilles »

Cet équilibre  $A = T$  atteint en régime stable suffisamment prolongé, on parle donc d'un flux conservatif.

Cette description doit être complétée de deux éléments essentiels :

- En situation naturelle le régime stable équilibré n'est pratiquement jamais réalisé sauf en fin de nuit et durant une pluie, et on parle alors d'un flux non conservatif.
- L'équilibre des débits se fait non pas sur le débit demandé mais sur le débit le plus faible (déclenchement de fermeture des stomates).

Il faut noter que la quantité d'eau perdue par la cuticule est 10 à 20 fois plus faible que celle perdue par les stomates. Néanmoins, en conditions de stress hydrique, pendant que les stomates sont fermés, la cuticule représente la principale voie de perte d'eau (Petcu, 2005).

Selon Blum (2011), de nombreuses expériences montrent que les plantes sont relativement stables en termes de flux d'eau et l'état hydrique à l'aube et pendant environ 1 à 2 heures après midi. A l'aube la plante est sous un déficit d'eau minimale alors qu'il est au pic à midi. Dans une plante bien hydratée, la plus grande résistance hydraulique est dans la feuille et la petite résistance est dans la tige. Ces limites peuvent varier dans une certaine mesure en terme absolu ou relatif selon les différentes espèces et sous différentes conditions.

## **5. L'eau et la culture du blé**

Selon Benchohra et Khelloufi (2000), les performances des céréales (rendement par unité de surface) sont sous le contrôle des caractéristiques endogènes propres à chaque cultivar (structure génétique) et ne peuvent s'exprimer totalement que sous des conditions environnementales optimales (éléments chimiques, eau, lumière, température etc.). Parmi ces éléments, le facteur hydrique est le plus contraignant car il est limité (faiblesse des précipitations) et aléatoire dans sa distribution. En effet, l'élaboration du rendement chez le blé dépend de la croissance générale qui est directement fonction de l'alimentation hydrique. Le rendement en grain et le rapport paille-grain sont en rapport avec la durée et l'intensité du déficit hydrique mais la relation varie en fonction de la période de développement pendant laquelle se produisent les déficits (Doorembos et Kassam, 1980).

En Algérie, le déficit hydrique est devenu inquiétant confirmant les diverses expertises partant d'hypothèse et usant de méthodologies différentes qui ont toutes conclu que notre pays se trouvera entre 2010 et 2025 confronté à cette pénurie quasi-endémique (Hadeff et Hadeff, 2001). Dans ce contexte, Jouve (2007), a souligné que pour mieux valoriser les eaux de pluie il faut maximiser l'efficacité de l'eau consommée par les cultures, ainsi, dans les zones arides du Maghreb, il apparaît essentiel de supprimer les semis tardifs qui accentuent le déficit hydrique en fin de cycle. Ce meilleur calage du cycle végétatif permet un surcroît de production de 30 à 60% suivant l'intensité de l'aridité.

En outre, pour contribuer à l'amélioration de l'efficacité de l'eau, les travaux de Mouhouche et Bourahla (2007), ont montré l'intérêt des irrigations d'appoint apportées à des phases phénologiques bien ciblées sur les principales composantes du rendement d'une culture de blé dur, ainsi qu'à l'amélioration de la productivité de l'eau d'appoint. D'autres chercheurs (Ali Othman et Bahaa El- Din Hassan, 2011) proposent d'utiliser la semence de haute performance et ce par les échanges du matériel végétal à haut rendement entre les pays arabes. De leur côté, Chennafi et al. (2010), ont préconisé la jachère et le choix des outils du travail du sol.

## **6. Besoins en eau des cultures**

Une plante utilise la majeure partie de l'eau qu'elle absorbe pour dissiper l'énergie solaire. Ainsi les besoins en eau d'une culture sont directement liés au climat. Si, par manque d'eau, la température de la plante s'élève et devient supérieure à celle de l'air, l'énergie est alors dissipée par convection à la manière d'une plaque chauffante. La réponse de la plante au stress hydrique dépend de la durée du stress, de la phase de développement et de l'état dans lequel se trouvait la plante quand le stress a eu lieu (Aidaoui, 2000).

Selon Vermeiren et Jobling (1983), le besoin en eau des cultures est appelé évapotranspiration maximale (ETM) et exprimé en millimètres par jour. D'après Daniel (1984), c'est la quantité d'eau nécessaire à une culture donnée durant tout son cycle végétatif pour produire un rendement maximal. Mais la satisfaction de la demande en évapotranspiration dépend du niveau de la réserve en eau dans le réservoir sol constitué par les horizons successifs colonisés par les racines (Jean-Marie et al., 1994).

### **6.1. Détermination des besoins en eau des cultures**

Pour la conception du projet d'irrigation, la connaissance de l'évapotranspiration des cultures pour une région est nécessaire. La connaissance des besoins en eau de chaque culture, permet de planifier et dimensionner les réservoirs de stockage de l'eau et sa distribution (Deore, 2009).

Dans les régions méditerranéennes, l'irrigation est le seul moyen pour produire des rendements à la fois élevé et stable (Katerji et Rana 2006) et l'évapotranspiration de référence est un paramètre important pour le calcul de la demande d'irrigation pour les diverses cultures (Chowdhary et Shrivastava 2010 ; Dinpashoh 2006). La programmation de l'irrigation est basée sur un coefficient cultural bien établie et sur les procédures de l'évapotranspiration de référence pour estimer l'évapotranspiration quotidienne des cultures (Hunsaker et al., 2007). C'est pourquoi, un mauvais calcul de l'évapotranspiration d'une culture semblait être associée à une mauvaise estimation du ET0 (Shujiang et al., 2009).

Il existe plusieurs méthodes de mesure ou d'évaluation des besoins en eau des cultures. Certaines d'entre elles sont basées sur l'utilisation des paramètres climatiques, d'autres utilisent des moyens de mesure au champ. La précision de cette détermination dépend beaucoup de la nature des données climatiques disponibles et de la précision de la méthode choisie.

### **6.1.1. L'évapotranspiration de référence (ET0)**

L'évapotranspiration potentielle est un paramètre important du cycle terrestre de l'eau. Elle désigne l'évapotranspiration maximale possible, indépendamment de la quantité d'eau que les plantes ont effectivement à leur disposition. Elle est considérée comme l'indicateur du développement optimal de la végétation et joue un rôle capital pour l'évaluation des aptitudes climatiques d'une région pour l'agriculture. L'appréciation de l'évapotranspiration potentielle est nécessaire notamment pour estimer le besoin en irrigation de l'agriculture. Or, il n'est pas si simple de définir précisément l'évapotranspiration potentielle, car elle dépend, non seulement des conditions de l'atmosphère et du sol, mais aussi des caractéristiques de la végétation. C'est la raison pour laquelle l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a introduit dans son rapport 56 sur l'irrigation et le drainage (Allen et al., 1998), le concept d'évapotranspiration de référence (ET0), c'est-à-dire

l'évapotranspiration d'un peuplement végétal idéal, disposant d'eau à volonté (Calanca et al., 2011).

La combinaison de deux processus distincts par lesquels l'eau est perdue, d'une part de la surface du sol par évaporation, et d'autre part du végétal par la transpiration est appelée l'évapotranspiration (ET). Le taux d'évapotranspiration d'une surface de référence, sans contrainte hydrique, est appelé l'évapotranspiration des cultures de référence ou de l'évapotranspiration de référence, elle est notée  $ET_0$ . La surface de référence est occupée par une culture d'herbe hypothétique de référence avec des caractéristiques spécifiques. L'utilisation d'autres dénominations telles que le potentiel ET est fortement déconseillée en raison des ambiguïtés dans leurs définitions (Allen et al., 2006). Elle est largement variable dans le temps et dans l'espace car elle est gouvernée par l'énergie radiative et aérodynamique disponibles (Richard et Allen, 2010).

Afin d'estimer l' $ET_0$ , de nombreuses recherches ont été menées à travers le monde, elles ont élaboré un nombre important de formules, mais la comparaison entre les résultats de ces formules révèle une grande disparité qui peut atteindre jusqu'à 50% de l'évaluation durant la même décennie (Smadhi, 2001 ; Lu et al., 2005).

Les résultats obtenus par les chercheurs ; (Saidati et Samuel, 2006 ; Hazrat et Lee, 2006) confirment que la méthode de Penman donne des valeurs de l'évapotranspiration potentielle les plus proches de la réalité. C'est la raison pour laquelle, la FAO préconise la formule de Penman Monteith (Mostefa, 1994 ; Allen et al., 1998).

#### **6.1.1.1. Etablissement de la formule de PENMAN**

Cette formule a été mise au point en 1948 par le physicien anglais Penman. Elle découle directement du bilan d'énergie (Theodore, 2011). Son intérêt est donc primordial quant à la compréhension du phénomène physique.

En 1973 Monteith avait apporté des adaptations à la formule de Penman pour prédire directement l'ET culture en employant des coefficients de réflexion pour tenir compte du rayonnement solaire incident, de l'effet de la résistance des végétaux à la transpiration et en incorporant des fonctions appropriés pour le vent qui tient compte des modifications de la rugosité aérodynamique accompagnant la croissance de la culture.

En 1975, Dorenboos avait estimé que la formule de Penman Monteith est d'une complexité telle qu'elle dépasse la portée de beaucoup d'utilisateurs. Il avait suggéré l'emploi d'une formule légèrement modifiée de la méthode de Penman pour prédire l'effet du climat sur les besoins en eau des cultures.

La formule proposée et les procédures à suivre pour l'appliquer permettent de prévoir l'effet du climat sur l'évapotranspiration de la culture de référence. La seule différence par rapport à la méthode originale de Penman réside dans un paramètre révisé de la fonction du vent et une correction supplémentaire pour tenir compte de conditions météorologiques diurnes et nocturnes non représentatives des climats pour lesquels la fonction du vent a été déterminé.

Cette méthode est globalement acceptée car elle couvre tous les paramètres et fournit des résultats très satisfaisants lorsque les données mesurées de la température, l'humidité, le vent et l'ensoleillement sont disponibles (Hajare et al., 2008). La marge d'erreur obtenue en cas d'application de cette méthode est réduite; 10 % en été et 20% hiver. Cependant, si les données météorologiques requises ne sont pas disponibles, l'utilisation du bac classe A pour l'estimation de l'ET<sub>0</sub> est plus convenable (Deore, 2009).

En 1994, pour créer ce nouveau modèle de Penman –Monteith-FAO, les experts de la FAO ont utilisé une culture de référence. Elle est définie comme étant une culture hypothétique de hauteur fixe (12 cm), d'une résistance du couvert végétal de 69 et d'un albédo de 0,23. Cette culture pourrait ressembler à un couvert du gazon extensif de hauteur uniforme, en pleine croissance, couvrant complètement le sol et non limité en eau (Balaghi, 1996).

L'équation FAO Penman-Monteith ayant des paramètres de rugosité et de résistance de surface normalisée, est recommandée comme équation qui représente la nouvelle définition de l'ET<sub>0</sub>. Le changement de la définition et la sélection d'une méthode de calcul appropriée à la nouvelle définition prétend contribuer à éliminer les problèmes liés à la mesure de l'ET<sub>0</sub> sur une culture de référence vivante et permet l'obtention des valeurs de l'ET<sub>0</sub> consistantes dans toutes les régions du globe (Pameseb, 2007).

Selon Belabbes (2004), la formule de Penman-Monteith se distingue parmi ces différentes formules par son origine théorique dérivée du bilan des flux énergétiques à la surface du couvert végétal. Dans un souci de normalisation, la FAO à travers son groupe

d'experts, opérant dans différents contextes climatiques, a adapté la formule de Penman-Monteith aux conditions d'un couvert de gazon et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition de l'évapotranspiration de référence ou ET<sub>0</sub> (Allen et al., 1998).

#### **6.1.1.2. Critique de la formule**

Cette formule a été critiquée par le fait qu'elle prédit la perte d'eau par évaporation E<sub>0</sub> à partir d'une surface d'eau libre. Le coefficient cultural préconisé = 0,8 pour établir la relation entre E<sub>0</sub> et l'évapotranspiration (ET gazon) donne lieu à de sérieuses erreurs dans les régions très chaudes et semi arides. Il avait aussi estimé que la formule de Penman Monteith (comme était cité plus haut) est d'une complexité telle qu'elle dépasse la portée de beaucoup d'utilisateurs (Doorenbos et Pruitt, 1976).

#### **6.1.2. Notion du coefficient cultural**

Le rapport entre l'évapotranspiration maximale ETM d'une culture à l'évapotranspiration de référence (ETM/ET<sub>0</sub>) s'appelle coefficient cultural (K<sub>c</sub>). Il apprécie l'effet des résistances qui s'opposent à la circulation de l'eau dans la plante et traduit le rythme de transpiration de la culture à un stade donné. La valeur du coefficient cultural dépend pour une culture donnée du stade végétatif et aussi de la référence de calcul d'ET<sub>0</sub> utilisée (Robélin, 1983 ; Hajare et al., 2008).

Il convient de rappeler que l'évapotranspiration maximale (ETM) est la valeur de l'ETR dans le cas d'une bonne alimentation en eau de la plante. Lorsque l'eau n'est plus un facteur limitant au niveau de l'absorption racinaire, la régulation stomatique est minimale et l'évapotranspiration est maximale. Elle dépend de la culture considérée, du stade phénologiques et des conditions météorologiques observées.

#### **6.2. Besoins en eau du blé**

Pour une région donnée, les besoins en eau d'une culture varient selon les saisons et les stades de développement de la culture. Ils représentent L'évapotranspiration maximale sans déficit en eau- mesurée à l'aide d'un lysimètre ou (évapotranspiromètre). Ainsi, pour la culture du blé, plusieurs résultats sont publiés par les chercheurs pour devers aires géographiques. En effet, Naheed et Mahmood (2009) indiquent qu'au Pakistan, le coefficient cultural (k<sub>c</sub>) pour le blé atteint 1 au cours du cycle végétatif, qui porte ses valeurs minimales pendant les stades initiaux de la culture et à maturation. Pour d'autres chercheurs (Changming

et al., 2002), le  $k_c$  du blé atteint 1,38 au stade floraison, il descend à 1,17 et 1,1 respectivement au stade laiteux et à maturation.

Au niveau de la région d'Adrar la consommation journalière du blé peut atteindre 12,5 mm/j au stade laiteux-pâteux (Laaboudi et al., 2004) et le coefficient cultural prend sa valeur maximale ( $K_c = 1,44$ ) au stade floraison.

## **Chapitre II : OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU**

### **A- Modélisation de l'évapotranspiration de référence**

#### **1. Etat de l'art sur la modélisation**

Dés qu'un phénomène, qu'il soit physique, biologique ou autre, est trop complexe ou encore trop bruité pour accéder à une description analytique débouchant sur une modélisation déterministe, un ensemble d'approches ont été élaborées afin d'en décrire au mieux le comportement à partir d'une série d'observations. Il s'agit alors d'estimer les paramètres du modèle à partir des observations (Besse, 2005). En effet, les modèles constituent un outil efficace pour améliorer notre compréhension des processus environnementaux. Ils permettent aussi d'obtenir rapidement et à moindre coût des informations sur la réalité (Nemeht, 2001). Un modèle est alors un « système de symboles » indifféremment et parfois simultanément dont l'extrême souplesse potentielle permet de rendre compte de la plupart des perceptions dont on dispose, lorsqu'on souhaite décrire un phénomène, afin de l'interpréter intelligiblement.

La modélisation ouvre l'espace immense à l'investigation de type scientifique sans contraintes de représentation par langage trop fermé (Lahsen, 2005). Actuellement le monde de la modélisation est très vaste et poursuit, sans cesse son élargissement. Il est devenu un outil puissant et abordable grâce à l'utilisation des outils informatiques de plus en plus performants. Les approches et méthodes utilisées dans ce domaine sont aussi très variées.

#### **2. Approche de régression linéaire multiple**

La régression multiple est un des procédés de modélisation prédictive la plus utilisée à l'heure actuelle (Delacoste et al., 1995). C'est une technique qui permet de décrire la liaison entre la variable dépendante ou expliquée et un ensemble de variables explicatives. Il s'agit d'une analyse statistique dans un espace à plusieurs dimensions et constitue une simple extension de régressions polynomiales et de l'analyse des tendances de surface (Holder, 1985 cité par Riad, 2003).

##### **2.1. Forces et limites de la méthode de régression linéaire multiple**

Selon Deswal et Pal (2008), les résultats des modèles obtenus indiquent que la régression linéaire multiple (RLM) a été en mesure de prédire à un niveau souhaitable de précision. Cependant, un des principaux problèmes lors de l'élaboration des modèles RLM est la multi colinéarité (Paulo et al., 2005). En outre, d'après Riad (2003), les résultats obtenus par la méthode de RLM sont souvent insatisfaisants (prédiction de valeurs négatives, dépendance des résidus etc.).

### **3. Approche des réseaux de neurones**

La technique des réseaux de neurones formels est considérée comme une extension puissante de techniques bien connues des ingénieurs, telle que la régression (Dreyfus, 1998).

La modélisation par les réseaux de neurones artificiels (RNA) est une technique statistique non-linéaire, elle peut être utilisée pour résoudre des problèmes qui ne se prêtent pas à des méthodes conventionnelles, statistiques et mathématiques (Eslamian et al., 2008). Par ailleurs, la mise à jour de l'application de la technologie de réseaux de neurones permet la modélisation par l'outil boîte noire (Aytek et al., 2009).

Les RNA (réseaux de neurones artificiels) sont analogues aux neurones biologiques, et sont des modèles mathématiques très simplifiés de leurs homologues biologiques. Ils possèdent la capacité à apprendre et à généraliser à partir d'exemples pour produire des solutions concrètes à des problèmes, même lorsque les données d'entrée contiennent des erreurs ou sont incomplètes, et d'adapter les solutions au fil du temps pour compenser l'évolution des circonstances et aussi à traiter rapidement l'information (Jain et al., 2008).

#### **3.1. Notions générales sur les réseaux de neurones**

Un réseau neuronal artificiel a des caractéristiques privilégiées représentées par sa capacité à apprendre des informations, à généraliser (à innover) et à identifier des fonctions non linéaires multidimensionnelles (Fadlallah, 2005). Il se compose d'éléments de traitement interconnectés (neurones) travaillant conjointement pour résoudre un problème spécifique (Chari et al., 2005). Dans les réseaux de neurones artificiels de nombreux processeurs appelés cellules ou unités, capables de réaliser des calculs élémentaires, sont structurés en couches successives capables d'échanger des informations au moyen de connexions qui les relient (Lallahem, 2002).

### 3.2. Aperçu historique

La première étude systématique du neurone artificiel est due au neuropsychiatre McCulloch et au logicien Pitts qui, en s'inspirant de leurs travaux sur les neurones biologiques, proposèrent en 1943 le modèle neurone artificiel.

En 1949, Hebb est le premier à avoir clairement envisagé la possibilité de comprendre les comportements physiologiques à partir d'une théorie au niveau cellulaire (Beghdadi et Senouci, 2005).

En 1958, Rosenblatt avait conçu le perceptron qui est un des premiers réseaux de neurones, linéaire et monocouche. Il est inspiré du système visuel. La première couche (d'entrée) représente la rétine. Les neurones de la couche suivante sont les cellules d'association et ceux de la couche finale sont les cellules de décision. Les sorties des neurones ne peuvent prendre que deux états (-1 et 1 ou 0 et 1) (Cour et al., 2002). C'est la première application concrète des réseaux de neurones. Rosenblatt (1958) et ses collègues ont construit ce réseau et ont démontré ses habilités à reconnaître des formes (Parizeau, 2004).

En 1960, Pratiquement au même moment, Windrow et Off proposaient un Nouvel algorithme d'apprentissage pour entraîner un réseau adaptatif de neurones linéaires, avec des capacités similaires au perceptron.

En 1969 Minsky et Papert avaient publié un livre dans lequel ils avaient démontré les limitations des réseaux développés par Rosenblatt et par Windrow et Off. Ainsi, ces théories se trouvent fortement contrariées. L'identification de ces limitations en partie dues à la capacité de calcul faible des machines de l'époque, avait entraîné le ralentissement de la recherche dans le domaine.

En 1972, malgré cela, Kohonen et Anderson publiaient indépendamment de nouvelles architectures semblables. En 1976, Grossberg proposait également d'autres réseaux auto-organisés.

Dans les années 1980, l'apparition de l'algorithme rétro-propagation relançait fortement l'activité sur les réseaux de neurones. En effet, En 1982, Hopfield avait développé un modèle qui utilise des réseaux totalement connectés basés sur la règle de Hebb pour définir les notions d'attracteur et de mémoire associative. En 1984, c'est la découverte des cartes de

Kohonen avec un algorithme non supervisé basé sur l'auto-organisation et suivi une année plus tard par la machine de Boltzman.

En 1990, les cartes auto-organisatrices publiées par Kohonen avaient constitué une suite de celles de 1972. Une révolution survient alors dans le domaine des réseaux de neurones artificiels : une nouvelle génération de réseaux de neurones, capables de traiter avec succès des phénomènes non-linéaires. Dès lors, on peut dire que les réseaux de neurones sont devenus un domaine de recherche attractif, qui réunit autour d'une thématique commune des mathématiciens, des psychologues, des physiciens, des biologistes, des ingénieurs et des informaticiens.

Aujourd'hui, les réseaux neuronaux sont utilisés dans de nombreux domaines, entre autres, vie artificielle et intelligence artificielle à cause de leur propriété en particulier, leur capacité d'apprentissage, et qu'ils soient des systèmes dynamiques.

### **3.3. Le neurone formel**

Un neurone (ou synapse) est une unité de calcul élémentaire ou l'élément de base d'un réseau de neurones, il effectue deux opérations sur les données d'entrée : une combinaison linéaire suivie d'une transformation non linéaire. Il contient deux éléments principaux : un ensemble de poids associés aux connexions du neurone, et une fonction d'activation. Les valeurs d'entrée sont multipliées par leurs poids correspondants et additionnées pour obtenir la somme ( $S$ ). L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est à dire de la composition des fonctions non linéaires réalisées par chacun des neurones (Dreyfus et al., 2004 ; Amini, 2008). Habituellement, les réseaux neuronaux sont formés de telle sorte que d'un ensemble particulier de l'entrée, produit aussi près que possible, un ensemble spécifique de sorties cibles (Dechemi et al., 2003).

En d'autres termes, un neurone est constitué essentiellement d'un intégrateur ( $\Sigma$ ) qui effectue la somme pondérée de ses entrées ( $p = (p_1, p_2, \dots, p_R)$ ). Le résultat ( $a$ ) de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert ( $\Phi$ ) qui produit la sortie du neurone ( $a$ ). Les coefficients de pondération (ou coefficients synaptiques) ( $w = (w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R})$ ) sont appelés poids du neurone alors que ( $b$ ) est le biais. Les poids et le biais constituent les paramètres du neurone. Un neurone est donc une fonction algébrique paramétrée. On peut

avoir un ou plusieurs neurones pour constituer une couche et les couches peuvent s'associer pour constituer un réseau (Parizeau, 2004).

Un neurone est donc, l'unité élémentaire de traitement d'un réseau de neurones. Il est connecté à des sources d'information en entrée et renvoie une information en sortie (Mustan, 2008). Le modèle du neurone formel utilisé dans la plupart des réseaux actuels a été proposé en 1943 par McCulloch et Pitts (Aouiche, 2006), à partir des connaissances en neurobiologie de cette époque. La structure d'un neurone formel est représentée par la figure 1.

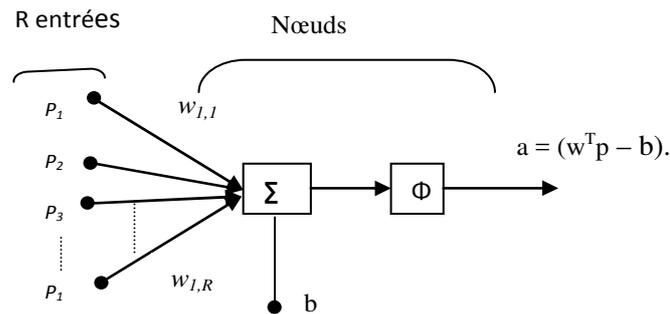


Fig.1 : Modèle du neurone formel

La sortie  $a$  de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

$$a = \sum_{j=1}^R w_{1,j} p_j - b \quad (5)$$

$$= w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R - b \quad (6)$$

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$a = (w^T p - b) \quad (7)$$

Yonaba (2009) avait souligné qu'un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches. Les  $S$  neurones d'une même couche sont tous branchés aux  $R$  entrées. On dit alors que la couche est totalement connectée. Un poids  $w_{ij}$  est associé à chacune des connexions. Nous noterons toujours le premier indice par  $i$  et le deuxième par  $j$  (jamais l'inverse). Le premier indice (rangée) désigne toujours le numéro de neurone sur la couche, alors que le deuxième indice (colonne) spécifie le numéro de l'entrée. Ainsi,  $w_{ij}$  désigne le poids de la connexion qui relie le neurone  $i$  à son entrée  $j$ . L'ensemble des poids d'une couche forme donc une matrice  $w$  de dimension  $S \times R$  (Il n'est pas nécessaire que  $S=R$ ):

$$W = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & & & w_{2,R} \\ \vdots & & & \vdots \\ w_{s,1} & w_{s,2} & & w_{s,R} \end{bmatrix}$$

Avec R nombre de paramètres et S Nombre de neurones par couche

### 3.4. Caractéristiques des réseaux de neurones artificiels

Par analogie au cerveau humain, les réseaux de neurones artificiels sont caractérisés par l'apprentissage et la mémoire. La première est une phase qui permet de déterminer ou de modifier les paramètres du réseau, afin d'adopter un comportement désiré, et par la deuxième importante caractéristique, les réseaux de neurones artificiels tentent de reproduire les caractéristiques les plus importantes du comportement biologique, à savoir l'apprentissage, la généralisation et l'association (Aouiche, 2006).

### 3.5. Fonction d'activation

La fonction d'activation, ou fonction de transfert, est une fonction qui doit renvoyer un réel proche de 1 quand les "bonnes" informations d'entrée sont données et un réel proche de 0 quand elles sont "mauvaises". On utilise généralement des fonctions à valeurs dans l'intervalle réel  $[0,1]$ . Quand le réel est proche de 1, on dit que l'unité (le neurone) est active alors que quand le réel est proche de 0, on dit que l'unité est inactive. Le réel en question est appelé la sortie du neurone et sera noté  $a$ . Si la fonction d'activation est linéaire, le réseau de neurones se réduirait à une simple fonction linéaire (Yonaba, 2009).

En effet, selon Mustan (2008), si les fonctions d'activations sont linéaires, alors le réseau est l'équivalent d'une régression multilinéaire. L'utilisation du réseau de neurone est toutefois bien plus intéressante lorsque l'on utilise des fonctions d'activations non linéaires.

Il existe plusieurs fonctions de transfert dont le choix se fait selon le problème à résoudre. Elles sont aussi retenues en raison de leur facilité d'exécution et de celle de leur dérivée qui intervient dans les algorithmes d'optimisation.

Les fonctions de transfère utilisées appartiennent généralement à quatre groupes essentiels :

- Les fonctions seuils largement utilisées dans la classification des données ;
- Les fonctions linéaires utilisées dans l'approximation des fonctions mais aussi dans la classification des données ;
- Les fonctions non-linéaires dominées par les sigmoïdes et rencontrées également dans l'approximation des fonctions ; et enfin
- Les fonctions résultant d'une combinaison des trois précédentes.

### **3. 6. Formulation mathématique de neurone**

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie". Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de logiciel (Dreyfus, 1998). C'est en s'éloignant de l'inspiration biologique pour prendre une tournure purement mathématique que les réseaux de neurones ont connu un essor (Yonaba, 2009).

### **3. 7. Les différents types de réseaux de neurones artificiels**

Il existe plusieurs types de réseaux de neurones qui diffèrent entre eux, par le mode d'apprentissage, l'interconnexion et de l'architecture de chacun d'eux. On peut les classer en deux grandes catégories ; ce sont les réseaux dits « feed-forward » (type perceptron) et feedback (réseaux récurrents) (Besse, 2005 ; Dario et al., 2011). On présente ci-dessous les plus classiques.

#### **3. 7.1. Les réseaux feed-forward**

Ce sont les réseaux dans lesquels l'information circule à sens unique, parmi lesquels on trouve :

##### **3. 7.1.1. Le perceptron monocouche**

C'est un des premiers réseaux de neurones, conçu en 1958 par Rosenblatt. Il est linéaire et monocouche, il est encore largement utilisé. Il est inspiré du système visuel. Il est

composé de trois couches (Gaume, 2007) ; la première couche (d'entrée) représente la rétine. Les neurones de la couche suivante (unique, d'où le qualificatif de monocouche) sont les cellules d'association, et la couche finale ou cellules de décision. Seuls les poids des liaisons entre la couche d'association et la couche finale peuvent être modifiés. La règle de modification des poids utilisée est la règle de Windrow-Hoff: Si la sortie du réseau (donc celle d'une cellule de décision) est égale à la sortie désirée, le poids de la connexion entre ce neurone et le neurone d'association qui lui est connecté n'est pas modifié. Dans le cas contraire le poids est modifié proportionnellement à la différence entre la sortie obtenue et la sortie désirée (Cour et al., 2002).

Le perceptron est limité dans ses applications. Premièrement, il ne peut être applicable que dans la classification dont les variables sont linéairement séparables et deuxièmement la sortie ne peut être que 0 ou 1 (Chaoui, 2004).

### 3. 7.1.2. Les perceptrons multicouches (PMC)

Ils sont une amélioration du perceptron comprenant une ou plusieurs couches intermédiaires dites couches cachées, dans le sens où elles n'ont qu'une utilité intrinsèque pour le réseau de neurones et pas de contact direct avec l'extérieur. Chaque neurone n'est relié qu'aux neurones des couches directement précédente et suivante, mais à tous les neurones de ces couches (Cour et al., 2002). Aussi les neurones sont connectés de sorte qu'il n'y ait pas un retour de l'information d'une manière ou d'une autre vers l'arrière.

Un PMC est défini par le nombre de ses entrées, le nombre de ses couches et le nombre de nœuds pour chacune de ses couches. La figure 2 montre un PMC 3-3-2-1, indiquant qu'il a trois entrées, et trois couches avec respectivement trois, deux et un nœud.

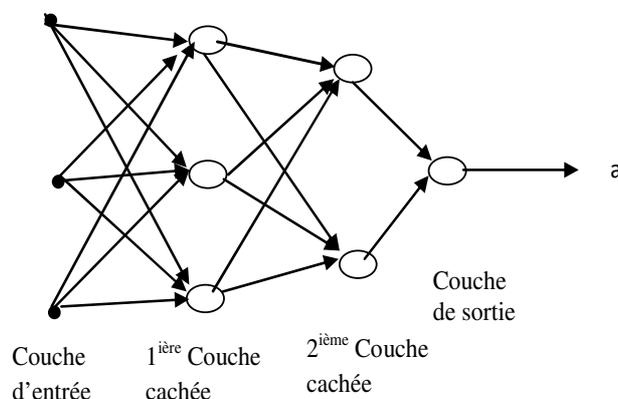


Fig.2 : Perceptrons multicouches 3-3-2-1

### **3. 7.2. Les réseaux “feedback”**

Appelés aussi «réseaux récurrents», ce sont des réseaux dans lesquels il y a retour en arrière de l'information. Ils sont caractérisés par :

- La présence d'au moins une boucle de rétroaction, au niveau des neurones et/ou entre les couches.
- L'aspect temporel du phénomène (la mémoire).

En fait, l'information n'a pas de sens particulier de circulation fixé à l'avance, elle peut donc faire des allers-retours (Volpi, 2005).

Parmi eux, on trouve les cartes auto-organisatrices de Kohonen, les réseaux de Hopfield et les réseaux ART (pour Adaptatif Résonance Théorie).

## **4. Modélisation à l'aide de réseaux de neurones**

Deux principales stratégies de modélisation qui emploient des réseaux de neurones peuvent être distinguées : la première appelée l'approche par boîte noire, quand le processus entier est représenté avec réseau neuronal approprié, et l'approche hybride qui est une combinaison de la modélisation traditionnelle du processus avec un réseau neuronal qui représente les phénomènes moins connus du processus.

### **4.1. Modèle «boîte noire»**

Selon Ammar (2007), le terme de « boîte noire » s'oppose aux termes de «modèle de connaissance» ou «Modèle de comportement interne» qui désignent un modèle mathématique établi à partir d'une analyse physique (ou chimique, physico-chimique, économique, etc.) du processus que l'on étudie. Ce modèle peut contenir un nombre limité de paramètres ajustables, qui possèdent une signification physique. Il constitue la forme la plus primitive de modèle mathématique : il est réalisé uniquement à partir de données expérimentales ou d'observations ; il peut avoir une valeur prédictive dans un certain domaine de validité, mais il n'a aucune valeur explicative.

### **4.2. Modèle «boîte grise» ou hybride**

Il arrive fréquemment qu'un modèle de connaissance existe, mais qu'il ne soit pas satisfaisant. Il est fort souhaitable de pouvoir mettre à profit ces connaissances exprimées par des équations algébriques ou différentielles pour élaborer un modèle plus précis ou plus rapide, mettant en œuvre un apprentissage à partir de mesure : ainsi construit-on un modèle boîte grise. On peut de cette façon obtenir un modèle qui combine la lisibilité des modèles de connaissance avec la souplesse et la vitesse d'exécution des modèles boîte noire (Dreyfus, 2004). La conception d'un modèle hybride exige que l'on dispose d'un modèle de connaissance, qui se présente habituellement sous la forme d'un ensemble d'équations algébriques.

## **5. Architecture des réseaux de neurones**

Il existe une multitude de réseaux de neurones définis par leurs architectures caractérisée par la fonction de transfert et la façon dont l'interconnexion se fait entre les neurones. Chaque neurone reçoit l'information de la couche précédente, effectue la sommation pondérée par les poids, puis la transforme selon sa fonction d'activation. Par la suite, il envoie cette réponse aux neurones de la couche suivante. La couche de sortie joue le même rôle que les autres couches cachées. La seule différence est que la sortie des neurones de la couche de sortie n'est liée à aucun autre neurone. Le neurone réalise alors trois opérations sur ses entrées :

- Pondération : multiplication de chaque entrée par un paramètre appelé poids de connexion,
- Sommation : une sommation des entrées pondérées est effectuée
- Activation : passage de cette somme dans une fonction, appelée fonction d'activation.

### **5.1. Réseaux de neurones statiques (ou acycliques, ou non bouclés).**

Un réseau de neurones non bouclé réalise une ou plusieurs fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones. Un réseau de neurones non bouclé est représenté graphiquement par un ensemble de neurones "connectés" entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties sans "retour en arrière" (Dreyfus, 1998).

### **5.2. Réseaux de neurones dynamiques (ou récurrents, ou bouclés).**

Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés dont le graphe de connexions est acyclique, les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir une topologie de connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties. Pour qu'un tel système soit causal, il faut évidemment qu'à toute boucle soit associé un *retard* : un réseau de neurones bouclé est donc un système dynamique, régi par des équations différentielles. Il existe deux types de réseaux de neurones récurrents: Totalement ou partiellement bouclés (Pierre et al., 2007).

## **6. Apprentissage des réseaux de neurones**

Parmi les propriétés désirables pour un réseau de neurones, la plus fondamentale est sûrement la capacité d'apprendre de son environnement, d'améliorer sa performance à travers un processus d'apprentissage (Parizeau, 2004). On appelle apprentissage des réseaux de neurones la procédure qui consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau, afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée (Dreyfus et al., 2004). L'objectif de l'apprentissage est de fournir une méthode au réseau afin qu'il puisse ajuster ces paramètres lorsqu'on lui présente des exemplaires à traiter (Baghdadi et Senouci, 2005).

### **6.1. Types d'apprentissage**

La caractéristique des réseaux de neurones qui est leur capacité à apprendre, n'est pas acquise dès le départ. La plupart des réseaux de neurones apprennent par l'exemple en suivant un algorithme d'apprentissage. Il y a deux algorithmes principaux : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé (Cour et al., 2002).

Dans le cas d'apprentissage supervisé, on fournit au réseau la donnée à traiter mais aussi la réponse attendue. Le réseau effectue une évaluation de la donnée, puis compare la valeur obtenue avec la valeur désirée. Il va ensuite modifier ces paramètres internes afin de minimiser l'erreur constatée. Autrement dit, l'apprentissage supervisé correspond au cas où l'objectif de l'apprentissage est déterminé explicitement via la définition d'une cible à prédire. L'apprentissage non-supervisé correspond au cas où aucune cible n'est prédéterminée. Ainsi, l'ensemble d'entraînement ne contient que des entrées (Larochelle, 2008).

### **6.2. Algorithme d'apprentissage**

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. Il s'agit toujours de minimiser l'erreur quadratique. On propage la modification des poids de la couche de sortie jusqu'à la couche d'entrée. Les PMC agissent comme un séparateur non linéaire et peuvent être utilisés pour la classification, le traitement de l'image ou l'aide à la décision (Cour et al., 2002).

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels on note : l'algorithme de rétro propagation, la Méthode Quasi-Newton, Algorithme de BFGS etc.

### **6.1. 1. Algorithme de rétro propagation**

L'algorithme de rétro propagation du gradient consiste à déterminer l'erreur commise par chaque neurone puis à modifier la valeur des poids pour minimiser cette erreur. Il faut effectuer des rétro propagations jusqu'à ce que l'erreur quadratique moyenne devienne inférieure à un certain seuil. L'erreur quadratique est définie comme la somme sur les sorties des carrés des différences entre l'entrée obtenue et la valeur réelle.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y_k - S_k)^2 \quad (8)$$

$y_k$  est la sortie attendue (la sortie "vraie") pour la  $k^{\text{ème}}$  valeur d'un exemple et  $S_k$ , la sortie obtenue pour la  $k^{\text{ème}}$  valeur de l'exemple avec les poids actuels.

Les PMC utilisent, pour modifier leurs poids, l'algorithme de rétro propagation du gradient qui est une généralisation de la règle de Windrow-Hoff (Mustan, 2008).

## **7. Tests et Validation**

La phase de test concerne la vérification des performances d'un réseau de neurones hors échantillon et sa capacité de généralisation lorsqu'on la testera sur un jeu de données différent de celui qui a servi à l'entraînement. On parle alors de la capacité du réseau à généraliser, c'est-à-dire de bien performer avec des données qu'il n'a jamais vu auparavant (Parizeau, 2004 ; Cheggaga et Youcef Ettoumi, 2010). La validation du modèle développé se traduit par une proportion importante de prédictions exactes sur l'ensemble de la validation. Si les performances du réseau ne sont pas satisfaisantes, il faudra, soit modifier l'architecture du réseau, soit modifier la base d'apprentissage.

Selon Dario (2011), la performance de chaque modèle de réseau doit être évaluée numériquement en utilisant le coefficient de détermination  $R^2$ . Le test s'effectue pour tous les ensembles de données : de la l'apprentissage, de test et de validation. Si les coefficients n'ont pas atteint les valeurs minimales acceptées ( $R^2 \geq 0,90$ ), donc, le réseau doit être re appris en ajustant les poids en choisissant un autre algorithme d'apprentissage ou en changeant les fonctions d'activation. Lorsque les modèles inclus seulement 2-3 variables indépendantes dans la couche d'entrée, le niveau de performance exigé est réduit ( $R^2 \geq 0,80$ ) en raison de la difficulté croissante de prédire correctement la variable dépendante.

## **8. Forces et limites des réseaux de neurones**

Les réseaux de neurones artificiels sont devenus en quelques années des outils précieux dans des domaines très divers de l'industrie et des services (Dreyfus, 1998). Ils possèdent une propriété remarquable qui est à l'origine de leur intérêt pratique dans des domaines très divers : ce sont des approximateurs universels parcimonieux. C'est cette remarquable parcimonie qui justifie l'intérêt industriel des réseaux de neurones.

Il faut noter que cette propriété d'approximation universelle n'est cependant pas propre aux seuls réseaux de neurones. Les polynômes et les séries de Fourier peuvent aussi réaliser de telles tâches. Ce qui constitue le principal intérêt des réseaux de neurones, c'est leur parcimonie. En effet, pour une précision donnée, les réseaux de neurones utilisent moins de paramètres que les autres approximateurs. Le nombre de paramètres varie en fait de façon linéaire avec le nombre de variables de la fonction que l'on cherche à approximer par les réseaux de neurones, alors que ce nombre varie de façon exponentielle avec le nombre de variables dans le cas des approximateurs usuels (Hornik et al., 1993). Dès lors que le nombre de variables est grand (en général supérieur à 2), les réseaux de neurones sont plus avantageux que les approximateurs conventionnels. Cette parcimonie constitue un avantage aussi bien du point de vue du temps de calcul que de la quantité d'information nécessaire pour l'estimation des paramètres du réseau. (Anctil et Coulibaly, 2006).

De même, les réseaux de neurones ne sont pas touchés par le problème multi colinéarité (Tufféry, 2007). D'une manière générale, le réseau de neurones permet donc de faire un meilleur usage des mesures disponibles que les méthodes de régression non linéaires conventionnelles (Dreyfus, 1998).

Enfin, il est à signaler que le réseau neuronal est privilégié pour traiter des non linéarités, et de la complexité en travaillant sur des données caractérisées par l'incomplétude

et l'imprécision. De même, les réseaux de neurones permettent le traitement des variables qualitatives à travers des neurones recevant des valeurs binaires comme c'est le cas pour la segmentation et la classification en sciences comportementales (Collins et Clark, 1994).

Par ailleurs, il faut noter que les réseaux de neurones présentent aussi des limites, on cite par exemple le problème de Sur-apprentissage. En effet, il arrive qu'à faire apprendre un réseau de neurones toujours sur le même échantillon, celui-ci devient inapte à reconnaître autre chose que les éléments présents dans l'échantillon. Le réseau ne cherche plus l'allure générale de la relation entre les entrées et les sorties du système, mais cherche à reproduire les allures de l'échantillon. On parle alors de sur-apprentissage : le réseau est devenu trop spécialisé et ne généralise plus correctement.

Ce phénomène apparaît aussi lorsqu'on utilise trop d'unités cachées (de connexions), la phase d'apprentissage devient alors trop longue (trop de paramètres réglables dans le système) et les performances du réseau en généralisation deviennent médiocres (Ammar, 2007).

Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour résoudre ce problème. Le plus simple est d'avoir trois bases de données distinctes : une base d'apprentissage, une base de données de test et une base de données appelée "validation croisée". Notez que cette technique nécessite d'avoir suffisamment de données pour établir trois bases à la fois représentatives et distinctives (Sterlin, 2007).

Le choix de l'architecture du réseau reste un problème difficile. Ce choix peut être fait par l'expérience. Il existe des méthodes dites "auto-constructives" : il s'agit d'ajouter des neurones au cours de l'apprentissage pour que se fasse bien. Mais ces méthodes peuvent rencontrer le problème de "sur-apprentissage" (Mestan, 2008).

## **B : OPTIMISATION DE L'EFFICIENCE DE L'EAU D'IRRIGATION**

### **1. Préservation et optimisation de l'utilisation des ressources en eau**

L'eau étant un facteur important de la production agricole, les pays doivent tenir compte de la quantité d'eau nécessaire pour produire les aliments dont ils ont besoin (FAO, 2003a). En effet, l'agriculture consomme environ 70 % de l'eau douce exploitée dans le monde et la population mondiale augmente par 80 à 85 millions d'individus chaque année, essentiellement en zones arides et semi-arides et l'accroissement de la production alimentaire passera principalement par l'irrigation, d'où la nécessité d'améliorer l'efficacité de l'irrigation, d'utiliser des eaux de moindre qualité et de mettre en œuvre des techniques efficaces de conservation de l'eau, ce qui permettra aussi une meilleure conservation des sols (Mermoud, 2005).

Cependant, une irrigation raisonnable et efficace exige impérativement la connaissance des besoins en eau des cultures. Plus encore que dans les autres régions, celle – ci revêt au Sahara un caractère capital (Dubost, 1983).

Il convient de noter qu'en Algérie, l'agriculture subit plusieurs contraintes qui grèvent son potentiel de croissance et pèsent sur les équilibres écologiques des différentes régions naturelles. On peut citer, entre autres ; la surexploitation des ressources hydriques souterraines, l'érosion des sols et leur salinisation ainsi que la désertification qui menace les 32 millions d'hectares de terres de parcours et le couvert forestier de l'Algérie du Nord. Malgré les efforts déployés par l'Etat dans la conservation des eaux et du sol en milieu agricole, l'érosion continue sa progression (Bessaoud, 2011).

### **2. Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation**

L'économie de l'eau est à réaliser à différents niveaux techniques, que ce soit au niveau de la mobilisation et du transport, de l'application à la parcelle ou bien au niveau du choix du système de mise en valeur valorisant au mieux l'eau d'irrigation (Tazi1, 2008). On parle donc de trois types d'efficacité.

#### **2.1. Définitions**

On définit une efficacité technique qui tient compte des relations physiques entre input et output et une efficacité économique dont le concept se confond donc avec celui de l'optimum économique. Cet optimum est atteint dans le cas d'un producteur considéré individuellement, quand le coût marginal et le prix du produit s'égalisent (Louhichi, 1999).

### **2.1.1 Efficacité d'irrigation**

C'est le rapport entre la quantité moyenne d'eau provenant de la rhizosphère et la quantité totale moyenne passant dans le système d'irrigation (PNUE, 2006). Cette approche tient compte des pertes en eau dues à l'évaporation et au vent, comme des pertes dues à la percolation en profondeur et aussi des pertes dues aux réseaux d'irrigation, de ce fait, elle est maximale en irrigation localisée alors qu'en irrigation gravitaire elle ne peut pas dépasser les 75 % dans les meilleurs cas.

### **2.1.2 Efficacité de l'eau d'irrigation**

C'est une notion qui se rapporte non plus à l'eau transpirée mais à l'eau apportée sous forme d'irrigation. Cette quantité d'eau est utilisée sous différentes manières (évapotranspiration, drainage, ruissellement, stockage dans le sol). Elle ne représente pas non plus la totalité de l'eau fournie à la culture, puisqu'elle ne comprend ni l'eau de pluie ni l'eau fournie par le sol (FAO, 1979). Elle peut s'exprimer en terme physique (efficacité agronomique) ou en terme monétaire (efficacité économique).

#### **Efficacité agronomique :**

$$E_a = \frac{\Delta pu}{v} \quad (9)$$

$\Delta pu$  = augmentation de la production utile exprimée dans l'unité de mesure de la production et  $v$  = quantité d'eau apportée

La courbe de variation de supplément de production en quantité ou en valeur en fonction de l'irrigation (en quantité ou en valeur) n'est pas linéaire et l'on distingue une production maximale et une production optimale.

L'efficacité maximale agronomique correspond à la plus forte valeur du rendement en quantité ou en valeur.

## **Efficiencce économique :**

$$Ee = \frac{\Delta RU}{ci} \quad (10)$$

$\Delta Ru$ = augmentation du revenu brut obtenu grâce à l'irrigation (c'est-à-dire valeur supplémentaire du produit).

$ci$  = charge liée à l'eau (c'est à dire le coût total de l'irrigation). Pour avoir une bonne efficacité de l'eau, il faut minimiser toutes les formes de perte d'eau au champ.

L'efficacité optimale économique correspond au supplément maximal de revenu par hectare résultant de l'irrigation.

En Algérie, l'efficacité physique de l'eau d'irrigation est estimée à 36 %, c'est parmi les plus faibles au monde (Thivet et Blinda, 2007). La cause primordiale réside probablement dans la technique d'irrigation utilisée. En effet, puisque l'irrigation de surface ne fait pas appel à des équipements hydrauliques complexes, de gestion et d'entretien, c'est la technique la plus courante et demeure la plus dominante jusqu'à 2030 (FAO, 2002).

C'est la raison pour laquelle la productivité de mètre cube d'eau est faible. Elle est de 0,32 kg de datte/m<sup>3</sup> d'eau pour le palmier dattier et 0,02 kg de grain blé/m<sup>3</sup> d'eau pour le blé sous pivot (OSS, 2008).

### **2.1.3. Efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (EUE)**

Selon Bamouh (2000), l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) est le ratio entre la production de matière sèche (MS) et la consommation en eau (ETR).

$$EUE = \frac{MS}{ETR} \quad (11)$$

Avec EUE= efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation, MS = matière sèche, ETR= évapotranspiration réelle (mm).

## **3. Facteurs d'amélioration de l'efficacité de l'eau d'irrigation du blé**

### **3.1. Facteurs liés à l'irrigation**

#### **3.1.1. Facteurs liés aux systèmes d'irrigation**

Il est évident que, plus le système d'irrigation apporte le quasi totalité de l'eau disponible jusqu'au voisinage de la plante, plus ce système est efficient. Pour cela, le système d'irrigation localisée lorsqu'il est bien géré est le plus performant. Un exemple typique dans ce domaine est celui des lysimètres installés dans la parcelle d'essai (tableau 02).

Pour le système gravitaire, il est difficile d'ajuster les apports aux besoins de la culture, cependant, l'efficience diffère selon les fréquences d'arrosage (Laaboudi, 2008).

Tableau 02: Efficience d'eau d'irrigation pour les différents systèmes

| Systèmes d'irrigations |             | Nombre d'irrigations | Eau apportée (mm) | Rendements Kg/ha | Efficience (kg/mm) |
|------------------------|-------------|----------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| lysimètres (Localisé)  |             | 90                   | 1204              | 6600             | 5,48               |
| pivot (aspersion)      |             |                      | 1044              | 5400             | 5,17               |
| Gravitaire             | Fréquence 1 | 13                   | 650               | 3700             | 5,69               |
|                        | Fréquence 2 | 21                   | 1050              | 4000             | 3,81               |
|                        | Fréquence 3 | 31                   | 1550              | 5500             | 3,55               |
|                        | Fréquence 4 | 41                   | 2050              | 5700             | 2,78               |
|                        | Fréquence 5 | 63                   | 3150              | 5100             | 1,62               |

Par contre en irrigation par aspersion, il est possible d'apporter l'eau selon les besoins de la culture. Néanmoins en pratique très peu d'irrigants qui réalise cet objectif.

### 3.1.2. Irrigation selon les besoins de la culture

Une irrigation correcte est celle à travers laquelle chaque culture reçoit une quantité d'eau selon les besoins et aux moments opportuns. En effet, pour une bonne croissance et une utilisation efficace de l'eau du sol, l'humidité du sol doit être au moins au niveau de 50 % de la RFU, cela veut dire que la limite optimale correspond approximativement à la moitié de l'évapotranspiration des cultures, (Naheed et Mahmood, 2010).

Dans ce contexte, la comparaison des besoins en eau du blé avec les doses délivrées par le pivot (2005/2006) montre une mauvaise conduite de l'irrigation. Les doses sont nettement supérieures aux besoins pendant les phases initiales et intermédiaires (Laaboudi,

2008), mais elles sont inférieures aux besoins ( $ETR < ETM$ ) pendant les phases finales (tableau 03).

Tableau 03 : Besoins en eau de la culture du blé (ETM) exprimés (mm/j)

| Phases végétatives    | Besoins en eau (mm/j) | Doses délivrées (mm/j) |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Phases initiales      | 1,5 – 4,4             | 5,6                    |
| Phases intermédiaires | 4,4- 7,7              | 6,4 -10,04             |
| Phases finales        | 7,5- 12,1             | 7,8 -9,4               |

Pour le blé, il convient de noter que pendant les stades initiaux, la consommation en eau est réduite, donc les irrigations peuvent être espacées (Laaboudi, 2002). Par contre pendant les mois de Mars et Avril, dans des conditions d'advection et en temps chaud et venteux, les valeurs de l' $ET_0$  sont généralement élevées. Si la culture du blé en ce moment est au stade de la formation des grains (la période d'exigence le plus élevé en eau), l'irrigation fréquente est nécessaire (Naheed et Mahmood, 2010).

Il convient de noter que l'accroissement de la production n'est pas linéaire avec l'augmentation des fréquences d'irrigation. Dans ce sens Al-Barrak (2006) a montré qu'en ajoutant des doses supplémentaires, le pic du rendement est obtenu par la dose de 12000  $m^3/ha$ . Dans notre cas la meilleure fréquence correspond à 10 irrigations par mois (Fig. 03).

Il en résulte que l'excès d'eau est toujours néfaste, car il provoque le gaspillage d'eau, l'asphyxie des racines, le lessivage de l'azote, le décalage du cycle de développement et une maturation hâtive. Par conséquent, une difficulté pour la réalisation de la rentabilité.

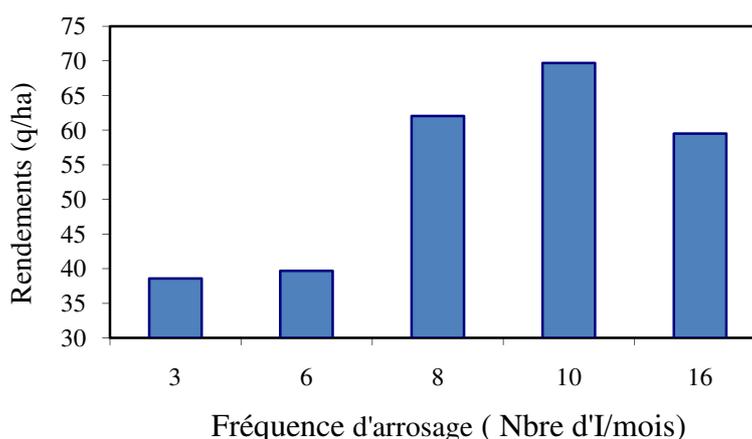


Fig. 03: Effet des fréquences d'arrosage sur les rendements

Durant la première campagne, le rendement en biomasse a régressé en raison de la sur irrigation. Les observations phénologiques faites au cours de développement de la culture ont montré une bonne croissance de culture. La régression remarquée est due principalement à une maturation accélérée suite à l'élévation de la température au moment du stade pâteux particulièrement pour ce bloc. En effet, l'excès d'eau a retardé relativement la maturation de ce traitement par rapport aux autres endroits (Laaboudi, 2008). Il en résulte que, si les apports supplémentaires des eaux d'irrigation ont un effet utile sur la production, il existe un seuil critique au delà duquel tout volume d'eau en plus se répercute négativement sur la récolte finale.

### 3.2. Facteurs liés à la fertilisation

#### 3.2.1. Fertilisation raisonnée

Une des fonctions essentielles du sol consiste à fournir à la plante les éléments nutritifs qui lui sont nécessaires. Pour pouvoir retirer de la matière organique de son champ, l'agriculteur doit compenser les exportations par des apports correspondants (Duchaufour, 1997).

Puisque la matière carbonée venant de l'air n'étant pas limitée, il devra surtout s'intéresser à l'azote, au phosphore et au potassium. Mais ils doivent être correctement évalués pour se situer à l'optimum économique. Il existe en effet un seuil technique au-delà duquel le rendement diminue par effet de toxicité (surdose) et un seuil économique, inférieur au précédent, au-delà duquel le gain supplémentaire ne couvre plus le coût additionnel. Bien entendu ce seuil est délicat à évaluer car le rendement dépend d'autres facteurs moins bien maîtrisés, notamment en culture de plein champ, comme la pluviométrie (Soltner, 1999).

La fertilisation raisonnée est donc l'une des techniques permettant d'assurer une agriculture durable, de mieux valoriser l'eau d'irrigation et de réduire le risque de pollution des eaux (Yara, 2008).

Il faut savoir qu'on distingue les nutriments de base, absorbés souvent, en quantités élevées par la plante (N, P, K, S, Mg), et les éléments traces (ou oligo-éléments) indispensables à faible dose. Parmi ces derniers, certains peuvent se montrer toxiques s'ils sont en excès (Duchaufour, 1997).

Le calcul de la dose à apporter est basé sur quatre critères : l'exigence de la culture, la teneur du sol, le devenir des résidus de la récolte du précédent cultural et le passé récent de fertilisation (Roger-Estrade et al., 2004). Il faut savoir qu'une des raisons pour la faiblesse de la production alimentaire est le niveau bas de la fertilité du sol qui résulte de l'exploitation continue du sol sans apport de fertilisants (AIEA, 2005).

Actuellement l'agriculture algérienne ne consomme que 100 000 tonnes d'éléments fertilisants environ par an alors que, selon la moyenne mondiale, la consommation devrait se situer à 850 000 tonnes par an (FAO, 2005).

En ce qui concerne le blé, Davis et Westfall (2011), indiquent qu'une fertilité adéquate du sol est l'une des exigences pour une production rentable de blé d'hiver. L'azote (N) est l'élément le plus limitant du rendement. Le Phosphore (P) est le second élément limitant. Le soufre (S) peut être limitant dans de rares situations sur certains sols. Les niveaux de potassium (K) et oligo-éléments sont généralement suffisants pour la production de blé dans la plus part des cas.

Selon les résultats obtenus par Laaboudi et Mouhouche (2008), l'effet du potassium ajouté au sol est nul, voir négatif pendant les deux premières campagnes. Il n'a exprimé son effet que durant la troisième campagne. De ce fait, pour une meilleure efficacité, il convient de connaître les besoins de la culture et la réserve du sol en cet élément. Quant au phosphore, cet élément s'est avéré indispensable pour la culture du blé. En effet, les rendements obtenus pendant les trois campagnes consécutives indiquent que son effet a été positif.

Tableau 04 : Rendements du blé (q/ha) obtenus par l'application des traitements de fertilisation

| Traitements         | 2004/2005 | 2005/2006 | 2006/2007 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| Témoin              | 45,5      | 36        | 50,7      |
| Potasse             | 44        | 42        | 63,6      |
| Phosphore           | 55        | 57,7      | 64,4      |
| Potasse + phosphore | 51        | 56        | 65,1      |

Les résultats obtenus par Laaboudi et Mouhouche (2008), ont montré que l'effet du phosphore est significatif pendant la première et la deuxième campagne et très hautement significatif pour la dernière. Il convient de noter que certaines parcelles sans apport de

phosphore durant cette campagne ont donné tout de même de bons rendements. Ceci est dû aux reliquats des apports effectués durant les campagnes précédentes.

### **3.2.1.1. Fertilisation azotée**

A l'époque du tallage de la culture du blé, l'azote permet de développer les talles. A la montaison, il accroît le nombre de talles qui montent en épis et la fertilité de ces derniers. On a donc une meilleure productivité. Il convient d'ajuster la fourniture aux besoins qui varient suivant les stades de la végétation. Le blé a besoin de la plus grande partie de son apport, pendant la période de croissance rapide jusqu'au remplissage du grain. Les besoins en azote sont beaucoup moins importants lorsque la croissance des cultures est modeste ; toutefois sans azote, la croissance des cultures est impossible (Reid, 2003).

D'après Duchaufour (1997), on se base pour un tel calcul, sur la quantité d'azote nécessaire à la production d'un quintal : 3 kg d'azote environ pour un quintal de blé, la dose totale d'engrais doit fournir la différence entre le besoin de la culture et la quantité d'azote disponible dans le sol. Dans ce sens Si Bennasseur (2004) avait souligné que les besoins en azote de la culture du blé dépendent du rendement objectif qui dépend essentiellement de la disponibilité en eau. Dans le cas, par exemple d'une culture irriguée et d'un rendement objectif de 80 q/ha, les besoins en N, sont 240 unité/ha.

### **3.2.1.2 Fertilisation phosphorée**

Le phosphore est un élément nécessaire à la croissance des plantes et joue un rôle important dans le métabolisme. Il participe avec l'azote pour remplir plusieurs fonctions (Soltner, 1999). Il peut conduire par ses carences à une diminution importante des rendements agricoles (Razi, 2006). C'est un élément chimique non métallique abondant dans la nature. Il est le onzième de la croûte terrestre (0,12 %) (Bachelier et Bélin, 1997 cité par Isabelle, 2006).

Le phosphore total du sol dépasse de 15 à 150 fois les besoins des végétaux. Cependant, en raison de la grande complexité du système sol - plante, la quantité de phosphore réellement disponible à la végétation est encore difficile à évaluer. Cette disponibilité est caractérisée par trois facteurs : l'intensité, la quantité et la capacité (Frossard et al., 2004 cité par Isabelle, 2006). La quantité de phosphore présente dans le sol est fonction

de la richesse de la roche mère et de l'acidité : dans un sol acide (pH inférieur à 6), la quantité de phosphore sera plus importante que dans les sols à pH alcalin. Seule une partie de ce phosphore (10 à 30 %) est « assimilable », c'est-à-dire disponible pour les plantes. On considère que lorsque la teneur en phosphore assimilable est inférieure à 250-300 mg de  $P_2O_5$ /kg de terre, elle peut être un facteur limitant pour la croissance des plantes (Gilles et al., 2005).

Selon PPIC (2003), le blé produit deux types de tiges, une principale et un nombre variable de talles. Au début de son cycle de vie, le blé «décide» quelles talles va développer. Des facteurs tels que la déficience en P ou N, sol dur, ou la plantation trop profonde peut créer des contraintes qui réduisent l'initiation de talles. Au début de saison la disponibilité réduite du P peut entraîner des restrictions dans la croissance des cultures à partir de laquelle la plante ne va pas récupérer, même si l'offre P est ensuite passée à des niveaux adéquats.

Le phosphore est un élément nécessaire à la croissance du blé, il agit sur le développement des racines en activant son démarrage, c'est également un facteur de précocité et de fructification. Il accroît la résistance au froid et aux maladies. A la levée, le phosphore est nécessaire pour une bonne installation et démarrage de la culture et les besoins sont très élevés au stade épiaison. Il affecte donc la croissance du blé tout au long la saison de plusieurs façons. Aussi, le blé avec P adéquats mûrit plus tôt et plus uniformément (Stewart, 2000).

Il est peu mobile, pour cela il est souhaitable de l'apporter en localisé et sous forme soluble pour stimuler le développement racinaire au moment de la germination. Dans les sols à pH alcalin  $> 7$ , ce qui est le cas de la majorité des sols Algériens ; le phosphore contenu dans les réserves est indisponible, il faut donc l'apporter sous forme soluble et acide permettant une dynamique d'échange dans la solution (Bennai et Benabbas, 2007).

Pour produire un quintal de blé, Si Bennasseur (2004), estime qu'il faut 1,7 kg de P. Besson et al. (2007) proposent pour la production de blé d'automne sur limon et limon argileux de  $pH \geq 7$ , une plage provisoire de teneurs satisfaisantes en P du sol comprise entre 25 et 50 mg/kg.

Il convient de noter que l'Algérie, malgré ses richesses, ses potentialités et ses capacités, utilise peu d'engrais comparativement au Maroc et à la Tunisie (FAO, 2006).

L'utilisation semble se stabiliser autour de 45 unités d'éléments nutritifs/ha, mais reste en deçà des normes d'intensification des cultures et d'amélioration de la productivité.

### **3.2.1.3. Fertilisation potassique**

D'après la FAO (2005), le potassium dans le sol se trouve uniquement sous forme minérale. Il provient soit de la décomposition de la matière organique et des minéraux du sol, soit des engrais. Pour certains minéraux, la quantité présente dans le sol doit être supérieure à la quantité nécessaire ; en effet, ils peuvent être présents dans le sol, mais non disponibles pour autant pour la plante. Le potassium est essentiellement retenu par l'humus ou l'argile (dans certains sols, il pourra donc être perdu en quantité importante par le drainage).

A l'exception de certains sols franchement sableux, riches en feldspaths potassiques, les sols à texture fine sont potentiellement plus riches en K total que les sols à texture grossière. Mais la teneur en K total d'un sol ne préjuge pas du niveau de disponibilité de cet élément pour la plante cultivée (biodisponibilité). Selon leur pH, les sols présentent une richesse en potassium différente. Les sols acides sont pauvres en potassium alors que les sols basiques sont potentiellement riches (Mhiri, 2002).

Le potassium est souvent apporté en une seule fois, de façon irrégulière, en grande quantité, car il est stocké par le sol et libéré progressivement. Les plantes très exigeantes en potassium sont la betterave ou la pomme de terre, alors que des plantes peu exigeantes sont le blé tendre, le blé dur, l'orge (FAO, 2005).

Un approvisionnement suffisant en engrais potassique est nécessaire pour une production agricole durable. Les plantes obtiennent la potasse à partir du sol sous forme de  $K^+$  qui est aussi fortement absorbée par les composants du sol. Particulièrement par les particules d'argile et n'est, par conséquent, pas facilement mobile dans les sols (Zameer et al., 2006).

Le potassium est très mobile dans la plante. Il joue un rôle primordial dans l'absorption des cations, dans l'accumulation des hydrates des protéines, le maintien de la turgescence de la cellule et la régulation de l'économie en eau de la plante. C'est aussi un élément de résistance des plantes au gel, à la sécheresse et aux maladies. Il est essentiel pour le transfert des assimilés vers les organes de réserve (bulbes et tubercules). Pour ces raisons, il est particulièrement important pour les cultures de type pomme de terre, betteraves (Zaid, 2011).

Le potassium (K) qui joue de nombreux rôles dans la physiologie de la plante est l'élément nutritif prélevé en plus grande quantité par la plante. La dynamique d'absorption du potassium est forte pendant la croissance des parties végétatives et passe par un maximum supérieur à la quantité d'azote prélevée (300 kg de K<sub>2</sub>O/ha pour un blé à 90 q). A la récolte, le potassium se trouve en quantités importantes dans les organes végétatifs (feuilles, tiges, tubercules, racines) alors que dans la partie transférée aux grains il reste plus faible (Mhiri, 2002).

Bien que le blé soit considéré comme une plante peu exigeante en potassium en général, en conditions favorables a une aptitude forte grâce à son enracinement dense à bien exploiter les réserves du sol. Néanmoins, si les conditions sont affectées par des accidents climatiques ou de structure des sols, la très forte demande en potassium pourrait ne plus être satisfaite, limitant la plante dans l'expression de son potentiel (UNIFA, 2003). Il faut ajouter que la potasse peut migrer bien en profondeur dans les sols sableux jusqu'au-delà de la rhizosphère (Zeraouli et Mrini, 2004).

Le potassium joue un rôle important dans le rendement en agissant sur la formation et le stockage des glucides et protéines et la résistance à la sécheresse, au gel et aux maladies cryptogamiques. Dans les sols a pH élevé >7, la potasse est peu assimilable même si elle est disponible en quantité et en condition de bonne pluviométrie et de haut rendement, les apports de potasse sont indispensables. Les besoins en potassium sont maximaux à partir du stade montaison. Par ailleurs, le potassium améliore la synergie azote - potasse. Pour produire un quintal du blé, il faut apporter 2,2 kg de K (Si Bennasseur, 2004).

#### **3.2.1.4. Interaction entre les éléments (NPK)**

L'action d'un élément minéral peut être modifiée par la présence ou l'absence d'un ou plusieurs autres éléments. L'effet de ces interactions peut être positif ou négatif. En fait, cette loi d'interaction met en évidence l'interdépendance entre les différents éléments nutritifs. De plus, le manque d'un seul élément, même en infime quantité, suffit à limiter la croissance de la plante, à diminuer sa résistance et peut conduire à des maladies de carences (UNIFA, 2006).

En effet, un élément minéral peut être limitant à l'expression du potentiel de production d'une culture aussi bien, d'ailleurs qu'un état structural dégradé. Selon la « loi du

minimum », le rendement est déterminé par le facteur le plus limitatif. Dans un sol déséquilibré en éléments minéraux, le rendement de la culture est limité au niveau permis par l'élément présent en plus faible quantité, même si tous les autres éléments se trouvent en quantités suffisantes (Asdrubal, 2006). Ceci était confirmé par Laaboudi et Mouhouche (2008), qui avaient trouvé que dans les parcelles qui présentent une carence intense en phosphore, le rendement reste faible malgré la présence des autres éléments en quantités suffisantes. Ainsi, l'apport simultané de NP (azote, phosphore) au semis exerce une forte synergie et l'apport de la potasse améliore la synergie azote/potasse (Bennai et Benabbas, 2007).

En outre, AIEA (2005) a déclaré que sans application de P, autres intrants et techniques sont inefficaces, car la carence en phosphore est une contrainte majeure à la production végétale, et la réponse à N est importante seulement lorsque ni l'humidité du sol ni la disponibilité du phosphore sont limitées.

De leur côté, Snyder et Mascagni (1998) avaient signalé que la fertilisation par les deux éléments P et K a amélioré les rendements de deux variétés étudiées du blé ; 21 % d'augmentation de rendement est rapportée à l'augmentation du nombre des épis par unité de surface. Les dommages provoqués par les maladies cryptogamiques sont réduits avec l'application du K seul ou avec P.

### 3.2.1.5. Correction des carences

Après l'apparition des symptômes de carence en phosphore, des apports de correction ont été effectués au stade tallage pour la deuxième campagne et au stade montaison pour la troisième campagne. La réponse du végétal a été rapide. Il y a eu un changement dans la coloration des feuilles après 15 jours. La croissance est stimulée et l'amélioration du rendement obtenus était significative (tableau 05) (Laaboudi, 2009).

Tableau 05 : Effet des apports de correction en phosphore sur l'amélioration du rendement du blé (q/ha), selon les stades d'apport

| Stades d'apports | Sans apport | Avec Apport de | Taux d'amélioration (%) |
|------------------|-------------|----------------|-------------------------|
| Tallage          | 12,1        | 41,7           | 244,6                   |
| Montaison        | 26,3        | 29,3           | 11,4                    |

Ainsi il en résulte que l'importance de la correction diffère selon le stade d'application et l'intensité de la carence. En effet, il a été constaté que l'apport de correction était très positif durant la deuxième campagne, car il était effectué au stade tallage sur les parcelles qui présentent un grand déficit en cet élément. Durant la troisième campagne durant laquelle l'apport de correction s'est effectué pendant le stade montaison, le rendement et ses composantes avaient une amélioration inférieure (tableau 06).

Tableau 06 : Effet des apports de correction sur le rendement et ses composantes (stade montaison)

| Composante du rendement             | Avec Apport de correction | Sans apport de correction |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Biomasse totale (g/m <sup>2</sup> ) | 930                       | 690                       |
| Rendement (g/m <sup>2</sup> )       | 293                       | 263                       |
| Poids de mille grains               | 50,5                      | 41                        |
| Longueur des tiges (cm)             | 35                        | 21                        |
| Nombre de grain par épi             | 56                        | 46                        |
| Longueur de l'épi (cm)              | 4                         | 3                         |
| Indice de récolte                   | 0,32                      | 0,38                      |

Pour conclure, nous soulignons qu'il s'est avéré que plusieurs facteurs régissent les besoins du blé en éléments fertilisants notamment le phosphore et potassium. A cet effet, la quantité à apporter dépend du rendement visé, de la fourniture du sol et du coefficient d'utilisation apparent (CUP).

En ce qui concerne la potasse, les analyses physico-chimiques du sol des régions sahariennes confirment sa richesse en cet élément. Selon la réponse de la culture du blé vis-à-vis des apports de l'engrais potassique durant la période de l'essai, celle-ci n'est pas exigeante en potasse. De ce fait les quantités disponibles permettent d'assurer des rendements acceptables pendant les trois premières campagnes d'exploitation du sol, des apports légers qui augmentent progressivement sont nécessaires par la suite.

Pour le phosphore, on rappelle que le pH du sol à tendance alcalin peut bloquer et réduire sa disponibilité pour les cultures. En plus, le CUP est faible et la réponse vis-à-vis des apports de corrections effectués durant les premières phases de développement de la culture est positive (Laaboudi et Mouhouche, 2008).

Le mode d'épandage a aussi son importance. Ainsi Reid (2003) a signalé que l'engrais épandu en bandes a donné un rendement plus élevé par apport à celui épandu à la volée.

### **3.3. Facteurs liés au végétal**

Dans les mêmes conditions, les différentes variétés de blé donnent des rendements différents, ceci est dû au potentiel génétique propre à chacune d'elles. Ce dernier se manifeste par différentes manières. Par une extension racinaire dense et profonde qui permet à mieux utiliser l'eau du sol (Maghsoudi et Yamagishi, 2006) et par la tolérance à la salinité (Laaboudi, 2008) et aussi par la résistance à la verse. (Rezgui et al., 1996). De même, le choix de variétés peu exigeantes en photopériode permet de mettre la phase critique à l'abri de la sécheresse qui peut s'installer dès le début du printemps sous les climats méditerranéens arides à semi-arides (Benchokroun et Handoufe, 1990).

De ce fait, afin de mieux valoriser l'eau d'irrigation, le choix variétal doit reposer sur deux principaux critères :

#### **3.3.1. Le potentiel génétique**

D'après Changming et al. (2002), les variétés ayant des racines denses et profondes utilisent mieux l'eau du sol et résistent ainsi au déficit hydrique prolongé. Ainsi, les résultats obtenus sur un même champ montrent que les variétés ont des potentiels génétiques différents. Dans ce contexte, les variétés Ascsad, Waha et Shen S, ont donné consécutivement des rendements de 36,05 q/ha, 21,45 q/ha et 49,66 q/ha (Laaboudi, 2002).

#### **3.3.2. Tolérance à la salinité**

Les essais effectués dans une parcelle relativement salée pour deux variétés du blé : hd 1220 et Waha, ont donné consécutivement 50,2 et 26,6 q/ha. Ceci confirme que la première variété tolère mieux la salinité par rapport à la deuxième (Laaboudi, 2008).

### **3.4. Date de semis**

Concernant la culture du blé en sec, la date de semis doit être la plus précoce possible afin de placer la phase critique (gonflement-floraison) dans une période pluvieuse ayant un déficit hydrique le plus réduit possible (Benchokroun et Handoufe, 1990).

Dans les régions sahariennes le choix de la bonne date de semis permet de placer la culture dans un confort hydrique et d'échapper à l'échaudage causé par l'effet combiné d'une température élevée et une forte évapotranspiration.

Afin de contrecarrer l'effet nuisible de l'élévation de la température pendant des dernières phases de développement de la culture, la solution serait de semer tôt. C'est pour cette raison que les rendements obtenus par le semis précoce sont nettement supérieurs à ceux obtenus par un semis tardif (tableau 07). Cependant le taux d'amélioration diffère selon les conditions climatiques dominantes durant la campagne considérée. C'est-à-dire, pour un semis tardif, la chute du rendement est beaucoup plus importante si la température du mois de Mars est élevée par rapport aux conditions d'une température mois élevée.

Tableau 07 : Effet de la date du semis sur l'amélioration des rendements (q/ha)

| Campagnes agricoles | Semis précoce (14/11) | Semis tardif (23/12) | Taux d'amélioration % |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 2005/2006           | 57,1                  | 38,3                 | 49,1                  |
| 2006/2007           | 56,2                  | 45,3                 | 23,8                  |

### 3.5. Facteurs liés au sol

#### 3.5.1. Fertilité du sol

La comparaison des rendements obtenus sous pivot au cours des 3 campagnes consécutives dans la même zone et chez le même agriculteur (Fig. 04), montre que les rendements sous le pivot 2 sont nettement supérieurs à ceux du pivot1 et ce, malgré les insuffisances constatées dans la gestion de l'irrigation. Ceci fait ressortir l'importance du sol vis-à-vis de l'amélioration de la production (Laaboudi, 2008).

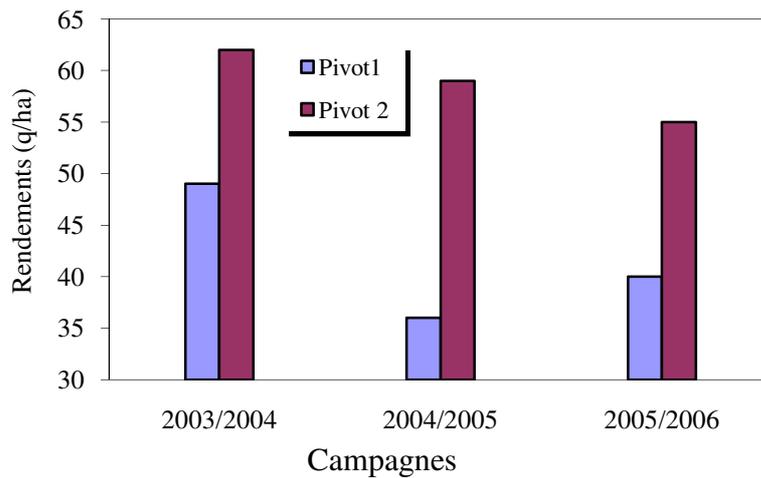


Fig. 04: Rendement du blé sous pivots pour deux sites dans la même zone

Dans ce sens, le choix des sites aptes à la mise en valeur, le repos des sols et la rotation sont des techniques à prendre en considération en vue d'améliorer l'efficacité d'irrigation. Dans ce contexte, Les travaux de Bellague et al. (2007) ont montré que les légumineuses ont un impact positif sur l'efficacité d'utilisation de l'eau et sur la restauration de la fertilité du sol.

Aussi, les essais menés par Khelifi et al. (2007) sur 16 cultivars de légumineuses ont mis en évidence un groupe de cultivars ayant une efficacité d'utilisation de l'eau comprise entre 2 et 3,5 kg de ms/m<sup>3</sup> d'eau. Ainsi l'utilisation des légumineuses dans la rotation préserve la fertilité du sol et valorise les quantités en eau disponibles (Laaboudi, 2008).

### 3.5.2. Lutte contre la salinisation du sol

La salinité de l'eau ou du sol entraîne l'augmentation de la pression osmotique qui joue à contre sens par rapport au flux d'eau dû à l'évapotranspiration en provoquant une élévation du potentiel hydrique d'autant plus important que la salinité est plus grande (Beisel Jean et al., 2011). Selon Fercha (2011), la salinité réduit tous les paramètres de croissance de feuilles de blé, telles que la surface foliaire (33%), le poids de la matière sèche (41%) et le poids de la matière fraîche (32%).

Un apport d'eau d'irrigation a pour conséquence un apport de sel. L'eau d'irrigation, même d'une bonne qualité est une source majeure de sels solubles (Van Alphen et Van Hooren, 1995). Ainsi, les problèmes de salure sont fréquents dans les zones arides où les eaux sont soumises à une forte évaporation ont tendance à se concentrer et provoquant l'augmentation de la salinisation des sols. Une salinisation trop importante, accompagne

parfois d'une alcalinisation du complexe absorbant des sols, nuit à la mise en valeur agricole des zones cultivables (Nezli et al., 2007).

Selon Eilers et al. (2000), la présence dans le sol de fortes teneurs en sel a le même effet que la sécheresse en réduisant la quantité d'eau assimilable par les racines des plantes. De même Kenfaoui (1997) avait remarqué que les effets de la salinité sont très semblables à ceux de la sécheresse car toutes les deux génèrent un déficit hydrique et une réduction de la croissance. En effet, la salinité accentue les effets de la sécheresse, en limitant le prélèvement de l'eau par la plante par réduction de la différence des potentiels osmotiques entre la plante et la solution du sol, la plante a d'autant plus de difficultés à s'approvisionner en eau que le potentiel osmotique est élevé (Daoud et Halitim, 1994).

Réduire le degré et l'étendue de la salinisation des sols consiste à un problème de gestion des eaux (Eilers et al., 2000), car, si l'irrigation augmente les rendements, elle n'est pas sans danger sur les sols. En effet, dans toute la marge frappée par une pluviométrie déficitaire, l'apport extérieur de l'eau d'irrigation est toujours accompagné d'une salinisation, voire une sodicité toxique pour le sol. Aussi l'irrigation et la conduite de celle-ci est la plaque tournante dans un développement durable des zones arides. On signale Le monde perd chaque année plusieurs hectares de terres arables à cause de la salinité du sol (IPTRID, 2006).

De ce fait, le premier objectif de l'irrigation consiste à apporter aux plantes, au moment opportun, les quantités d'eau nécessaires, afin d'éviter la baisse de rendement provoquée par le déficit hydrique mais il faut en tenir compte de la lutte contre la salinisation, car en cas de déficit pluviométrique après des irrigations répétées, les sels contenus dans l'eau d'irrigation peuvent s'accumuler dans les sols et réduire les disponibilités de l'eau pour les plantes (Kenfaoui, 1997).

Selon Ferchouche (1999), la combinaison entre une géologie favorable au stockage des sels, l'aridité du climat, l'hydrographie, l'hydrologie et l'irrigation mal contrôlée font de la salinisation du sol une menace permanente.

Cependant, les sels peuvent être lessivés en appliquant une dose d'eau plus importante que les besoins de la plante. Cette eau supplémentaire entraîne au moins une partie des sels en dessous de la zone racinaire (Van Alphen et Van hooren, 1995; Kenfaoui, 1997). La fraction de lessivage (leaching fraction = LR) dépend de la salinité du sol, de la salinité de l'eau

d'irrigation, de la sensibilité aux sels de la culture et aussi du taux de chute de rendement toléré.

Dans ce sens, le suivi du bilan salin dans les cases lysimétriques met en évidence l'importance de la gestion de l'irrigation pour lutter contre la salinité. Les résultats obtenus après la récolte indiquent qu'à la même profondeur (30 cm) les valeurs de la conductivité électrique (C.E), sont de 8,06 dS/m et 9,36 dS/m respectivement pour la case irriguée à l'ETR et la case irriguée à l'ETM. C'est-à-dire que la salinité augmente avec l'augmentation des fréquences d'irrigation Laaboudi (2009). En effet, selon Mermoud (2005), le bilan de la salinité du sol  $\Delta Ms = \text{Apports} - \text{pertes}$  (12).

$$\Delta Ms = Ir Ci + G Gc - D Cd \quad (12)$$

Avec

$\Delta Ms$  : variation de la masse de sels dans le sol,  $Ir Ci$  est les apports par irrigation  $+G Gc$  est les apports par remontées capillaires et  $D Cd$  pertes par percolation.

Il en résulte donc que la quantité de sels apportée est liée à la quantité d'eau apportée. Cependant, le volume d'eau d'irrigation et la fréquence d'application sont deux facteurs déterminants pour contrôler la salinité (FAO, 2003b).

Il faut souligner que la salinité de la solution du sol augmente lorsque le sol se dessèche, donc en irrigation avec une eau relativement chargée il faut que la fréquence des apports d'eau soit ajustée de manière à ne pas trop dessécher le sol pour ne pas induire le stress salin (INSID, 2006).

Dans le cas de manque d'eau, il est possible d'utiliser des volumes importants d'eau en fin cycle ou en début de la campagne. Dans cette situation, la quantité de sel lessivée sera importante. En effet, Un volume drainé de 46.6 mm en fin cycle a provoqué un dessalement du sol de 804 g de sel pour chaque  $m^3$  de sol (Fig. 05) (Laaboudi, 2009).

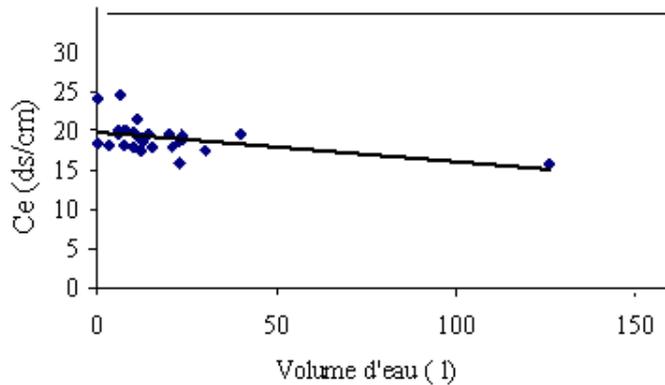


Fig. 05 : Relation entre la quantité de sel lessivée et le volume d'eau drainé

En conséquence, pour garder les sols en équilibre salin, la gestion de l'irrigation est indispensable.

### 3.6. Lutte contre les adventices

Les pertes de rendement causées par les adventices, varient selon les espèces de mauvaises herbes, la densité de peuplement et le moment de leur levée ainsi que celui du traitement (Vioix, 2004). Par conséquent, aucune période critique de lutte contre les mauvaises herbes n'est définitivement établie pour les cultures céréalières. Cependant, il est recommandé de combattre les mauvaises herbes dans les premiers stades de croissance des céréales. Au delà du stade 5 feuilles de la culture, les mauvaises herbes peuvent devenir plus difficiles à maîtriser et la culture peut être plus sensible aux blessures par les herbicides (MAAO, 2002).

En outre, la lutte curative ne donne pas toujours satisfaction. Il est souvent nécessaire de l'associer à des mesures préventives. Le broyage des résidus ou le brûlage, la destruction des repousses, le déchaumage répété, la préparation d'une structure fine en surface et l'emploi de produits chimiques contribuent au contrôle des limaces. En effet, l'expérience montre que le choix du bon produit et son mode d'emploi optimal ne permettent pas à eux seuls de maîtriser la flore adventice présente dans les cultures. Le travail du sol la période de semis des cultures sont deux éléments qui ont un rôle décisif sur la nature et le développement des espèces dans une parcelle (INRA, 2001). Ajouter à cela l'irrigation de faux semis qui consiste à humidifier le sol pour provoquer la levée de certaines mauvaises herbes et de les détruire au moment des différentes opérations de préparation du sol (labours, lit de semence etc.).

De son côté, Debaeke (1997) a signalé que la lutte intégrée contre les mauvaises herbes a un effet très positif, celle-ci suppose que l'on passe d'une technique fondée exclusivement sur l'emploi d'herbicides à l'échelle de la culture à une lutte globale à l'échelle d'une succession de cultures, intégrant la réduction d'intrants, la limitation des pollutions, la protection des organismes utiles et le maintien d'une certaine diversité floristique. L'intégration des méthodes de lutte biologiques, physiques et mécaniques est recherchée dans le cadre de l'élaboration de stratégies de désherbage durables sur le plan agronomique, économique et environnemental.

Dans la région d'Adrar, Selon la DSA (2001), la prolifération des mauvaises herbes a été aggravée par la pratique de la monoculture blé sur blé, par les semis de cultures sur chaumes ainsi que la mauvaise qualité de la semence et absence d'une lutte intégrée. Il convient de dire, d'après Pousset (1999), que la monoculture blé sur blé est habituellement présentée comme anti-écologique par les partisans de l'agriculture biologique.

### **3.7. Adaptation au changement climatique**

Le changement climatique va profondément affecter les productions agricoles. Les effets, variables suivant les régions et les productions, vont amener à des adaptations, qui combineront des modifications locales des systèmes de culture et des déplacements géographiques des systèmes de production. Les particularités de l'agriculture biologique dans ce contexte d'évolution sont à établir (Seguin, 2007)

Cependant, la question qui se pose est ; quelles politiques peuvent aider à adapter le secteur agricole face aux changements climatiques ? Le rapport AFED recommande que les variétés des cultures, la fertilisation, l'irrigation et d'autres pratiques de gestion de l'eau doivent être modifiées, en raison de leurs vulnérabilités aux changements climatiques (Tolba et Najib, 2009).

En effet, pour contrecarrer les effets néfastes de changement climatique, il y a lieu de choisir les dates de semis opportuns, des techniques d'irrigation appropriés et le matériel végétal le plus performant (Laaboudi et al., 2011a).

## **DEUXIEME PARTIE : ETUDE DU MILIEU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE LA ZONE D'ETUDE**

### **Chapitre III : CARACTERISTIQUES DU SOL, DE L'EAU ET DU CLIMAT**

#### **A. CARACTERISTIQUES DU SOL ET L'EAU D'IRRIGATION**

##### **1. Situation géographique et administrative**

Vue les caractéristiques spécifiques de la région d'Adrar, il est utile de réserver un chapitre entière pour discuter les spécificités de cette région.

Il convient de mentionner que l'Algérie, en fonction de la géologie, de la lithologie et de la topographie, s'organise en trois grandes unités structurales : le Système Tellien, les Hautes Plaines steppiques et le Sahara. Ce dernier, forme une large barrière qui sépare le domaine méditerranéen au Nord du domaine tropical au Sud. Il est constitué de plateaux où le massif volcanique du Hoggar culmine à 3000 m d'altitude, de plaines (regs et ergs) et de dépressions (sebkhas et gueltas). Il correspond à la zone Sud de l'Atlas saharien, il occupe 87 pourcent du territoire algérien mais il abrite seulement 8 pourcent de la population totale. Il est caractérisé par une pluviométrie très faible, < 100 mm.

A l'extrême Sud Ouest se situe la région d'Adrar où la végétation est contractée et localisée dans les lits d'oueds (Nedjraoui, 2004). C'est une zone hyper aride ou désertique où les sols sont pratiquement dépourvus de matière organique (Robert, 1960). Si l'altération chimique est inexistante, la désagrégation mécanique liée à la forte variation de température diurne peut conduire à une division extrême du matériau d'origine. En raison de l'absence de structure, les particules sont entraînées et triées par le vent donnant naissance à des sols qui s'opposent par leurs texture : caillouteuse, sableuse, argileuse et à fente polygonales (Duchauffour, 1997). Les sols y sont, en fait, des sols minéraux bruts et très peu évolués. Les processus chimiques d'altération des roches et des minéraux y sont très peu développés et ceux physiques de désagrégation sont au contraire dominants.

Il faut noter que la formation des sols des désert est plutôt complexe (khadraoui, 2005), car ces régions ont connu dans le passé des phases climatiques humides ayant pu causer certains des caractères actuels. Il convient de signaler, d'après les résultats obtenus par

Benslimane et al. (2008), que 74,81 % des parcours steppiques sont au seuil de la désertification.

Issue du découpage administratif de 1974, la Wilaya d'Adrar couvre une superficie globale de 427,968 km<sup>2</sup> soit 17,98 % du territoire national, pour une population estimée au 30 avril 2008 à 389,898 habitants. La densité est de 0,89 habitant/km<sup>2</sup>. Elle est composée de 11 Daïra regroupant 28 communes et 294 ksours éparpillés sur son vaste territoire (tout au long de l'Oued Messaoud et en bordure de la Grande Sebkhia de Timimoun).

La population du Chef lieu de Wilaya ne représente que 14 % de la population totale. Quatre grandes zones constituent le territoire de la wilaya à savoir :

- le Gourara : région de Timimoun
- le Touat : région d'Adrar
- le Tidikelt : région d'Aoulef.
- Le Tanezrouft : région de Bordj Badji Mokhtar.

Elle s'étend entre les coordonnées géographiques : 5°15`et 5°25`à l'Est et 31°55`et 32°00`au Nord avec une altitude moyenne de 222 m (fig.06).

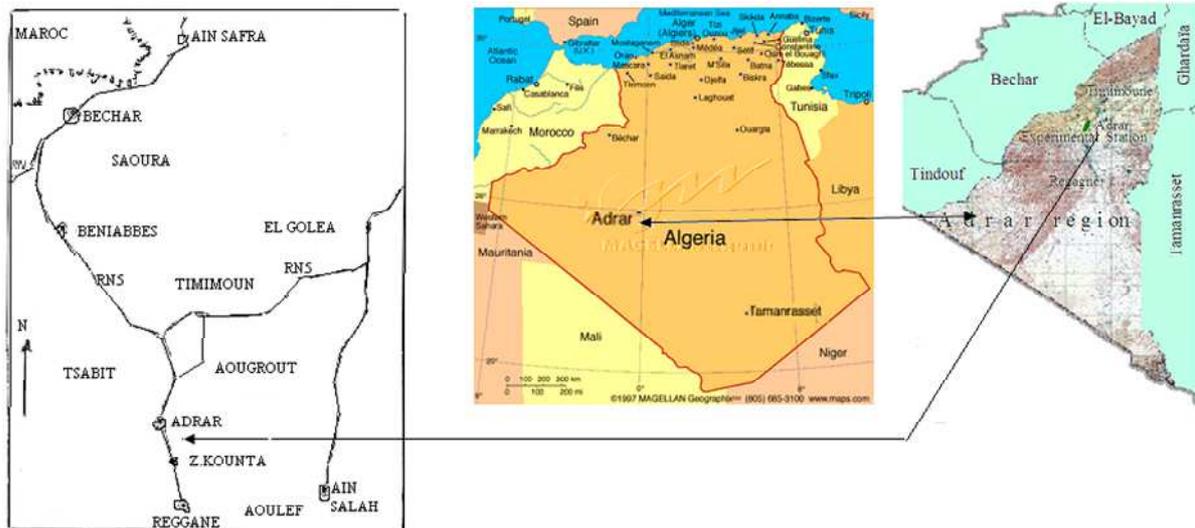


Fig. 06 : Localisation de la région d'Adrar et de la zone d'étude

Source (Raissi, 2004 ; Laaboudi et al., 2011b)

## 2. La Géologie

La région d'Adrar se situe à la terminaison sud des formations du continental intercalaire. Le continental intercalaire est formé par des argiles et des grès (crétacé), il renferme une nappe aquifère connue sous le nom de la nappe de l'Albien. La puissance de la nappe diminue de l'Est vers l'Ouest et vers la bordure du plateau (Raïssi, 2004).

### **3. Aspect géomorphologique de la région d'Adrar**

La carte géomorphologique de la région montre que celle-ci est constituée de quatre grandes formations de sol :

- **Les plateaux** : on cite par exemple, le plateau de Tademaït, son altitude atteint 520 m en moyenne. Il est caractérisé par une terrasse plane avec une pente légère sur 100 km environ. Il est exposé d'une manière intense à l'érosion éolienne et hydrique.
- **Les Ergs** : En plus des dunes de sable locales et limitées, la région connaît les plus grandes étendues de sable qui s'étalent sur des centaines de km. Il s'agit du grand Erg occidental et Erg Chèche. C'est le résultat d'une érosion éolienne depuis les aires géologiques anciennes.
- **Les plaines** : sont constituées des terres planes qui se situent entre les plateaux et les Ergs. Elles prennent deux aspects : les Reg et les Hamadas.
- **Les Sebkhass** : Elles sont situées généralement dans les dépressions. Elles étaient constituées au cours des époques géologiques anciennes pendant les périodes pluvieuses et évaporation des eaux des lacs, comme elles pouvaient être constituées récemment par les eaux de drainage (Fig.07).

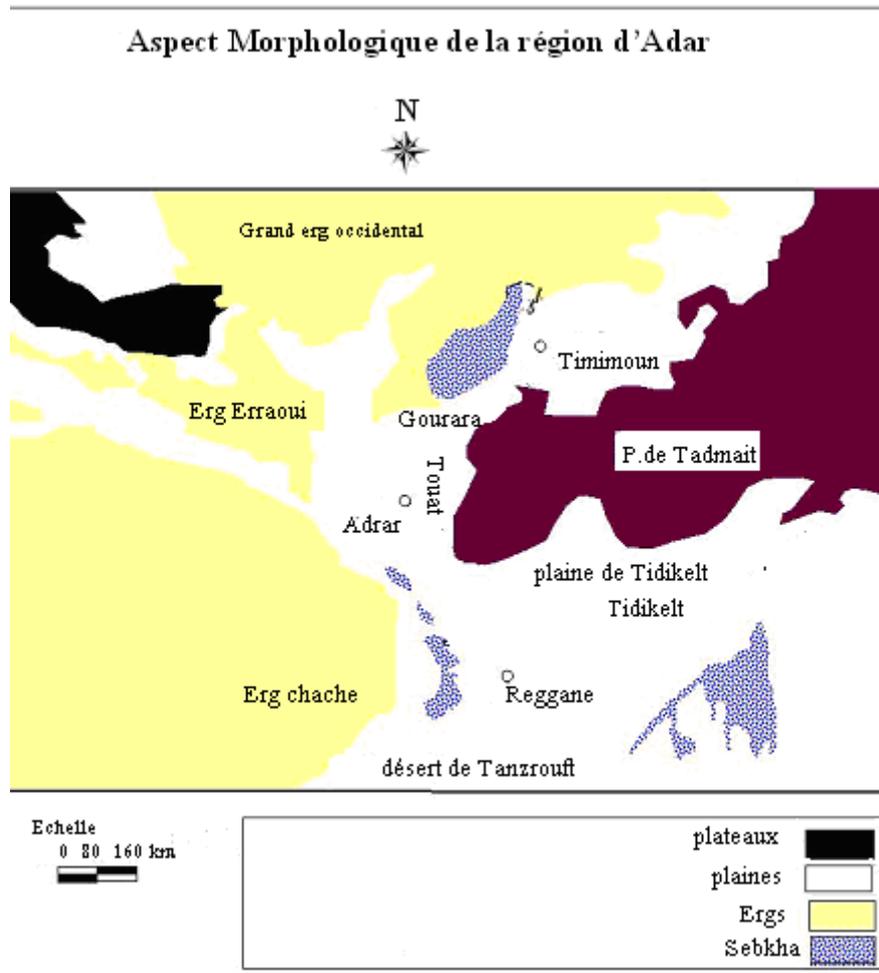


Fig. 07 : Aspect morphologique de la région d'Adrar

Source (Laaboudi et Chaâbouni, 2009)

#### 4. Aspect pédologique

Du point de vue pédologique, selon la classification française, les sols de la région, sont regroupés en trois classes.

- **Sols minéraux bruts** : ils résultent de l'action du vent, soit par ablation soit par accumulation ou apports. Ces sols concernent la plus grande partie du Sahara.
- **Sols peu évolués** : Le substrat de ces sols est très perméable, l'eau s'y infiltré rapidement et l'évolution pédologique reste faible.
- **Sols halomorphe** : sols à substrat peu perméable, l'évolution pédologique est donc orientée obligatoirement vers le phénomène de salure et généralement d'une manière accentuée par suite des conditions d'évaporation intense.

## **5. Hydrologie et hydrogéologie**

La nappe du continental intercalaire est le seul réservoir d'eau dans la région, elle est sollicitée par les foggaras, les puits traditionnels et les forages de mise en valeur. Sa capacité est estimée à environ 70 milliards de m<sup>3</sup>, de nature fossile à part les minimales crues des oueds descendants de l'Atlas saharien et les pluies exceptionnelles. L'épaisseur du continental intercalaire (CI) est de l'ordre de 150 à 400 m. Le niveau statique de la nappe oscille entre 13 à 45 m par rapport à la surface du sol et peut atteindre 100 m au niveau du plateau de Tadmaït (forages d'Ain Belbel). L'écoulement des eaux de la nappe aquifère du continental intercalaire est de direction Nord – Sud, Nord – Est (Raïssi, 2004).

## **6. Les eaux d'irrigation**

La nature des eaux d'irrigation diffère d'une région à une autre, la conductivité électrique varie de 1 à 5 ms/cm, on distingue globalement deux types :

Eau douce, où la salinité se situe au voisinage de 1 ms/cm, cette eau se trouve généralement à l'amont des palmeraies, et regroupe les eaux captées par les foggaras, la plus part des forages d'eau potable et les forages d'irrigation sous pivots (forage d'Aougrout, ce = 1,07 ms/cm).

Eau légèrement salée à salée : sa conductivité électrique varie de 2 à 6 ms/cm, la concentration des sels augmente à proximité des palmeraies. Ces eaux sont captées généralement par les puits peu profonds, elles sont alimentées partiellement par les eaux de drainage (CE du puits de la station expérimentale est supérieure à 5 ms/cm) (tableau 08).

Tableau 08 : analyse de l'eau de la station (Puits de la station INRA)

| Paramètres physico chimiques | Résultats | Minéralisation globale | Résultats |
|------------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| Ph                           | 7,66      | Calcium c++ mg/l       | 308       |
| Conductivité ms /cm          | 5,87      | Magnésium Mg++ mg/l    | 158       |
| Turbidité eau brute NTU      |           | Sodium Na+ mg/l        | 700       |
| Turbidité eau sec NTU        |           | Potasse K+ mg/l        | 55        |
|                              |           | Chlorure Cl- mg/l      | 1150      |
|                              |           | Sulfate SO4-- mg/l     | 800       |
| Paramètres de pollution      |           | Bicarbonate HCO3 mg/l  | 290       |
| Oxygène dessous mg/l         | 8,05      | Carbonate CO3 mg/l     | 0         |
| Ammonium NH4 mg/l            | 0,02      | Silice sio2 mg/l       | -         |
| Nitrate NO2 mg/l             | 0,00      | Th °F mg/l             | 140       |
| Nitrate NO3 mg/l             | 78,00     | TAC mg/l               | 24        |
| O. Phosphate mg/l            | 00        | TA mg/l                | 0         |
| Mat.ox (mil.Ac) mg/l         |           | Minéralisation mg/l    | 3639      |
| Fer mg/l                     |           | Somme des ions mg/l    | 3538      |

## 7. Les foggaras

C'est un ancien procédé original et remarquable qui a connu un grand essor dans le grand Sud Ouest algérien, en particulier à travers la wilaya d'Adrar. Presque toutes les foggaras se situent à la périphérie du plateau de Tadmaït ou près d'oued Messaoud.

De l'Est à l'Ouest, les foggaras présentent un réseau hiérarchisé en amont plus ou moins parallèle, tout en s'organisant en direction de la palmeraie. Ce système hydraulique fort adapté aux conditions climatiques de la région, capte la nappe du continental intercalaire et draine sur un long chemin jusqu'à la palmeraie. L'existence de ce système de drainage est liée à la présence d'une nappe d'eau peu profonde et d'une dépression naturelle (Fig. 08).

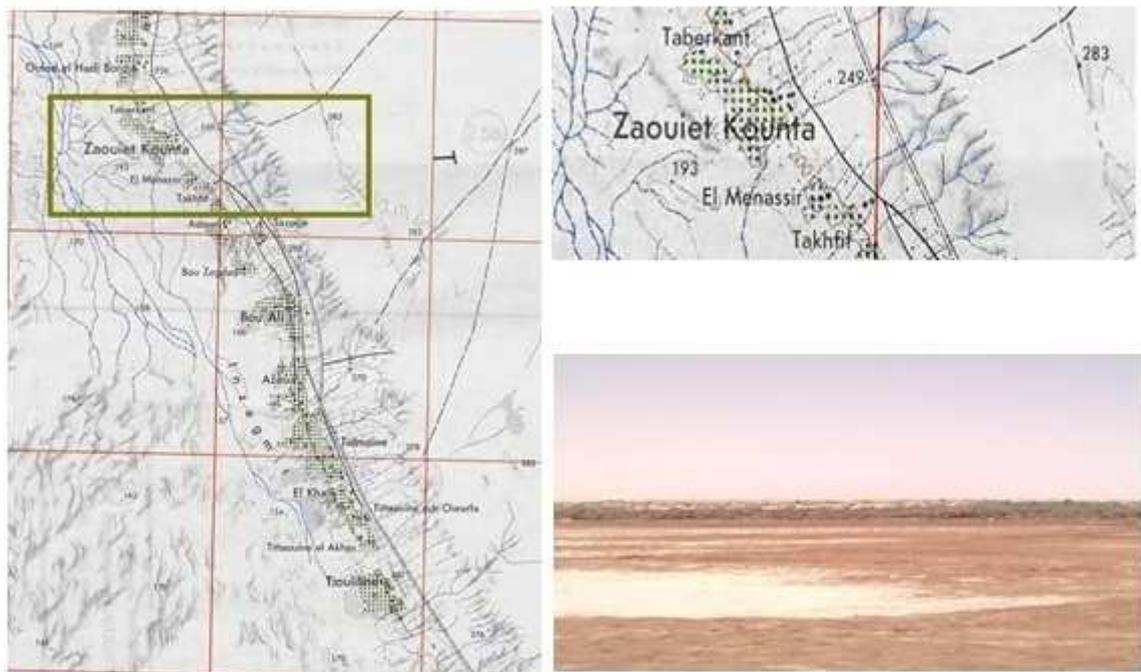


Fig. 08 : Carte topographique : Localisation des foggaras et leurs directions

Source ((Laaboudi et Chaâbouni, 2009)

Le terme foggara correspond à une galerie souterraine qui draine les eaux de la nappe aquifère du plateau vers les terrains irrigués situés dans la dépression.

La foggara se compose de plusieurs puits avec des profondeurs variables réunis à leur base par une galerie. Elle est constituée par deux parties :

- Une partie amont, sa profondeur atteint le niveau statique de la nappe, c'est la partie active ou drainante.
- Une partie aval qui permet l'écoulement de l'eau vers les jardins grâce à sa pente ; c'est la partie inactive. Généralement, la direction des foggaras est parallèle au sens d'écoulement de la nappe aquifère.

Pour connaître la situation de l'ensemble des foggaras d'Adrar, l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques a organisé une campagne d'inventaire et de jaugeage des débits des foggaras. Il en résulte que la wilaya d'Adrar réunit 1400 foggaras dont 907 foggaras pérennes (en services) et 493 foggaras taries (Ansari, 2009). Ce système d'adduction de l'eau, connaît aujourd'hui des contraintes socio économiques importantes. C'est la raison pour laquelle sa pérennité devient douteuse (Blama et Laaboudi, 2009).



Fig. 09 : de partage d'eau de la foggara.  
1 : outil de partage, 2 : Ouvrage de répartition (Kasria) .

Le partage des eaux de la foggara (fig.09) se fait par un outil traditionnel qui s'appelle « Chegfa ». L'unité de mesure est le « kirate ». Cette opération est effectuée par un spécialiste nommé « Kial ». Les eaux sont amenées aux jardins et collectées dans des bassins en Argile ou en béton armé (fig.10).



Fig. 10 : Bassins d'accumulation des eaux d'irrigation 1 bassin en Argile 2 : Bassin en ciment" utilisé généralement pour accumuler les eaux de pompage

A l'agriculture traditionnelle oasisienne des ksours très ancienne et irriguée par les foggaras, viennent s'ajouter les nouveaux périmètres de mise en valeur, introduisant de nouvelles techniques d'exploitation des ressources en eau et en sol (Bouaboub et al, 2008). Cependant cette expérience récente de la mise en valeur agricole dans la région a met en évidence la fragilité du milieu (eau-sol-climat et végétation) (khadraoui, 2005).

## **8. Types des sols et systèmes de production**

Les sols de la région sont utilisés par deux systèmes agricoles :

- Le système traditionnel.
- Le système de mise en valeur créé récemment suite à l'apparition de la loi 1983 de l'Accession à la Propriété Foncière Agricole l'APFA.

De ce fait, le mode d'utilisation de l'eau diffère en conséquence.

### **8.1. Sols du système traditionnel**

Ce système est caractérisé par l'utilisation des forces naturelles pour l'exploitation de l'eau souterraine, Il s'agit de la force de la gravité et la remontée de l'eau par capillarité. Dans le premier cas on parle des palmeraies irriguées par les foggaras et le second concerne le système des "Ghouttes" ou les "Bardates".

#### **8.1.1. Les sols irrigués par les foggaras**

Ce type d'irrigation exige une topographie particulière qui permet l'adduction des eaux souterraines à la surface du sol par la simple force de gravité. A cet effet, la plupart des palmeraies de la région sont situées sur les rives des oueds.

Selon Vinas et Joukov (1974), les sols de ces palmeraies appartiennent au groupe des sols peu évolués d'apports éolien, éocolluvial et éoalluvial. Ils sont situés sur les terrasses d'apport faisant la transition entre la terrasse d'érosion au dessus et les Sebkhas au dessous.

Cette zone est caractérisée par des pentes plus au moins fortes, la profondeur du sol est variable, mais elle dépasse généralement 80 cm. La nature de dépôt diffère selon la distance du lit d'oued. Dans la région d'Aougrout (Gourara) dans laquelle on trouve généralement de l'amont vers l'aval :

- Des sols peu évolués d'apport éolien formé par des accumulations d'origine éolienne. On peut distinguer facilement une stratification formée par des dépôts anciens de sable en profondeur et de sol remanié par les apports anthropiques sous forme d'amendements.

- Les sols peu évolués d'apport éocolluvial, les dépôts colluviaux et éoliens peuvent être formés simultanément ou séparément.
- Les sols peu évolués d'apport éoalluvial sont peu fréquents, mais on les trouve surtout dans les zones d'arrêt des oueds.

La valeur agronomique de ces sols est généralement intéressante, car ils sont profonds, bien drainés, fertiles, leurs aptitudes culturales diffèrent légèrement selon le type de dépôts. Les plus proches du lit d'oued sont généralement les plus fertiles.

Les Sebkhas constitués généralement dans les endroits d'accumulation des eaux de drainage. Ils sont situés dans les points les plus profonds à l'extrémité des palmeraies.

### **8.1.2. Sols irrigués par le système du «Ghoutte »**

C'est un système très ancien, il existe dans la zone de Charuine située à l'extrémité sud du grand Erg occidental. La topographie et les reliefs rendent difficile la création et la préservation des foggaras. Dans ces endroits, les palmeraies sont installées sur les sols minéraux bruts.

## **8.2. Sols du système de mise en valeurs**

Ce système comprend deux types, selon la superficie de l'exploitation : la petite et la grande mise en valeur.

### **8.2.1. La petite mise en valeur**

Il s'agit des exploitations de 1 à 5 ha. Elle est située généralement à la périphérie immédiate des oasis, elle est considérée comme une extension du système traditionnel. Le type de sol diffère selon sa situation géographique : il est identique à celui de la palmeraie si la mise en valeur est située juste à proximité, et ressemble à celui de la grande mise en valeur si elle est située en amont des oasis.

### **8.2.2. La grande mise en valeurs.**

Il s'agit des exploitations de plus de 50 ha. Ces périmètres sont généralement dans les terrasses d'érosion éolienne et plus rarement dans des terrasses d'accumulation. Ces sols sont

formés généralement à partir de l'altération physique et chimique des roches parentales et très faibles apports éoliens.

Malgré leur richesse en potassium et en calcaire, la valeur agronomique de ces sols est généralement faible, car l'analyse chimique de quatre périmètres de mise en valeur montre leur pauvreté en phosphore et en azote et leur contenance presque nulle en matière organique. Le taux de sable dépasse généralement 70%

## 9. Le pH et la capacité d'échange cationique

L'alcalinité enregistrée dans les sols de la région d'Adrar revient à l'aridification du climat, l'absence de lessivage et une pluviométrie insignifiante. Les valeurs du pH se situent entre 7,5- 8,8 traduisant un milieu alcalin pour la plupart des périmètres.

L'alcalinité est associée le plus souvent aux sols salés, la sodicité se traduit par la présence de l'ion  $\text{Na}^+$  sur le complexe absorbant et dans la solution du sol. Cette sodicité est due à une forte évapotranspiration avec remontée des sels en surface.

La capacité d'échange cationique (CEC), exprimée en méq/100 g de sol traduit la richesse du sol en éléments nutritifs. Elle exprime le total des charges négatives du sol disponible pour la fixation des cations métalliques ou d'ion  $\text{H}^+$ .

Les valeurs obtenues indiquent que la capacité d'échange cationique est très faible. Elle est très inférieure à la valeur souhaitable. Car selon Martin et Nolin (1991) cette teneur est appartient à la classe faible. Les coefficients de variation (cv) indiquent que le sol du même site est très hétérogène. L'analyse de la variance montre que la différence entre les moyennes des différents sites est significative (tableau 09).

Tableau 09 : Capacité d'échange cationique (CEC en méq/100 g)

| Echantillons | Parcelle 1 | Parcelle 2 | Parcelle 3 | Parcelle 4 |
|--------------|------------|------------|------------|------------|
| 1            | 11,06      | 10,24      | 9,70       | 21,45      |
| 2            | 4,54       | 7,20       | 13,65      | 12,38      |
| 3            | 6,66       | 8,72       | 14,67      | 20,79      |
| 4            | 10,76      | 7,96       | 11,94      | 4,21       |
| 5            | 6,01       | 10,24      | 7,39       | 14,45      |
| 6            | 2,01       | 10,24      | 1,94       | 16,04      |
| 7            | 8,20       | 7,20       | 2,36       | 24,52      |
| 8            | 1,54       | 11,76      | 8,86       | 11,47      |

Tableau 09 : Capacité d'échange cationique (CEC en méq/100 g) (suite)

|            |       |       |       |        |
|------------|-------|-------|-------|--------|
| 9          | 12,83 | 7,20  | 4,66  | 8,83   |
| 10         | 7,29  | 7,20  | 9,64  | 7,29   |
| Moyenne    | 7,09  | 8,796 | 8,481 | 14,143 |
| Ecart type | 3,77  | 1,70  | 4,42  | 6,61   |
| CV%        | 53    | 19    | 52    | 47     |

## 10. La salure

Les sols sont le plus souvent salés, ceci est dû à une forte évaporation. Certains sols présentent des valeurs de conductivité électrique très élevées, elles peuvent atteindre 40 mmhos/cm. Cependant, en présence d'une faible salinité des eaux d'irrigation et d'une texture grossière, ces sols peuvent être récupérables.

## 11. La matière organique

La matière organique est indispensable pour la formation d'agrégats et pour l'obtention d'une structure stable, une bonne porosité et une capacité d'échange cationique élevée. Toute l'activité biologique dépend de cette dernière. Cependant, les sols étudiés sont pauvres à très pauvres en matière organique. Les valeurs enregistrées sont comprises entre 0,1–1,5 %, donnant lieu à des sols pauvres en matière organique (normes INRA –France).

## 12. Le rapport Carbone-Azote (C/N)

La capacité minéralisatrice du sol est appréciée par le rapport carbone/azote. Il traduit aussi la richesse de l'humus en azote. Les teneurs sont souvent inférieures à 5,75 en moyenne dans les sols des oasis. Dans les sols de la mise en valeur ce rapport est encore plus bas, il est inférieur à 1,9 en moyenne.

## 13. Les éléments fertilisants

### 13.1. L'azote

L'analyse de cet élément a montré que les sols sont pratiquement dépourvus d'azote, ceci revient à la minéralisation rapide. Les teneurs oscillent entre 0,06 dans les nouvelles

terres à 0,11 pour les terres anciennes. Dans certains endroits il se trouve à l'état de traces. Des amendements organiques de fond et engrais azotés seront nécessaires pour une mise en valeur rentable.

### 13.2. Le phosphore

Les sols des sites étudiés se caractérisent par des taux en phosphore total compris entre 30 ppm (pour la mise en valeur) et 50 ppm pour les sols oasiens. Nous avons enregistré une variabilité d'un endroit à un autre.

### 13.3. Le potassium

Les sols de la région sont en général moyennement riches en potasse assimilable. Les valeurs obtenues varient entre 0,31 et 0,49 méq/100 g de terre. Les nouveaux périmètres sont souvent plus riches que les anciens. On trouve dans certains sol 1méq/100 g qui correspond à un niveau moyennement riche.

## 14. Conditions pédologique des essais

Pour réaliser les analyses physico-chimiques du sol, des prélèvements d'échantillons de sol ont été effectués avant le semis de chaque campagne et envoyés aux laboratoires de sols à la station expérimentale de L'INRAA à Mahdi Boualem (Alger). Les résultats de l'analyse en moyennes sont présentés dans les tableaux 10,11, 12, 13, 14, 15 et 16.

Tableau 10 : Analyse chimique (sol de la station expérimentale)

| Echantillons | H%  | pH<br>eau | Ce<br>Mmho/cm | Calcaire<br>total % | Calcaire<br>actif % | k assi<br>meq/100g | P2O5<br>ppm | Azote total<br>(N %) | Carbon<br>e (C%) |
|--------------|-----|-----------|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------|----------------------|------------------|
| 1            | 0,6 | 8,2       | 0,3           | 8,4                 | 0,2                 | 0,16               | 36,21       | 0,12                 | 0,25             |
| 2            | 0,6 | 8,3       | 0,4           | 8,4                 | 0,6                 | 0,16               | 36,21       | 0,10                 | 0,25             |
| 3            | 1,2 | 8,1       | 0,5           | 8,4                 | 0,6                 | 0,18               | 60,62       | 0,2                  | 1,2              |
| 4            | 1   | 8,3       | 0,4           | 8,4                 | 0,6                 | 0,18               | 65,65       | 0,09                 | 0,6              |
| 5            | 1,3 | 8,2       | 0,4           | 8,0                 | 1,0                 | 0,18               | 55,71       | 0,07                 | 1,04             |

Il faut noter que la conductivité électrique du sol (Ce) est effectuée en extrait dilué 1/5. Les normes d'interprétation indiquent que le sol est salé. La plus part des cultures sensibles ne convient pas dans ce sol. Le pH est alcalin. Dans certaines parcelles la teneur en phosphore est importante. C'est le reliquat du précédent cultural (Luzerne) qui avait reçu des apports en phosphore à chaque début de la campagne.

Tableau 11 : Bases échangeables

| Echantillons | Potassium K+<br>Meq /100g | Sodium Na+<br>Meq/100g | Mangésium Mg++<br>Meq/100g | Calcium Ca++<br>Meq/100g | CE C<br>Meq/100g |
|--------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| 1            | 0,26                      | 0,85                   | 1,64                       | 3,75                     | 8,71             |
| 2            | 0,32                      | 0,85                   | 1,23                       | 4                        | 8,71             |
| 3            | 0,31                      | 0,42                   | 2,46                       | 2,25                     | 8,71             |
| 4            | 0,33                      | 0,85                   | 1,23                       | 2,75                     | 5,21             |
| 5            | 0,33                      | 0,42                   | 2,05                       | 3,5                      | 6,96             |

La texture du sol est sableuse, le pourcentage du sable peut dépasser 85% dont la grande partie est représentée par le sable fin (Tableau 12).

Tableau 12 : Analyse granulométrique (sol de la station expérimentale)

| Echantillons | Argile A % | Limon fin % | Limon grossier % | Sable fin % | S. grossier % |
|--------------|------------|-------------|------------------|-------------|---------------|
| 1            | 6,25       | 3,00        | 3,83             | 68,02       | 18,90         |
| 2            | 4,25       | 1,00        | 8,78             | 67,28       | 19,69         |
| 3            | 9,25       | 3,00        | 3,89             | 68,77       | 18,15         |
| 4            | 8,00       | 6,00        | 3,45             | 60,18       | 21,34         |
| 5            | 6,50       | 6,50        | 3,75             | 53,73       | 28,4          |
| Moyennes     | 6,85       | 3,90        | 4,74             | 63,59       | 21,29         |

Sous pivot, le pH du sol est plus alcalin que celui de la station. La matière organique est négligeable et les taux d'azote est insignifiant (Tableau 13).

Tableau 13 : Analyse chimique sous pivot (Aougrouit)

| pH eau | Ce<br>mmho/cm | Calcaire<br>total % | Calcaire actif<br>% | k assi<br>meq/100g | P2O5 ppm | Azote total<br>(N %) | Carbone<br>(C%) |
|--------|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------|----------------------|-----------------|
| 8,89   | 2,20          | 22,47               | 2,64                | 0,63               | 30,54    | 0,06                 | 0,11            |

Tableau 14 : Analyse chimique sous pivot d'Aougrouit (suite)

| CO   | HCO  | SO4  | Cl-  |
|------|------|------|------|
| 2,96 | 3,05 | 0,61 | 4,94 |

Tableau 15 : Bases échangeables (site d'Aougrouit)

| Echantillons | CEC<br>Meq/100g | Sodium Na+<br>Meq/100g | Potassium K+<br>Meq /100g | Mangésium Mg++<br>Meq/100g | Calcium Ca++<br>Meq/100g |
|--------------|-----------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
|              | 9,75            | 1,08                   | 0,49                      | 1,47                       | 4,98                     |

L'analyse granulométrique indique que le sol d'Aougrouit contient un taux de limon élevé par rapport à celui de la station expérimentale d'Adrar (Tableau 16).

Tableau 16 : Analyse granulométrique (site d'Aougrouit)

| Argile A % | Limon fin % | Limon grossier % | Sable fin % | Sable grossier % |
|------------|-------------|------------------|-------------|------------------|
| 7,04       | 12,54       | 11,76            | 57,89       | 10,08            |

## B. CARACTERISTIQUES DU CLIMAT

### 1. Evolution des paramètres climatiques

Bien que les régions sahariennes se ressemblent en ce qui concerne les facteurs climatiques, néanmoins, la région d'Adrar est caractérisée par une aridité plus accentuée par rapport aux autres régions du Sahara (moins de 25 mm de pluie/an).

Une différence sensible du point de vue paramètres climatiques entre les différentes zones de la région d'Adrar est ressentie. Ainsi Guillerrou (1993), a signalé que le Touat, le Gourara et le Tidikelt sont parmi les zones les plus arides au monde. Le calcul de l'indice d'aridité fait nettement ressortir l'extrême aridité de ces régions, qui présentent des valeurs excessivement basses par rapport à d'autres régions sahariennes : 0,40 pour Gourara, 0,32

pour Adrar (Touat) 0, 15 pour Aoulef (Tidikelt), contre 0,46 pour Tamanrasset (Hoggar) et 1,21 pour Ghardaïa (M'zab).

### 1.1. Diagnose générale de Köppen

Selon la Diagnose générale de Köppen, si la relation (13) est vérifiée le climat est désertique.

$$P < t + \frac{14C}{C+1} \quad (13)$$

Où P est la moyenne annuelle de la pluviométrie (mm), t est la température moyenne annuelle en degrés Celsius et C est l'indice de continentalité pluviale. C est donné par la relation suivante :

$$C = \frac{P_E}{P_H} \quad (14)$$

Avec  $P_E$  module pluviométrique des six mois à jours longs et  $P_H$  celui de 6 mois à jours courts. Dans notre cas ;

$$C = \frac{P_E}{P_H} = \frac{10,30}{13,69} = 0,75 \quad (15)$$

Et

$$P < t + \frac{14C}{C+1} < 26,1 + \frac{14 \times 0,75}{0,75+1} = 32,1 \quad (16)$$

La moyenne annuelle de la température  $t = 26,1$  °C et la moyenne annuelle de  $P = 23,99$  mm/an. Donc la condition est vérifiée, cela veut dire que le climat est désertique.

### 1.2. Diagramme ombrothermique de Bagnols et Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnols est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèche et humide de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), avec  $P=2T$ .

La figure 11 met en relief le Diagramme Ombrothermique de la région d'Adrar établi à partir des données pluviométriques et thermiques moyennes mensuelles calculées sur une période de 25 ans. Il confirme que la région d'Adrar est sèche pendant toute l'année.

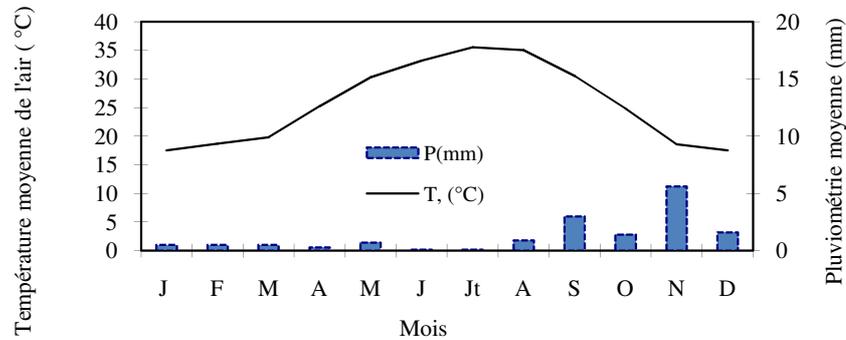


Fig.11: Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен de la région d'Adrar (moyenne sur 25 ans)

### 1.3. Indice d'aridité :

Selon FAO (1992), les environnements arides sont extrêmement divers par leurs formes de terrain, leurs sols, leur faune, leur flore, leurs équilibres hydriques et les activités humaines qui s'y déroulent, Du fait de cette diversité, on ne peut pas donner de définition pratique des environnements arides. Cependant, l'élément commun à toutes les régions arides est l'aridité.

Celle-ci s'exprime généralement en fonction des précipitations et de la température. Une "représentation" utile de l'aridité est l'indice d'aridité climatique suivant donné par la formule suivante :

$$I_a = \frac{P}{ETP} \quad (17)$$

où P = précipitation et ETP = évapotranspiration potentielle, calculée par la méthode de Penman, en tenant compte de l'humidité atmosphérique, du rayonnement solaire et du vent.

Dans ce contexte Malagnoux et Atzmon (2007) ont souligné qu'à cause de son indice d'aridité ( $I_a < 0,03$ ), la wilaya d'Adrar est considérée comme une zone hyperaride (ou désert absolu), où les hautes températures conduisent à l'augmentation de l'évaporation et à l'aggravation du manque d'eau. Les résultats obtenus montrent que  $I_a = 0,027 < 0,03$  (18) confirme cette réalité.

$$I_a = \frac{p}{ETP} = \frac{25}{931} = 0,027 \quad (18)$$

L'indice d'aridité (I) (De Martonne, 1923) est défini comme étant le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles (P) et la moyenne des températures annuelles (T).

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (19)$$

Il faut souligner que les régions hyperarides ont un indice d'aridité inférieur à 5. Ces régions correspondent à des déserts absolus. Les précipitations annuelles sur ces régions sont inférieures à 25 mm par an. Dans notre cas, l'indice d'aridité de Martonne est très inférieur à 5. Il confirme que la région a un climat hyperaride (20).

$$I = \frac{P}{T + 10} = \frac{25}{26,1 + 10} = 0,69 \quad (20)$$

#### **1.4. Evolution de la température**

Les amplitudes thermiques sont étendues aussi bien au cours de l'année qu'au cours du mois et de la journée. Le maximum absolu atteint les 50 °C en été (juillet, août) et le minimum absolu descend à - 3°C. Les gelées sont rares mais peuvent être enregistrées voire causer des dégâts catastrophiques.

##### **1.4.1. Tendances générales des températures moyennes annuelles :**

Malgré l'existence des fluctuations interannuelles, tout au long de la période de 30 dernières années, on constate visiblement que les températures moyennes annuelles tendent vers la croissance (Fig.12a).

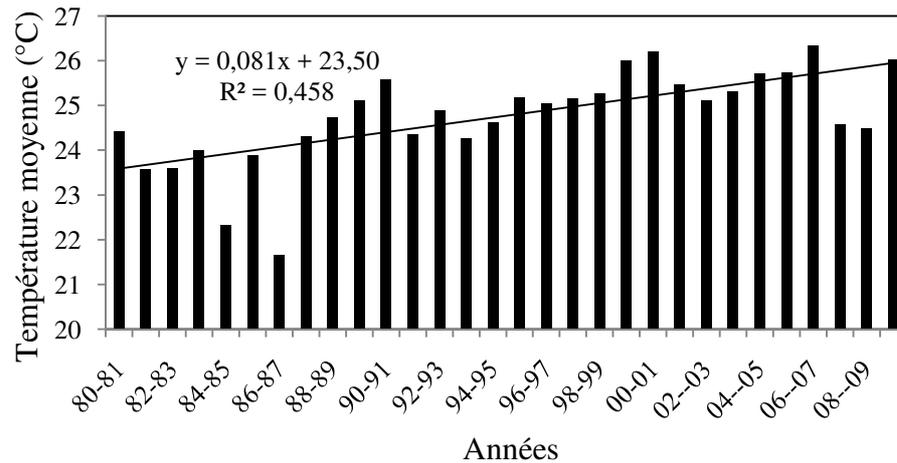


Fig.12 a: Evolution des températures moyennes annuelles durant la période 1980-2010

### 1.4.2. Evolution des températures extrêmes

Les minimas absolus ont une tendance positive plus rapide, si on trace la courbe de tendance on obtient une pente qui indique une augmentation moyenne annuelle de la température équivalente à 0,12 °C/an (Fig.12 b).

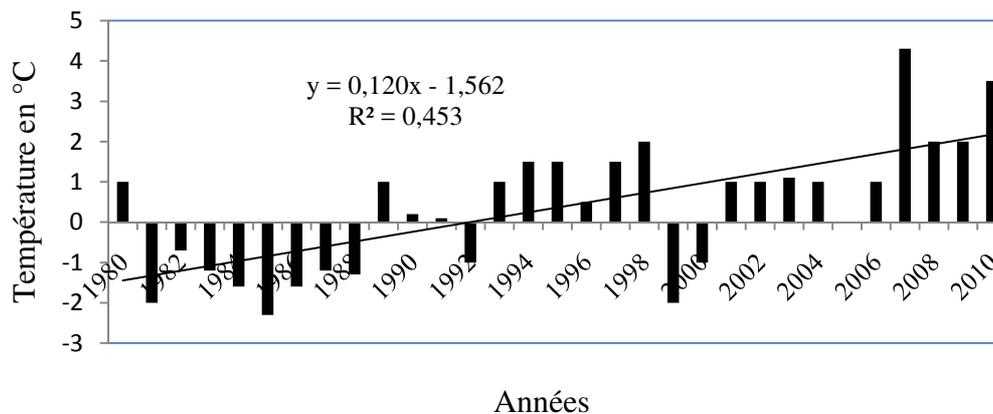


Fig.12 b :Evolution des minimas absolus (1980- 2010)

La tendance générale des maxima absolus est positive mais d'une façon très lente. Durant la période des années 1990 les variations sont plus stables. C'est la période où les maxima absolus ont atteint 50 °C. La valeur la plus faibles (47°C) est enregistrée en 1982, 1988 et 2004 (Fig.12c).

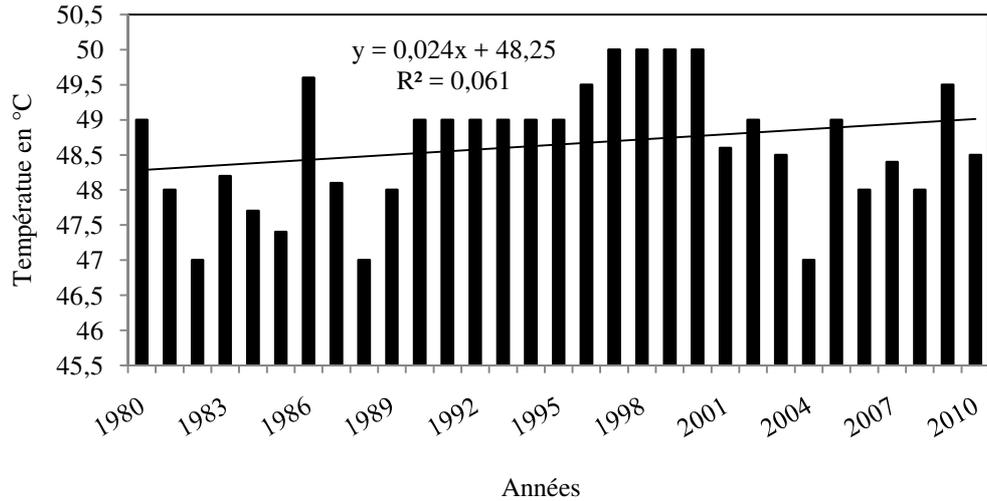


Fig.12c: Evolution des maxima absolus (1980-2010)

### 1.5. La pluviométrie

Bien que la pluviométrie ne constitue pas une source d'eau pour l'irrigation, elle peut y avoir un effet sur les besoins en eau des cultures pendant une courte période. La courbe ci dessous (Fig.13) indique que de temps en temps ils existent des pluies torrentielles où l'intensité des précipitations peut être forte et peut causer des dégâts catastrophiques. Comme c'est le cas de l'année 2004 qui est considérée comme une année exceptionnelle (69,8 mm). Les pluies orageuses du mois d'Avril (51,5 mm) ont causé des dégâts matériels importants.

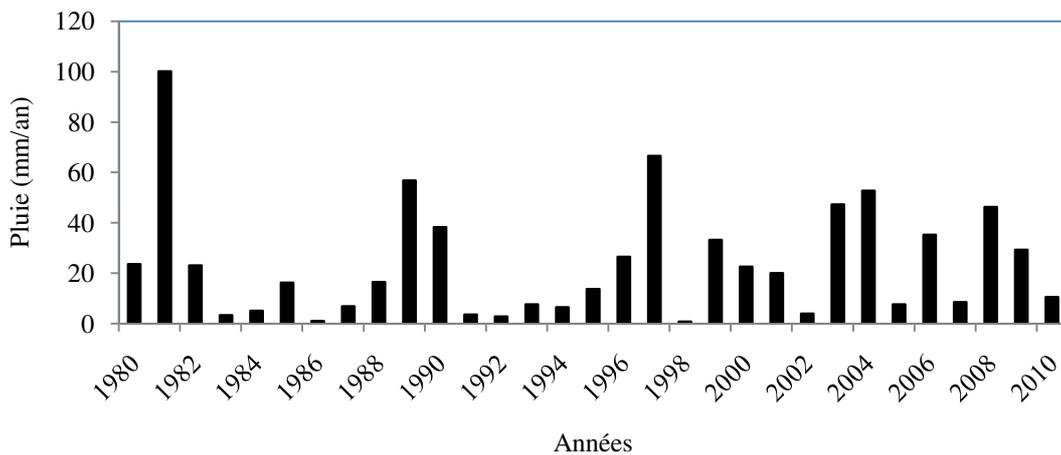


Fig.13: Pluie annuelle durant la période 1980-2010

## 2. Caractéristique du climat durant la période d'essai

### 2.1. Température

Pendant les trois années des essais, la température varie du 0°C en hiver à 49°C en été (tableau 17). Le minimum absolu est enregistré souvent au mois de décembre et le maximum absolu est enregistré au mois de juillet.

Tableau 17 : Variation des températures extrêmes et les moyennes mensuelles au cours de la période d'essai.

| Mois      | t    | T    | m     | M     | M-m   | $\frac{M+m}{2}$ |
|-----------|------|------|-------|-------|-------|-----------------|
| Janvier   | 1    | 28,5 | 5,56  | 20,36 | 14,8  | 7,4             |
| Février   | 1    | 32,5 | 8,09  | 25,5  | 17,42 | 8,71            |
| Mars      | 7    | 37,2 | 12,74 | 28,57 | 15,83 | 7,92            |
| Avril     | 10   | 43   | 18,06 | 34,81 | 16,74 | 8,37            |
| Mai       | 11,2 | 45   | 23,35 | 38,97 | 15,62 | 7,81            |
| Juin      | 20,5 | 47,5 | 26,24 | 43,12 | 16,88 | 8,44            |
| Juillet   | 26   | 49   | 30,85 | 45,95 | 15,1  | 7,55            |
| Aout      | 26   | 48   | 29,45 | 45,22 | 15,76 | 7,88            |
| Septembre | 19   | 45   | 24,6  | 40,98 | 16,38 | 8,19            |
| Octobre   | 11,3 | 42   | 22,57 | 34    | 11,43 | 5,71            |
| Novembre  | 6,4  | 35   | 14,35 | 27,59 | 13,23 | 6,62            |
| Décembre  | 0    | 31,5 | 7,04  | 20,82 | 13,78 | 6,89            |

T est le minimum absolu observé, t est le maximum absolu observé, m est la moyenne des minima mensuels, M est la moyenne des maxima mensuels, M –m est la moyenne des écarts mensuels et  $\frac{M+m}{2}$  est la moyenne mensuelle.

Durant les trois derniers mois de l'année les températures moyennes mensuelles sont presque identiques (Fig.14).

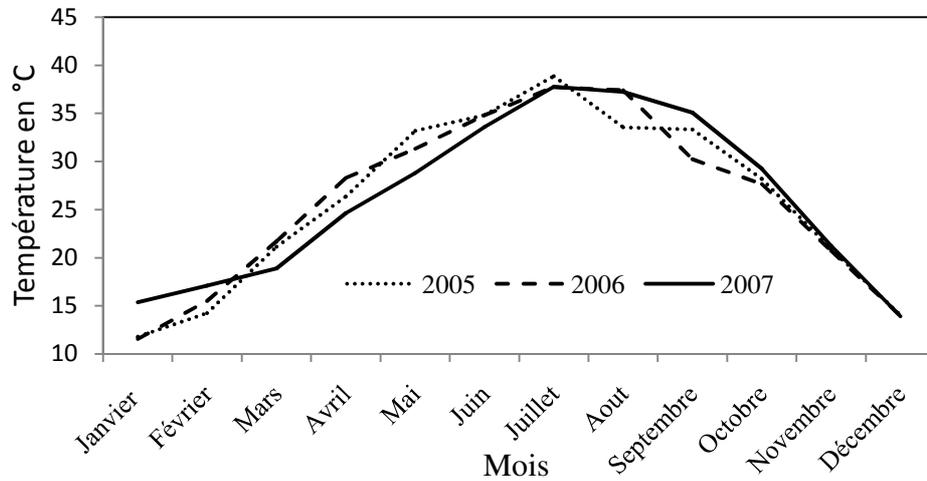


Fig. 14: Evolution de la température au cours de l'année

### 2.3. Humidité relative de l'air

Elle est souvent inférieure à 50 %. Elle dépasse cette valeur pendant quatre mois de l'année (Novembre, décembre, janvier et février) (Fig. 15). Pendant certaines périodes très courtes (jours pluvieux), elle peut s'approcher de 100 %. La rosée est un évènement très rare.

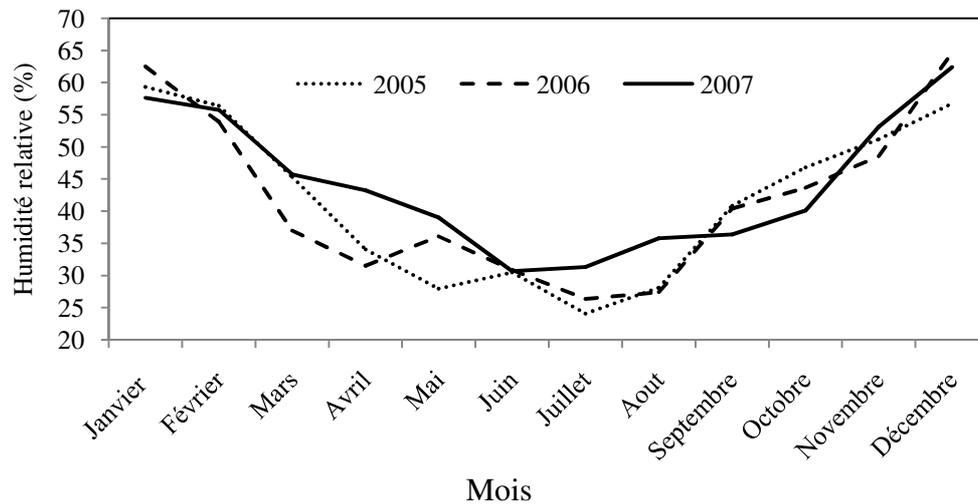


Fig. 15: Evolution de l'humidité relative au cours de l'année

### 2.3. Le vent

Il souffle presque en permanence, la direction dominante est Nord-est. En direction ouest, il souffle souvent en violentes tempêtes de sable exerçant une double action : l'érosion et le transport et la sédimentation (Fig. 16). Bien que la vitesse moyenne parait faible, la vitesse instantanée peut être très grande et peut atteindre 100 km/heure, elle peut causer des dégâts importants sur les cultures et sur les systèmes de protection (serres, murs et brise-vent).

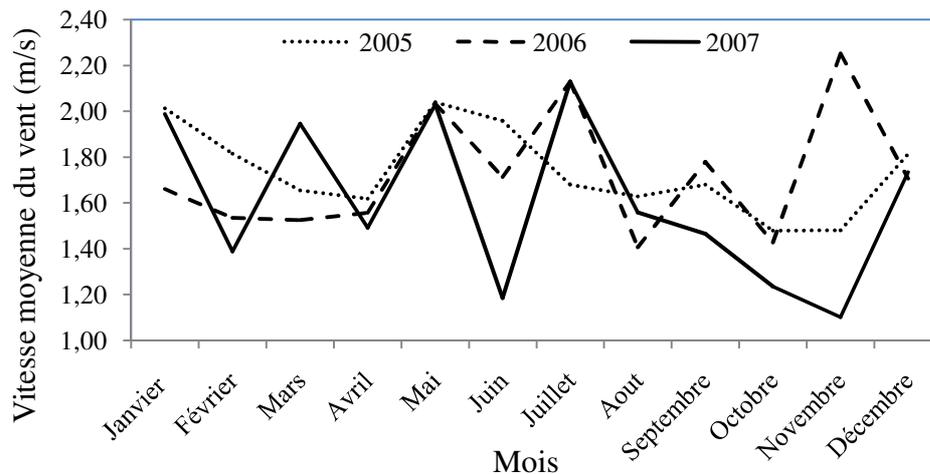


Fig .16: Variationn de la vitesse moyenne du vent au cours de l'année

### 2.4. Durée d'ensoleillement

La dure de l'insolation est souvent supérieure à 7 heures par jour. Ceci indique que le ciel est dégagé la plus part du temps (Fig. 17).

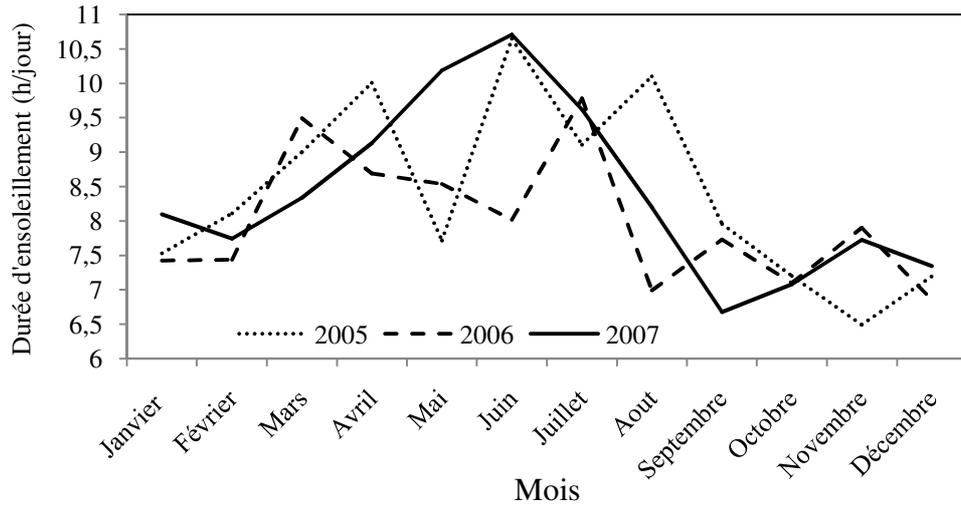


Fig. 17: Variation de la durée de l'ensoleillement au cours de l'année

### 2.5. L'évapotranspiration de référence

Les valeurs de l'ET0 sont en générale élevées. Elles sont en relation étroite avec tous les autres facteurs météorologiques. Les valeurs maximales peuvent atteindre 10 mm/jour. Elles sont enregistrées durant les périodes chaudes et ventées. Durant l'année 2007 l'évapotranspiration était basse pendant les mois de Mars et avril (Fig. 18). Ceci était utile pour la culture du blé.

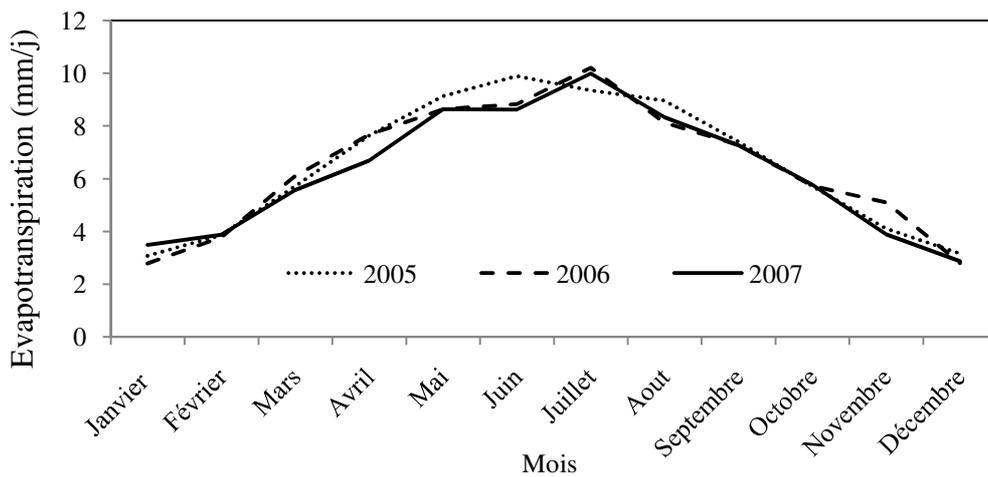


Fig. 18 : Evolution de l'évapotranspiration au cours de l'année

## **TROISIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES**

### **Chapitre IV : MATERIELS ET METHODES DES ESSAIS EXPERIMENTAUX ET DE MODELISATION**

#### **A. MATERIELS ET METHODES DES ESSAIS EXPERIMENTAUX**

##### **1. Localisation des sites expérimentaux**

Notre expérimentation a été réalisée durant trois années consécutives 2005, 2006 et 2007 dans deux sites différents :

Le premier est situé sur le périmètre d'Aougrouit à 110 km d'Adrar. Il s'agit d'un pivot installé à 10 km au Sud du chef lieu de la daïra. Cette localité est connue par une température légèrement plus fraîche par rapport à la zone d'Adrar. Les coordonnées géographiques sont les suivantes : Latitude : 28°42'Nord, Longitude : 0° 20' Est et altitude : 278 m.

Le second est situé à la station expérimentale de l'INRAA d'Adrar, située à 5 km au sud du chef lieu de la wilaya. C'est le milieu de la zone potentiellement agricole. Elle représente donc la moyenne du point de vue conditions climatiques de la région d'Adrar ; étant située entre, d'une part, la partie sud (Zaouite Kounta, Reggane et Aoulef) légèrement plus chaude et d'autre part, la partie nord (Tsabit, Aougrouit et Timimoun) légèrement plus froide. Les coordonnées géographiques sont les suivantes : Altitude : 278 m, Latitude : 27° 49 N et Longitude : 00°11.

##### **2. Collecte des données météorologiques**

Les différents paramètres climatiques sont relevés à station météo située à l'intérieur de la station expérimentale (INRAA) d'Adrar, juste à proximité de la parcelle d'essai (fig. 19).

Ce sont la température, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent, la durée d'insolation, l'évaporation et la pluviométrie. Les données relevées indiquent l'existence des variations entre les mois de l'année et aussi des variations inter- annuelles pour le même mois.



Fig. 19 : Localisation de la station météorologique.  
1. Abris météo et essais du blé. 2. Pluviomètre et Anémomètre

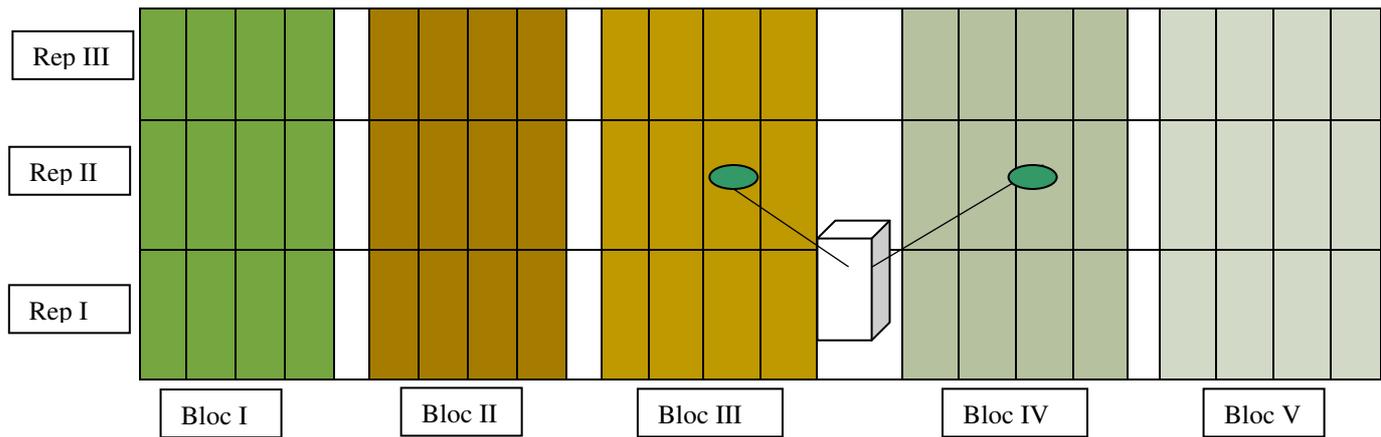
### 3. Matériel végétal

Pour les essais de la station expérimentale, il s'agit d'une variété de blé dur, appelée communément Shèn-S, elle est semi précoce et à paille courte 85cm. Largement utilisée sous pivots.

### 4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est de type : split plot avec :

- 5 traitements hydriques,
- 4 traitements de fertilisation,
- 3 trois répétitions.
- Soit, 60 parcelles élémentaires.



-  Chambre de contrôle
-  Cases lysimétriques
-  Conduite de drainage

## 5. Le semis

Durant la première campagne, la date de semis était le 12/12/2004, à la dose de 200 kg/ha. Il était tardif à cause de la crainte des attaques des criquets. Le précédent cultural est une luzerne, cette luzernière avait occupée la parcelle pendant 5 campagnes. Pour les deux autres campagnes le semis a été effectué le 14 et 15 novembre.

## 6. Lutte contre les adventices

Afin de déterminer une méthode de lutte efficace, des essais qui portent plusieurs traitements sont effectués dans sur un terrain très infecté par les adventices.

Nous citons la lutte mécanique, lutte chimique et effet de semis sans labour. En outre, nous avons appliqué le traitement intégré qui est la combinaison de la lutte chimique et mécanique, cette opération est menée de la façon suivante :

- Pré-irrigation
- Levée des adventices
- Utilisation d'un désherbant total ROUNDUP associé à un adjuvant : le Génamin
- Après dessèchement des mauvaises herbes ; passage de cover crop pour détruire les rescapées à l'action du produit chimique. Cette opération est répétée deux fois.

- Au stade 2- 3 feuilles un autre traitement contre le brome est effectuée en utilisant l'Apyros à ½ dose (12.5 g /ha) suivie d'une autre application du même type après 21 jours.

Dans un autre site, nous avons appliqué les traitements suivants :

- Traitement chimique : il s'agit de l'utilisation d'un désherbant total ROUNDUP associé à un adjuvant : le Génamin.
- Traitement mécanique ; un passage de charrue à disques pour une parcelle dans le but de détruire les mauvaises herbes et les enfouir en profondeur. Des passages de Cover Crop sur une autre parcelle. Tous ces traitements sont effectués après un faux semis.

## 7. Traitements hydriques

5 traitements hydriques sont effectués selon la fréquence d'arrosage (le mode d'irrigation ne permet pas des traitements selon des doses d'arrosage), chaque traitement s'effectue en deux fréquences selon les besoins en eau de la culture qui diffèrent très largement entre les premiers stades de croissance et les stades intermédiaires. La répartition des fréquences d'arrosage est effectuée aléatoirement (tirage au sort).

- Traitement I : 2 irrigations par semaine
- Traitement II : 2 à 3 irrigations par semaine
- Traitement III : 3 à 5 irrigations par semaine
- Traitement IV : 1 à 2 irrigation par semaine
- Traitement V : 0 à 1 irrigation par semaine

La dose d'arrosage est maintenue identique pour l'ensemble des parcelles, le long du cycle végétatif. Elle est évaluée à 50 mm par irrigation. En éliminant les jours fériés et les jours de repos, les tours d'eau sont effectués selon le calendrier d'irrigation cité ci-dessous (tableau 18).

Tableau 18 : Tour d'eau (jours) durant le cycle végétatif du blé

| Stades végétatifs    | Traitements hydriques |    |     |    |    |
|----------------------|-----------------------|----|-----|----|----|
|                      | I                     | II | III | IV | V  |
| Ger- montaison       | 4                     | 5  | 2   | 7  | 15 |
| Epiaison –maturation | 2                     | 3  | 1   | 5  | 7  |

## **8. Traitements de fertilisation :**

Quatre traitements différents sont effectués :

- Traitement 1 : N, - Traitement 2 : Nk, - Traitement 3 : NP, - Traitement 4: NPK

Les apports de phosphore et de potassium sont faits avant le semis, à raison de 200 unité/ha et 100 unité/ha respectivement. Pour ceux de l'azote (200 u/ha), ils sont fractionnés de la manière suivante :

1/8 : germination

1/4 : 3-4 feuilles

1/4 : tallage

1/4 : montaison

1/8 : floraison

Il convient de noter qu'habituellement les apports d'azote sont fractionnés en trois apports. Vue l'importance de cet élément au stade poste levée et au stade floraison, nous avons fractionné les apports en cinq stades végétatifs.

## **9. Observations phénologiques**

Le suivi de la culture s'effectue continuellement et ce pour évaluer le comportement de la culture vis-à-vis des traitements expérimentaux appliqués. Des notations périodiques sont faites pour estimer le développement des racines, de l'appareil végétatif, nombre de talle et l'indice foliaire.

## **10. Le bilan hydrique**

Deux cases lysimétriques (évapotranspiromètres) sont utilisées pour cet objectif. Les apports d'eau d'irrigation et la collecte de l'excédent tout au long du cycle végétatif de la culture du blé permettent d'élaborer le bilan hydrique et d'évaluer la consommation en eau de la culture durant le cycle végétatif (fig. 20).

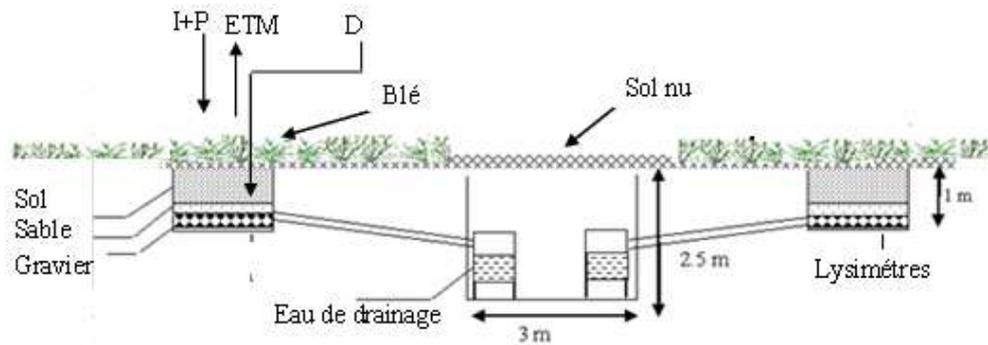


Fig. 20 : Schéma de deux cases lysimétriques

Le lysimètre dans sa forme la plus simple permet de mesurer l'eau entrant et sortant d'un conteneur qui renferme une masse de sol isolé avec une surface de végétation. Ce flux d'eau entrant et sortant peut être représenté sous forme du bilan hydrique exprimé par :

$$P + I \pm R_o = ET_{\text{culture}} + D \pm A_w \quad (21)$$

Le flux d'eau entrant pendant une période de temps donnée se réfère à  $P$  = précipitation et  $I$  = l'irrigation. Le flux d'eau sortant se réfère à l'évapotranspiration de la culture ( $ET_{\text{culture}}$ ) et  $D$  = l'eau de drainage.

$R_o$  et  $A_w$  sont respectivement le ruissellement de surface et la variation du stock d'eau ( $w$ ) de la masse de sol isolé sur une période donnée. Dans notre cas ces deux termes sont = 0, et  $ET_{\text{culture}}$  peut alors être déterminée directement par :

$$ET_{\text{culture}} = P + I - D \quad (22).$$

Chaque lysimètre a une profondeur de 1 mètre et un diamètre de 2 mètres. Des dispositions sont prises au sein de chaque cuve pour collecter et mesurer l'eau qui s'infiltre à travers la masse du sol. Ces dispositifs sont installés dans une chambre de contrôle d'une profondeur de 2,5 m et une surface de 9 m<sup>2</sup>.

Les tensiomètres sont utilisés pour suivre l'évolution de l'humidité du sol et la tension qui relie cette humidité aux particules du sol.

## 11. Détermination de la réserve utile pratique

En pratique, il est difficile d'obtenir par le calcul la valeur de la réserve facilement utilisable (RFU) qui dépend largement de la nature du sol. L'expérience montre que la détermination du volume et de la fréquence d'irrigation peut être opérée sans risque d'erreur sur la base de 2/3 ou de la moitié de la R.U.maximun (Ducrocq, 1990).

Il faut noter que cette valeur est valable lorsque la demande d'évaporation de l'air est faible l'humidité du sol est proche de la capacité au champ et l'enracinement des plantes profond et bien développé. Dans notre cas ou le sol n'est pas profond et la demande climatique est élevée. Par observation nous avons pri  $RFU \sim RU. Pratique = 2/3 RU \text{ max.}$

La consommation de l'eau à l'ETM, se fait au dessus de RFU. Sinon, la culture commence à trouver des difficultés de l'absorption de l'eau du sol.

En ce qui concerne les essais sous pivot, il est intéressant de signaler que le pivot de 30 ha de superficie est géré par l'agriculteur, il a effectué toutes les opérations culturales. Des interventions et des directives sont faites en cas de nécessité.

Pour contrôler l'irrigation, juste à la sortie du forage, un débitmètre est monté, pour comptabiliser la totalité des eaux qui passent vers le pivot. Des cases lysimétriques et chambre de contrôle sont installés sous pivot dans le but de suivre de bilan hydrique de la culture du blé. La fréquence d'arrosage n'est est réalisée conformément aux besoins théoriques de la culture. Mais en général elle est faible au début et à la fin du cycle et élevée aux stades intermédiaires.

Des visites périodiques sont effectuées pour suivre le développement de la culture est réaliser les observations nécessaires.

## B. MATERIELS ET METHODES DE LA MODELISATION

### 1. Estimation de l'évapotranspiration de référence

Pour estimer l'évapotranspiration de référence, nous avons utilisé la formule de Penman-Montheith proposée par Allen et al. (1998):

$$ET0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (23)$$

Avec :

ET0: évapotranspiration de référence journalière (mm/j),  $R_n$  : rayonnement net à la surface de culture ( $M J/m^2/j$ ),  $G$ : flux de chaleur échangé avec le sol ( $M J/m^2/j$ ),  $T$ : température moyenne journalière ( $^{\circ}C$ ),  $u_2$ : vitesse moyenne journalière du vent mesuré à 2 mètres (m/s),  $e_s$  et  $e_a$  : respectivement la pression de vapeur saturante et la pression réelle de l'air à la même hauteur (kPa),  $\Delta$ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température  $T$  (kPa / $^{\circ}C$ ),  $\tilde{a}$  : constante psychrométrique (kPa / $^{\circ}C$ ), 900 coefficient pour la culture de référence (kg K/ kJ) liées aux unités utilisées a la distribution de variables  $\tilde{n}$ ,  $c_p$  et  $r_a$ , 0,34 : coefficient de vent pour la culture de référence (kg K/kJ) résultant du rapports  $r_s/r_a$ , 0,408 inverse de  $\tilde{e} = 2,45 MJ/ kg$ .

Les paramètres : température de l'air, la durée d'ensoleillement, vitesse du vent et l'humidité relative sont prises directement à partir de la station météorologique et sont utilisées pour estimer d'autres paramètres, tels que le rayonnement net, la pente de pression de vapeur, constante et psychométriques, et ainsi de suite.

## **2. Modélisation de l'évapotranspiration de référence**

Nous avons utilisé l'approche de réseaux de neurones pour modéliser l'évapotranspiration de référence, et nous avons comparé les résultats obtenus par l'approche de la régression linéaire multiple.

### **2.1. Les étapes de développement des réseaux de neurones**

#### **2.1.1. Collecte des données**

Les données utilisées sont constituées d'une série de paramètres climatiques journaliers, décennaires et mensuelles, sur une période qui s'étale sur 6 ans et demie (2002-2007).

#### **2.1.2. Analyse des données**

Toutes les séries de données ont subi une étude statistique qui consiste au traçage des graphiques. Ceci nous a permis d'écarter ou rectifier les valeurs aberrantes et redondantes.

#### **2.1.3. Séparation des bases de données**

Les données sont séparées à trois sous ensembles ; 70% de données sont utilisées pour la phase d'apprentissage, 15% de données constituent la phase de test et 15% de données restantes sont réservées pour la phase de validation. La majeure partie des données est utilisée

dans la phase d'apprentissage pour fournir des résultats très satisfaisants et adéquats. De nombreux chercheurs (Riad, 2003 et Puc, 2012) ont utilisé cette répartition.

#### **2.1.4. Normalisation des données**

Afin d'améliorer la performance des réseaux neuronaux multicouches, il est préférable de normaliser les données d'entrée et de sortie de telle sorte qu'elles se trouvent dans l'intervalle [-1 1]. De manière générale, la base de données doit subir un prétraitement afin d'être adaptée aux entrées et sorties du réseau de neurones. Un prétraitement courant consiste à effectuer l'opération suivante :

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_x} \quad (24)$$

Avec :

$Z_i$  : Variable centrée réduite ;  $X_i$  : Variable d'entrée ;  $\bar{X}$  : Moyenne et  $\sigma_x$  est l'Ecart type.

### **3. Apprentissage du réseau de neurones**

L'objectif de l'apprentissage est de fournir une méthode au réseau afin qu'il puisse ajuster ces paramètres lorsqu'on lui présente des exemplaires à traiter.

#### **3.1. Algorithme d'apprentissage**

Le réseau neurone utilisés dans cette étude est le réseau dit « feedforward » avec l'algorithme d'apprentissage ; dit rétro propagation. C'est une technique d'apprentissage supervisé utilisés pour l'apprentissage des réseaux neurones artificiels. Fondamentalement, il s'agit d'une technique de descente de gradient pour minimiser l'erreur quadratique entre les sorties calculées et les sorties désirées. Pour la modélisation à pas de temps journalier, la structure du réseau de neurone consiste en un réseau à quatre couches ; une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie.

L'algorithme de rétro propagation, comme l'a noté Parizeau (2004), permet l'apprentissage des réseaux multicouches. Pour être utile, ce réseau doit avoir une fonction de transfert non linéaire sur les couches cachées et la couche de sortie en fonction du type d'application, soit fonction linéaire ou non linéaire.

#### 4. Fonction de transfert

Pour cette étude, deux types de fonctions de transfert sont utilisés comme fonction d'activation du neurone. Ce sont les fonctions non linéaires utilisées dans les couches cachées et une fonction linéaire utilisée dans la couche de sortie.

Deux sortes de fonctions non linéaires dites sigmoïdes sont utilisés : une fonction sigmoïde symétriques type tangente Hyperbolique.

Elle est connue en Matlab sous le nom « tansig ». C'est une fonction bornée à valeurs réelles comprises entre -1 et +1. Son Algorithme est  $a = \text{tansig}(n) = 2/(1+\exp(-2n))-1$ .

C'est-à-dire

$$\forall n \in R, g(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \quad (25)$$

Et une fonction sigmoïde positive type logistique. Elle est connue en Matlab sous le nom « logsig ». C'est une fonction bornée à valeurs réelles comprises entre 0 et +1. Son algorithme est  $\text{logsig}(n) = 1 / (1 + \exp(-n))$ . C'est-à-dire ;

$$\forall n \in R, g(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (26)$$

La Fonction linéaire, C'est l'une des fonctions d'activations les plus simples, sa fonction est définie par :  $F(n)=n$  (fig.21). A Matlab cette fonction est connue sous le nom « purelin ».

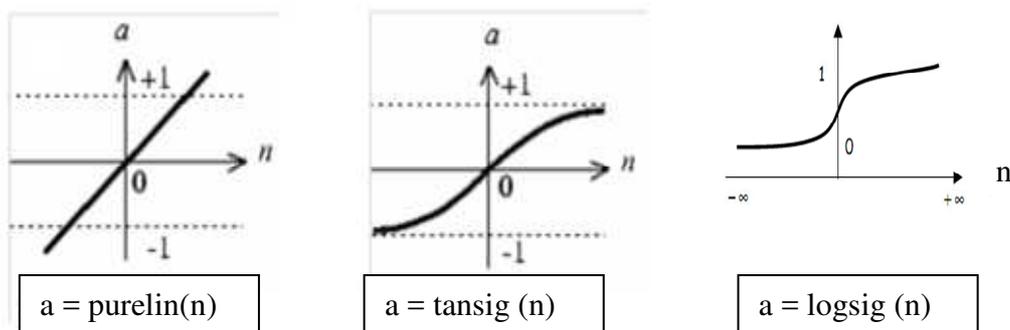


Fig. 21 : Allure de fonctions de transfert utilisées

(Extrait de help du Matlab version 7)

## 5. Validation

Une fois le réseau de neurones entraîné (après apprentissage), il est nécessaire de le tester et de valider sur des bases de données différentes de celles utilisées pour l'apprentissage.

## 6. Critères de performance du modèle

La modélisation par le réseau de neurones artificiels consiste à trouver le nombre optimal de neurones dans la couche cachée, ainsi le nombre d'itérations pour aboutir au modèle le plus performant qui est déterminé par le minimum du nombre de neurones et d'itérations.

La performance du modèle de RNA est aussi validée par d'autres paramètres statistiques des phases d'apprentissage et du test. Les paramètres statistiques utilisés dans cette étude sont :

Le critère de Nash-Sutcliffe (E) proposé par Nash et Sutcliffe (1970). Il est calculé par la formule (27) selon Krause et al. (2005). C'est le critère le plus largement utilisé pour la prévision comme pour la simulation.

On considère, selon (Line Kong, 2011) que la modélisation est acceptable si le critère de Nash est supérieur à 0,6-0,7. Au-delà de 0,9, le modèle est considéré comme bon à excellent. Il faut noter que dans l'expression du critère, le numérateur correspond à l'erreur quadratique moyenne. Ainsi, minimiser l'erreur quadratique revient à maximiser le critère de Nash.

Les autres critères de performance utilisés sont : Le coefficient de corrélation R (28), la racine de l'erreur moyenne quadratique RMSE (Root Mean Squared Error) (29); l'erreur moyenne relative absolue *MARE* (Mean Absolute Relative Error) (30) et la moyenne des carrés des erreurs *MSE* (Mean Squared Error) (31). Tous ces paramètres sont donnés par les relations suivantes :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{sim} - Y_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{sim} - \bar{Y}_{obs})^2} \quad (27)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})(Y_{sim} - \bar{Y}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{sim} - \bar{Y}_{sim})^2}} \quad (28)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{n}} \quad (29)$$

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_{obs} - Y_{sim}|}{|Y_{obs}|} \times 100 \quad (30)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{n} \quad (31)$$

Avec

$E$  efficacité (critère) de Nash-Sutcliffe,  $Y_{sim}$  ; Variable simulée,  $Y_{obs}$  ; Variable observée,  $\bar{Y}_{sim}$  ; moyenne de variable simulées  $\bar{Y}_{obs}$  ; moyenne de variable of observée,  $n$  Nombre d'observations.

Pour la régression multiple, on ajoute le test de F. statistique et T. statistique et aussi on doit vérifier le non colinéarité des paramètres en utilisant la matrice de corrélation et VIF (Variance Inflation Factor).

La statistique F est utilisé dans le but de déterminer si la relation entre la variable dépendante et les variables indépendantes est due au hasard. La statistique T est un test d'hypothèse qui permet d'évaluer la contribution marginal des paramètres pour l'estimation de la valeur du modèle. Si la valeur absolue de T est suffisamment élevée, C'est-à-dire supérieure à T théorique, nous pouvons conclure que le paramètre est utile dans l'estimation de la valeur du modèle. On dit que sa contribution est significative.

## 7. Les outils et logiciels utilisés pour les traitements des données

### Excel

L'Excel est utilisé pour le traçage des graphiques et la modélisation en utilisation la méthode de la régression multiple.

### GENSTAT discovery édition 2

GENSTAT est un logiciel élaboré et utilisé par la contribution de l'ICARDA, il est spécialisé dans les analyses statistiques des expérimentations agricoles, notamment en ce qui concerne la sélection et l'amélioration génétique.

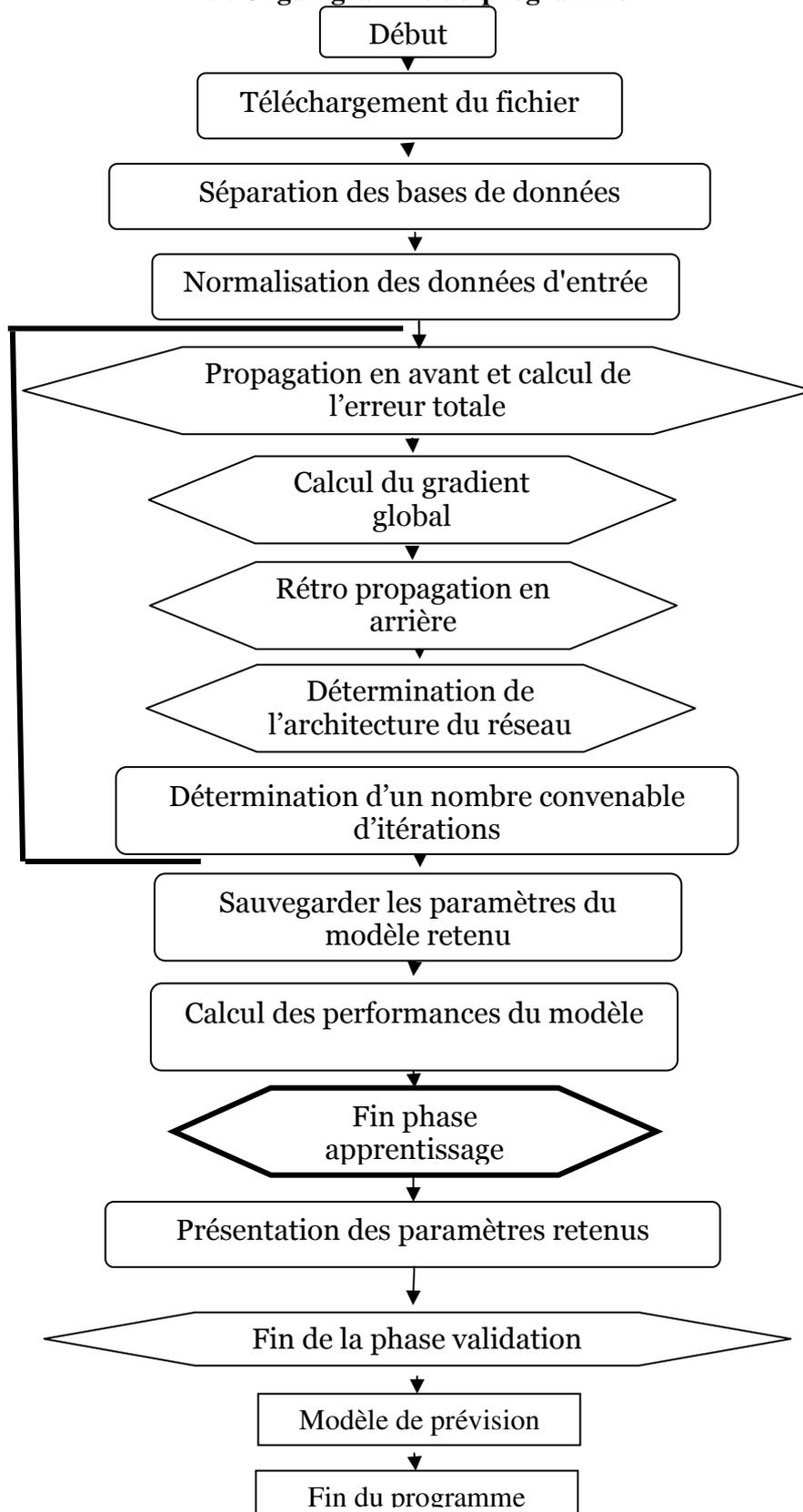
La version GENSTAT discovery édition 2, est destinée pour certains pays à titre gratuite mais à utiliser dans les buts de l'éducation et de la recherche scientifique. Pour notre travail ce logiciel est utilisé pour les calculs statistiques.

## **8. Programmation du modèle**

Le programme élaboré dans la cadre de ce travail, utilise le logiciel de calcul mathématique MATLAB version 7 sous système d'exploitation Windows mis au point par la firme Américaine MATHWORKS LABORATORY. Ce logiciel dispose des sous programmes. La partie réservée aux réseaux de neurones permet la création et l'entraînement de perceptrons multicouches de manière personnalisée.

Pour comparer les résultats de la modélisation obtenus par les réseaux de neurones nous avons utilisé la méthode classique qui est la régression linéaire multiple (RLM).

## 9. Organigramme du programme



## QUATRIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Chapitre V : RESULTATS DE LA MODELISATION

L'objectif de notre travail dans ce chapitre est l'élaboration des modèles d'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET0). L'utilisation de l'approche de réseaux de neurones permet d'avoir différents modèles d'estimation de l'ET0 qui répondent aux différentes situations : Manque de paramètres météorologiques et modélisation à pas de temps mensuel, décadaire ou journalier. Afin de comparer la performance des modèles, nous avons utilisé aussi l'approche de la régression linéaire multiple (RLM).

#### 1. Modèle à pas de temps Mensuel

Le premier obstacle qui s'oppose à l'application de l'approche de la RLM est le problème de la colinéarité. Pour vérifier sa présence, il est intéressant d'analyser la matrice de corrélation (tableau 19).

Tableau 19 : Matrice de corrélation des variables (moyenne mensuelle)

|     | T     | Hr    | V.v   | I     | ET0   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| T   | 1,00  | -0,82 | 0,20  | 0,36  | 0,93  |
| Hr  | -0,82 | 1,00  | -0,06 | -0,50 | -0,86 |
| V.v | 0,20  | -0,06 | 1,00  | 0,24  | 0,37  |
| I   | 0,36  | -0,50 | 0,24  | 1,00  | 0,57  |
| ET0 | 0,93  | -0,86 | 0,37  | 0,57  | 1,00  |

A première vue, nous observons une forte corrélation entre la température (T) et l'humidité relative (Hr) avec  $R = -0,82$ . Analysons la variance inflation factor (VIF) qui est  $= \frac{1}{1-R_j^2}$ , la valeur de ce paramètre indique l'existence de la colinéarité ou non. Il faut noter que plus une variable  $x_j$  est colinéaire à une autre variable, plus  $R_j^2$  (coefficient de détermination ajusté) est proche de 1, donc plus le terme  $\frac{1}{1-R_j^2}$  est élevé. A l'inverse, plus  $R_j^2$  est proche de 0 plus le VIF associé est proche de 1.

Il est préférable d'observer un  $VIF < 3$ . C'est-à-dire  $|R| < 0,66$  bien que certains auteurs acceptent un  $VIF < 5$ . C'est-à-dire  $|R| < 0,80$  (Rakotomalala, 2011). Dans notre cas,  $R = -0,82$  donne un  $VIF > 5$ . Elle risque de poser le problème de la colinéarité, et donc l'imprécision du modèle de la régression multiple.

Par ailleurs, nous avons observé de fortes corrélations entre ET0, T et Hr. Ceci permet de consolider les modèles obtenus par les réseaux de neurones et alléger l'architecture utilisée. En effet, d'après le tableau 20, il s'est avéré que la présence de la température ou l'humidité relative donne des résultats satisfaisants, sinon le modèle est moins performant.

Tableau 20 : Critères de performance selon le nombre d'entrées

| Entrées | R <sup>2</sup> | E    | RMSE (mm/j) | MARE (%) |
|---------|----------------|------|-------------|----------|
| T+H     | 0,94           | 0,93 | 0,58        | 5,62     |
| T+V     | 0,96           | 0,95 | 0,49        | 6,81     |
| T+I     | 0,95           | 0,94 | 0,55        | 6,58     |
| V+I     | 0,41           | 0,42 | 1,44        | 19,47    |
| T +V+I  | 0,97           | 0,96 | 0,43        | 4,81     |
| HR+ V+I | 0,97           | 0,94 | 0,53        | 6,72     |
| T+H+V   | 0,99           | 0,98 | 0,26        | 3,02     |
| T+H+V+I | 0,99           | 0,98 | 0,25        | 2,71     |

En cas de manque des données météorologiques concernant la vitesse du vent ou la durée d'ensoleillement, il est possible de construire des modèles performants uniquement avec 3 entrées. Ainsi la figure 22 montre de bons résultats.

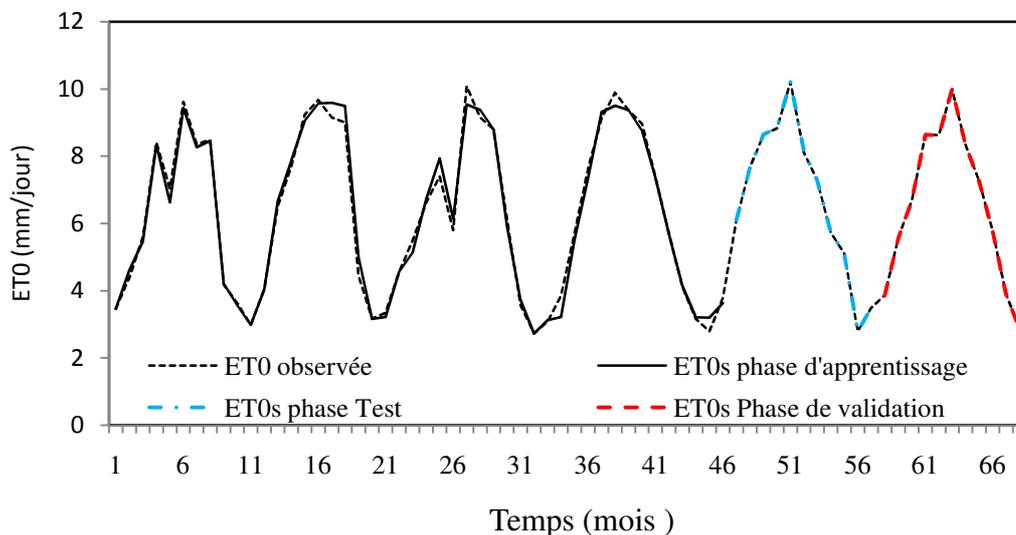


Fig. 22 : Comparaison entre les séries observées et les séries simulées de l'ET0 pour les trois phases de modélisation

En phase d'apprentissage les deux séries sont très proches l'une de l'autre, mais en phase de test et en phase de validation, les deux séries sont superposées.

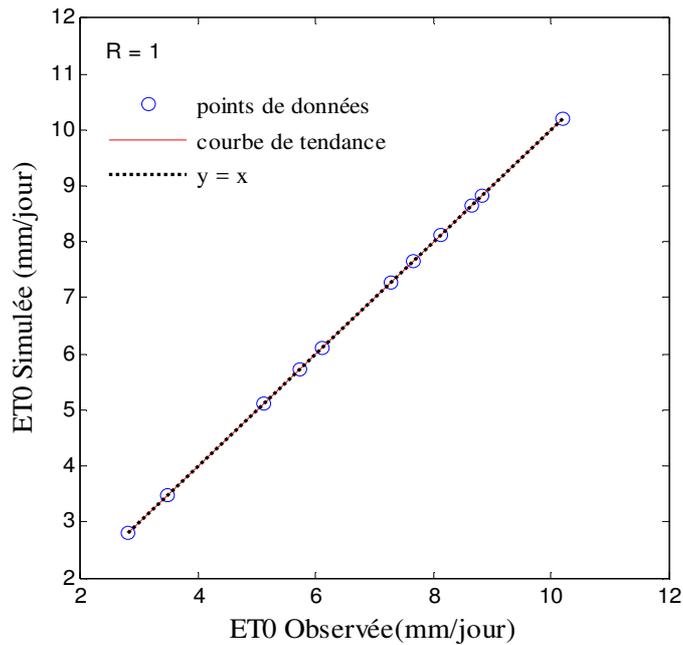


Fig. 23 : Corrélation entre la série observée et la série simulée de l'ET0 (phase de test)

D'après la figure 23, on souligne une forte corrélation entre les deux séries de l'ET0. En plus, la matrice de corrélation indique que la corrélation entre l'ET0 et la durée d'ensoleillement n'est pas forte ;  $R = 0,57$  (Tableau 19), sa présence parmi les paramètres d'entrées consolide mieux le modèle obtenu.

### 1.1.Choix de l'architecture du modèle

On peut choisir le nombre de couches cachées et nombre de neurones pour chaque couche. Mais il faut prendre en considération que, plus le nombre de neurones augmente, plus le réseau est apte à identifier des phénomènes complexes. Toutefois, un trop grand nombre de neurones conduit à un sur-apprentissage dans l'échantillon d'apprentissage, finalement nuisible à l'échantillon de test.

On estime que dans notre cas, le phénomène étudié n'est pas très complexe. En effet, il s'est avéré qu'en utilisant un nombre réduit de neurones dans la couche cachée donne des résultats satisfaisants.

Afin de trouver l'architecture adéquate, nous avons ciblé celle qui minimise l'erreur et maximise le coefficient de détermination (Fig.24). A chaque fois qu'on ajoute un neurone à la couche cachée l'erreur (MSE) se réduit et  $R^2$  augmente. Les différentes combinaisons aboutissent à une structure à 8 neurones dans la couche cachée, qui donne une  $MSE = 0,066$   $(mm/j)^2$  et  $R^2$  est très proche de 1.

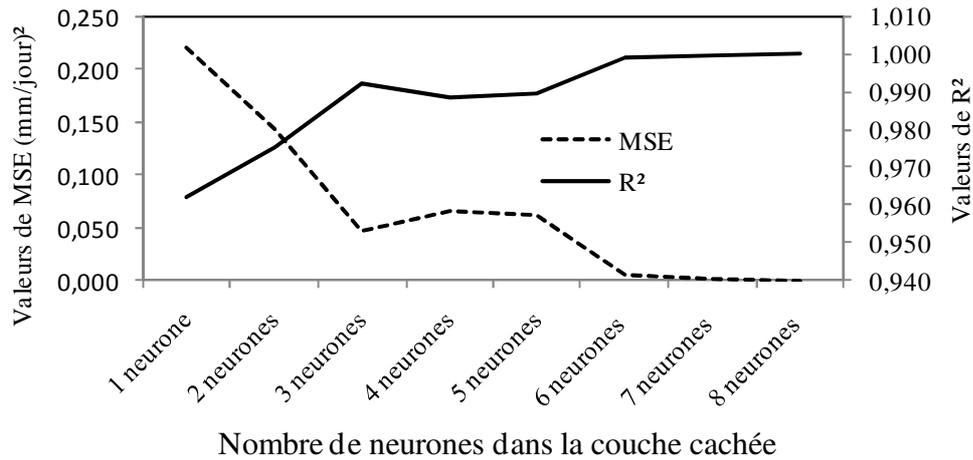


Fig.24: Evolution des valeurs de R<sup>2</sup> et MSE en fonction du nombre de neurones dans la couche cachée

Les critères de performance pour le modèle obtenu (tableau 21) indiquent qu'il y a une concordance parfaite entre la série observée et la série simulée de l'ET0.

Tableau 21 : Critères de performance du modèle à 4 entrées et 8 neurones dans la couche cachée

| Critères de performance | Apprentissage | Test | Validation |
|-------------------------|---------------|------|------------|
| R <sup>2</sup>          | 0,98          | 1    | 1          |
| E                       | 0,99          | 1    | 1          |
| MSE (mm/j) <sup>2</sup> | 0,066         | 0,00 | 0,00       |
| RMSE (mm/j)             | 0,257         | 0,00 | 0,00       |
| MARE (%)                | 2,718         | 0,00 | 0,00       |

La comparaison graphique de la série observée et la série simulée de l'ET0 (phase d'apprentissage) montre que l'allure des deux séries est identique et elles se confondent dans plusieurs points (fig.25).

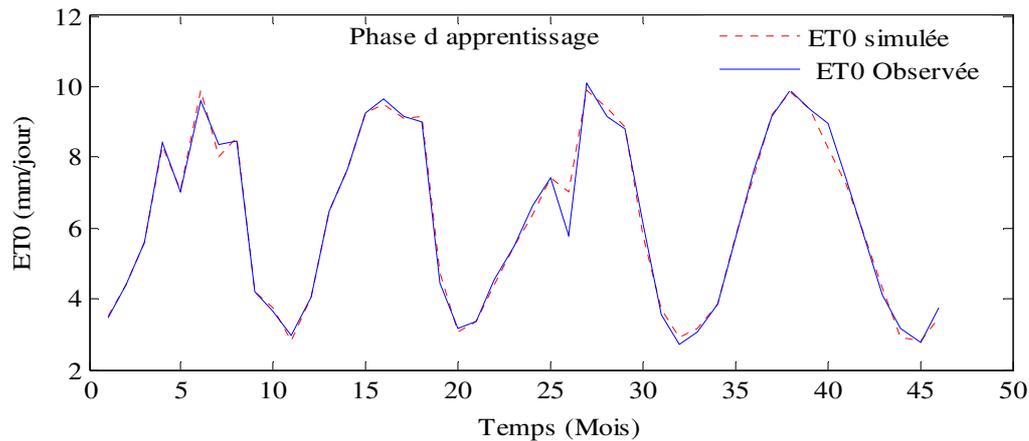


Fig. 25 : Comparaison graphique de la série observée et la série simulée de l'ETO (Phase d'apprentissage)

Donc, le modèle retenu dans le cas du pas de temps mensuel se caractérise par une architecture contenant une seule couche cachée à 8 neurones et une couche de sortie à un neurone. Les paramètres retenus par le modèle élaboré sont présentés dans le tableau 22.

Tableau 22 : Paramètres retenus pour un model a pas de temps mensuel

| N°<br>Neurone | Poids de la couche d'entrée |       |        |       |        | Neurone de sortie |       |
|---------------|-----------------------------|-------|--------|-------|--------|-------------------|-------|
|               | T                           | Hr %  | V      | I     | biais  | poids             | biais |
| 1             | -1,23                       | -2,46 | -0,02  | 1,62  | -5,93  | -0,89             | -7,9  |
| 2             | -1,42                       | 7,01  | -4,17  | 1,88  | 3,15   | 0,18              |       |
| 3             | 6,91                        | 10,58 | -13,25 | -7,26 | -1,50  | 0,56              |       |
| 4             | 1,77                        | 1,41  | 1,36   | -4,37 | -1,61  | 6,06              |       |
| 5             | -1,34                       | -0,90 | -0,21  | -1,98 | 6,88   | 16,50             |       |
| 6             | 5,67                        | 3,73  | 1,84   | -7,42 | -2,15  | -4,65             |       |
| 7             | 6,95                        | -0,37 | 7,80   | -4,09 | -17,27 | 0,61              |       |
| 8             | -0,48                       | -1,07 | 2,16   | -1,69 | 12,60  | -9,56             |       |

## 2. Modèle à pas de temps décadaire

Les bases de données utilisées pour implémenter les réseaux de neurones sont présentées en annexe 5.

Voyons d'abord la possibilité d'utiliser l'approche de régression linéaire multiple en analysant la matrice de corrélation des paramètres d'entrée (tableau 23). La valeur absolue de la plus grande corrélation est  $|0,79|$ , donc  $|R| < |0,80|$ , on peut utiliser l'approche de RLM sans risque de la colinéarité (Tableau 23).

Tableau 23 : Matrice de corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie (moyennes décadaires)

|     | T     | Hr    | V.v  | I    | ET0   |
|-----|-------|-------|------|------|-------|
| T   | 1,00  | -0,79 | 0,10 | 0,24 | 0,91  |
| Hr  | -0,79 | 1,00  | 0,03 | 0,41 | -0,82 |
| V.v | 0,10  | 0,03  | 1,00 | 0,21 | 0,32  |
| I   | 0,24  | -0,41 | 0,21 | 1,00 | 0,49  |
| ET0 | 0,91  | -0,82 | 0,32 | 0,49 | 1,00  |

Les résultats obtenus montrent qu'en additionnant des neurones à la couche cachée, l'erreur commise (MSE) entre la série observée et la série simulée se réduit graduellement et le coefficient de détermination agrandit jusqu'à une structure de 15 neurones dans la couche cachée (Fig. 26). La diminution de l'erreur et l'augmentation de la corrélation entre les deux séries ne sont pas proportionnelles au nombre de neurones dans la couche cachée. Une addition d'un neurone peut réaliser le contraire (12 neurones). La structure retenue dans ce cas, est celle à 15 neurones dans la couche cachée.

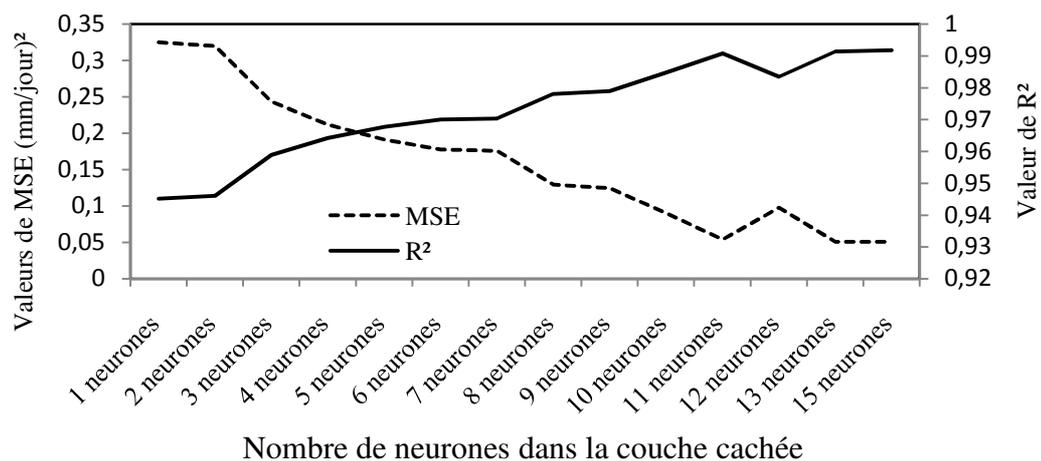


Fig.26: Evolution des valeurs de MSE et de R<sup>2</sup> en fonction de nombre de neurones dans la couche cachée (phase d'apprentissage)

L'examen de l'influence du nombre d'entrées indique que le manque d'un seul paramètre météorologique réduit significativement la performance du modèle. En effet, le manque de la durée d'ensoleillement dans le cas du modèle à pas du temps mensuel n'a pas eu une grande influence sur la performance du modèle, les valeurs de RMSE pour la phase d'apprentissage sont égales à 0,26. Par contre dans le cas du modèle à pas du temps décadaire, l'influence apparait visiblement ; les valeurs de RMSE sont égales 0,49 mm/j et 0,36 mm/j respectivement pour le modèle à 3 entrées et le modèle à 4 entrées. La valeur de MARE augment de 2,63 % à 3,79 % en éliminant la durée d'ensoleillement du groupe de paramètres d'entrée. Elle devient 4,08% si on élimine l'humidité relative. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Laaboudi et al. (2012).

La comparaison graphique de deux séries montre que celles-ci se concordent parfaitement, pendant la phase d'apprentissage les deux séries se rapproche l'une de l'autre. Une légère divergence s'observe au niveau des pics (Fig. 27).

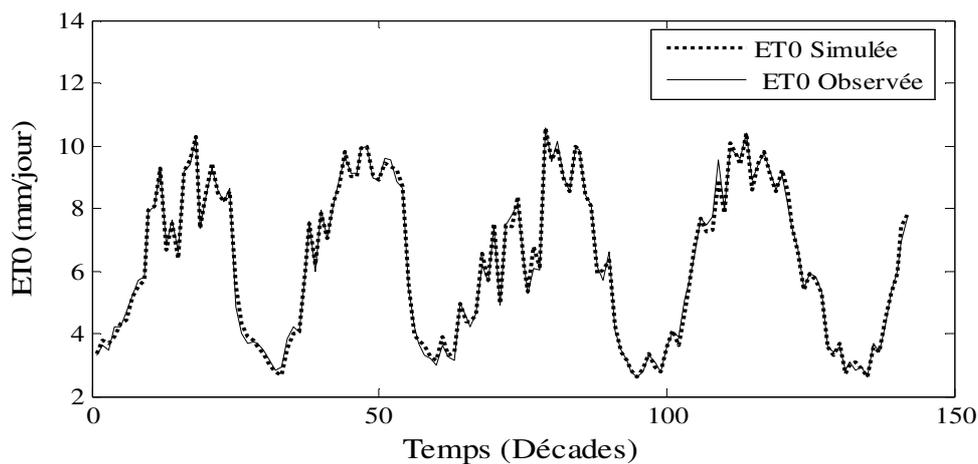


Fig. 27 : Comparaison graphique de la série observée et la série simulée de l'ET0 (Phase d'apprentissage)

Si les deux séries se distinguent dans la phase d'apprentissage, elles se confondent dans la phase de test (Fig. 28).

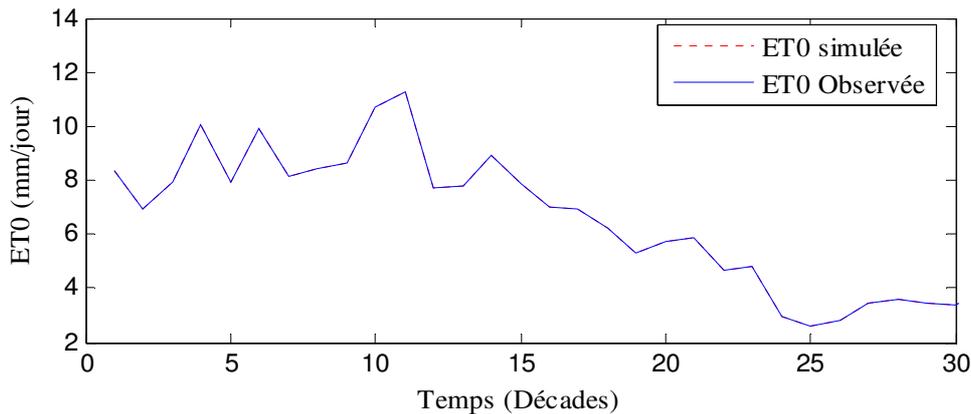


Fig. 28 : Comparaison graphique de la série observée et la série simulée de l'ET0 (Pas de temps décadaire, phase de test)

Donc, le modèle retenu dans le cas de la modélisation à pas de temps décadaire se caractérise par une architecture contenant une seule couche cachée à 15 neurones et une couche de sortie à un neurone.

## 2. Modèle à pas de temps journalier

La matrice de corrélation de toutes les variables d'entrée est présentée dans le tableau 14. Ce tableau montre que la corrélation entre la température et ET0 est de 0,86. Ainsi, tout modèle qui utilise la température devrait être en mesure d'estimer l'ET0 d'une manière satisfaisante. Le tableau 24 montre également une forte corrélation entre l'humidité et ET0.

Tableau 24 : Matrice de corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie (Données journalières)

|     | T     | Hr    | V.v  | I     | ET0   |
|-----|-------|-------|------|-------|-------|
| T   | 1,00  | -0,78 | 0,01 | 0,16  | 0,86  |
| Hr  | -0,78 | 1,00  | 0,07 | -0,27 | -0,79 |
| V.v | 0,01  | 0,07  | 1,00 | 0,02  | 0,31  |
| I   | 0,16  | -0,27 | 0,02 | 1,00  | 0,42  |
| ET0 | 0,86  | -0,79 | 0,31 | 0,42  | 1,00  |

La température et l'humidité sont aussi fortement corrélées. Par conséquent, une combinaison de ces deux facteurs peut fournir une bonne estimation. La vitesse du vent et la durée d'ensoleillement ne sont pas bien corrélées avec ET0. Néanmoins, ces paramètres sont inclus dans notre modèle pour une meilleure précision de l'estimation ET0. Il est à noter que

toutes ces corrélations entre les variables sont de type linéaire, mais le processus ET0 est considéré comme fortement non linéaire.

Plus on réduit le pas de temps, plus les corrélations mutuelles entre les paramètres d'entrées se réduisent, et par conséquent, le risque d'existence de la colinéarité se réduit à son tour.

### 3.1. Utilisation de la régression linéaire multiple

On rappelle que la base de données est subdivisée en trois sous ensembles, les données utilisées dans cette section sont celles du sous-ensemble de la phase de test. Ce sont les données météorologiques d'une période qui s'étale sur 07 mois (du mois de juin au mois de décembre).

L'équation de RLM utilisée selon les coefficients de régression obtenus est la suivante :

$$ET0 = 0,17T - 0,06Rh + 1,31V + 0,26I - 0,05 \quad (6)$$

Avec

ET0 : évapotranspiration de référence (mm/jour), T : température moyenne journalière (°C), Rh : humidité relative (%), V : vitesse moyenne journalière du vent (m/s) et I: durée d'insolation (nombre d'heures par jour).

Les données d'analyse statistique montrent une relation étroite entre la série observée et la série simulée. En général, tous les paramètres utilisés dans les modèles contribuent de manière significative dans l'estimation ET0. Les résultats ont montré qu'au niveau de confiance  $\alpha = 0,05$ , la contribution marginale de chaque variable est significative. Ils ont également montré que le F observé (1445,14) a été plus élevé que le F critique (3,9). Cela veut dire que les coefficients de détermination ne sont pas dus au hasard.

La statistique T. de l'humidité relative est -11,40, ceci indique que celle-ci évolue inversement par rapport à l'évapotranspiration et donc par rapport aux besoins en eau des cultures. Par contre, la température de l'air, la vitesse du vent et la durée d'ensoleillement ont un effet positif sur l'évolution de l'ET0. Cependant, il est utile de prendre en compte l'influence combinée de l'ensemble des paramètres météorologiques sur ET0.

En ce qui concerne la signification individuelle des paramètres météorologiques, l'étude a révélé que la valeur la plus élevée du coefficient de corrélation a été obtenue entre

l'évapotranspiration et la température de l'air, suivie de celui de l'humidité relative et puis celui de la vitesse du vent.

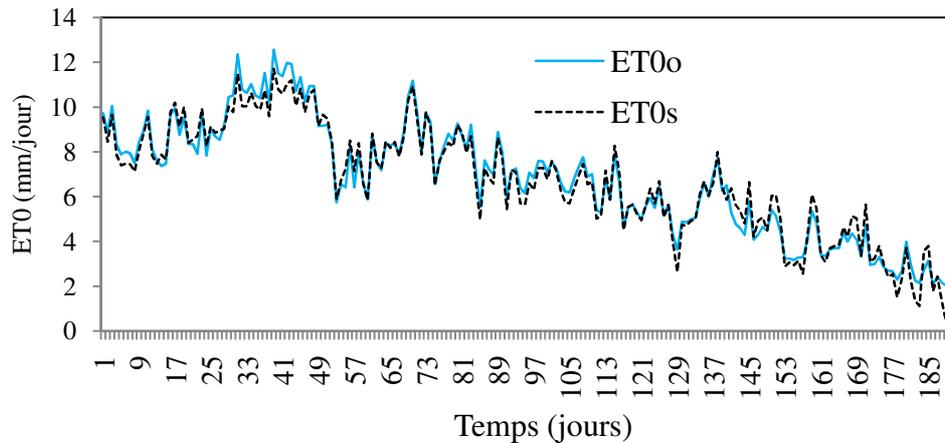


Fig. 29: Comparaison graphique entre la série observée et la série simulée de l'ET0 (pas de temps journalier, phase test)

La figure 29 indique que la série observée (ET0o) et la série simulée (ET0s) ont presque la même allure, elles se confondent dans plusieurs points. Néanmoins, les deux séries divergent parfois, notamment au niveau des pics des petites valeurs. Par conséquent, les valeurs observées ont plus d'importance que les valeurs simulées dans certains cas, et vice-versa dans les autres cas. La corrélation entre les valeurs de l'ET0 simulées par RLM et les valeurs observées est forte ;  $R^2 = 0,97$  (Fig. 30).

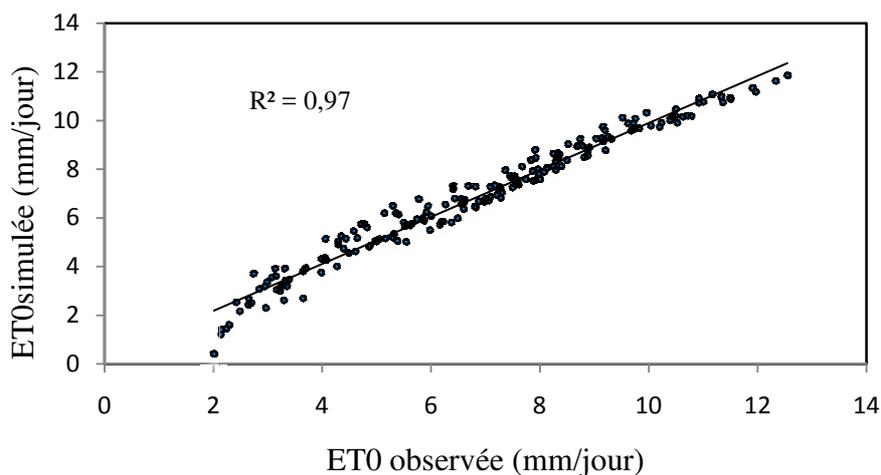


Fig.30: Correlation entre ET0 observée et ET0 simulée

Les valeurs de critère de performance E,  $R^2$ , RMSE, et MSE de ce modèle pour la base de données relative à la phase de test sont respectivement 0,97, 0,97, 0,20 (mm/jour)<sup>2</sup> et

0,45 mm/jour. Ce résultat montre que tous ces critères de performance sont très satisfaisants, il souligne que tous les facteurs influent sur ET0. Il indique aussi que la relation entre les deux séries est très forte.

### 3.2. Utilisation de réseaux de neurones

Par l'utilisation d'une simple architecture de réseau de neurones (une couche cachée à 4 nœuds), nous avons obtenu des résultats très satisfaisants. En effet, la comparaison des critères de performance de chaque phase de modélisation avec ceux de la régression linéaire multiple (RLM) ont montré que le modèle de RNA est mieux par rapport au modèle obtenu par la RLM (tableau 25).

Dans ce contexte, Tabari et al. (2010) ont noté que la comparaison des performances du modèle a montré que le RNA était plus appropriée que RLM. Contrairement, Izadifar (2010), a constaté que l'utilisation d'une seule couche cachée à cinq neurones, le modèle de la RLM est le meilleur.

Tableau 25 : Critères de performance obtenus par RLM et ANN avec une seule couche cachée contenant quatre neurones

| Méthodes de modélisation | R <sup>2</sup> | E    | MSE  | RMSE |
|--------------------------|----------------|------|------|------|
| Régression Multiple      | 0,97           | 0,97 | 0,20 | 0,45 |
| Réseau de neurones       | 0,99           | 0,99 | 0,07 | 0,27 |

Les résultats mentionnés ci-dessus sont très satisfaisants et nous pouvons nous arrêter à cette simple architecture. Dans ce contexte, Tabari et al. (2009) ont noté que, parmi plusieurs architectures testées, celle d'une seule couche cachée avec 5 neurones était la meilleure. On peut donc dire que l'RNA avec juste une seule couche cachée est suffisante pour représenter la relation non linéaire entre les paramètres climatiques et l'ET0 correspondante. Mais, il convient de noter que l'avantage de la méthode de neurones réside dans la possibilité d'avoir des améliorations dans les critères de performance en modifiant l'architecture du réseau. En effet, Koleyni (2010) considère que la performance des réseaux de neurones est très souvent liée à son architecture. Celle-ci est habituellement déterminée par des expériences.

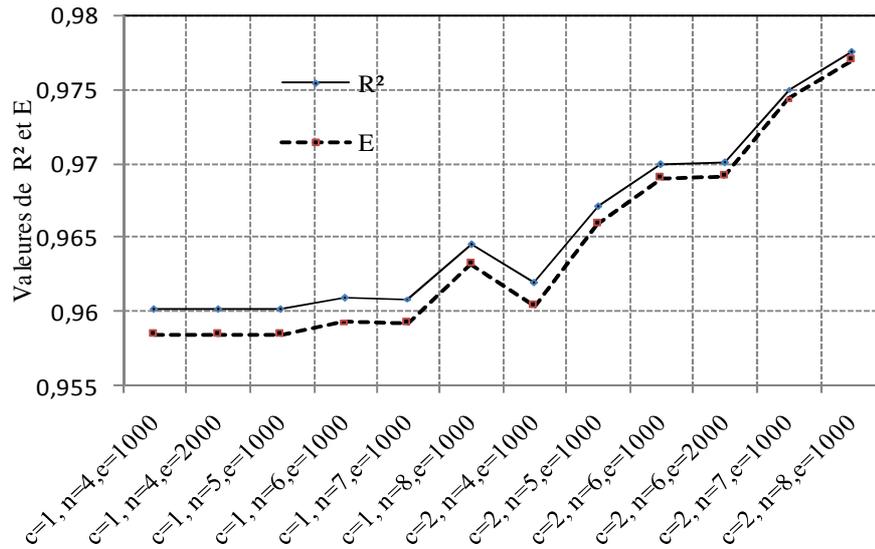
Le choix de la capacité du réseau de neurones reflète primordialement sa capacité d'apprentissage et de généralisation. Si le modèle de réseau est proportionnellement faible, il

sera incapable d'obtenir la fonction désirée. Toutefois, si elle est trop complexe, il sera incapable de généraliser le modèle.

À travers diverses architectures testées, nous avons cherché à maximiser le coefficient de détermination  $R^2$  et le critère de Nash  $E$  à environ 1. En fait, nous avons appliqué la technique d'essai-erreur en augmentant le nombre de neurones dans la première couche cachée jusqu'à l'arrêt de l'amélioration et ensuite ajouter une autre couche cachée. L'amélioration des performances des modèles par l'ajout de neurones à la seule couche cachée a été limitée à 13 neurones, pour diminuer par la suite. Les valeurs de MSE obtenus dans la phase de test étaient 0,029, 0,019 et 0,027 (mm/j)<sup>2</sup> respectivement par 12, 13 et 14 neurones. La meilleure valeur obtenue par une couche cachée était plus grande que 0,0047 (mm/jour)<sup>2</sup>, qui a été obtenu par l'architecture du réseau choisie dans cette étude. Nous avons constaté que par une seule couche cachée, les valeurs de  $R^2$  sont fluctuantes, et avec 2 couches cachées, les valeurs de  $R^2$  progressent de manière rapide et monotone. En outre, les valeurs de critère de Nash ( $E$ ) ont progressé de manière significative jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur de 1 à la phase de test (Fig. 31).

Un autre paramètre qui doit être absolument pris en considération est le nombre d'itérations. Les différentes combinaisons montrent que 1000 itérations sont suffisantes pour obtenir le meilleur résultat. L'ajout d'autres itérations est inutile ou peut même diminuer la performance.

L'augmentation du nombre de couches cachées n'améliore pas automatiquement la performance du modèle. Elle peut affecter négativement tous les critères de performance, comme par exemple l'architecture du réseau ( $c = 2$ ,  $n = 4$ ), mais avec plus de neurones à chaque couche cachée le taux d'amélioration est très rapide.



Arcitecture du réseau et nombre d'itérations

Fig. 31: Evolution R² et E en fonction de l'architecture du réseau et le nombre d'itérations

où

(c) est le nombre de couches cachées, (n) est le nombre de neurones par chaque couche cachée et (e) nombre des époques (itérations).

En même temps que ces deux critères se rapprochent de 1, les critères qui reflètent l'importance des erreurs commises entre les valeurs observées et les valeurs simulées régressent peu à peu pour atteindre leurs valeurs minimales (Fig. 32).

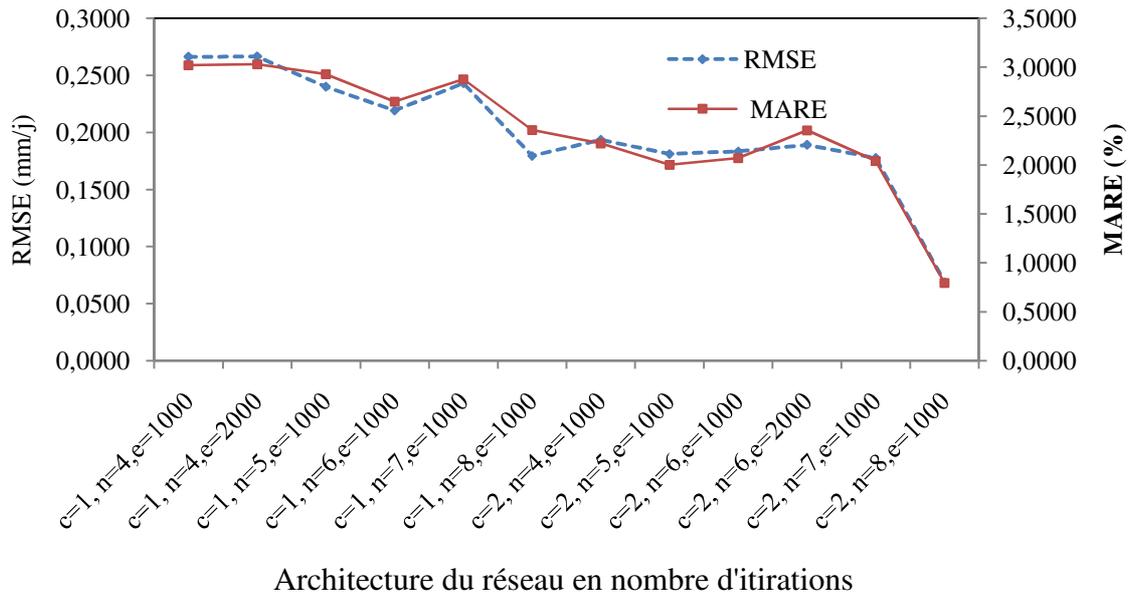


Fig. 32: Evolution de RMSE et MARE en fonction de l'architecture du réseau et nombre d'itérations

où

(c) est le nombre de couches cachées, (n) est le nombre de neurones par chaque de couche cachée et (e) nombre des époques (itérations).

Plusieurs tests approfondis ont été menés afin de sélectionner l'architecture optimale du réseau. Par conséquent, ces tests ont conduit à un réseau de 2 couches cachées, chacune à 8 neurones (Fig. 33).

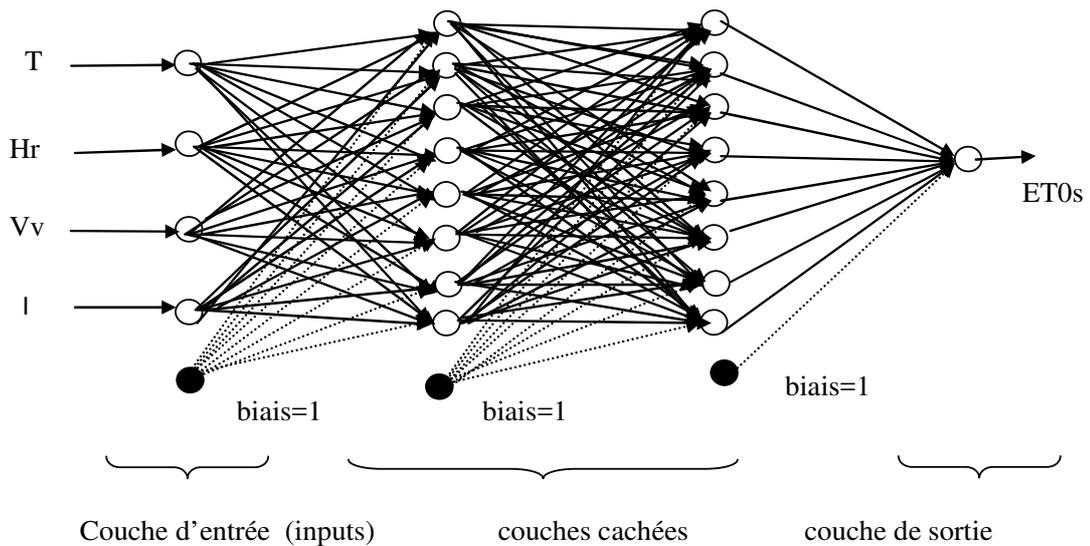


Fig. 33 : Structure de trois couches du réseau

de neurones type « feed forward »

Cette topologie utilise deux fonctions sigmoïdes de couches cachées et une fonction linéaire de la couche de sortie telle qu'elle est représentée dans la figure 34.

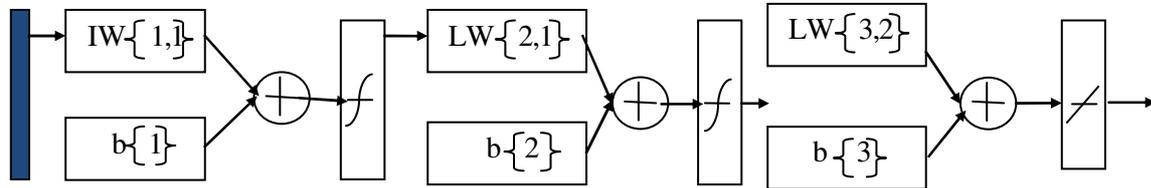


Fig. 34 : Schéma de l'architecture du réseau utilisé dans cette étude

Où  $IW\{1,1\}$  est la matrice de poids dans la première couche cachée  $b\{1\}$  est le vecteur des biais de la première couche cachée  $LW\{2,1\}$  est la matrice de poids dans la deuxième couche cachée;  $b\{2\}$  est le vecteur des biais dans la deuxième couche cachée;  $LW\{3,1\}$  est la matrice de poids dans la couche de sortie;  $b\{3\}$  est le vecteur des biais dans la couche de sortie.

Il convient de mentionner que, lorsque l'architecture du réseau devient complexe, le processus d'apprentissage devient de plus en plus lourd et le temps requis pour effectuer cette opération augmente progressivement. Par conséquent, la modélisation peut durer une longue période et la recherche d'une meilleure architecture nécessite un temps considérable. En outre, le réseau de neurones nécessite la mise en place de taux d'apprentissage et le nombre d'itérations. Ainsi, après différentes combinaisons, nous avons choisi un taux d'apprentissage = 0,2 et nombre d'itérations = 1000.

Tableau 26 : Comparaison des critères de performance obtenue par le model de la RLM et le modèle du RNA

| Critères de performance | RLM           |      |            | RNA           |      |            |
|-------------------------|---------------|------|------------|---------------|------|------------|
|                         | Apprentissage | Test | Validation | apprentissage | Test | Validation |
| R <sup>2</sup>          | 0,93          | 0,97 | 0,95       | 0,99          | 1,00 | 1,00       |
| E                       | 0,93          | 0,97 | 0,95       | 0,98          | 1,00 | 0,99       |
| MSE (mm/j) <sup>2</sup> | 0,45          | 0,20 | 0,23       | 0,16          | 0,00 | 0,03       |
| RMSE (mm/j)             | 0,67          | 0,45 | 0,49       | 0,40          | 0,07 | 0,17       |
| MARE (%)                | 7,74          | 5,19 | 6,62       | 4,96          | 0,80 | 2,45       |

À première vue, RLM montre une performance satisfaisante. Néanmoins, le modèle de réseau neuronal montre globalement une supériorité de performance par rapport à la RLM (tableau 26).

La comparaison des critères de performances obtenues lors des différentes étapes de modélisation par les deux méthodes et pour les différents sous ensembles de base de données, montre l'importance de la modélisation par les réseaux de neurones, La MARE (%), ou le pourcentage d'erreurs commises entre les valeurs réelles et les valeurs simulées de ET0, indique la performance élevée des réseaux neuronaux par rapport à celle de la RLM.

Il convient de signaler que l'un des obstacles qui s'oppose à l'application de cette approche est le problème de sur-apprentissage. On peut vraisemblablement parler de ce problème si l'erreur de prédiction du réseau sur l'ensemble d'apprentissage diminue alors que l'erreur sur la validation augmente de manière significative. Cela signifie que le réseau continue à améliorer ses performances sur les échantillons d'apprentissage mais perd son pouvoir de prédiction sur ceux provenant de la validation (Sterlin, 2007).

Le tableau 29 montre l'absence de sur-apprentissage parce que l'erreur (MSE) à la phase de test est inférieure à celle de la phase d'apprentissage. Il faut noter que des erreurs se produisent en raison de la nature des données, Pourtant, en cas de RLM le taux d'erreur est élevé par rapport au modèle de réseau neuronal, L'absence de sur-apprentissage est due principalement à la procédure adoptée pour l'éviter et en même temps confirme le bon choix de l'architecture du réseau de neurones (Laaboudi et al., 2011b).

Afin d'évaluer la corrélation entre les valeurs observées de l'ET0 et les valeurs simulées, on les a tracés dans un graphique comme indiqué dans la Fig. 35. On constate que les points sont bien répartis autour de la droite  $y = x$ . Cela montre une très bonne concordance, ce qui explique un coefficient de corrélation élevée lors de différentes phases ; apprentissage, test et validation. Nous avons mentionné que la plupart des valeurs prédites avec RNA sont situées près de la ligne 45. En outre, cette étude conclut que la combinaison de la température moyenne, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et la durée d'ensoleillement fournit de meilleures performances dans la prédiction de l'évapotranspiration de référence. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Wang et al. (2011).

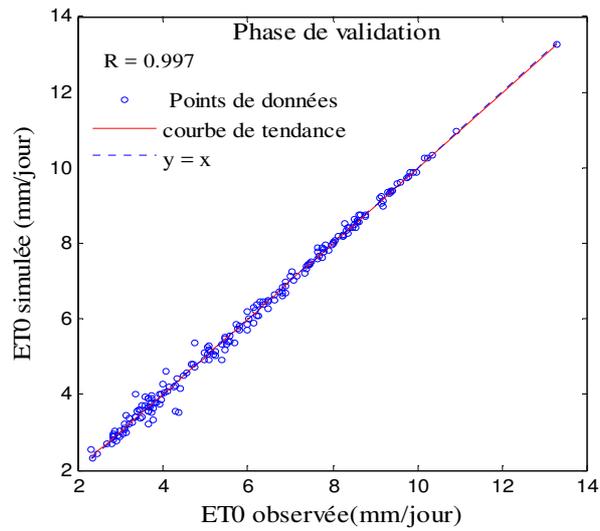
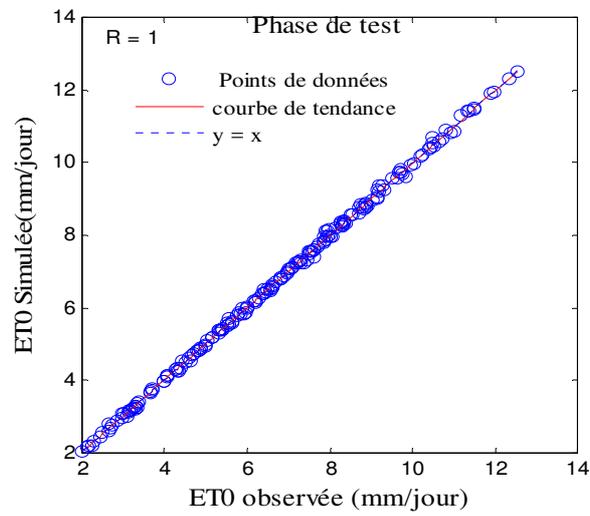
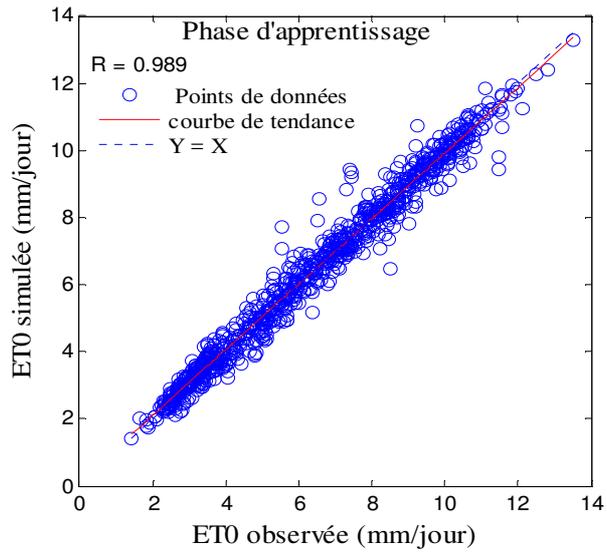


Fig. 35 : Relation entre ET0 simulée et ET0 observée pendant les différentes phases de modélisation

En outre, les paramètres statistiques montrent des ressemblances étroites pendant les trois phases de modélisation, Ces résultats confirment la haute performance du modèle (tableau 27).

Tableau 27 : Paramètres statistiques de la série observée et simulée d'ET0 (mm/j)

| Phases de modélisation | ET0  | Min  | Max    | Moyenne | Médiane | Ecartype |
|------------------------|------|------|--------|---------|---------|----------|
| Apprentissage          | ET0o | 1,43 | 13,52  | 6,37    | 6,29    | 2,65     |
|                        | ET0s | 1,42 | 13,27  | 6,37    | 2,39    | 2,62     |
| Test                   | ET0o | 2,01 | 12,55  | 6,80    | 6,97    | 2,56     |
|                        | ET0s | 2,01 | 12, 51 | 6,80    | 6,94    | 2,56     |
| Validation             | ET0o | 2,31 | 13,29  | 5,96    | 5,77    | 2,29     |
|                        | ET0s | 2,32 | 13,26  | 5,96    | 5,73    | 2,29     |

La comparaison entre les valeurs de la série observée et celles de série simulée de l'ET0 montre qu'elles ont presque la même allure (Fig. 36).

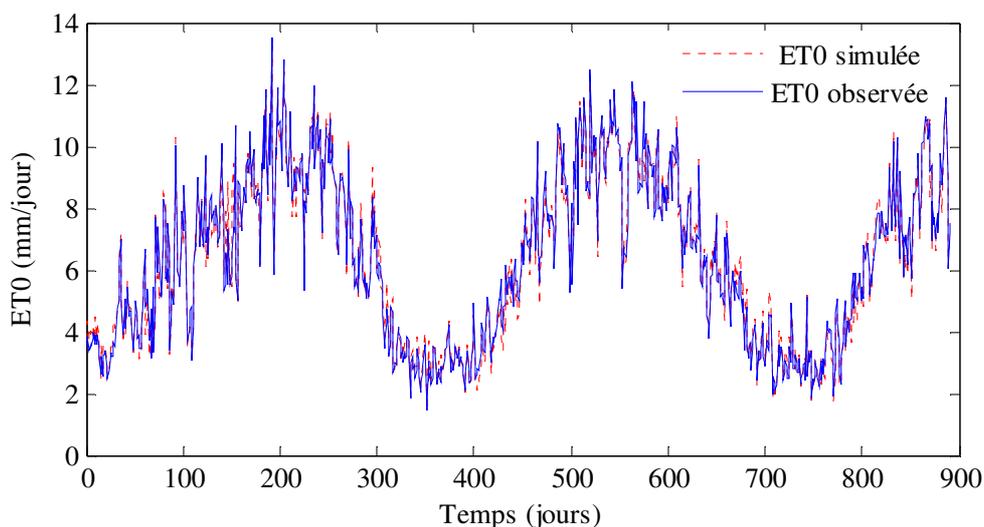


Fig. 36 : Comparaison entre les valeurs de la série observée et celles de la série simulée d'ET0 (phase d'apprentissage)

Si nous comparons les résultats obtenus par les réseaux de neurones en phase de test (ET0n) avec ceux obtenus par la méthode de régression multiple (ET0m) pour le même ensemble de données, nous pouvons voir clairement que la série obtenue par les réseaux de neurones est plus proche par rapport à celle de la RLM (Fig. 37), Cette différence devient plus importante avec des valeurs extrêmes. Ce qui ajoute une autre justification au choix des réseaux de neurones, Dans ce même contexte Deswal et Pal (2008), ont noté que les deux approches d'analyse de régression qu'ils ont utilisé, le réseau neuronal artificiel donne de

meilleurs résultats en termes de prédiction de l'évaporation due au coefficient de corrélation plus élevée avec moins d'erreur moyenne de la racine quadratique (RMSE).

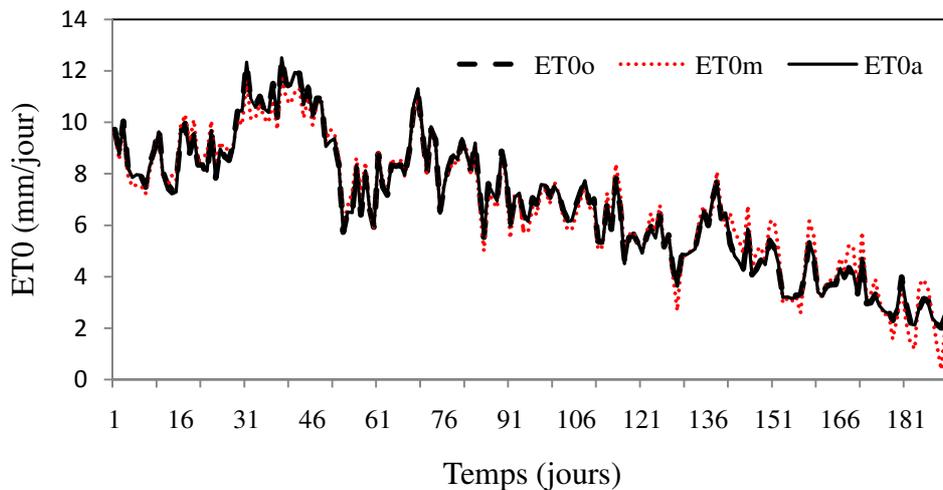


Fig. 37: Comparaison graphique entre la simulation de RNA et celle de la RLM (phase de test )

Nous devons avouer donc, que la performance des modèles varie selon le nombre d'entrées ainsi que du pas de temps prévu, En effet, la performance est d'autant meilleure qu'on s'intéresse à la modélisation à pas de temps plus étendu. Doté d'une architecture simple, on a obtenu une très forte corrélation, c'est à dire,  $R^2$  proche de 1, Cette performance décroît lorsque le nombre d'entrées est réduit.

D'autres facteurs peuvent probablement intervenir et influencer sur la performance des modèles. Ce sont notamment la variabilité (écart type) entre les valeurs des paramètres d'entrée et leurs corrélation avec le paramètre de sortie. On constate que les écarts types des valeurs des entrées sont d'autant plus réduits qu'en allant du pas de temps journalier au pas du temps mensuel (Tableau 28).

Tableau 28 : Ecart type des différents paramètres d'entrée

| Pas de temps | T (°C) | Hr (%) | Vv (m/s) | I (h/j) |
|--------------|--------|--------|----------|---------|
| Journalier   | 8,84   | 14,38  | 0,75     | 2,81    |
| Décadaire    | 8,83   | 12,57  | 0,39     | 1,46    |
| mensuel      | 8,69   | 11,91  | 0,27     | 1,09    |

Nous avons constaté tout à fait le contraire pour les corrélations entre les entrées et les sorties. C'est-à-dire entre la variable dépendante et les variables indépendantes (tableau 29).

En effet, lorsque la variabilité entre les valeurs du même paramètre est réduite et la corrélation entre les paramètres d'entrée et celle de sortie est forte, la performance des modèles sera bonne sans une architecture complexe.

Tableau 29 : Corrélations entre les différents paramètres d'entrée et le paramètre de sortie

| Pas de temps | T (°C) | Hr (%) | Vv (m/s) | I (h/j) |
|--------------|--------|--------|----------|---------|
| Journalier   | 0,86   | -0,79  | 0,31     | 0,42    |
| Décadaire    | 0,91   | -0,82  | 0,32     | 0,48    |
| mensuel      | 0,93   | -0,86  | 0,37     | 0,57    |

Cela aidera à choisir rapidement l'architecture qui convient selon la puissance des corrélations entre les paramètres et la variabilité des valeurs pour le même paramètre. Il faut noter que le point faible de la méthode de la régression linéaire multiple devient un point fort pour la méthode de réseaux de neurones.

## Chapitre VI : RESULTATS DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

Avant d'entamer l'analyse des résultats, il est intéressant de rappeler que :

- A la station expérimentale, la date de semis de la première campagne était tardive à cause de menaces de criquets.
- Le précédent cultural pour la parcelle de la station était la luzerne (M. Sativa).
- Le terrain du pivot est nouvellement exploité, il est cultivé par le blé pour sa deuxième campagne.

### 1. Développement de la culture

#### 1.1. Développement des racines

Afin d'éviter la destruction de la culture et l'hétérogénéité de l'échantillonnage, ces prélèvements ont été effectués dans les bordures extérieures des blocs. Ils ont abouti aux résultats suivant (tableau 30) :

Tableau 30 : Extension racinaires (cm) au stade fin tallage (première campagne)

| Traitements           |     | Traitements de fertilisation |      |      |      |         |
|-----------------------|-----|------------------------------|------|------|------|---------|
|                       |     | N                            | NK   | NP   | NPK  | Moyenne |
| Traitements hydriques | V   | 33                           | 28   | 30   | 30   | 30,25   |
|                       | IV  | 31                           | 28   | 38   | 38   | 33,75   |
|                       | II  | 37                           | 38   | 42   | 46   | 40,75   |
|                       | I   | 26                           | 32   | 40   | 40   | 34,5    |
|                       | III | 36                           | 32   | 32   | 32   | 33      |
| Moyenne               |     | 32,6                         | 31,6 | 36,4 | 37,2 | 34,45   |

Le développement des racines croît rapidement durant les stades initiaux de la culture, il atteint 35 cm au stade tallage et 55 cm au stade montaison. Il avait une légère avance en croissance dans les planches fertilisées en phosphore par rapport aux autres, puis c'est la profondeur du sol qui détermine la profondeur maximale atteinte.

### 1.1.1. Effet de la fertilisation

Nous avons constaté que les racines du blé en présence du phosphore sont plus développées (37,2 cm et 36,6 cm) que dans le cas contraire (32,6 cm et 31,6 cm). Ainsi il a été démontré que l'élément P a un effet très positif sur l'extension des racines du blé. En outre l'apport supplémentaire du K n'a rien ajouté par rapport à l'extension des racines.

Dans ce contexte, Matthieu (2006) a souligné que l'élément phosphore joue un rôle important pour le développement des racines du blé. En outre, les apports supplémentaires en potassium au niveau des parcelles sans phosphore n'ont pas amélioré l'extension des racines. Ceci confirme le résultat obtenu par Hue et al. (1997, in Razi, 2006) qui indique que la déficience en phosphore diminue l'extension racinaire.

### 1.1.2. Effet de l'irrigation

L'effet des traitements hydriques sur le développement des racines diffère d'un traitement à l'autre. Nous avons remarqué que le manque d'eau ainsi que l'excès, tous deux ont un effet négatif sur la croissance des racines. C'est l'irrigation intermédiaire (traitement II) qui a favorisé bien l'extension des racines. Pour ce traitement les racines ont mesuré 40,8 cm de longueur contre 30,3 et 33 cm respectivement pour la plus grande et la plus faible fréquence.

Le résultat de l'analyse de la variance (tableau 31) indique que l'effet des traitements hydriques est significatif par contre l'effet de traitements de fertilisation est non significatif.

Tableau 31 : Analyse de la variance pour l'extension des racines

| Sources de variations | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne des carrés | F observé | Probabilité | Valeur critique de F |
|-----------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------|-------------|----------------------|
| T. hydriques          | 239,7            | 4                | 59,92              | 4,06      | 0,02        | 3,25                 |
| T. fertilisation      | 114,55           | 3                | 38,18              | 2,59      | 0,10        | 3,49                 |
| Erreur                | 176,7            | 12               | 14,72              |           |             |                      |
| Total                 | 530,95           | 19               |                    |           |             |                      |

CV = 11%

## 2. Développement des parties aériennes

La culture du blé sous pivot a été soumise à des traitements hydriques et de fertilisations uniformes et identiques, tandis qu'à la station elle obéit à des traitements différents. Le développement végétatif sous pivot était excellent dans sa globalité (fig. 38), excepté certains endroits limités, où nous avons observé une faiblesse de la croissance.

Des plages jaunâtres sont souvent observées sous pivot au stade plein tallage (photo 1), ceci est dû probablement, soit à un excès d'eau ou plutôt à une déficience en azote. Ce phénomène était observé à la station mais au stade montaison. La cause est due notamment à un déficit en azote, car à ce moment l'utilisation de l'azote par la culture est élevée et les apports ne couvrent pas les besoins. Dans cette situation, il est utile d'ajouter une fraction d'azote à ce stade.

La culture en cases lysimétriques sous pivot qui est conduite de la même façon que la totalité de la surface cultivée montre aussi un bon développement végétatif (photo3).

A la station expérimentale, le développement végétatif diffère d'un traitement à un autre. Il était très bon en présence du phosphore dès le début du cycle. Ce résultat était aussi observé par Matthieu (2006), qui a indiqué que le phosphore accélère le développement végétatif du blé avec pour conséquence une maturation plus précoce des grains.

Par une bonne irrigation le retard en développement peut être se rattrapé si la teneur du sol en phosphore est satisfaisante (photos 4 et 5).



Fig. 38 : développement aérien du blé ; photos 1,2 et 3 culture sous pivot, photos 3 et 4 essai de la station expérimentale

Durant la troisième campagne, à cause de la modification de l'emplacement de différents traitements d'une manière aléatoire, il en résulte l'existence des parcelles qui n'ont jamais reçues des apports en phosphore, d'autres sont épandues durant deux campagnes et d'autres sont fertilisées durant les trois campagnes consécutives, alors le développement végétatif du blé a été différent dans ces parcelles en conséquence. Ainsi, on a remarqué que le développement est meilleur dans les parcelles fertilisées durant la présente campagne suivi de celles épandues la campagne précédente. Cela peut s'expliquer par le fait que le reliquat en cet élément a contribué à la fertilisation mais sa quantité est inférieure aux besoins de la culture.

L'effet des traitements hydriques sur la croissance du végétal est important. Les valeurs obtenues indiquent que la croissance des tiges suit presque la même allure que la croissance des racines. En effet, une irrigation avoisinante des besoins en eau de la culture favorise mieux la croissance des tiges (45,7 cm) en moyenne, par contre un déficit hydrique accentué ou un excès d'eau prolongé ont des effets négatifs, 41,3 cm et 43,6 cm, respectivement par la plus faible fréquence et la plus forte.

Les différents traitements (irrigation et fertilisation) et aussi leur interaction ont des effets significatifs sur la croissance de la culture (tableau 32).

Tableau 32 : Analyse de la variance pour la croissance de la culture

| Source des variations   | Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne des carrés | F     | Probabilité | Valeur critique de F |
|-------------------------|------------------|------------------|--------------------|-------|-------------|----------------------|
| Fertilisation           | 14,08            | 3                | 4,69               | 112,7 | P<0,01      | 2,90                 |
| Irrigation              | 4,25             | 3                | 1,42               | 34,00 | P<0,01      | 2,90                 |
| Interaction             | 4,25             | 9                | 0,47               | 11,33 | P<0,01      | 2,19                 |
| A l'intérieur du groupe | 1,33             | 32               | 0,04               |       |             |                      |
| Total                   | 23,91            | 47               |                    |       |             |                      |

### 2.1. Indice de tallage

Le nombre de talles/plant varie sensiblement d'une planche à l'autre. Le coefficient de tallage était faible dans certaines planches sans apport du phosphore, où nous avons

compté seulement 1 à 2 talles/plant. En revanche les planches bien fertilisées ont comptées 3 à 4 talles/plant.

## 2. 2. Indice foliaire

L'indice foliaire ou LAI (leaf area index), a reflété l'état sanitaire de la culture, il croit rapidement pour atteindre sa valeur maximale au stade floraison (5,70 en moyenne) (Tableau 33). Il diffère d'un traitement à un autre, et dépend largement de l'indice de tallage.

Tableau 33 : Evolution de l'indice foliaire du blé (en moyenne) durant les stades végétatifs

| 3 Feuilles | Début tallage | Montaison | Epiaison | Floraison | Laiteux | Pâteux | Maturation |
|------------|---------------|-----------|----------|-----------|---------|--------|------------|
| 0,23       | 0,35          | 1,67      | 3,06     | 5,72      | 5,70    | 5,36   | 4,01       |

L'analyse de variance indique une différence significative ( $P < 0,01$ ) entre les valeurs de LAI pour chaque campagne d'essai. Cela montre que LAI n'est pas un caractère variétal. Il peut changer avec l'évolution des conditions environnementales, telles que la densité de semis (Riffkin et al., 2001) et la sensibilité plus ou moins élevée vis-à-vis au à la salinité (Amjad, 2008). Dans notre cas, cette différence est due principalement aux variations des conditions climatiques durant les cycles de croissance durant chaque campagne. La valeur maximale du l'indice foliaire est de 6,6, elle est très proche de 6,5 obtenue par Bavec et al. (2007).

## 3. Durée du cycle végétatif

Les observations menées sur terrain indiquent que, dès le stade montaison, l'effet de l'humidité du sol sur le décalage des stades végétatifs est nettement visible. La différence s'accroît au fur et à mesure pour atteindre quelques jours en fin de cycle (photo 7).

Ainsi, on a noté en fin mars les phases : fin floraison, laitieux et fin laitieux respectivement du tour d'eau le moins espacé au tour d'eau le plus espacé.

Le décalage s'est observé même à l'intérieur du même traitement hydrique à cause de différences entre les traitements de fertilisation.

Cette situation peut avoir un effet néfaste sur le rendement si la température est élevée au moment de la maturation. En effet, la forte humidité du sol du bloc III a causé un retard du

cycle végétatif du blé dans cette parcelle. Ceci a provoqué le phénomène d'échaudage suite à une élévation de la température au début de la maturation.

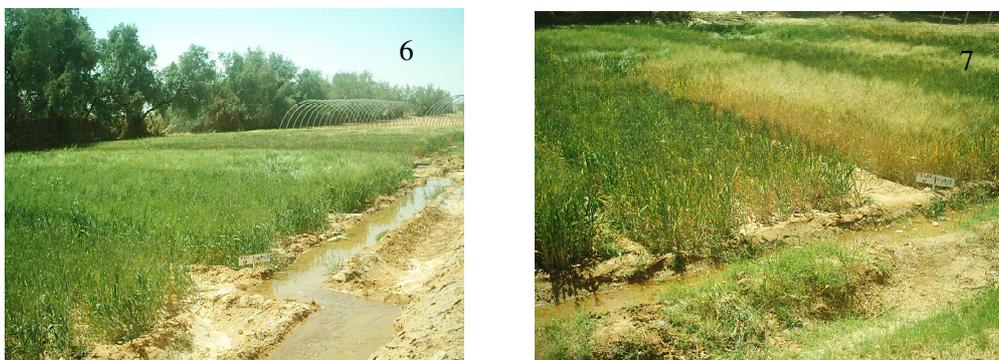


Fig. 39 : Hétérogénéité de développement entre traitements  
(Photo 6 : stades intermédiaires, Photo 7 : stades finaux)

#### 4. Rendements et leurs composantes

##### 4.1. Rendements et leurs composantes sous pivot

Les résultats obtenus sous pivot sont satisfaisants, ils sont parmi les meilleurs dans la willaya d'Adrar. Le pivot est installé dans un nouveau site, les mauvaises herbes sont absentes. Donc les techniques culturales appliquées par l'agriculteur ont donné leurs résultats (tableau 34).

Tableau 34 : Rendement et ses composantes sous pivot

| Campagnes | Bm (g/m <sup>2</sup> ) | Rd (g/m <sup>2</sup> ) | L.T (cm) | L. E (cm) | N.G/EPI | PMG (g) | IR   |
|-----------|------------------------|------------------------|----------|-----------|---------|---------|------|
| 2004/2005 | 1450,00                | 534,11                 | 67,00    | 5,14      | 55,80   | 40,16   | 0,37 |
| 2005/2006 | 1649,25                | 645,8                  | 64,03    | 7,1875    | 44,62   | 43,44   | 0,39 |

Le rendement en grain pour ce pivot durant la campagne 2005/2006 représente le pic de la région d'Adrar.

##### 4.2. Rendements et leurs composantes à la station expérimentale

Les résultats obtenus pour les trois campagnes sont présentés en détail en annexes 1,2 et 3.

Durant la première campagne toutes les composantes du rendement sont affectées par le manque d'eau et aussi par son excès. Ainsi nous avons enregistré pour la biomasse ; 0,98,

1,06, 1,44, 1,45 et 1,39 kg /m<sup>2</sup> en allant de la faible irrigation à la plus forte. Quant à la fertilisation, c'est le traitement qui contient le phosphore qui est le meilleur, avec 1,45 kg/m<sup>2</sup>.

La hauteur des tiges pendant la première campagne est affectée par la date de semis. En effet le blé cultivé est une variété à paille courte ; 85 cm, cette hauteur n'est pas atteinte pour l'ensemble de différents traitements (70 cm maximum). Ce sont la date de semis tardive et la température ambiante qui ont conduit à un cycle végétatif raccourci, ce qui a influé sur la hauteur de végétation.

Les rendements et leurs composantes obtenus durant les trois campagnes d'essai montrent des variations importantes d'une campagne à une autre. Le rendement le plus élevé a été obtenu durant la troisième campagne alors que, le nombre de grains par épi est plus élevé durant la première campagne et les longueurs des liges sont les plus élevées durant la deuxième campagne (tableau 35).

Tableau 35 : Rendements et leurs composantes à la station expérimentale

| Campagnes | Bm (g/m <sup>2</sup> ) | Rd (g/m <sup>2</sup> ) | L.T (cm) | L EPI (cm) | N.G/EPI | PMG (g) | IR   |
|-----------|------------------------|------------------------|----------|------------|---------|---------|------|
| 2004/2005 | 1264,00                | 485,96                 | 63,92    | 5,18       | 56,97   | 35,23   | 0,39 |
| 2005/2006 | 1200,03                | 473,88                 | 72,41    | 6,25       | 56,05   | 42,87   | 0,40 |
| 2006/2007 | 1372,33                | 609,16                 | 68,78    | 5,21       | 50,23   | 44,02   | 0,44 |

En fait, à cause de l'interaction de plusieurs paramètres, il était difficile d'avoir une relation visible entre les différentes composantes de rendement et le rendement en question. L'analyse des corrélations entre les rendements des trois campagnes et leurs composantes a aboutit aux résultats suivants :

Durant la première et la deuxième campagne les corrélations sont globalement faibles. La seule composante qui présente une relation étroite avec le rendement est la biomasse totale. Durant la troisième campagne par contre, toutes les composantes avaient une relation étroite avec le rendement (tableau 36).

Tableau 36 : Coefficients de détermination ( $R^2$ )  
entre les rendements et leurs composantes

| Composantes du rendement | Campagnes agricoles |           |           |
|--------------------------|---------------------|-----------|-----------|
|                          | 2004-2005           | 2005-2006 | 2006-2007 |
| BM (g/m <sup>2</sup> )   | 86,4                | 71,4      | 79        |
| LT (cm)                  | 6,7                 | 36        | 33        |
| L EPI (cm)               | 13,3                | 12,5      | 10,77     |
| N.G/EPI                  | 10,1                | 4         | 57        |
| PMG (g)                  | 3,5                 | 2,6       | 56        |
| IR                       | 7                   | 3,6       | 60        |

### 5. Contribution des composantes de rendement à l'élaboration du rendement

Il convient d'étudier l'apport de chaque composante sur l'amélioration du rendement, pour cela nous nous posons la question suivante : Est-ce qu'on peut prédire le rendement à partir de ses composantes ?

La régression linéaire multiple entre le rendement et ces composantes pour chaque campagne indique que seules la biomasse totale et l'indice de récolte ont contribué d'une manière significative dans l'élaboration du modèle de rendement. Etant donné que l'indice de récolte est déterminé à partir du rendement ( $IR = Rd/biomasse$ ), il serait utile de le supprimer pour éviter le problème de la colinéarité.

En absence de l'indice de récolte (IR), pendant la première campagne le nombre de grains par épi et la longueur des tiges ont une contribution significative. La contribution de la dernière composante est négative (T statistique = -2, 13).

Pendant la deuxième campagne les composantes : biomasse, longueurs des épis et poids de 1000 grains ont contribué significativement à l'élaboration du modèle.

En revanche, pendant la troisième campagne, seule la biomasse et le poids de 1000 grains qui ont une contribution significative. Par ailleurs, durant cette campagne, malgré la forte corrélation entre le rendement le nombre de grains par épi ( $R^2 = 0,57$ ), sa contribution est non significative

Il convient de noter que malgré la contribution non significative de certaines composantes du rendement, leur introduction dans le modèle consolide mieux la corrélation

entre le rendement et ses composantes. Si nous tenons compte toutes les composantes, on aboutira à de fortes corrélations entre le rendement observé et le rendement simulé pour chaque campagne. En effet, les coefficients de détermination  $R^2$  sont de l'ordre de 88,4 %, 77 % et 92,2% consécutivement pour les campagnes 2005, 2006 et 2007.

Pour les trois campagnes prises ensemble, ce sont la biomasse, le nombre de grains par épi et le PMG qui contribuent positivement à l'amélioration du rendement. De ce fait, nous pouvons prédire le rendement avec une précision satisfaisante ( $R^2= 85,7 \%$ ) en connaissant la biomasse, la fertilité de l'épi et le PMG (fig.40).

Le modèle de prédiction pour les 3 campagnes est le suivant :

$$Rd \text{ (g/m}^2\text{)} = 0,38 \text{ BM} + 2,42 \text{ NGE} + 5,8 \text{ PMG} - 358,19 \text{ (14)}$$

Avec BM = biomasse totale (g/m<sup>2</sup>), NGE = nombre de grains par épi et PMG = poids de 1000 grains (g).

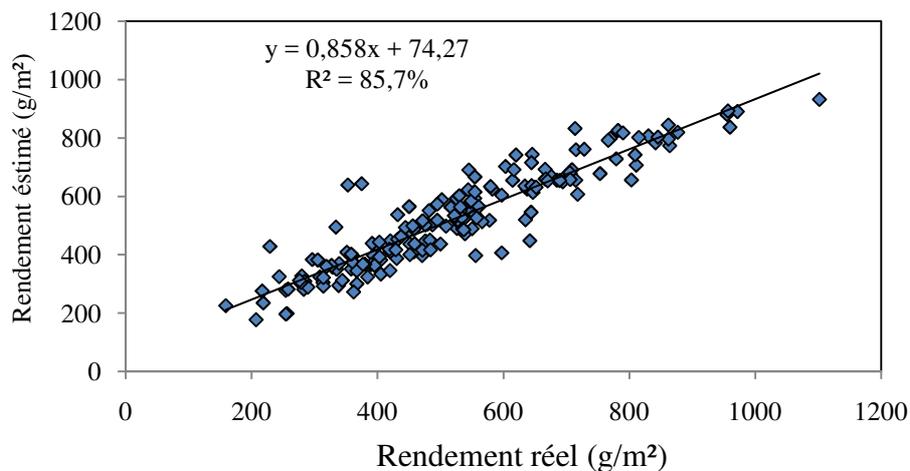


Fig .40: Corrélation entre le rendement réel et le rendement estimé

L'allure des courbes du rendement observé et rendement simulé se présente comme suit (Fig. 41).

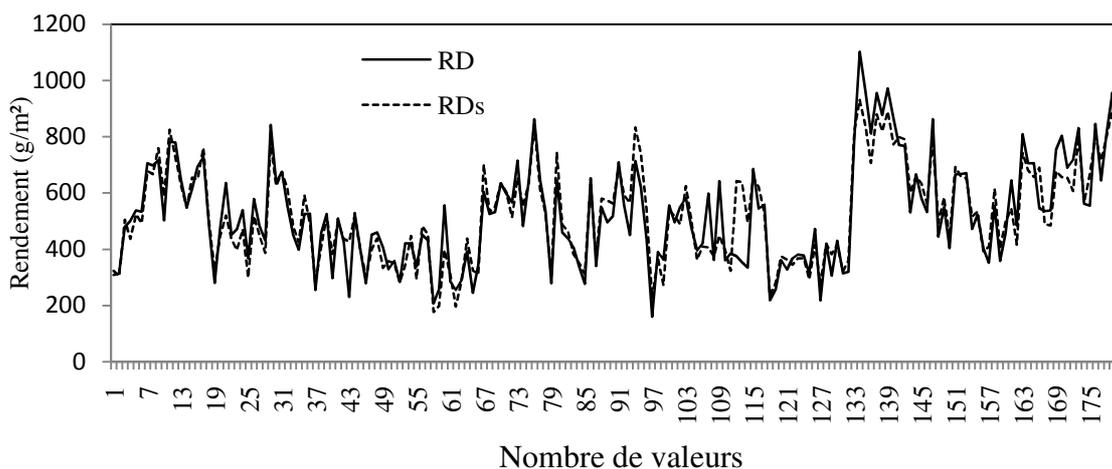


Fig. 41: Comparaison graphique entre le rendement réel et le rendement simulé

Donc, afin d'améliorer le rendement, il faut améliorer en préférence ces trois composantes. Pour ce la, nous devons chercher les facteurs qui agissent sur ces composantes qui conduisent à leur amélioration d'une manière significative.

## 6. Comportement de la culture vis-à-vis des traitements hydriques

### 6.1. Utilisation de l'eau du sol par la culture du blé

Les bilans hydriques pour la deuxième et la troisième campagne sont présentés en détail en annexe 4.

La culture du blé utilise l'eau du sol selon sa disponibilité ; celle-ci est régit par les lois de la circulation de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère. Pour une utilisation économique, la plante intervient par la régulation stomatique afin de réduire la quantité d'eau rejetée dans l'atmosphère. A titre d'exemple, la quantité d'eau utilisée par une culture de blé au stade montaison (3<sup>ème</sup> campagne), irriguée par deux régimes est présentée dans le tableau 37.

Tableau 37 : Consommation en eau du blé à l'ETM et l'ETR et stade montaison (mm/j)

| Temps en jours | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| ETM (mm/j)     | 8,08 | 8,27 | 7,24 | 6,54 | 7,20 | 6,87 | 6,31 |
| ETR (mm/j)     | 8,08 | 5,51 | 4,35 | 3,74 | 4,00 | 3,75 | 3,40 |

Si on porte les valeurs de l'ETR en fonction du temps sur un graphique, on en déduit que celles-ci suivent une tendance logarithmique (Fig. 42) ( $R^2= 0,90$ ).

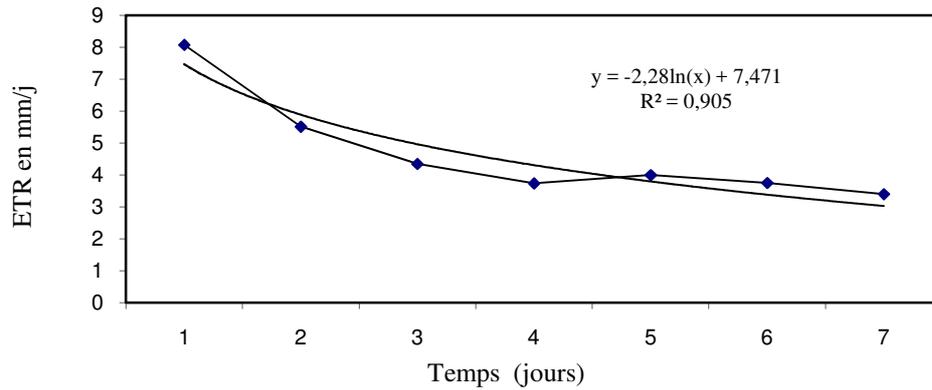


Fig. 42: Evolution de l'ETR durant une semaine au stade montaison

Ceci est en relation étroite avec l'évolution du potentiel de l'humidité dans le sol qui suit une tendance exponentielle (Fig. 43).

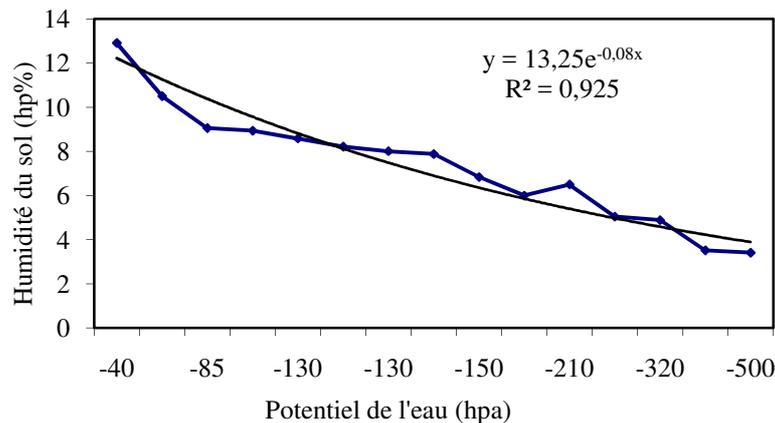


Fig. 43 : Evolution du potentiel hydrique en fonction de l'humidité du sol

Ainsi l'évolution de l'ETR pendant une période de temps, sans apport d'eau, est sous une forme logarithmique, inversement à l'évolution du potentiel de l'eau du sol durant la même période. C'est-à-dire, l'ETR est soumise aux différentes résistances qui s'opposent au flux d'eau du sol vers l'atmosphère à travers le végétal.

Dans les conditions de l'ETR le végétal résiste au déficit hydrique prolongé par plusieurs mécanismes, nous pouvons citer notamment :

- Une régression de l'appareil foliaire qui consiste à réduire au fur et à mesure la surface des feuilles par enroulement et de diminuer ainsi l'ETR.
- Développement de la partie racinaire qui permet d'épuiser davantage d'eau de survie à partir des couches profondes du sol.

En réalité, le végétal peut bénéficier aussi pendant une période de sa vie, de la remontée d'eau par capillarité. Car cette remontée de l'eau s'effectue d'une façon continue au niveau du sol où la circulation de l'eau est régie par la loi de la différence de potentiel et l'eau circule du point à potentiel le moins élevé vers le potentiel le plus élevé. Ce phénomène est plus visible pendant la nuit et durant la matinée, pendant lesquelles les endroits où s'exerce une forte succion d'eau par les racines durant le jour, récupèrent une partie de l'eau pendant la nuit lors d'une faible demande d'eau par évapotranspiration.

Ainsi les mesures effectuées par des tensiomètres indiquent une pression plus faible en début de matinée par rapport à celle mesurée la veille. Il peut aussi indiquer une pression inférieure à celle indiquée à midi du même jour (tableau 38).

Tableau 38 : Evolution du potentiel de l'humidité du sol au cours de trois jours successifs (hpa)

| date  | Heures | Profondeur du sol en cm |     |     |     |     |
|-------|--------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|
|       |        | 5                       | 10  | 20  | 25  | 30  |
| 31/01 | 8 h    | 320                     | 230 | 210 | 160 | 140 |
|       | 16 h   | 360                     | 270 | 250 | 175 | 145 |
| 01/02 | 8 h    | 340                     | 240 | 255 | 278 | 140 |
|       | 13 h   | 315                     | 220 | 260 | 240 | 140 |
|       | 16 h   | 390                     | 270 | 320 | 190 | 150 |
| 02/02 | 8 h    | 378                     | 260 | 320 | 195 | 140 |
|       | 13 h   | 360                     | 250 | 350 | 170 | 140 |
|       | 16 h   | 395                     | 280 | 390 | 200 | 155 |

Ceci s'explique par le fait que la plus forte consommation en eau s'effectue pendant le jour durant l'après midi.

En outre, d'après les mesures de l'humidité du sol effectuées quelques jours après irrigation, nous constatons que la culture utilise préférentiellement l'humidité disponible dans les couches superficielles du sol (fig. 44). Il convient de noter que l'augmentation de la tension dans cette couche est due en partie à l'évaporation du sol.

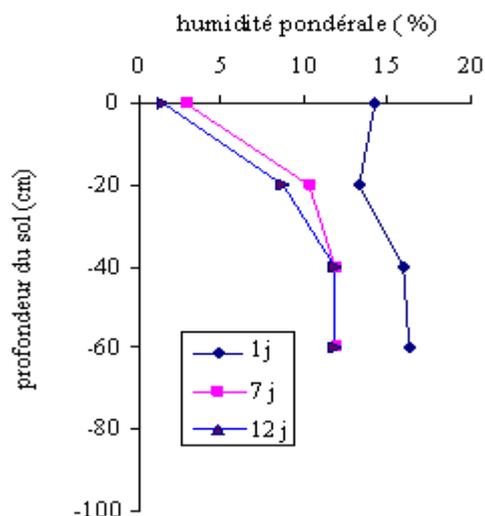


Fig. 44 : Evolution de l'humidité du sol cultivé en blé (stade montaison)

Une partie de l'eau gravitaire peut être puisée par la plante, car dès l'entrée de l'eau d'irrigation dans le sol, le végétal qui se comporte comme une véritable pompe, absorbe de l'eau tout au long du profil hydrique mais surtout à partir des couches superficielles.

En effet, on estime que durant le stade montaison, plus de 60% d'eau utilisée est absorbée des 20 premiers cm du sol. Ce taux est modifiable selon le stade végétatif et la teneur en eau du sol.

La culture du blé utilise l'eau du sol notamment à partir de la réserve utile, le rythme de la consommation dépend des stades végétatifs et de quantité d'eau disponible dans la tranche prospectée par les racines. La quantité d'eau utilisée est exprimée par l'évapotranspiration qui regroupe la partie évaporée par le sol et la partie transpirée par le végétal.

En l'absence de tout facteur limitant, en relation soit avec le végétal ou son environnement, l'évapotranspiration est maximale (ETM). C'est le cas d'une culture saine, sur le plan phytosanitaire et ne présentant aucune déficience nutritionnelle, bien développée et bien alimentée en eau où la teneur en eau du sol est maintenue très proche de la réserve facilement utilisable (RFU).

Dans le cas contraire, c'est l'évapotranspiration réelle (ETR) qui se manifeste. Nous avons constaté dans nos conditions, que les phases de l'ETM ne durent pas longtemps sans apport d'eau supplémentaire, la plante intervient par le mécanisme de la régulation stomatique afin de réduire la quantité d'eau évaporée à travers ses stomates. Elle lutte ainsi contre le

phénomène de déshydratation et le stress hydrique et économise les quantités d'eau disponibles (tableau 39).

Tableau 39 : Evapotranspiration réelle et maximale du blé (mm/j) selon des stades végétatifs (campagne 2006/2007)

| Evapotrans | Levée | 3 Feuilles | Tallage | Montaison | Epiaison | Floraison | Laiteux | Pâteux | Maturation |
|------------|-------|------------|---------|-----------|----------|-----------|---------|--------|------------|
| ETR        | 1,91  | 1,93       | 2,86    | 4,57      | 4,98     | 8,91      | 7,23    | 7,15   | 4,48       |
| ETM        | 2,44  | 2,97       | 3,29    | 5,7       | 6,81     | 9,77      | 7,98    | 7,75   | 5,95       |

Si la durée de la consommation de l'eau en condition de l'ETR n'est pas longue, c'est-à-dire une semaine à 10 jours selon les conditions climatiques et les besoins en eau la culture, nous pouvons économiser assez d'eau sans compromettre d'une manière significative le rendement. Ainsi, il a été réalisé un gain de 36 % d'eau apportée contre une perte de 15% en biomasse totale et en rendement (tableau 40).

Tableau 40 : Effet d'un stress hydrique court sur la production du blé

| Régime d'irrigation | Biomasse (q/ha) | Rendement (q/ha) | Eau apportée (mm) | Evapotranspiration (mm) | EUE (kg/mm/ha) |
|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------|----------------|
| Irrigation en ETR   | 142             | 55,30            | 746,36            | 626,92                  | 8,82           |
| Irrigation en ETM   | 167             | 65,30            | 1157,46           | 798,22                  | 8,18           |
| gain ou perte (%)   | 15              | 15               | 36                | 21                      | -0,08          |

## 5.2. Modélisation de l'évapotranspiration maximale (ETM)

Le bilan hydrique déterminé à partir des cases lysimétriques, nous a permis d'évaluer l'évapotranspiration maximale du blé. La connaissance de l'évapotranspiration de référence, ET<sub>0</sub>, permet de déterminer les valeurs du coefficient cultural (K<sub>c</sub>) en appliquant la formule ci après :

$$K_c = \frac{ETM}{ET_0} \quad (15)$$

Les résultats mentionnés dans tableau 40 indiquent que la valeur maximale du K<sub>c</sub> est atteinte au stade floraison (K<sub>c</sub> = 1,44) et la quantité d'eau maximale consommée par la culture du blé est effectuée au stade maturation (tableau 40).

Tableau 41 : Evolution de l'ETM et du Kc du blé pendant le cycle végétatif de la culture

| S. végétatifs | Levée | 3 Feuilles | Tallage | Montaison | Epiaison | Floraison | L. Pâteux | Maturation |
|---------------|-------|------------|---------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|
| ETM (mm/j)    | 1,44  | 1,81       | 3,33    | 5,29      | 5,81     | 7,61      | 8,16      | 6,03       |
| Kc            | 0,48  | 0,74       | 1,07    | 1,29      | 1,33     | 1,44      | 1,35      | 0,88       |

Cette valeur (Kc = 1,44) est plus grande de 1,24 obtenue par Tyagi et al. (2000) mais elle est très proche à 1,42 obtenue par Yongqiang et al. (2004).

A partir de la relation 15, nous pouvons déterminer les valeurs de l'ETM dans le but d'une utilisation ultérieure, il suffit de multiplier le Kc correspondant au stade végétatif par l'ET0 de la période en considération. Cependant, dans le cas où les valeurs de l'ET0 ne sont pas disponibles, nous pouvons contourner ce problème par la mise au point d'un modèle qui n'exige que la connaissance de la température moyenne de l'air (T), le coefficient cultural (Kc) et de l'indice foliaire (LAI).

Pour que la contribution marginale de chaque paramètre soit utile à la construction du modèle en question, la valeur de T statistique de chacun d'eux doit être supérieure à T critique. Dans notre cas la valeur de T critique au seuil de confiance  $\alpha = 0,05$  est = 2,085. En réalité, en utilisant l'analyse multivariée (régression linéaire multiple), deux options sont possibles :

La première option consiste à utiliser la relation linéaire entre les paramètres indépendants et le paramètre dépendant, dans ce cas LAI ne contribue pas à l'élaboration du modèle car sa valeur de T statistique est 0,72. On aura donc un modèle basé uniquement sur la température et le Kc (équation 16).

$$ETM = 0,27T + 4,76 Kc - 4,99 \quad (16)$$

Où ETM est l'évapotranspiration maximale du blé (mm/j), T est la température moyenne journalière (°C) et Kc est le coefficient cultural du blé.

Les résultats des paramètres statistiques de ce modèle sont présentés dans tableau 42.

Tableau 42 : Modélisation de l'ETM. Paramètres statistiques du modèle (option 1)

| Paramètres | T statistique | T critique | R <sup>2</sup> | F observé | F Critique | Probabilité |
|------------|---------------|------------|----------------|-----------|------------|-------------|
| Constant   | -6,61         | 2,085      | 90 %           | 93,48     | 3,10       | P<0,001     |
| T          | 7,04          |            |                |           |            |             |
| Kc         | 8,08          |            |                |           |            |             |

Les critères de performance du modèle sont les suivants ; le coefficient de détermination  $R^2 = 0,90$  (tableau 41) et la valeur du critère de Nash = 0,89. Les valeurs de MSE RMSE et MARE sont respectivement  $0,66 \text{ (mm/j)}^2$ ,  $0,81 \text{ (mm/j)}$  et  $21,16 \%$ .

La seconde option est lorsqu'on utilise une relation non linéaire. Dans ce cas la valeur de T statistique de LAI est 2,47, elle contribue donc d'une manière significative dans la construction du modèle. Sa formule est comme suit :

$$ETM = \exp (0, 26LAI^{0,5} + 0,046T + 0,95 Kc - 0,83) \quad (17)$$

Où ETM est l'évapotranspiration maximale du blé (mm/j), LAI (leaf area index) est l'indice foliaire ; T est la température moyenne journalière (°C) et Kc est le coefficient cultural du blé.

Les résultats des paramètres statistiques de ce modèle sont présentés dans tableau 43.

Tableau 43 : Modélisation de l'ETM. Paramètres statistiques du modèle (option 2)

| Paramètres | T statistique | T critique | R <sup>2</sup> | F observé | F Critique | Probabilité |
|------------|---------------|------------|----------------|-----------|------------|-------------|
| Constant   | -5,27         | 2,085      | 92 %           | 127,68    | 3,10       | P<0,001     |
| T          | 2,47          |            |                |           |            |             |
| LAI        | 5,56          |            |                |           |            |             |
| Kc         | 5,50          |            |                |           |            |             |

Les critères de performance du modèle sont  $R^2 = 0,92$  (tableau 43) et le critère de Nash = 0,92. Les valeurs de MSE, RMSE et MARE sont respectivement  $0,56 \text{ (mm/j)}^2$ ,  $0,75 \text{ (mm/j)}$  et  $12,76 \%$ . Ce ci indique que tous les critères de performance sont nettement améliorés par rapport au modèle précédent. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Laaboudi et Mouhouche (2012).

De ce fait, nous avons aboutit à une bonne relation entre les valeurs observées et les valeurs simulées de l'ETM (Fig. 45).

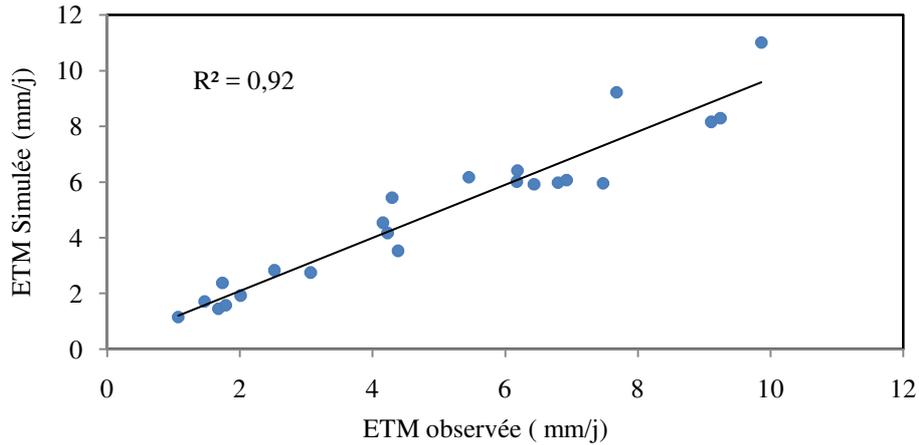


Fig. 45: Corrélation entre l'ETM observée et l'ETM simulée du blé

La comparaison graphique entre l'ETM observée (ETMo) et l'ETM simulée (ETMs) pendant les stades de croissance du blé au cours des trois campagnes d'essai indique une bonne concordance (Fig. 46).

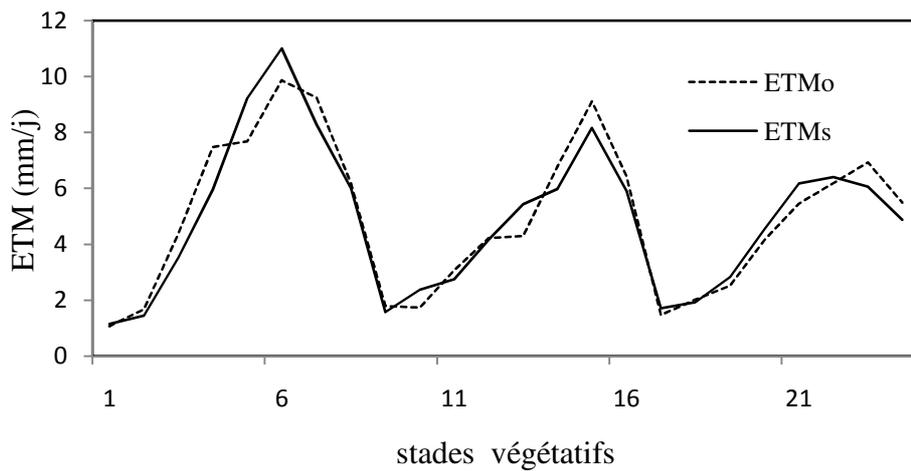


Fig. 46: Comparaison graphique entre l'ETM observée et l'ETM simulée durant les stades végétatifs du blé (3 campagnes)

### 5. 3. Effet des traitements hydriques sur les rendements et leurs composantes

L'analyse de la variance offre des indications précises sur l'influence de chaque traitement étudié sur les rendements obtenus et leurs composantes. Cette influence diffère d'une campagne à l'autre, car elle dépend d'autres facteurs.

#### 5.3.1. Première campagne

Les résultats d'analyse statistiques (tableau 44) indiquent que les quantités d'eau apportées ont un effet hautement significatif (HS) sur la biomasse et la longueur de l'épi. La

seule composante qui ne soit pas influencée par les traitements hydriques est la fertilité de l'épi (nombre de grains/épi). L'effet de l'interaction irrigation x fertilisation sur la biomasse est hautement significatif, contrairement à toutes les autres composantes qui ne se sont pas manifestées.

Tableau 44 : Résultats d'analyse statistique du rendement et ses composantes (Première campagne)

| Rendement et composantes | Niveau de signification |             | Paramètres statistiques |         |          |          |            |
|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|---------|----------|----------|------------|
|                          | irrigation              | interaction | Moyenne                 | E (int) | Cv (int) | Ppds (i) | Ppds (int) |
| Rd (g/m <sup>2</sup> )   | S                       | NS          | 474                     | 86,4    | 18,2     | 71,8     |            |
| BM (kg/m <sup>2</sup> )  | HS                      | HS          | 1200                    | 171,8   | 20,6     | 17,2     | 141,0      |
| PMG (g)                  | S                       | NS          | 42,78                   | 3,58    | 8,4      | 297      |            |
| NGE                      | NS                      | NS          | 56                      | 10,53   | 18,8     |          |            |
| IR                       | S                       | NS          | 0,40                    | 0,07    | 17,6     | 0,06     |            |
| LT (cm)                  | S                       | NS          | 72,41                   | 5,7     | 7,9      | 4,7      |            |
| LEP (cm)                 | HS                      | NS          | 6,25                    | 0,75    | 12       | 0,62     |            |

Avec E (int) ; écart type de l'interaction, Cv % (int): coefficient de variation de l'interaction et Ppds (i) : la plus petite différence significative pour l'irrigation.

### 5.3.2. Deuxième campagne

Durant la deuxième campagne, l'effet des traitements hydriques sur le rendement et ses composantes devient plus important dans la mesure où les traitements hydriques ont eu un effet hautement significatif sur la biomasse et sur la longueur des tiges et un effet significatif sur le rendement et le reste de ses composantes. Par contre, l'interaction n'avait eu d'effet significatif que sur la biomasse (tableau 45).

Tableau 45 : Résultats d'analyse statistique du rendement et ses composantes

| Rendement et composantes | N. de signification |             | Paramètres statistiques |         |          |          |            |
|--------------------------|---------------------|-------------|-------------------------|---------|----------|----------|------------|
|                          | irrigation          | interaction | Moyenne                 | E (int) | Cv (int) | Ppds (i) | Ppds (int) |
| Rd (g/m <sup>2</sup> )   | S                   | NS          | 474                     | 89,0    | 18,8     | 74       |            |
| BM (kg/m <sup>2</sup> )  | HS                  | S           | 1203,                   | 204,7   | 17       | 170      | 388,0      |
| PMG (g)                  | S                   | NS          | 42,87                   | 3,504   | 8,2      | 2,91     |            |
| NGE                      | S                   | NS          | 56,0                    | 9,38    | 16,7     | 7,8      |            |
| IR                       | S                   | NS          | 0,39                    | 0,05    | 14,8     | 0,04     |            |
| LT (cm)                  | S                   | NS          | 72,74                   | 5,8     | 8,0      | 4,82     |            |
| LEP (cm)                 | HS                  | NS          | 6,24                    | 0,76    | 12,2     | 0,02     |            |

Avec

E (int) ; écart type de l'interaction, Cv % (int): coefficient de variation de l'interaction et Ppds (i) : la plus petite différence significative pour l'irrigation.

### 5.3.3. Troisième campagne

Durant la campagne, les traitements hydriques ont eu un effet hautement significatif sur le rendement et sur toutes ses composantes, sauf en ce qui concerne l'indice de récolte. L'effet de l'interaction devient significatif sur la biomasse et sur le nombre de grains par épi (tableau 46).

Tableau 46 : Résultats d'analyse statistique du rendement et ses composantes

| Rendement et composantes | Niveau de signification |             | Paramètres statistiques |                  |             |            |              |
|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|------------------|-------------|------------|--------------|
|                          | irrigation              | interaction | Moyenne g.              | Ecartype (inter) | Cv% (inter) | Ppds (irr) | Ppds (inter) |
| Rd (g/m <sup>2</sup> )   | HS                      | NS          | 609                     | 99,40            | 16,3        | 88,7       |              |
| BM (kg/m <sup>2</sup> )  | Hs                      | S           | 1372                    | 179,90           | 13,1        | 148        | 285          |
| PMG (g)                  | Hs                      | Ns          | 44,02                   | 3,32             | 7,6         | 2,84       |              |
| NGE                      | Hs                      | S           | 68,78                   | 3,83             | 5,6         | 3,29       | 6,21         |
| IR                       | S                       | Ns          | 0,43                    | 0,04             | 9,4         | 0,03       |              |
| LT (cm)                  | Hs                      | Ns          | 50,23                   | 5,66             | 11,3        | 3,99       |              |
| LEP (cm)                 | Ns                      | Ns          | 5,2                     | 0,34             | 6,7         |            |              |

## 6. Comportement végétatif du blé vis-à-vis de la fertilisation

### 6.1. Effet de la fertilisation sur le développement de la culture

Nous avons noté (nous rappelons) que la réponse du végétal à la fertilisation phosphatée débute dès le stade 3- 4 feuilles, les micros parcelles où les besoins de la plante sont satisfaits se comportent normalement et présentent une coloration vert-foncé.

Au stade tallage, les planches de fertilisation ayant une déficience en phosphore se distinguent facilement car la différence de développement végétatif entre les planches bien alimentées en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et les autres devient plus nette.

## 6. Effet de la fertilisation sur le rendement et ses composantes

Durant la première campagne, l'effet de la fertilisation appliquée était significatif sur le rendement. Par contre, mise à part la biomasse, la fertilisation n'avait aucun effet significatif sur toutes les composantes du rendement (tableau 47).

Tableau 47 : Résultats d'analyse statistique sur le rendement et ses composantes (première campagne)

| Rendement et composantes | Moyenne | Niveau de signification | Ecartype | cv%  | Ppds  |
|--------------------------|---------|-------------------------|----------|------|-------|
| Rd (g/m <sup>2</sup> )   | 474     | S                       | 82,1     | 17,3 | 164   |
| BM (g/m <sup>2</sup> )   | 1200    | S                       | 147,6    | 12,3 | 294,8 |
| PMG (g)                  | 42,8    | NS                      | 1,42     | 3,3  |       |
| NGE                      | 56      | NS                      | 4,26     | 7,6  |       |
| IR                       | 0,40    | NS                      | 0,03     | 9,1  |       |
| LT (cm)                  | 72,41   | NS                      | 2,5      | 3,5  |       |
| LEP (cm)                 | 6,25    | NS                      | 0,35     | 5,7  |       |

La ppds (la plus petite différence significative) indique que cette différence est due uniquement à la fertilisation phosphorique. Les apports en potassium n'avaient aucun effet sur le rendement (Fig. 47).

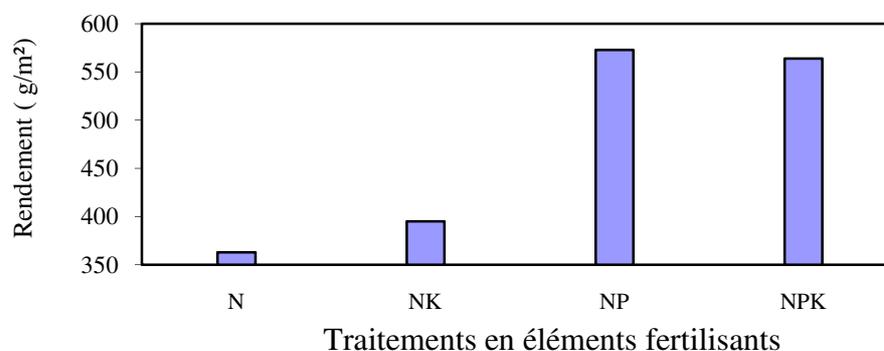


Fig. 47: Effet de la fertilisation sur le rendement du blé

Il faut signaler que le sol de la parcelle d'essai était auparavant riche en élément potassium. La teneur du sol en phosphore est très hétérogène. Les résultats d'analyse du sol confirment cette réalité. Ainsi, nous avons constaté que dans certains endroits la teneur en phosphore est de l'ordre de 65 ppm. Elle satisfait largement les besoins de la culture estimés à 50 ppm. Par contre dans certains endroits, la teneur est faible en cet élément et d'autres

endroits présentent une déficience importante. C'est la raison pour laquelle l'effet du phosphore sur le rendement est significatif.

Durant la deuxième campagne, l'analyse statistique des résultats indique que globalement la fertilisation avait un effet identique à celui de la campagne précédente. La seule différence est enregistrée sur la hauteur des tiges sur lesquelles l'effet de la fertilisation est significatif (tableau 48).

Tableau 48 : Résultats d'analyse statistique pour le rendement et ses composantes (deuxième campagne)

| Rd et composantes      | Moyenne | N. de signification | Ecartype | Cv%  | Ppds  |
|------------------------|---------|---------------------|----------|------|-------|
| Rd (g/m <sup>2</sup> ) | 474     | S                   | 79       | 16,7 | 158   |
| BM (g/m <sup>2</sup> ) | 1203    | S                   | 142,4    | 11,8 | 284,5 |
| PMG (g)                | 42,87   | Ns                  | 1,29     | 3    |       |
| NGE                    | 56,0    | Ns                  | 6,52     | 11,6 |       |
| IR                     | 0,3980  | Ns                  | 0,030    | 7,7  |       |
| LT (cm)                | 72,74   | S                   | 2,38     | 3,3  | 4,77  |
| LEP (cm)               | 6,247   | Ns                  | 0,32     | 5,3  |       |

Les ppds pour le rendement, la biomasse et les hauteurs des tiges indiquent que les différences entre leurs moyennes sont dues essentiellement à l'effet du phosphore.

Les rendements moyens obtenus pour les deux campagnes par rapport aux niveaux de fertilisation sont presque identiques et le potassium s'est manifesté par une réponse négative.

Pendant la 3<sup>ème</sup> campagne, l'effet de la fertilisation est hautement significatif sur le rendement et sur l'indice de récolte. Il est significatif sur la biomasse, le nombre de grains par épi et les hauteurs des tiges (tableau 49).

Tableau 49 : Résultats d'analyse statistique pour le rendement et ses composantes (troisième campagne)

| Rd et composantes      | Moyenne | N,de signification | Ecartype | cv% | Ppds  |
|------------------------|---------|--------------------|----------|-----|-------|
| Rd (g/m <sup>2</sup> ) | 609     | HS                 | 23,9     | 3,9 | 47,8  |
| BM (g/m <sup>2</sup> ) | 1372    | S                  | 67       | 4,9 | 133,8 |
| PMG (g)                | 44,02   | NS                 | 1,06     | 2,4 |       |
| NGE                    | 68,78   | S                  | 1,26     | 1,8 | 2,5   |
| IR                     | 0,44    | HS                 | 0,015    | 3,4 | 0,029 |
| LT (cm)                | 50,23   | S                  | 3,26     | 6,5 | 6,5   |
| LEP (cm)               | 5,2     | NS                 | 0,054    | 1   |       |

Les valeurs des ppds indiquent que la réponse du blé à la fertilisation potassique est positive et son effet sur l'amélioration du rendement est hautement significatif. Ceci s'explique par le fait que la réserve du sol en cet élément est épuisée, donc le stock est au dessous du seuil de satisfaction des besoins de la culture.

### 6.1. Importance du potassium

La figure 48 montre que le rendement obtenu dans les parcelles témoins (507 g/m<sup>2</sup>) pendant la troisième campagne est nettement inférieur à celui obtenu dans les parcelles ayant reçu un épandage en potassium (636 g/m<sup>2</sup>). Mais il est largement supérieur à ceux du même traitement obtenus durant les deux premières campagnes.

Une autre observation dont il faut tenir compte est le reliquat de l'année précédente. En effet, quelque soit le niveau de consommation du phosphore et du potassium par le végétal, une quantité plus ou moins importante reste toujours sans utilisation. Ce constat est observé au niveau du sol mais aussi sur le végétal de l'année suivante. Ainsi, nous avons constaté que le comportement végétatif de la culture au niveau des parcelles ayant reçu un épandage en phosphore pendant l'année précédente est meilleur que celui des parcelles qui n'ont pas reçu de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> durant les deux campagnes consécutives. Ceci explique en partie l'amélioration du rendement des parcelles sans apport d'engrais potassique et phosphorique.

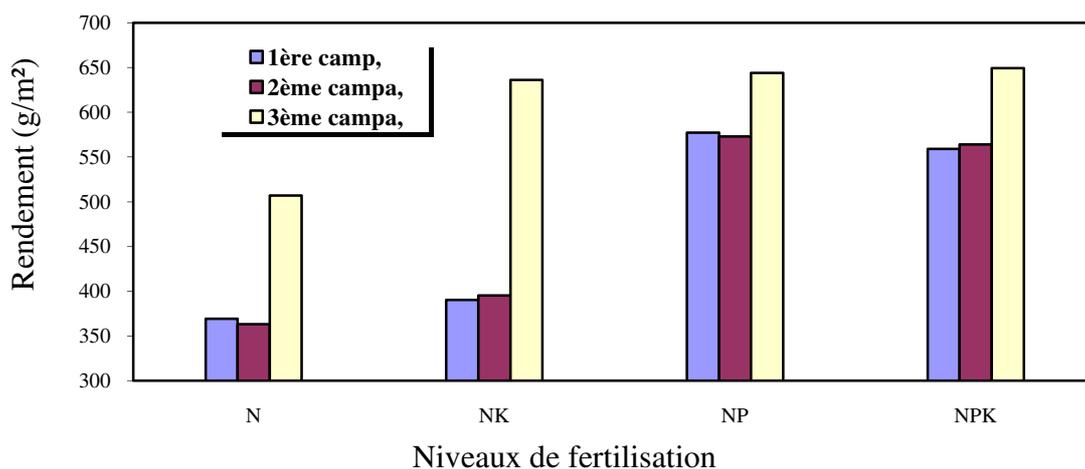


Fig. 48: Effet de la fertilisation sur les rendement de blé pendant les campagnes d'essai

D'après les résultats d'analyse statistique (tableau 50), l'effet de la fertilisation sur les rendements diffère d'une campagne à une autre. La différence entre les moyennes des rendements obtenues par les différents niveaux de fertilisation est hautement significative. Ce résultat ajoute la confirmation par rapport à l'effet des reliquats. L'effet sur la biomasse est hautement significatif car la fertilisation favorise le tallage.

Tableau 50 : Résultats d'analyse statistique du rendement et ses composantes (effet campagne)

| Rd et composantes      | Moyenne | N.de signification | Ecart type | cv% | Ppds  |
|------------------------|---------|--------------------|------------|-----|-------|
| Rd (g/m <sup>2</sup> ) | 519     | HS                 | 67,25      | 13  | 66,61 |
| BM (g/m <sup>2</sup> ) | 1259    | HS                 | 124,6      | 9,9 | 123   |
| PMG (g)                | 43,22   | NS                 | 1,26       | 2,9 |       |
| NGE                    | 60,29   | NS                 | 4,55       | 7,6 |       |
| IR                     | 0,41    | S                  | 0,029      | 7   | 0,028 |
| LT (cm)                | 65,02   | Hs                 | 2,7        | 4,2 | 2,73  |
| LEP (cm)               | 5,9     | Ns                 | 0,28       | 4,8 |       |

Pendant les deux premières campagnes, les apports en potassium n'avaient pas eu un effet significatif. Au contraire, ils ont probablement eu un effet négatif car le sol en contient suffisamment. C'est dans ce sens que MADREF/DERD (2001) ont indiqué que la réponse positive à l'apport du phosphore a été enregistrée dans les sols contenant une teneur initiale de

11,25 mg/kg en  $P_2O_5$  et que la réponse du blé au potassium sur un sol contenant 153 mg  $K_2O$ /kg a été négative et lorsque la teneur en potassium échangeable est  $> 140$  mg  $K_2O$ /kg son apport est inutile.

Il faut noter que le potassium n'était pas sans utilité pour la culture du blé, mais il faut dire que lorsque le sol en est suffisamment pourvu, il est inutile de faire des apports supplémentaires. Donc, pour garantir la rentabilité des investissements, il est indispensable d'effectuer périodiquement des analyses du sol afin de réajuster l'équilibre des stocks d'éléments fertilisants du sol, et par conséquent, de réduire au maximum le gaspillage en intrants ainsi que la pollution de l'environnement et des nappes souterraines.

Pendant la troisième campagne, l'effet de la fertilisation sur le rendement est hautement significatif. La ppds indique que les différences proviennent simultanément des apports du phosphore et du potassium. La réponse du rendement vis à vis des apports en engrais potassique est hautement significative. Ceci explique pourquoi les besoins du blé en potassium dans ces sols ne sont pas élevés.

## **6. 2. Importance du phosphore**

L'effet positif du phosphore sur le développement de la culture du blé est apparu dès les stades initiaux du cycle végétatif. Cet effet est répercuté positivement sur toutes les composantes du rendement.

### **6.2.1. Taux d'amélioration des rendements**

Le taux d'amélioration le plus élevé est enregistré en deuxième campagne pour le phosphore, il dépasse 60,7 %. Pour le potassium le taux est plus élevé en troisième campagne, il était supérieur à 25 % (fig.49). En troisième campagne la différence entre les taux d'amélioration pour les deux fertilisants était très faible (1,6 %). C'était à cause de l'effet du reliquat en phosphore. Pendant la première campagne le taux d'amélioration pour la potasse était faible ; 13,8 %, mais il était beaucoup mieux à 0,9 % obtenu par Guo et al. (2000) avec les traitements de K en absence de P.

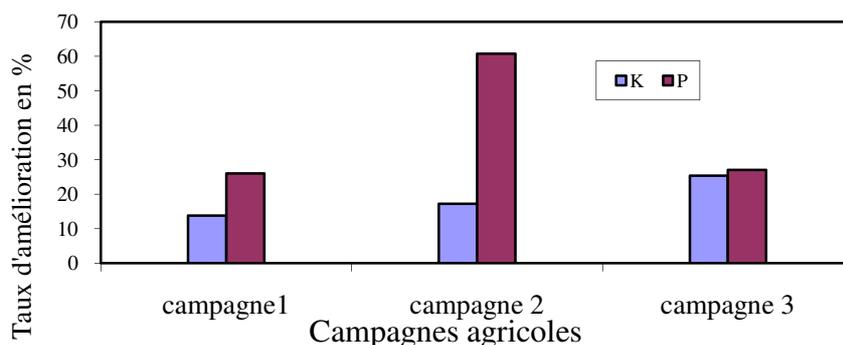


Fig. 49 : Taux d'amélioration du rendement du blé par des apports d'engrais

### 6.3. Coefficient d'utilisation apparent des engrais utilisés

Le coefficient d'utilisation du phosphore (CUP) varie entre 9,81 % (première campagne) et 19,62 % (deuxième campagne). Ces valeurs sont situées dans la plage indiquée par DERD (2001) qui ont trouvé des variations de l'ordre de 10 à 30 %, avec une moyenne de 16,5 %. Pour la potasse, elles varient entre 10,44 et 23,22 % (tableau 51).

Dans ce contexte Yara (non daté) a signalé que même lorsque les engrais sont apportés sous une forme soluble dans l'eau, la part prélevée par la culture ne représente tout au plus que 25 à 30 % de cet apport. La part restante réagit avec les constituants du sol, et évolue progressivement vers des états moins disponibles pour les plantes.

Tableau 51 : Coefficients d'utilisation apparents des engrais utilisés (%)

| Campagnes | Engrais apportés |                               |   |
|-----------|------------------|-------------------------------|---|
|           | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> et K <sub>2</sub> O |
| 2004/2005 | 10,44            | 9,81                          | 6,06  |
| 2005/2006 | 11,16            | 19,62                         | 12  |
| 2006/2007 | 23,22            | 12,33                         | 8,52  |
| Moyenne   | 14,94            | 13,92                         | 8,86  |

D'après le tableau 51, on constate que le coefficient d'utilisation apparent d'un engrais, dépend pour un sol donné, de sa teneur en cet élément du passé récent de la fertilisation et aussi de l'efficacité d'utilisation des engrais apportés.

Ainsi, nous avons remarqué que malgré le rendement élevé en troisième campagne, le CUP obtenu est inférieur à celui de la deuxième campagne, ceci est dû au fait qu'une partie importante des éléments utilisés provienne des reliquats des campagnes écoulées.

## **Chapitre VII : AMELIORATION DE L'EFFICIENCE DE L'EAU D'IRRIGATION**

Pour mieux valoriser l'eau d'irrigation dans la région d'Adrar, notamment dans le domaine céréalier, il ne suffit pas de connaître les besoins en eau et en éléments fertilisants de la culture, mais il est nécessaire de contrecarrer les différentes contraintes qui confrontent cette agriculture dans la région.

En effet, il existe de nombreux obstacles qui font face au développement durable de la céréaliculture. Ces contraintes ont conduit à la régression des rendements des céréales sous pivots et à la diminution de la production totale du blé. Elles ont empêché ainsi la réalisation de la rentabilité des investissements effectués par beaucoup d'agriculteurs et ce malgré les grands efforts déployés par l'état.

A travers ce travail nous allons mettre en évidence deux contraintes importantes et la façon d'en lutter contre, et ce dans le but d'améliorer l'efficacité de l'eau de l'irrigation.

### **1. Lutte contre les mauvaises herbes**

#### **1.1 Infestation des champs de blé par les adventices**

Une des causes importantes des chutes de rendements du blé sous pivots est le problème de l'envahissement de ceux-ci par les mauvaises herbes. Celles-ci se manifestent par une propagation rapide en gagnant tout le terrain en un temps réduit.

Nous avons observé dès la première campagne l'apparition de quelques pieds de mauvaises herbes qui s'installent sous pivot. Les origines d'infestation sont diverses. Certains accusent l'impureté de la semence, d'autres accusent les moissonneuses batteuses et les outils de travail du sol.

A partir de la troisième campagne, une gamme très diversifiée de mauvaises herbes occupe tout le terrain du pivot. Un recensement effectué sur le terrain d'un ancien pivot montre l'ampleur de cette infestation (tableau 52). Il s'est avéré que le champ du blé est infesté par plus de 16 espèces et variétés avec une moyenne de 563 pieds /m<sup>2</sup>. Pendant cette campagne le rendement obtenu sous ce pivot est inférieur à 20 q/ha. Tous les moyens de lutte contre les adventices n'ont pas abouti à un résultat satisfaisant et l'agriculteur se trouve obligé à effectuer le transfert de ce pivot à un nouveau site.

Tableau 52 : Liste des adventices recensés sous pivot (nombre de pieds /m<sup>2</sup>)

| Espaces prélevées | Echantillons |     |     |     |     |     | Moyenne |
|-------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
|                   | E1           | E2  | E3  | E4  | E5  | E6  |         |
| Ray-grass         |              | 8   | 23  |     | 93  | 42  | 27,67   |
| Brome             | 214          | 257 | 72  | 176 | 52  | 154 | 154,17  |
| Pâturin           |              |     |     | 11  |     | 11  | 3,67    |
| Laiteron          |              |     |     | 1   |     | 1   | 0,33    |
| Avoine            | 175          | 55  | 286 | 36  | 72  | 125 | 124,83  |
| Moutard           |              | 9   | 78  | 10  | 12  | 27  | 22,67   |
| Nielle            | 1            | 10  |     |     | 5   | 5   | 3,50    |
| Lisserons         |              | 1   | 2   |     | 3   | 2   | 1,33    |
| Chénopode         | 2            | 2   |     | 2   | 25  |     | 5,17    |
| Epineux           |              |     |     | 9   | 5   |     | 2,33    |
| Phalaris          | 11           | 1   | 77  | 2   |     |     | 15,17   |
| Trèfle            | 3            | 2   | 22  | 5   |     |     | 5,33    |
| Mauve             |              |     |     | 2   |     |     | 0,33    |
| Coquelicol        |              |     |     | 3   |     |     | 0,50    |
| Rumex             | 6            |     |     |     |     |     | 1,00    |
| Autres            | 204          | 292 | 106 | 260 | 309 |     | 195,17  |
| TOTAL             | 616          | 637 | 666 | 517 | 576 | 367 | 563     |

Le résultat du recensement montre que la totalité du terrain est envahie, avec une densité qui varie entre 367 et 666 tiges/m<sup>2</sup>.

Le brome (*Bromus* sp.) occupe la première place du point de vue nombre de pieds/m<sup>2</sup> (Fig.50). Cette espèce est très difficile à combattre dans les champs du blé. Une fois installé, le brome présente suffisamment de vigueur pour étouffer les éventuelles mauvaises herbes. C'est la raison pour laquelle elle gagne le terrain au fil de temps et devient une espèce dominante et pose de sérieux problèmes pour le développement de la culture.



Fig. 50 : Infestation du champ du blé par les adventices

L'avoine ou la folle avoine (famille de Poaceae) occupe la deuxième place, elle cède sa place au fur et à mesure au brome (fig. 51).

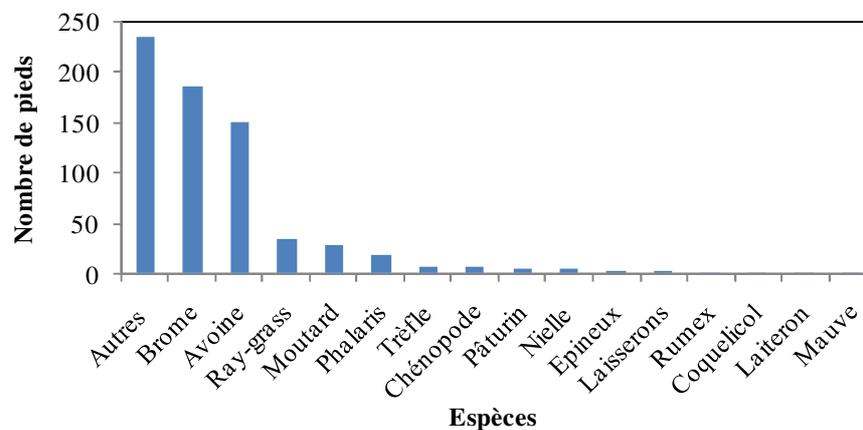


Fig. 51 : Dénombrement des adventices sous pivot (nombre de tiges/m<sup>2</sup>)

Durant la première campagne d'expérimentation (2004/2005), les rendements réalisés dans deux sites différents dans la même zone et pour la même variété (Shen S) sont 36 et 59 q/ha respectivement dans un ancien site et dans un nouveau site. Le facteur crucial dans cette situation est l'effet décisif de mauvaises dans la chute des rendements.

Dans le pivot installé dans un nouveau site, le comportement végétatif du blé est bon dans sa globalité malgré que les rendements des échantillons prélevés montrent une légère variabilité de la production d'un endroit à l'autre. Ils varient de 493,8 à 683,6 g/m<sup>2</sup> avec un coefficient de variation de 12,8% qui reflète cette réalité.

## 1.2. Méthodes de lutte

Afin d'identifier une méthode de lutte la plus efficace, plusieurs essais ont été effectués. Tout d'abord on a effectué un comptage des pieds des adventices toutes espèces confondues, on a aboutit au résultat mentionné dans tableau 53.

Tableau 53 : Nombre de tiges d'adventices par m<sup>2</sup> (avant traitements)

| N°               | 1    | 2    | 3    | 4   | 5    | 6     | 7   | 8    | 9    | 10   | moyenne |
|------------------|------|------|------|-----|------|-------|-----|------|------|------|---------|
| P/m <sup>2</sup> | 1952 | 1840 | 5360 | 976 | 3680 | 10240 | 864 | 2528 | 3360 | 9200 | 4000    |

Ce résultat indique qu'il existe un envahissement important des adventices, puisque la densité moyenne pour toute la parcelle est de 4000 pieds /m<sup>2</sup>.

### 1.2.1. Comparaison entre la lutte chimique et la lutte mécanique

Pour la lutte chimique un désherbant total (le Roundup) est utilisé. La lutte mécanique consiste à utiliser le travail du sol superficiel à l'aide d'un Cover crop et un labour profond par une charrue à disque avec retournement du sol. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 54.

Tableau 54 : Nombre de plants d'adventices par m<sup>2</sup> (après traitements)

| Échantillons | Traitements    |            |                |        |
|--------------|----------------|------------|----------------|--------|
|              | Lute mécanique |            | Lutte chimique | Témoin |
|              | Disquage       | Cover crop | Roundup        |        |
| 1            | 64             | 112        | 0              | 3376   |
| 2            | 80             | 16         | 224            | 2880   |
| 3            | 48             | 432        | 48             | 12016  |
| 4            | 464            | 256        | 544            | 2848   |
| 5            | 48             | 960        | 2690           | 4352   |
| 6            | 160            | 880        | 80             | 3138   |
| 7            | 128            | 112        | 176            | 3728   |
| 8            | 64             | 64         | 288            | 1920   |
| 9            | 112            | 192        | 32             | 2400   |
| 10           | 320            | 64         | 160            | 3840   |
| Moyenne      | 149            | 309        | 424            | 4049   |

Nous avons constaté que dans la parcelle témoin, il n'y a pas eu une augmentation sensible en nombre des tiges d'adventices. Car il y a une petite différence en mauvaises herbes entre le premier comptage et le deuxième (49 pieds/m<sup>2</sup>). Ceci est dû probablement à la forte densité des adventices qui empêche l'apparition de nouveaux pieds dans la parcelle. Il en résulte d'après le résultat de l'analyse de la variance (tableau 55), que l'essai a un effet significatif sur la réduction du nombre de pieds par m<sup>2</sup>.

Tableau 55 : Analyse de la variance (techniques de désherbage)

| Source des variations     | S.des carrés | d.d.l | M. carrés | F     | V. critique pour f |
|---------------------------|--------------|-------|-----------|-------|--------------------|
| Entre Groupes             | 413043,27    | 3     | 137681    | 15,19 | 2,86               |
| A l'intérieur des groupes | 326230,7     | 36    | 9062      |       |                    |
| Total                     | 739273,97    | 39    |           |       |                    |

Ppds (5%) = 122

D'après la PPDS, elle n'y a pas une différence significative entre les deux traitements de la lutte mécanique, la différence est significative entre celle-ci et la lutte chimique.

En outre, nous avons constaté qu'un nombre important des pieds d'adventices ont persisté. Ceci est dû notamment au fait que les différents traitements n'ont pas détruit la totalité des plants, une fraction de ceux-ci a repris et a continué son développement. D'autres facteurs peuvent agir dans cette situation ; c'est l'existence d'un stock important en semences dans le sol et les conditions pour la germination des grains qui diffèrent selon les espèces.

Nous avons remarqué aussi qu'en présence de suffisamment d'espace, ces plants se manifestent par une capacité de tallage assez importante.

### 1.2.2. Effet du semis sans labour

Est-ce que le semis sans labour réduit l'infestation des champs de blé par les adventices ?

Pour répondre à cette question nous avons effectué un essai dans un champ très infesté. Nous avons effectué un faux semis et à post levée et nous avons traité des adventices par un désherbant total.

Une parcelle a subi le labour et une autre parcelle est conduite sans labour. Après la levée du blé nous avons effectué un autre traitement contre le brome à l'aide de l'Apyros. Malgré toutes ces opérations l'élimination définitive des pieds de mauvaises herbes n'est pas réalisée. Le résultat de l'étude est mentionné dans le tableau (tableau 56).

Tableau 56 : Nombre de tiges d'adventices par m<sup>2</sup> (effet de semis direct)

| Echantillon<br>N° | Parcelle labourée |               | Parcelle non labourée |               |
|-------------------|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|
|                   | monocotylédones   | dicotylédones | monocotylédones       | dicotylédones |
| 1                 | 160               | 560           | 352                   | 720           |
| 2                 | 176               | 272           | 192                   | 1024          |
| 3                 | 16                | 96            | 256                   | 384           |
| 4                 | 80                | 416           | 48                    | 480           |
| 5                 | 144               | 112           | 96                    | 320           |
| 6                 | 160               | 224           | 112                   | 112           |
| 7                 | 192               | 1760          | 32                    | 384           |
| 8                 | 208               | 768           | 32                    | 256           |
| 9                 | 14                | 768           | 64                    | 336           |
| 10                | 80                | 1168          | 144                   | 672           |
| Moyenne           | 123               | 614,4         | 132,8                 | 468,8         |

Les résultats obtenus confirment la difficulté que présentent les opérations de désherbage. L'analyse de la variance indique que l'effet des différents traitements est significatif (tableau 57).

Tableau 57 : Analyse de la variance (effet de semis direct)

| Source des variations     | Somme<br>des carrés | Degré de<br>liberté | Moyenne<br>des carrés | F    | Probabilité | Valeur<br>critique de F |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------|-------------|-------------------------|
| Entre Groupes             | 2045924             | 3                   | 681974,69             | 8,27 | P<0,01      | 2,81                    |
| A l'intérieur des groupes | 3295383             | 40                  | 82384,59              |      |             |                         |
| Total                     | 5341307             | 43                  |                       |      |             |                         |

Ppds (5%)= 412

En réalité, cette différence n'était pas entre les traitements mais entre les types de mauvaises herbes ; monocotylédone et dicotylédone. On en conclut que le semis avec ou sans labour n'a pas d'effet sur la propagation des adventices dans les champs de blé quand celui-ci est arrivé à un degré d'infestation très élevé.

Il convient de dire que parmi la gamme d'adventices, le brome est le plus difficile à combattre. Car il se caractérise par une grande résistance aux mauvaises conditions. Il produit des quantités importantes de semences et il présente une grande difficulté aux différentes méthodes de lutte.

En effet, pour mieux contrôler la propagation des adventices dans les champs de blé, la lutte manuelle doit commencer dès les premières apparitions. Sinon à partir de la troisième campagne le terrain du pivot devient très infesté et dans ce cas il est préférable de changer la culture (rotation) ou de transférer le pivot à un nouveau site.

Par ailleurs, il faut signaler que même si la lutte chimique contre les adventices est maîtrisée par l'apparition d'une gamme de désherbants puissants, l'utilisation massive de ceux-ci perturbe le développement de la culture et réduit la quantité de récolte et la qualité organoleptique de la production.

## 2. Adaptation au climat

### 2.1. Influence de la température sur la culture du blé

Sans tenir compte de l'effet de différents traitements, l'analyse statistique indique que l'effet de la campagne est significatif sur presque toutes les composantes de rendement (sauf le PMG). Le poids de 1000 grains est plutôt influencé beaucoup plus par l'irrigation. Ainsi nous constatons que l'effet de l'irrigation seul ou en interaction avec les autres facteurs est hautement significatif (tableau 58).

Tableau 58 : Analyse statistique de l'interaction campagne/ répétition/fertilisation/irrigation

| Traitements             | Rd | BM | PMG | NGE | IR | LEP |
|-------------------------|----|----|-----|-----|----|-----|
| Campagne                | S  | S  | Ns  | S   | S  | S   |
| Fertilisation           | Hs | Hs | Ns  | Ns  | S  | Ns  |
| Campagne .fertilisation | Ns | Ns | Ns  | Ns  | Ns | Ns  |
| Irrigation              | Hs | Hs | Hs  | S   | S  | Hs  |
| Campagne. irrigation    | Hs | Hs | Hs  | Hs  | Hs | hS  |
| fer.irr                 | S  | Hs | Ns  | S   | S  | Ns  |
| camp.fer.irr            | Ns | S  | Ns  | Ns  | nS | Ns  |

Si on analyse l'évolution de la température moyenne des deux dernières campagnes (dates de semis identiques), on trouve une grande différence entre les allures de celles-ci durant le cycle végétatif de la culture. Durant la campagne 2006/2007 (Fig.52) les stades finaux de la culture ont coïncidé avec une température modérée qui a permis une maturation progressive.

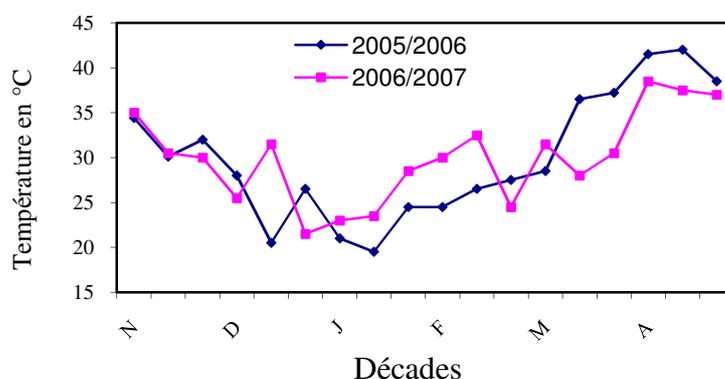


Fig. 52: Évolution de la température moyenne pendant le cycle végétatif du blé

Il convient de dire que les données météorologiques de la région d'Adrar indiquent que les températures sont en fluctuations permanentes d'une année à une autre.

C'est probablement la raison pour laquelle les rendements moyens du blé sous pivots et les rendements pics fluctuent à leurs tours d'une année à une autre (fig. 53).

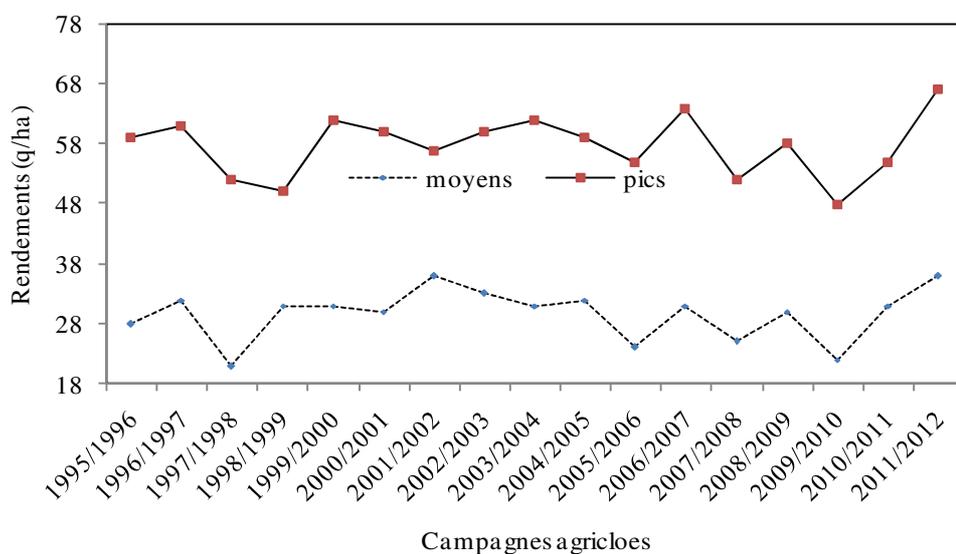


Fig. 53: Evolution des rendements moyens et rendements pics du blé sous pivots dans la région d'Adrar

En réalité, l'effet des températures est bien constaté sur terrain. A titre d'exemple, durant la campagne 2009/2010 ils ont été réalisés les plus faibles rendements (22 q/ha). Plus de 300 ha n'ont rien donné, 10 pivots ont été déclarés sinistrés à cause de température élevées enregistrées dès les premiers stades végétatifs de la culture. Les pivots à semis tardifs sont les plus touchés et les semis précoces ont réalisé des rendements plus faibles par rapport à la normal. Les rendements pics sont aussi les plus faibles ; 48 q/ha et ce malgré qu'il n'y a pas une relation étroite entre les rendements moyens et rendements pics réalisés sous pivots de la région (Fig. 54).

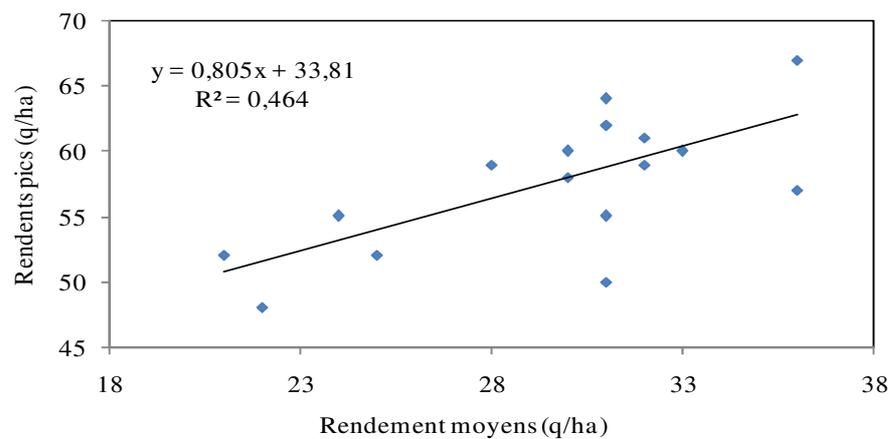


Fig. 54: Relation entre les rendements moyens et les rendements pics dans la région d'Adrar

En outre, Pendant la campagne 2011/2012 durant laquelle les températures tout au long du cycle végétatif du blé sont relativement basses, les rendements obtenus sont les plus élevés ; 36 q/ha et 67 q/ha respectivement pour le rendement moyen et le rendement pic.

Pour étudier l'impact de la température sur les rendements du blé sous pivots nous avons effectué l'analyse multi variée des 11 dernières campagnes (2002-2011), nous avons aboutit au résultat très intéressant.

Il convient de noter que la matrice de corrélation des variables indépendantes indique qu'il n'y a pas de risque de la colinéarité étant donné que le seuil toléré ( $|R|= 0,80$ ) pour éviter le problème de colinéarité n'est dépassé (tableau 59).

Tableau 59 : Matrice de corrélation des variables indépendantes

|         |      | Janvier |      | Février | Mars |      |
|---------|------|---------|------|---------|------|------|
|         |      | tmin    | tmax | tmin    | tmin | tmax |
| Janvier | tmin | 1,00    | 0,52 | 0,50    | 0,24 | 0,11 |
|         | tmax |         | 1,00 | 0,74    | 0,00 | 0,05 |
| Février | tmin |         |      | 1,00    | 0,25 | 0,19 |
| Mars    | tmin |         |      |         | 1,00 | 0,43 |
|         | tmax |         |      |         |      | 1    |

L'analyse multi variée (tableau 60) indique que l'effet des températures basses et celui des températures élevées des trois mois ; janvier, février et mars sont significatifs à seuil de confiance  $\alpha=0,05$ .

Tableau 60: Analyse multi variée de l'effet des températures sur les rendements du blé sous pivots

| Paramètres    | Coeff. de régression | Statistique t | Probabilité | R <sup>2</sup> | statistique F | F théorique |
|---------------|----------------------|---------------|-------------|----------------|---------------|-------------|
| Constante     | 77,46                | 8,20          | 0,0004      | 0,97           | 36,15         | 3,34        |
| T min janvier | -0,89                | -3,08         | 0,0274      |                |               |             |
| T max janvier | 0,96                 | 4,16          | 0,0088      |                |               |             |
| T min février | -1,03                | -5,09         | 0,0038      |                |               |             |
| T min Mars    | -1,09                | -5,41         | 0,0029      |                |               |             |
| T max Mars    | -1,64                | -9,44         | 0,0002      |                |               |             |

Nous signalons que la valeur T théorique = 2,57 inférieure à toutes les valeurs de statistique T, ce qui confirme que tous ces paramètres ont un effet significatif sur le rendement. En outre, la valeur de la statistique F est largement supérieure à la valeur de F théorique, ceci signifie que le coefficient de détermination est significatif.

Il faut que noter que la date de semis est généralement située au mois de décembre, la maturation est effectuée pour la plus part des pivots à la fin de mois d'Avril. Les températures extrêmes au début de cycle (stades germination 3 feuilles) et en fin de cycle (maturation) n'ont pas d'effets significatifs sur le rendement. Pour cette raison elles sont éliminées de l'analyse par la régression multiple.

Les coefficients de régression relatifs aux minima absolus ont des signes négatifs, cela veut dire que ceux-ci évoluent en sens contraire avec les rendements, donc les valeurs de température les plus basses favorisent mieux l'obtention d'un bon rendement. Mais il faut tenir compte que les basses températures peuvent aussi avoir des conséquences négatives si elles coïncident avec certains stades critiques de la culture. Ainsi Peter et Tinuta (2006), déclarent que les températures froides peuvent provoquer d'importants dommages au stade épiaison, puisque le point végétatif (épi) n'est plus protégé. Ce phénomène s'est manifesté dans le côté Nord de la région d'Adrar suite au gelées de février 2002. De plus, en cas de gelées pendant l'élongation des entre-nœuds, il peut y avoir affaissement et mort des jeunes tissus en croissance immédiatement au-dessus et sous les nœuds.

Le coefficient de régression relative au maxima absolu du mois de mars porte aussi un signe négatif et une valeur absolue élevée. Ceci explique l'ampleur de l'impact négatif que présentent les hautes températures de ce mois sur les rendements. Pendant cette période c'est généralement les stades de production que se déroulent. Elles sont sensibles au stress hydrique et à l'élévation de température.

Aussi la valeur de statistique T relative au constant est élevée, ceci reflète la part important des facteurs non étudiés dans l'élaboration des rendements.

Il en résulte que pour effectuer un cycle de végétation complet, le blé doit être exposé à des températures froides durant une période de son cycle. Or la période de culture du blé dans la région d'Adrar est coincée entre deux périodes chaudes fin mois de novembre pour la période de semis et fin mars et le mois d'avril pour la période de maturation. D'où, la production finale qui reste tributaire des conditions climatiques durant la campagne.

En revanche, un semis tardif, accélère les stades végétatifs et décale le cycle végétatif, car la vitesse de développement du blé pourrait être influencée par une moindre satisfaction des "besoins en froid" (vernalisation) pendant l'hiver. Ce non satisfaction se traduit par la réalisation d'une vitesse maximum de développement (Délecolle, 2000). Le décalage du cycle, peut conduire à la coïncidence des stades critiques avec les perturbations climatiques qui se manifestent par la fréquence du vent, des températures élevées qui provoquent l'échaudage et conduisent ainsi aux chutes de rendements.

## 2.2. Estimation des rendements

La présence d'un coefficient de détermination élevé et des coefficients de régression significatifs permet de construire un modèle d'estimation des rendements moyens du blé sous pivots dans la région d'Adrar en connaissant les températures extrêmes des trois mois ; janvier février et mars. Les paramètres statistiques obtenus indiquent que ce modèle est performant (tableau 61).

Tableau 61: Paramètres statistiques du modèle d'estimation des rendements

| R <sup>2</sup> | E    | MSE (q/ha) <sup>2</sup> | RMSE (q/ha) | MARE (%) |
|----------------|------|-------------------------|-------------|----------|
| 0,97           | 0,97 | 0,74                    | 0,54        | 2,07     |

Etant donné que le pourcentage de l'erreur est très réduit donc on peut estimer le rendement moyen du blé sous pivot dans la région d'Adrar avec une faible marge d'erreur (fig. 55).

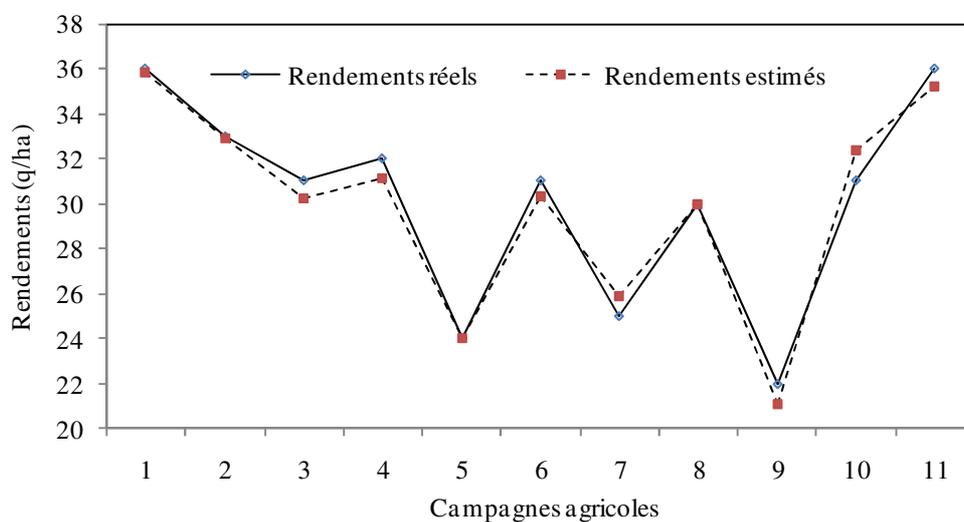


Fig. 55: Evolution des rendements réels et rendements estimés de blé sous pivots dans la région d'Adrar

**L'équation de ce modèle est représentée sous la forme suivante :**

$$Rdt = -0,88t_{jmin} + 0,96 t_{jmax} - 1,03 t_{fmin} - 1,09t_{mmin} - 1,36t_{mamx} + 77,46 \quad (18)$$

Avec

Rdt = Rendement moyen (q/ha),  $t_{jmin}$  : température minimale absolue de Janvier (°C)  
 $t_{jmax}$  : température maximale absolue de Janvier (°C),  $t_{fmin}$  température minimale absolue de février (°C),  $t_{mmin}$  température minimale absolue de mars (°C) et  $t_{mmax}$  ; température maximale absolue de mars (°C).

Ce modèle d'estimation du rendement ne peut être valable que dans les limites acceptables de variation de température qui ne détruit pas la culture.

### **2.3. Choix de date de semis**

Les essais menés à la station expérimentale et sous pivot ont montré que l'effet de la date de semis sur le rendement est important.

Durant la campagne 2004/2005, les dates de semis étaient tardives dans les deux sites expérimentaux. On a réalisé des rendements faibles, 36 et 48.6 q/ha respectivement sous pivot et à la station expérimentale. Ceci est dû principalement au phénomène de l'échaudage qu'a subi la culture à cause de l'élévation brutale de température en fin de cycle.

Nous avons noté qu'au départ, le développement végétatif de la culture était excellent pendant toute la période de végétation, mais du fait que la date de semis été tardive elle a provoqué, en quelque sorte, un décalage du cycle végétatif, les derniers stades critiques de la culture ont souffert de l'effet de forte évapotranspiration accompagnée d'un climat chaud et sec. Ce qui a défavorisé la migration des réserves et le remplissage complet des grains.

Pour échapper aux effets néfastes du climat, il est primordial d'effectuer le semis à temps. L'expérience montre que la meilleure date de semis se situe dans la deuxième moitié du mois de novembre, un petit décalage est tolérable au Nord d'Adrar.

## CONCLUSIONS GENERALES

C'est vrai que l'Algérie est située parmi les pays pauvres en ressources hydriques, cependant cette réalité n'est pas un argument valable qui justifie cette dépendance chronique en denrées alimentaires. Il est temps de réfléchir sérieusement et déployer les efforts nécessaires afin de réduire la facture alimentaire qui s'alourdit sans cesse. Pour cela, l'agriculture algérienne doit se montrer flexible pour faire face aux défis de la rareté et de dégradation des ressources naturelles de base et à l'instabilité des productions agricoles.

Une attention particulière doit être confiée à la culture du blé car les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base des algériens, elles constituent l'épine dorsale de leur système alimentaire et elles fournissent plus de 60% de l'apport calorifique et 75 à 80% de l'apport protéique de la ration alimentaire.

Dans ce contexte, les potentialités en ressources hydriques souterraines et en terres recelées dans les régions sahariennes notamment la région d'Adrar qui ont incité les pouvoirs publics à encourager l'investissement dans ces régions, plus particulièrement en céréaliculture, dont les résultats réalisés à nos jours sont toujours instables avec des fluctuations exorbitantes, toutes les contraintes qui font face doivent être prises en charge.

Il convient de dire que l'augmentation de la production et l'amélioration des rendements sont en mesure de nos capacités collectives si l'intention existe pour réaliser cet objectif. Pour cette raison, à la compétence scientifique de relever le défi et prendre en charge les contraintes techniques qui entravent notre agriculture. Dans ce contexte s'inscrit notre travail qui a comme objectif la valorisation des ressources en eau disponibles et l'amélioration de l'efficacité de l'eau d'irrigation pour la culture du blé.

L'approche adoptée réside dans la modélisation de l'évapotranspiration de référence estimée par la méthode de Penman Monteith, l'utilisation adéquate des éléments fertilisants, lutte contre les adventices et adaptation aux conditions climatiques.

La modélisation est devenue actuellement un outil puissant et abordable grâce à l'utilisation des outils informatiques de plus en plus performants. Les approches et méthodes utilisées dans ce domaine sont aussi très variées. Actuellement le monde de la modélisation est très vaste et poursuit, sans cesse son élargissement. Deux approches sont appliquées dans ce travail ;

- La régression multiple qui est un des procédés de modélisation prédictive ancien, il est très utilisé à l'heure actuelle mais il présente des limites dans son utilisation.

- La technique des réseaux de neurones formels qui est considérée comme une extension puissante de techniques bien connues des ingénieurs, elle vient pour améliorer les performances des modèles obtenus. Aujourd'hui, les réseaux neuronaux sont utilisés dans de nombreux domaines entre autres, l'intelligence artificielle grâce à leur propriété en particulier, leur capacité d'apprentissage. Avoir une série de donnée assez long et le problème de Sur-apprentissage sont des limites sérieuses qui contraignent l'utilisation de cette approche.

Pour améliorer l'efficience de l'eau d'irrigation il faut intervenir à plusieurs niveaux. On cite entre autres ; le choix d'un système d'irrigation performant, pratique d'une irrigation correcte, réalisation d'une fertilisation raisonnée, choix d'un matériel végétal performant, préservation de fertilité du sol et lutte contre la salinisation, semis à temps importun et adaptation au changement climatique.

Cette étude est réalisée dans un milieu qui présente des caractères spécifiques ; le sol est type peu évolué, l'eau d'irrigation provienne dans sa totalité de la nappe du continental intercalaire qui alimente à la fois les Foggaras, les puits et les forages. Le climat se caractérise par les températures extrêmes, pluviométrie négligeable, humidité relative faible et un vent qui souffle en permanence.

Une série de données météorologiques journalière de plus de 5 ans est utilisée pour calculer les valeurs mensuelles, décadaires et journalières de l'ET0 par l'intermédiaire de la formule de Penman Monteith, elle est aussi utilisée comme base de données pour implémenter les réseaux de neurones et estimer les valeurs de l'ET0 par les modèles élaborés.

Les essais expérimentaux sont déroulés dans deux sites différents ; la zone d'Aougrou et à la station expérimentale de l'INRAA d'Adrar au cours de trois campagnes consécutives. Les résultats obtenus peuvent être subdivisés en trois parties :

1. Les résultats de la modélisation indiquent que l'approche de la régression linéaire multiple peut présenter des modèles performants mais elle est limitée par le problème de colinéarité. La vérification de sa présence passe obligatoirement par la détermination de la valeur de VIF (variance inflation factor), lorsque celle la dépasse une certaine limite il y aura

risque de la colinéarité. Pour cette raison on n'a pas pu l'utiliser pour modéliser l'évapotranspiration de référence à pas de temps mensuel.

D'autres reproches pour cette méthode ; elle donne de mauvais résultats en présence de relation non linéaire entre les variables indépendantes et la variable dépendante et elle n'offre pas la possibilité d'améliorer la performance des modèles.

Quant à l'approche de réseaux de neurones, l'utilisation d'une simple architecture (une couche cachée à 4 neurones) a donné des résultats très satisfaisants. En effet, la comparaison des critères de performance de chaque phase de modélisation avec ceux de la RLM (régression linéaire multiple) ont montré que le modèle de RNA est mieux par rapport au modèle obtenu par la RLM. Cependant, il convient de noter que l'avantage de la méthode de neurones réside dans la possibilité d'avoir des améliorations dans les critères de performance en modifiant l'architecture du réseau. En effet, la performance des réseaux de neurones est très souvent liée à son architecture, celle-ci est habituellement déterminée par des expériences.

Par la comparaison des résultats obtenus par les réseaux de neurones en phase de test avec ceux obtenus par la méthode de régression multiple pour le même ensemble de données, nous pouvons voir clairement que la série obtenue par les réseaux de neurones est plus proche de la série observée par rapport à celle obtenue par la méthode de la RLM. Cette différence devient plus importante avec des valeurs extrêmes. Ce qui ajoute une autre justification au choix des réseaux de neurones

Le choix de la capacité du réseau de neurones reflète primordialement sa capacité d'apprentissage et de généralisation. Si le modèle de réseau est proportionnellement faible, il sera incapable d'obtenir la fonction désirée. Toutefois, si elle est trop complexe, il sera incapable de généraliser le modèle.

À travers diverses architectures testées, nous avons cherché à maximiser le coefficient de détermination  $R^2$  et le critère de Nash E à environ 1. Dans le cas d'un phénomène peu complexe (pas de temps mensuel et pas de temps décadaire), il suffit une seule couche cachée et un nombre limité de neurones dans cette couche pour avoir un modèle performant.

Par contre pour un phénomène plus complexe (modélisation à pas de temps journalier), il faut jouter d'autres couches cachées. En effet dans notre cas, l'amélioration des performances des modèles par l'ajout de neurones à la seule couche cachée a été limitée à 13

neurones, pour diminuer par la suite. Les valeurs de MSE obtenus dans la phase de test étaient 0,029, 0,019 et 0,027 (mm/j)<sup>2</sup> respectivement par 12, 13 et 14 neurones. La meilleure valeur obtenue par une couche cachée était plus grande que 0,0047 (mm/jour)<sup>2</sup>, qui a été obtenu par l'architecture du réseau choisie dans cette étude à savoir deux couches cachées avec 8 neurones chacune.

Nous avons constaté que par une seule couche cachée, les valeurs de R<sup>2</sup> sont fluctuantes, et avec 2 couches cachées, les valeurs de R<sup>2</sup> progressent de manière rapide et monotone. En outre, les valeurs de critère de Nash (E) ont progressé de manière significative jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur de 1.

Un autre paramètre qui doit être absolument pris en considération est le nombre d'itérations. Les différentes combinaisons montrent que 1000 itérations sont suffisantes pour obtenir le meilleur résultat. L'ajout d'autres itérations est inutile ou peut même diminuer la performance.

Il convient de mentionner que, lorsque l'architecture du réseau devient complexe, le processus d'apprentissage devient de plus en plus lourd et le temps requis pour effectuer cette opération augmente progressivement. Par conséquent, la modélisation peut durer pendant une longue période et la recherche d'une meilleure architecture nécessite un temps considérable.

Nous devons avouer donc, que la performance des modèles varie selon le nombre d'entrées ainsi que du pas de temps prévu, En effet, la performance est d'autant meilleure qu'on s'intéresse à la modélisation à pas de temps plus étendu. Doté d'une architecture simple, on a obtenu une très forte corrélation, c'est à dire, R<sup>2</sup> proche de 1, Cette performance décroît lorsque le nombre d'entrées est réduit.

D'autres facteurs peuvent probablement intervenir et influencer sur la performance des modèles. Ce sont notamment la variabilité (écart type) entre les valeurs des paramètres d'entrée et leurs corrélation avec le paramètre de sortie. On constate que les écarts types des valeurs des entrées sont d'autant réduits qu'en allant du pas de temps journalier au pas du temps mensuel.

Il est nécessaire de signaler que l'un des obstacles qui s'oppose à l'application de cette approche est le problème de sur-apprentissage. On peut vraisemblablement parler de ce

problème si l'erreur de prédiction du réseau sur l'ensemble d'apprentissage diminue alors que l'erreur sur la validation augmente de manière significative. Cela signifie que le réseau continue à améliorer ses performances sur les échantillons d'apprentissage mais perd son pouvoir de prédiction sur ceux provenant de la validation.

2. Les résultats des essais expérimentaux effectués sur le blé nous a conduit à inscrire les conclusions suivantes :

Le développement des racines croît rapidement durant les stades initiaux de la culture, elles atteignent 35 cm au stade tallage et 55 cm au stade montaison. Il y avait une légère avance en extension dans les planches fertilisées en phosphore par rapport aux autres, puis c'est la profondeur du sol qui détermine la profondeur maximale atteinte.

L'extension des racines est favorisée par les apports du phosphore par contre les apports supplémentaires en potassium étaient sans effet. En outre nous avons remarqué que le manque d'eau ainsi que son excès ont un effet négatif sur la croissance des racines.

L'effet du phosphore sur le développement des parties aériennes est significatif et le reliquat en cet élément a exprimé son existence. L'effet positif du phosphore s'est aussi manifesté par l'amélioration de l'indice de tallage et de l'indice foliaire. Il faut ajouter que la durée du cycle végétatif est influencée par la fertilisation phosphatée mais aussi par le manque d'eau ou son excès.

Le développement végétatif ainsi que le rendement obtenu sous pivot sont satisfaisants, ceci est dû notamment au fait que le pivot est installé dans une terre nouvelle, dans cette situation, les techniques culturales appliquées par l'agriculteur ont donné leurs fruits.

A la station expérimentale ; durant la première campagne toutes les composantes du rendement sont affectées par le manque d'eau et aussi par son excès. Ces composantes sont améliorées par les traitements hydriques qui assurent un apport d'eau proche aux besoins de la culture mais aussi par la fertilisation qui contient le phosphore.

Les rendements et leurs composantes obtenus durant les trois campagnes d'essai montrent des variations importantes d'une campagne à une autre. Le rendement le plus élevé a été obtenu durant la troisième campagne alors que, le nombre de grains par épi est plus élevé

durant la première campagne et les longueurs des tiges sont les plus élevées durant la deuxième campagne.

L'effet des traitements hydriques sur la croissance du végétal est important. Les valeurs obtenues indiquent que la croissance des tiges suit presque la même allure que la croissance des racines. En effet, une irrigation avoisinante des besoins en eau de la culture favorise mieux la croissance des tiges, par contre un déficit hydrique accentué ou un excès d'eau prolongé ont des effets négatifs.

En ce qui concerne la durée du cycle végétatif, les observations menées sur le terrain indiquent que, dès le stade montaison, l'effet de l'humidité du sol sur le décalage entre les stades végétatifs est nettement visible. La différence s'accroît au fur et à mesure pour atteindre plus d'une semaine en fin de cycle. Cette situation peut représenter un effet négatif sur le rendement si l'intensité de la température au moment de la maturation est importante.

En ce qui concerne l'effet des traitements hydriques sur les rendements et leurs composantes ; l'analyse de la variance offre des indications précises sur l'influence de chaque traitement étudié sur les rendements obtenus et leurs composantes. Cette influence diffère d'une campagne à l'autre, car elle dépend d'autres facteurs.

Pendant la première campagne les résultats d'analyse statistiques indiquent que les quantités d'eau apportées ont un effet hautement significatif sur la biomasse et la longueur de l'épi. La seule composante qui ne soit pas influencée par les traitements hydriques est la fertilité de l'épi (nombre de grains/épi). L'effet de l'interaction irrigation x fertilisation sur la biomasse est hautement significatif, contrairement à toutes les autres composantes qui ne se sont pas manifestées.

Durant la deuxième campagne, l'effet des traitements hydriques sur le rendement et ses composantes devient plus important dans la mesure où les traitements hydriques ont eu un effet hautement significatif sur la biomasse et sur la longueur des tiges, et un effet significatif sur le rendement et le reste de ses composantes.

Durant la troisième campagne, les traitements hydriques ont eu un effet hautement significatif sur le rendement et sur toutes ses composantes, sauf l'indice de récolte.

L'étude de la contribution des composantes de rendement à l'élaboration du rendement a révélé que pour les trois campagnes d'essai, ce sont la biomasse, le nombre de

grains par épi et le PMG qui contribuent positivement à l'amélioration du rendement. Donc, afin d'améliorer le rendement, il suffit d'améliorer ces trois composantes.

A partir du bilan hydrique déterminé par les cases lysimétriques, nous avons abouti à l'ETM du blé qui peut dépasser 8,16 mm/j et un coefficient cultural Kc qui atteint 1,44.

Connaissant les valeurs de LAI, de la température moyenne et celle du Kc on peut construire un modèle performant qui permet d'évaluer les valeurs de l'ETM de blé. Sa formule est comme suit :

$$ETM = \exp (0,26LAI^{0.5} + 0,046T + 0,95 Kc - 0,83)$$

L'effet de la fertilisation sur le développement de la culture a débuté dès le stade 3- 4 feuilles, les micros parcelles où les besoins de la plante sont satisfaits se comportent normalement et présentent une coloration vert-foncé.

L'effet du phosphore est nettement positif sur le nombre de talle et la hauteur de végétation par contre les apports de potassium n'ont pas mis en évidence aucun signe positif.

Durant la première campagne, l'effet de la fertilisation appliquée était significatif sur le rendement. Par contre, mise à part la biomasse, la fertilisation n'avait aucun effet significatif sur toutes les composantes du rendement. Les apports en potassium n'avaient aucun effet sur le rendement.

Durant la deuxième campagne, l'analyse statistique des résultats indique que globalement que la fertilisation avait un effet identique à celui de la campagne précédente. La seule différence est enregistrée sur la hauteur des tiges où l'effet de la fertilisation est significatif.

Pendant la 3<sup>ème</sup> campagne, l'effet de la fertilisation est hautement significatif sur le rendement et sur l'indice de récolte. Il est significatif sur la biomasse, le nombre de grains par épi et les hauteurs des tiges.

D'après les résultats d'analyse statistique, l'effet de la fertilisation sur les rendements diffère d'une campagne à une autre. La différence entre les moyennes des rendements obtenus par les différents niveaux de fertilisation est hautement significative. Ce résultat ajoute la confirmation à l'effet positif des reliquats.

Pendant les deux premières campagnes, les apports en potassium n'avaient eu pas un effet significatif. Au contraire, ils ont probablement eu un effet négatif car le sol en contient suffisamment.

Pendant la troisième campagne, la réponse du rendement vis à vis des apports en engrais potassique est hautement significative. Ceci explique pourquoi les besoins du blé en potassium dans ces sols ne sont pas élevés.

Nous avons constaté que les traitements avec apport en K en l'absence de P n'ont pas pu améliorer le rendement d'une manière significative.

Pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation dans la région d'Adrar, il est nécessaire de contrecarrer les différentes contraintes qui confrontent le bon développement de l'agriculture, plus particulièrement celui de la céréaliculture sous pivots.

Deux contraintes importantes méritent d'être tenues en considération ; lutte contre les mauvaises herbes et adaptation au climat.

Pour la première contrainte, il est utile de noter que c'est une des causes importantes des chutes de rendements du blé sous pivots.

Nous avons observé dès la première campagne l'apparition de quelques pieds de mauvaises herbes qui s'installent sous pivot et à partir de la troisième campagne, une gamme très diversifiée de mauvaises herbes occupe tout le terrain du pivot. Un recensement effectué sur le terrain d'un ancien pivot montre que le champ du blé est infesté par plus de 16 espèces et variétés avec une moyenne de 563 plants/m<sup>2</sup> dans un premier site et 4000 plants /m<sup>2</sup> dans un deuxième.

Pendant cette campagne, le rendement obtenu sous ce pivot est moins de 20 q/ha. Tous les moyens de lutte contre les adventices n'ont pas abouti à un résultat satisfaisant et l'agriculteur se trouve obligé à effectuer le transfert de ce pivot à un nouveau site.

Le brome (*Bromus* sp) occupe la première place du point de vue nombre de pieds/m<sup>2</sup>. Cette espèce est très difficile à combattre dans les cultures de céréales. Car une fois installé, le brome présente suffisamment de vigueur pour étouffer les éventuelles mauvaises herbes. C'est la raison pour laquelle elle gagne le terrain au fil de temps et devient une espèce dominante et pose de sérieux problèmes pour développement de la culture.

L'avoine ou la folle avoine (famille de Poaceae) occupe la deuxième place, elle cède sa place au fur et à mesure au brome. L'opération de lutte contre cette espèce est efficace si elle est effectuée à temps approprié.

Après différentes techniques de lutte, nous avons constaté qu'un nombre important des plants des adventices ont persisté. Ceci est dû notamment au fait que les différents traitements n'ont pas détruit la totalité des plants, une fraction de ceux-ci a repris et a continué son développement. D'autres facteurs peuvent agir dans cette situation ; c'est l'existence d'un stock important en semences dans le sol et les conditions pour la germination des grains qui diffèrent selon les espèces.

Nous avons remarqué aussi qu'en présence de suffisamment d'espace, ces plants se manifestent par une capacité de tallage assez importante.

Il s'est avéré que tous les moyens de lutte utilisés n'ont pas abouti à un résultat satisfaisant, ceci a confirmé la difficulté que présentent les opérations de désherbage. En effet, pour mieux contrôler la propagation des adventices dans les champs du blé, la lutte manuelle doit commencer dès les premières apparitions. Sinon à partir de la troisième campagne le terrain du pivot devient très infesté et dans ce cas il est préférable de changer la culture (rotation) ou de transférer le pivot à un nouveau site.

Par ailleurs, il faut signaler que même si la lutte chimique contre les adventices est maîtrisée par l'apparition d'une gamme de désherbants puissants, l'utilisation massive de ceux-ci perturbe le développement de la culture et réduit la quantité de la récolte et la qualité organoleptique de la production.

En ce qui concerne l'adaptation au climat, on note que sans tenir compte de l'effet de différents traitements, l'analyse statistique indique que l'effet de la campagne est significatif sur presque toutes les composantes de rendement.

En effet, si on analyse l'évolution des températures moyennes pendant les cycles végétatifs des deux dernières campagnes (dates de semis identiques), on trouve une grande différence entre les allures de celles-ci. Durant la deuxième campagne la température était relativement élevée notamment durant le mois de mars. Par contre durant la campagne 2006/2007 les stades finaux de la culture ont coïncidé avec une température modérée qui a permis une maturation progressive.

Il convient de dire que les données météorologiques de la région d'Adrar indiquent que les températures sont en fluctuations permanentes d'une année à une autre. C'est probablement la raison pour laquelle les rendements moyens du blé sous pivots et les rendements pics fluctuent à leurs tours d'une année à une autre.

L'analyse multivariée indique que les effets des températures basses et celui des températures élevées des trois mois ; janvier, février et Mars sont significatifs à l'intervalle de confiance  $\alpha = 0.05$ .

La présence d'un coefficient de détermination élevé et des coefficients de régression significatifs permet de construire un modèle d'estimation des rendements moyens du blé sous pivots dans la région d'Adrar en connaissant les températures extrêmes des trois mois ; janvier, février et mars.

Pour s'échapper aux effets néfastes du climat, il est primordial d'effectuer le semis à temps. L'expérience montre que la meilleure date de semis se situe dans la deuxième moitié du mois de novembre, un petit décalage est tolérable au Nord d'Adrar.

En fin, il est nécessaire d'effectuer une réflexion profonde et d'étudier sérieusement le devenir de la céréaliculture dans la région d'Adrar. A vrai dire, il faut tenir compte que les quantités énormes en eau de meilleur qualité qui sont mobilisées pour avoir un rendement moyen qui descend dans certain cas à 20 q/ha. Cette situation ne satisfait pas la contre partie déployé à maint niveaux ; économique, social et écologique. Il est temps de réfléchir sérieusement pour prendre une décision définitive afin de valoriser au mieux cette ressource en eau irrécupérable.

Ce travail n'est qu'un début des travaux nécessaires pour développer l'agriculture dans cette région, il est indispensable de fournir des efforts colossaux pour sauvegarder l'écosystème de la région et d'exploiter ses ressources naturelles d'une manière rationnelle.

## Références bibliographiques

**Aidaoui A. et Hartani T. (2000)** : Gestion de l'irrigation du blé dur par des indicateurs de l'état hydrique ; CIHEAM - Options Mediterraneennes.

**AIEA (2005)**: Nutrient and water management practices for increasing crop production in rainfed arid/semi-arid areas. Agency's Laboratory, Seibersdorf International Atomic Energy Agency Wagramer Strasse 5 P.O. Box 100.A-1400 Vienna, Austria.

**Ait Kadi M. (2009)**: Impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire. Rencontre internationale sur le changement climatique : enjeux et perspectives d'adaptation pour le Maroc .Rabat, 16 octobre 2009.

**AL-Barrak K. M. (2006)**: Irrigation interval and nitrogen level effects on growth and yield of canola (*Brassica napus*). Scientific Journal of King Fisal University, 7. (1): 87–103.

**Alderfasi A.A. et Refay Y.A. (2010)**: Integrated use of potassium fertilizer and water schedules on growth and yield of two wheat genotypes under arid environment in Saudi Arabia 1- effect on growth characters. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci., 9 (3): 239-247, 2010.

**Ali Othman A. Z. et Bahaa El- Din Hassan M. (2011)**: Potentials for Boosting Arab Wheat Production under The Currently Prevailing Conditions. Journal of Applied Sciences Research, 7(11): 1460-1466, 2011.

**Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. et Smith M. (1998)**: Crop evapotranspiration (guidelines for computing irrigation crop water requirement). Irrigation and drainage paper N°. 56. Food and Agriculture Organization: Rome, Italy.

**Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Belgium L. et Smith M. (2006)**: Crop evapotranspiration. (Guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO. Water Resources. Development and Management Service. Rome, Italy.

**Amigues J., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B. et Tardieu A. (2006)** : Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise collective scientifique. INRA.

**Amini J. (2008):** Optimum learning rate in back-propagation neural network for classification of satellite images (IRS-1D). *Scientia Iranica*. 15: 558-567.

**Amjad H., Shazia N., Tahira I., Hina S., et Ahsanul H. (2008):** Effects of NaCl salinity on seedling growth. Senescence, catalase and protease activities in two wheat genotypes differing in salt tolerance. Nuclear institute for agriculture and biology (NIAB). P.O. Box. 128. Faisalabad, Pakistan and department of chemistry. University of agriculture. Faisalabad. Pakistan.

**Ammar M.Y. (2007) :** Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu thèse présentée pour obtenir le titre de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse .École doctorale : transfert, dynamique des fluides, énergétique & procédés. Spécialité : génie des procédés et de l'environnement.194 p.

**Anctil F. et Coulibaly P. (2006) :** Potentialités des réseaux de neurones pour la modélisation hydrologique en support a la gestion des barrages. Congrès annuel de l'ACB. Canada. Québec city.

**Ansari T. (2011) :** Système traditionnel d'exploitation des eaux souterraines foggaras. Colloque international sur la foggara (CIFog) International conférence on Foggara. Adrar les 9-10 et 11 avril 2011.

**Aouiche A. (2006) :** Rejection des perturbations dans les systèmes non linéaires : étude comparative. Université Mohamed Boudiaf de M'sila. Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur. Département d'électronique. Mémoire de Magister en génie électronique. 131 P.

**Asdrubal M. (2006) :** Fertilisation et amendements .Dossier d'autoformation. Educagri éditions. 2e édition 2006. ISBN 978-2-84444-462-2.

**Aytek A., Guven A., Yuce I.M. et Akso H. (2009):** Reply to discussion of "An explicit neural network formulation for evapotranspiration. *Journal des sciences hydrologiques*, 54(2): 389 393.

**Badraoui M. et Farhat A. (1998) :** Développement de l'Irrigation par Pivot au Maroc. Bulletin de liaison du Programme National de transfert de technologie en agriculture.

**Balaghi R. (1996)** : Calcul de l'évapotranspiration journalière par l'approche de Penman–Monteith. Note technique. INRA. Centre régional de la recherche agronomique du Saïs-Moyen Atlas.

**Bamouh A. (2000)** : Gestion de la contrainte pluviométrique pour l'amélioration de la production végétale et de l'efficacité d'utilisation de l'eau. Bulletin de liaison du programme national de transfert de technologie en agriculture. Maroc.

**Bavec M., Vuković K., Grobelnik Mlakar S., Rozman Č. et Bavec F. (2007)**: Leaf area index in winter wheat: response on seed rate and nitrogen application by different varieties. Central european agriculture journal n° 3 (337-342) 337.

**Beghdadi H. et Senouci M. (2005)** : Réseaux de neurones, théorie et pratique. Office des Publications Universitaires.

**Belabbes K. (2004)** : Besoins en eau des cultures dans le périmètre de Tadla. Rapport de prestation d'expertise sur le thème ; Département Génie rural .IAV Hassan II. Rabat.

**Bellague D., Chedjerat A., Khedim A., Khelifi H., M'hammedi Bouzina M., Merabet B., Laouar M. et Abdelguerfi A. (2007)** : Comportement et l'efficacité de l'utilisation de l'eau de quelques cultivars de luzerne pérenne dans une région semi aride de l'Algérie. Option méditerranéen. Séries A. N° 79. PP.265-268.

**Benchokroun I. et Handoufe A. (1990)** : Maximisation de l'efficacité de l'eau. Cas de blé. [Anafide.org/doc/HTE.2080/80-5.pdf](http://Anafide.org/doc/HTE.2080/80-5.pdf).

**Benchohra B. et Khelloufi B. (2000)** : Impacts du risque climatique sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride : Approche éco-physiologique. Sécheresse. Vol. 11, Numéro 1, pp 45-51, Notes méthodologiques.

**Bennai M. et Benabbas B. (2007)** : L'amélioration des rendements des céréales par une fertilisation adaptée aux conditions pédoclimatiques algériennes. Constantine– Septembre 2007.

**Benslimane M., Hamimed A., El Zerey W., Khaldi A. et Mederbal K. (2008)** : Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. Laboratoire de recherche sur les systèmes biologiques. Vertigo : Revue en sciences de l'environnement, vol.8 no3, décembre 2008.

**Bessaoud O. (2011)** : Les politiques agricoles et rurales maghrébines face aux enjeux du futur. <http://www.maghrebemergent.com/economie/78-idees/2049>.

**Besse P. (2005)** : Data mining II. Modélisation Statistique et apprentissage publications du laboratoire de statistique et probabilité. Université de Paule Sabatier Toulouse III.

**Bharat R.S. (2006)**: Crop Water Requirements and Water Productivity .Concepts and Practices. College of agricultural engineering. Punjab agricultural university. Ludhiana.

**Blama A. et Laaboudi A. (2009)** : La foggara : défis du passé et défis de l'avenir. Revue INRA n° 20 juin 2007.

**Blum A. (2011)**: Plant Breeding for Water-Limited Environments. DOI 10.1007/978-1-4419-7491-4\_2, © Springer Science+Business Media, LLC 2011.

**Bongaarts J. et Sinding S. (2011)**: Population policy in transition in the developing world. 29 July 2011. VOL 333 Science. [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org).

**Borne P., Benrejeb M. et Haggège J. (2007)** : Les réseaux de neurones: présentation et applications. Méthodes et pratiques de l'ingénieur. Edition Technip, Paris 2007.

**Boukhalfa-deraoui N., Halilat M.T. et Mekliche A. (2011)** : Effet d'un apport de phosphore sur une culture de blé tendre conduite en conditions irriguées. Revue des BioRessources. Vol 1 N 1 Juin 2011(41-48).

**Boulaâssel A. (1998)** : Utilisation rationnelle de l'irrigation d'appoint sur deux variétés de blé dur (Waha et Acsad 65). Thèse de magister. INA El-Harrach.

**Bourenane N. (1991)** : Agriculture et alimentation en Algérie ; entre les contraintes historiques et les perspectives futures -Options Méditerranéennes, série A / n O 21, 1991. Pp 146-157. Choix technologiques, risques et sécurité dans les agricultures méditerranéennes.

**Calanca P., Smith P., Holzkämper A. et Ammann C. (2011)** : L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie. Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich. E-mail: [pierluigi.calanca@art.admin.ch](mailto:pierluigi.calanca@art.admin.ch).

**Chabane M. (2010)** : Le réchauffement climatique menace la sécurité alimentaire : quelle vision et quelle politique pour l'avenir en Algérie. Centre régional de recherche en sciences sociales. Laboratoire d'économie et de sciences sociales de rennes. [mohamed.chabane@uhb.fr](mailto:mohamed.chabane@uhb.fr).

**Changming L., Xiying Z., Yongqiang Z. (2002)** : Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter *Agricultural and Forest Meteorology* 111 (2002) 109–120.

**Chaoui H. (2004)** : Implantation sur FPGA d'une loi de commande adaptative neuronale supervisée pour une articulation flexible. Mémoire de maîtrise en informatique. Université du Québec en OUTAOUAIS. 272 p.

**Chari F., Delhom M., Filippi J.B. et Santucci J.F. (2005)** : Prédiction du comportement hydrologique d'un bassin versant à l'aide de réseaux de Neurones. SPE - URA CNRS 2053 .Université de Corse. Campus Grossetti.

**Cheggaga N. et Youcef Ettoumi F. (2010)** : Estimation du potentiel éolien *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza* (2010) 99 – 1.

**Chennafi H., Saci A., Harkati N., Adjabi A. et Mébarkia A. (2010)** : L'optimisation du rendement de la culture du blé sous l'effet du précédent cultural et l'outil de labour en environnement semi-aride. *Options Méditerranéennes, A no. 96, 2010 – IV Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct.*

**Chowdhary A. et Shrivastava R.K. (2010)**: Reference crop evapotranspiration estimation using Artificial Neural Networks. *International Journal of Engineering Science and Technology.* 2(9): 4205-4212.

**Chuanyan Z., Zhongren N. et Guodong C. (2005)**: Evaluating methods of estimation and modeling spatial distribution of evapotranspiration in the middle Heihe River Basin, China. *Ecological Modeling* 189: 209–220.

**CIHAM et AFD (2009)** : Perspectives des politiques agricoles en Afrique du Nord. Série B étude et recherche 2009 n°64.

**Clemmens A.J. Et Molden D.J. (2007)**: Water uses and productivity of irrigation systems. *Irrig Sci.* 25:247–261.

**Collins J. M. et Clark M.R. (1993)**: An application of the theory of neural computation to the prediction of workplace behavior: an illustration and assessment of network analysis, *Personnel Psychology*, 46: 503- 524.

**Cour T., Giraud G., Kodsi A., Luong T., Lauranson R., Marcovici C. et Sadeghi K. (2002)** : reconnaissance de formes par réseaux de neurones. Ecole polytechnique, 69 p.

**Daoud Y. et Halitim A. (1994) :** Irrigation et salinisation au Sahara algérien. Revue sécheresse n° 3 Vol. 5, 1994 pp 151-60.

**Dario J.C. et José L.C. (2011):** Soil Heat Flux Modeling Using Artificial Neural Networks and Multispectral Airborne Remote Sensing Imagery. Remote Sens. 2011, 3, 1627-1643; doi: 10.3390/rs3081627.

**Davis J.G. et Westfall D.G. (2011):** Fertilizing Winter Wheat. Colorado State University Extension.

**Debaeke P. (1997):** Le désherbage intégré en grande culture: bases de raisonnement et perspectives d'application. Cahiers "Agricultures", Volume 6, Numéro 3, pages 185 -194, Mai - Juin 1997.

**Dechemi N. Benkaci T. et Issolah A. (2003) :** Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. Revue des sciences de l'eau. RSE 16-4. 407 -427.

**Delacostea M., Lekbir S., Barana P., Dimopoulos T. et Giraude J.L. (1995) :** Neural model versus multiple regression prediction nests trout. Second Forum Halieumétrique, Nantes, 1995.

**Delecolle R. (2000) :** Agriculture et réchauffement climatique : quelques éléments de réflexion : Unité de Bioclimatologie, INRA, Avignon.

**Deore S.J. (2009):** Comparative assessment of pan and modified penman method for the estimation of reference crop evapotranspiration. International Research Journal - ISSN-0974-2832 Vol. II, Issue-6 (Feb.09-April.09).

**Derd (2001) :** Nouvelles normes pour mieux fertiliser le blé en irrigué dans le Gharb. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA. Transfert de technologie en agriculture.

**Deswal S. et Pal M. (2008):** Artificial Neural Network based Modeling of Evaporation Losses in Reservoirs World Academy of Science, Engineering and Technology 39 : 279-283.

**Dinpashoh Y. (2006):** Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran. Agricultural Water Management 84:123 – 129.

**Djermoun A. (2009) :** La production céréalière en Algérie. Les principales caractéristiques. Revue Nature et Technologie. n° 01/Juin 2009. Pages 45 -53.

**Doorenbos J. et Pruitt W.O (1976) :** Les besoins en eau des cultures. Bul. Irr. Drai. N° 24  
FAO Rome 235 p.

**Doria R., Madramootoo C.A. et Mehdi B.B. (2006):** Estimation of future crop water requirements for 2020 and 2050, Using CROPWAT. Climate change technology. 2006 IEEE. Volume, Issue, 10-12 May 2006 :1– 6.

**Dreyfus G. (1998):** Les réseaux de neurones. École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI), Laboratoire d'Électronique 10, rue Vauquelin 75005 Paris.

**Dreyfus G., Martinez J.M., Samulides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria S. et Hérault L (2004) :** Réseaux de neurone Méthodologie et application. 379 p.

**D.S.A Adrar : (2000) :** Rendement du blé cultivé sous pivot dans la région d'Adrar. Bilan de la campagne agricole 1999/2000.

**Dubost D. (1983):** Méthode pratique pour le calcul de l'évapotranspiration au Sahara Algérien. Bull.agr.saha. N°5 juillet 1983 pp.111- 142.

**Dubost D. (1991) :** Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis Algériennes ; thèse pour le doctorat d'Université en géographie et aménagement du monde arabe tome I 290 P.

**Duchauffour P. (1997):** Abrégé de pédologie : Sol, végétation, environnement. 5<sup>ème</sup> édition.

**Ducrocq M. (1990) :** Les bases de l'irrigation, 117 p.

**Dufumier M. (2007) :** Souveraineté et sécurité alimentaires dans les pays du Sud. Institut National Agronomique Paris-Grignon. <http://utopiaconf.free.fr>.

**Eckersten H. (1997):** Simulation of water flow in plant communities. - SPAC model description, exercises and user's manual.2nd edition. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Soil Sciences. Division of Agricultural Hydrotechnics. p56.

**Eilers R.G., Eilers w. D., Pettapiece W.W. et Lelyk G. (2000):** Santé des sols. Agriculture et agroalimentaire. CRECO Canada.

**Er-Raki S., Chehbouni A., Ezzahar3J., Khabba S., Lakhali E.K et Duchemin B. (2011):** Derived Crop Coefficients for Winter Wheat Using Different Reference Evapotranspiration Estimates Methods J. Agr. Sci. Tech. (2011) Vol. 13: 209-221.

**Eslamian S.S., Gohari S.A., Biabanaki M. et Malekian R. (2008):** Estimation of Monthly pan evaporation using artificial neural networks and support vector machines. Journal of applied sciences 8(19):3497-3502.

**Fadlallah N. (2005) :** Contribution à l'optimisation de la synthèse du lobe de rayonnement pour une antenne intelligente. Application à la conception de réseaux à déphasage : Thèse doctorat université de Limoges. Ecole Doctorale Science – Technologie – Santé.

**FAO (1979):** *L'évaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations. 2<sup>e</sup> éd. 1979. Archive documentaire de la FAO.*

**FAO (1992) :** *Foresterie en zones arides - Guide à l'intention des techniciens de terrain ISSN 1020-1149 Archive documentaire de la FAO.*

**FAO (1996) :** Sommet mondial de l'alimentation ; 13-17 novembre 1996. Rome Italie.

**FAO (2000) :** Utiliser l'eau de manière rationnelle. Deuxième forum mondial de l'eau. Magazine l'eau et l'agriculture.

**FAO (2002) :** Eau et agriculture. Produire avec moins d'eau. Archive documentaire de la FAO 28 P.

**FAO (2003a):** Accroître la productivité de l'eau. Revue agriculture.

**FAO (2003b) :** Irrigation avec les eaux usées. Manuel d'utilisation. 73 p.

**FAO (2005) :** Notions de nutrition des plantes et de fertilisation des sols. Manuel de formation, Projet Intrants/FAO, 2005. Version provisoire 24 p.

**FAO (2006) :** Sécurité alimentaire. Notes d'orientation. Archive documentaire de la FAO.

**FAO (2008) :** L'eau virtuelle : quel éclairage pour la gestion et la répartition de l'eau en Méditerranée. Les Notes du Plan Bleu. Environnement et Développement en Méditerranée. Programme des Nations Unies pour l'Environnement. Plan d'Action pour la Méditerranée. Centre d'Activités Régionales du Plan Bleu. Dépôt légal et ISSN : 1954-9164 N°8 2008.

**Fercha A. (2011):** Some physiological and biochemical effects of NaCl Salinity on Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.). Advances in Biological Research. 5 (6): 315-322, 2011.

- Ferchouche Y. (1999):** La salinité du sol. Revue symbiose pp 36-39.
- Gaume E. (2007) :** Un parcours dans l'étude des phénomènes extrêmes en hydrologie. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches 269 p.
- Gilles H., Marie P. et Denis L. (2005) :** Le phosphore, un polluant d'avenir. Eau et rivières, été 2005 n° 132. Dossier phosphore. [www.eau-et-rivieres.asso.fr](http://www.eau-et-rivieres.asso.fr).
- Guiheneuf P.Y. (1997) :** Le défi alimentaire mondial, des enjeux marchands à la gestion du bien public. Base.d-p-h.info/fr/fiches/premierdph/fiche.
- Guillermo Y. (1993) :** Les oasis du Touat-Gourara-Tidikelt en Algérie. Survie et ordre social au Sahara. 1993.  
Disponible sur [http://www.mondeberbere.com/civilisation/gourara/guillermou\\_orstom.pdf](http://www.mondeberbere.com/civilisation/gourara/guillermou_orstom.pdf).
- Guo J., Xing Z. et Liu Z. (2000):** Responses to phosphorus and potassium application in a wheat- Corn Rotation in Hebei Province China. Better crops international. Vol. 14, No. 2, November 2000.
- Hadef R. et Hadef A. (2001) :** Le déficit d'eau en Algérie: une situation alarmante. Desalination 137 (2001) 215–218.
- Hajare. H.V., Raman N.S. et Jayant Dharkar E.R. (2008):** New technique for evaluation of crop water requirement. WS3EAS Transactions on environment and development. Issue 5, Volume 4.
- Hamadache A., Abdellaoui Z. et Aknine M. (2002) :** Facteurs agro technique d'amélioration de la productivité de blé dur en Algérie. cas de la zone sub –humide. Revue Recherches agronomique n° 10 juin 2002 pp 5-18.
- Hassani I. (2001) :** Les ressources en eau en Algérie. Limites et contraintes. Forum scientifique international. Prévision du climat et gestion stratégique des ressources en eau au Maghreb. Adrar 24-26 septembre 2001.
- Hazrat M.A. et Lee T.S. (2006):** Potential evapotranspiration model for Muda. Irrigation Project, Malaysia .Water Resour Manage. 23:57–69.
- Hornik K., Stinchcombe M. et White H. (1994):** Degree of approximation results for feedforward networks approximating unknown mappings and their derivatives. Neural computation, vol 6, p 1262-1275, 1994.

**Hunsaker D.J., Fitzgerald G.J., French A.N., Clarke T.R., Ottman M. et Jand P.J. (2007):** Wheat irrigation management using multispectral crop coefficients: II. irrigation scheduling performance, grain yield, and water use efficiency. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50(6): 2035-2050.

**INRAA (2001) :** Le sol du labour au semis direct : Enjeux agronomique, Gestion de l'inter-culture, désherbage et protection des cultures.

**INRAA (2006) :** Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau; Sécheresse et agriculture ; Synthèse du rapport d'expertise. Octobre 2006.

**INSID (2006) :** Problématique de la salinité dans les périmètres irrigués de Bas Chelif : besoins en formation, en recherche - développement et en transferts de technologies.

**IPTRID (2006) :** Conférence électronique sur la salinisation: Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation.

**Isabelle B. (2006) :** La mobilité du phosphore. Revue de littérature. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.

**Izadifar Z. (2010):** Modeling and analysis of actual evapotranspiration using data driven and wavelet techniques. A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Civil and Geological Engineering. University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada. 150 p.

**Jain S.K., Nayak P.C. et Sudheer K.P. (2008):** Models for estimating evapotranspiration using artificial neural networks, and their physical interpretation. *Hydrological Processes* ydrol. Process. **22**: 2225–2234.

**Jean-Marie M., Philippe L., Marc V., Michel B., Claude S.P (1994) :** Choisir des sols aptes aux grandes cultures sèches en milieu méditerranéen. *Sécheresse* Vol.5, N°2: pp 117-125.

**Jouve P. (2007) :** Comment améliorer la valorisation des eaux de pluies au Maghreb et au Sahel ? Séance des Savoirs partagés d'Agropolis-Museum. Mercredi 19 décembre 2007.

**Katerji N. et Rana G. (2006):** Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 138: 142–155.

**Kenfaoui A. (1997).** La salinité des eaux d'irrigation.

**Kettab A. (2001)** : Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision. Desalination 136 (2001) 25–33.

**Khadraoui A. (2008)** : La foggara dans les Oasis du Touat, Gourara et de Tidikelt. Définition propositions de réhabilitation et sauvegarde. Agence de bassin hydrographique Sahara. Août 2007.

**Khelifi H.E., Khedim A., Merabet B.A., Benmessaoud A., Hadj Omar K., Nabi M., Alouane Y., Lazali M., Bellague D., et Abdelguerfi A. (2007)** : Résultats préliminaires de production et d'efficacité de l'utilisation de l'eau chez des cultivars de luzerne pérenne (*Medicago Sativa*) en régime hydrique pluvial et irrigué. Option méditerranéen. Séries A. N° 79. PP.327- 330.

**Koleyni K. (2010)**: Using artificial neural networks for income convergence. Global Journal of business research, Vol. 3, No. 2: 141-152.

**Krause P., Boyle D.P. et Base F. (2005)**: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in geosciences. Department for geo informatics, Hydrology and Modelling, Friedrich-Schiller-University, Jena, Germany.

**Laaboudi A. (2002)** : Détermination des besoins en eau de la culture du blé dans la zone d'Adrar : Utilisation des cases lysimétriques ; thèse de magistère 85 P. et annexe.

**Laaboudi A., Chaabane A. et Kharsi M. (2004)** : Les besoins en eau de la culture du blé dans les régions désertiques (cas de la wilaya d'Adrar). Revue INRA .n° 15

**Laaboudi A. et Mouhouche B. (2008)** : Conduite de la fertilisation phospho- potassique du blé dans les régions sahariennes. Colloque international sur l'aridoculture. Optimisation des productions agricoles et développement durable. CRSTRA. Biskra du 13 au 14 décembre 2008.

**Laaboudi A. (2008)** : Procédés d'amélioration de l'efficacité d'eau d'irrigation dans les régions sahariennes. Premier séminaire national sur la thème agriculture, environnement et santé. Centre universitaire de Khemis Meliana. 19 et 20 avril 2008.

**Laaboudi A. (2009)** : Dynamique de l'eau et des solutés dans les sols cultivés en zones arides (cas de la région d'Adrar). Séminaire International sur la protection et la préservation des écosystèmes sahariens. Université Kasdi Merbah Ouargla. Laboratoire de Protection des Ecosystèmes en Zones Arides et Semi-arides Ouargla.

**Laaboudi A., Slama A. et Hammouda M. (2010) :** Variations climatiques et leurs impacts sur le comportement des agriculteurs de la région d'Adrar. Premier colloque international sur les changements climatiques et environnement. Rabat- université Med V. Agdal et (AMEDD). Rabat 20-21 2010.

**Laaboudi A., Slama A. et Hammouda M. (2011a) :** Impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans la région d'Adrar. International conference on energy and sustainable development. Université Africaine d'Adrar. 29-30 November 2011.

**Laaboudi A., Mouhouche B. et Draoui B. (2011b):** Neural network approach to reference evapotranspiration modeling from limited climatic data in arid regions. Int J Biometeorol DOI 10.1007/s00484-011-0485-7

**Laaboudi A., Mouhouche B. et Draoui B. (2012):** Conceptual Reference Evapotranspiration Models for Different Time Steps. Petroleum & Environmental Biotechnology. Volume 3 • Issue 4 • 1000123.

**Laaboudi A. et Mouhouche B. (2012):** Water Requirement Modelling for Wheat under Arid Climatic Conditions. Hydrology current research volume 3. Issue 3 1000130

**Lahsen R. (2005) :** Contribution à la modélisation de l'évapotranspiration potentielle par les réseaux de neurone. Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention de diplôme d'ingénieur d'état en Génie Hydraulique. 80 p.

**Lallahem S. (2002) :** Structure et modélisation hydro-dynamique des eaux souterraines : Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. THESE N° d'ordre présentée à l'Université des sciences et technologies de LILLE Pour obtenir le grade de docteur de l'université en génie civil. Spécialité : Hydrogéologie.

**Larochelle H. (2008) :** Étude de techniques d'apprentissage non-supervisé pour l'amélioration de l'entraînement supervisé de modèles connexionnistes Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et postdoctorales en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.) en informatique. Université de Montréal.

**Line Kong A S. (2011) :** Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France). Thèse Présentée à l'Université de Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc pour obtenir le grade de docteur. Spécialité : hydrogéologie. Ecole

doctorale: systèmes intégrés en biologie, Agronomie, Géosciences, Hydro sciences et Environnement.

**Louhichi K. (1999)** : L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation pour une économie d'eau: cas d'un périmètre irrigué en Tunisie CIHEAM-IAMM Rapport final.

**Lu J., Sun G., McNulty G.S. et Amatya M.D. (2005)**: A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. Journal of the American Water Resources Association. 41(3):621-633.

**MAAO (2002)** : Céréales : lutte contre les mauvaises herbes.

**MADR (2010)** : Statistiques agricoles. Campagne agricole 2011/2012.

**Maghsoudi Moud A.A. et Yamagishi T. (2006)**: Differences between water extraction patterns of three wheat (*Triticum aestivum* L.). Cultivars at different soil depths under gradually downward soil drying conditions J. Agric. Sci. Technol. (2006) Vol. 8: 271-279.

**Martin, A. et Nolin, M.C. (1991)** : Etude pédologique du Comté de Chambly (Québec). Equip e pédologique du Québec, Agriculture Canada, Sainte-Foy. Centre de recherche sur les terres, Contribution no 89-26. Vol. 1. Description et interprétation des unités cartographiques. 319 p. (2 cartes). Vol. 2. Description et classification des séries de sols. 142 p.

**Matthieu V. (2006)** : Perspectives d'évolution pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée. Responsable Recherche et Développement Agronomiques du groupe SAS Laboratoire – AGRO-Systèmes, mvale@saslaboratoire.com.

**Mermoud A. (2005)** : Ingénierie des eaux, du sol et des écosystèmes. Sciences et ingénierie de l'environnement ; Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

**Mestan A. (2008)** : Introduction aux Réseaux de Neurones Artificiels Feed Forward 24 p.

**Mhiri A. (2002)** : Le potassium dans les sols de Tunisie. Atelier sur la gestion de la fertilisation potassique. Acquis et perspectives de la recherche. Tunis 10 décembre 2002. Institut National Agronomique de Tunisie.

**Mostéfa E. (1994)**: Evapotranspiration de référence. Penman –Monteith : Méthode révisée et recommandée. Office national de la météorologie.

**Mouhouche B. et Bourahla A. (2007)** : Optimisation de l'irrigation d'appoint apportée a différentes phases phénologiques d'une culture de blé dur (*triticum durum*). Sciences & Technologie C – N°25, Juin (2007), pp.53-58B.

**Nash J.E. et Sutcliffe J.V. (1970)**: River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. J Hydrol.10:282–290.

**Nedjraoui (2004)**: Algérie profil fourrager.

[www.fao.org/ag/AGP/agpc/doc/Counprof/Algeria/Algerie.htm](http://www.fao.org/ag/AGP/agpc/doc/Counprof/Algeria/Algerie.htm)

**Naheed G. et Mahmood A. (2010)**: Water Requirement of Wheat Crop in Pakistan Pakistan Journal of Meteorology Vol. 6, Issue 11(89-98).

**Naeem M. et Rai N.A. (2005)**: Determination of Water Requirements and Response of Wheat to Irrigation at Different Soil Moisture Depletion Levels. International Journal of Agriculture & Biology.07–5: 812–815.

**Nemeth I. (2001)** : Pollution azotée sous irrigation gravitaire : caractérisation de l'effet des pratiques agricoles et proposition d'amélioration. Application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique, Thèse Univ. Montpellier II, Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental.

**Nezli I.E., Achour S. et Djabri L. (2007)** : Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued m'ya (Ouargla). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n 06, Décembre 2007, pp. 121-134.

**Ouali S., Khellaf A et. Baddari K. (2007)** : Etude des ressources géothermiques du sud algérien. Revue des énergies renouvelables Vol. 10 N°3 (2007) 407 – 414.

**Oukaci H. (2004)** : L'eau un enjeu planétaire. Revue Eldjeich n° 492 JUILLET 2004 PP14-16.

**OSS (2008)** : Système aquifère du Saha septentrional (Algérie, la Libye ,la Tunisie). Gestion concertée d'un bassin transfrontalier. Collection synthèse N°1 Tunis 2008 56p.

**Parizeau M. (2004)** : Réseaux de neurones. GIF-21140 et GIF-64326. 124 p. Université de Laval.

**Paulo A., Quadros., Marco S. R., Cristina M. S. et Baptista G. (2005)**: Different modeling approaches for a heterogeneous liquid-liquid reaction process. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44: 9414-9421.

**Pereira LS., Oweis T. et Zairi A. (2002):** Irrigation management under water scarcity. *Agricultural water management* 57: 175-206.

**Petcu E. (2005):** The effect of water stress on cuticular transpiration and relationships with winter wheat yield. *Romanian Agricultural Research. Agricultural Research and Development Institute. Fundulea, 915200 Fundulea, Calarasi Romania.*

**Peter J. et Tenuta A. (2006) :** Dégâts dus au froid dans le blé chef du programme de pathologie, *Grandes cultures/ MAAARO.*

**PNUE (2006) :** Fiches méthodologiques des 34 indicateurs prioritaires pour le suivi de la stratégie méditerranéenne pour le développement durable .Document de travail 80 p.

**Pousset J.(1999) :** Culture des céréales avec peu ou pas de bétail. *Principes de base en agriculture biologique.*

**PPIC (2003):** Phosphorus Nutrition of Wheat—Optimize Production (PPIC)Potash & Phosphate Institute of Canada.

**Puc M. (2012):** Artificial neural network model of the relationship between Betula pollen and meteorological factors in Szczecin (Poland). *Int J Biometeorol* (2012) 56:395–401.

**Raissi O. (2004) :** Etude agro-pédologique des périmètres de la wilaya d'Adrar pour la création d'Oasis. *Rapport technique. ANRH 2004. 54 P.*

**Rakotomalala R. (2011) :** Colinéarité et section des variables régression linéaire multiple. *Université Lyon 2. Laboratoire ERIC.*

**Razi S. (2006) :** Etude expérimentale de l'influence du gypse sur la dynamique du phosphore dans le sol et sa cinétique d'absorption par le ray-grass. *Mémoire de Magister en agronomie. Université d'El hadj Lakhdar de Batna. 194 P.*

**Reid K. (2003) :** Fertilisation pour une culture rentable du blé.

**Rezgui M., Ben Mechlia N., Bizid E., Kalboussi R. et Hayouni R. (non daté) :** Etude de la stabilité du rendement de blé dur dans différentes régions de la Tunisie. *CIHEAM - Options Méditerranéennes pp 167-172.*

**Riad S. (2003) :** Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles a partir de quelques bassins versants. *Thèse en cotutelle université des sciences et technologies de Lille*

et université Ibnou Zohr d'Agadir. Doctorat de l'université en génie civil spécialité : hydrologie de surface représentatif du Maroc.

**Riffkin P.A., Holden S., Evans P.E. et Wright A. (2001):** Growth attributes for higher wheat yields in the high rainfall zone of south-western Victoria: Australian society of agronomy.

**Riou C. (2006) :** Aspects climatiques de la sécheresse de part et d'autre du Sahara (de l'Afrique Centrale sèche à la Tunisie) Mission ORSTOM, 18 rues Charles Nicolle Tunis-Belvédère – Tunisie.

**Robélin M. (1983) :** Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. Physiologies du maïs pp 445-473.

**Roberta M. G.et Sébastien A. (2007) :** Place de la Méditerranée dans la production mondiale de fruits et légumes. Les notes d'analyse du CIHEAM. N°23 – Août 2007.

**Robert G. (1960) :** Les sols de la zone aride. Etude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. Colloque général sur les problèmes de la zone aride. Projet majeur relative aux recherches scientifiques sur les terres arides. UNISCO le 6 mai 1960.

**Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Défossez P.et Manichon H. (2004) :** Un modèle d'évolution de l'état structural des couches de sol cultivées Etude et Gestion des Sols, Volume 11, 1, 2004 - pages 33 à 46.

**Saidati B. et Samuel P. (2006) :** Evapotranspiration de référence dans la région aride de Tafilalet au sud-est du Maroc. AJEAM-RAGEE. 11: 1-16.

**Seguin B. (2007) :** Impact du changement climatique et adaptation de l' agriculture. INRA Mission 'Changement climatique et effet de serre', site Agroparc, domaine Saint-Paul, F-84914 Avignon cedex 9.

**Shujiang K., William A.P., Steven R.E., Clay A.R. et Bobby A.S. (2009):** Simulation of winter wheat evapotranspiration in Texas and Henan using three models of differing complexity Agricultural. Water Management. 96: 167-178.

**Smadhi D. (2000) :** Evapotranspiration potentielle et besoins en eau de la culture du blé dur dans la région de Sétif (cas du bassin versant de Boussellam). Revue recherche agronomique 3: 29-40.

**Snyder, C.S. et Mascagni H.J. (1998):** Phosphorus and potassium increase wheat yields and help reduce disease damage [On-line]. Available at <http://www.ipni.net/news.Int>. Plant Nutrition Institute. News and Views from the Southeast Region, October 1998.

**Soltner D. (1999):** Les bases de la production végétale. Tome III. La plante et son amélioration. Collection science et technique agricole 22 ème édition.

**Sterlin P. (2007) :** Overfitting Prevention with Cross-Validation. Supervised Machine Learning for Massih-Reza Amini, LIP6, Paris. IAD Master, Paris VI.

**Stewart W.M. (2000):** Phosphorus Fertilization of Wheat. Let's Talk Placement. A regional newsletter published by the Potash & Phosphate Institute (PPI) and the Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC).

**Tabari H., Marofi S. et Sabziparvar A.A. (2009):** Estimation of daily pan evaporation using artificial neural network and multivariate non-linear regression. Irrig Sci. 28:399–406.

**Tabari H, Ahmadi M et Sabziparvar A.A. (1010):** Comparison of artificial neural network and multivariate linear regression methods for estimation of daily soil temperature in an arid region. Meteorol Atmos Phys. 110:135–142.

**Tazi1 M. (2008) :** Problématique de l'économie de l'eau d'irrigation dans la zone d'action de l'Ormva de Ouarzazate. Art. 2 (141) 19/03/09.

**Theodore W., Sammis J.W. et David R.M. (2011):** The Transition of the Blaney-Criddle Formula to the Penman-Monteith Equation in the Western United States. Journal of service climatology. Volume 5, Number 1, Pages 1-11.

**Thivet G. et Blinda M (2007) :** Améliorer l'*efficience* d'utilisation de l'eau pour faire face aux crises et pénuries d'eau en Méditerranée Gaëlle. Plan Bleu, 2007. Centre d'Activités Régionales.

**Tolba M.K. et Najib W.S. (2009) :** Arab Environment: Climate Change - Impact of Climate Change on Arab Countries. Beirut: Arab Forum for Environment and Development.

**Tolk Judy A. (2003):** Plant Available Soil Water. United States Department of Agriculture (USDA), Bushland, Texas, U.S.A.

**Tufféry S. (2007) :** Data mining et statistique décisionnelle. L'intelligence de données, Modèles linéaire, Régression logistique, Réseaux de neurones, Scoring et Text mining. Edition TECHNIP. Paris 2007.

**Tyagi N.K., Sharma D.K. et Luthra S.K. (2000):** Evapotranspiration and crop coefficients of wheat and sorghum. *Journal of irrigation and drainage engineering*. vol. 126. N°4. pp. 215-222 (23 ref.).

**UNIFA (2003):** Le potassium : l'élément de qualité et sécurité des récoltes. La lettre de l'UNIFA N° 10 .*Site web : <http://www.unifa.fr>*.

**UNIFA (2006):** Bien nourrir les plantes pour mieux nourrir les hommes. Union des industries de la fertilisation Site web : <http://www.unifa.fr>.

**Van Alphen J. et Vanhoorn J.W. (1995):** Maîtrise de la salinité et besoins de lessivage du sol irrigué.

**Vioix J.B. (2004):** Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multi spectrale embarqué : du capteur aux traitements pour la détection d'adventices. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Instrumentation et Informatique de l'Image de l'Université de Bourgogne 233p.

**Volpi K. (2005) :** Réseau de neurones. *[cnam.nemy.net/probatoire/17.pdf](http://cnam.nemy.net/probatoire/17.pdf)*.

**Wang Y.M., Traore S., Kerh T. et Leu J.M. (2010):** Modeling reference evapotranspiration using feed forward backpropagation algorithm in arid regions of Africa," *Irrigation and Drainage*, Wiley online library. doi:10.1002/ird.589.

**Yonaba H. (2009) :** Modélisation hydrologique hybride réseau de neurones - modèle conceptuel. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de doctorat en génie civil pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D). Département de génie civil. Faculté des sciences et génie. Université Laval Québec 182 p.

**Yongqiang Z., Qiang Yu., Changming L., Jie J. et Xiyang Z. (2004):** Estimation of winter wheat evapotranspiration under water stress with Two Semiempirical Approaches. Published in *Agron. J.* 96:159–168 2004. American society of agronomy NCP. North China Plain; Segoe Rd.. Madison. WI 53711. USA.

**Zaid H. (2011) :** Nutrition Minérale. Cours de physiologie végétale.

**Zameer M., Khan S., Muhammad M.A., Naeem, E.A et KHALID M. (2006):** Response of some wheat (*triticum aestivum l.*) varieties to foliar application of N & K under rainfed conditions *Pak. J. Bot.*, 38(4): 1027-1034, 2006.

**Zeraouli M. et Mrini M. (2004)** : Fertilité des Sols et Fertilisation Potassique des principales cultures dans la Région du Gharb (Maroc): Développement de la fertigation. Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb-Kénitra. IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa; Rabat, Morocco, 24-28 November, 2004.

**Zhao, C.Y., Nan Z.R. et Cheng G.D. (2005)**: Methods for estimating irrigation needs of spring wheat in the middle Heihe basin, China. *Agricultural Water Management* 75: 54-70.

## ANNEXES

Annexe 1 : Rendement et ses composantes (première campagne)

| Traitements  |                    |             | Rendement              | Composantes de rendement |         |         |         |          |                |
|--------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------------|
| T. Hydriques | T.de Fertilisation | Répétitions | Rd (g/m <sup>2</sup> ) | B.m (g/m <sup>2</sup> )  | N.G/Epi | PMG (g) | LT (cm) | L.E (cm) | Indice Récolte |
| I            | N                  | 1           | 08,3                   | 775                      | 54      | 42,8    | 57      | 6        | 0,40           |
|              |                    | 2           | 313,4                  | 800                      | 48      | 40,4    | 56      | 5        | 0,39           |
|              |                    | 3           | 479,8                  | 1180                     | 64      | 42,8    | 64      | 5,5      | 0,41           |
|              | NK                 | 1           | 500                    | 1060                     | 52      | 44      | 59      | 5,5      | 0,47           |
|              |                    | 2           | 537,9                  | 1290                     | 54      | 42,8    | 60      | 5,5      | 0,42           |
|              |                    | 3           | 532,7                  | 1220                     | 58      | 40,4    | 57      | 5,5      | 0,44           |
|              | NPK                | 1           | 706                    | 1740                     | 61      | 36      | 65      | 5,5      | 0,41           |
|              |                    | 2           | 698                    | 1830                     | 48      | 33,6    | 66      | 5        | 0,38           |
|              |                    | 3           | 715,2                  | 2030                     | 52      | 34,4    | 60      | 6        | 0,35           |
|              | NP                 | 1           | 502,3                  | 1440                     | 60      | 41,2    | 65      | 5,5      | 0,35           |
|              |                    | 2           | 782,1                  | 2150                     | 60      | 34,4    | 63      | 5,5      | 0,36           |
|              |                    | 3           | 779,2                  | 1850                     | 67      | 34,8    | 62      | 5,5      | 0,42           |
| II           | NP                 | 1           | 649,1                  | 1700                     | 57      | 32,4    | 65      | 5,5      | 0,38           |
|              |                    | 2           | 549,1                  | 1440                     | 61      | 34      | 66      | 5,5      | 0,38           |
|              |                    | 3           | 614,5                  | 1770                     | 63      | 29,2    | 67      | 5,5      | 0,35           |
|              | NPK                | 1           | 694,3                  | 1750                     | 65      | 28,8    | 67      | 5,5      | 0,40           |
|              |                    | 2           | 728,4                  | 1975                     | 50      | 39,2    | 68      | 5,5      | 0,37           |
|              |                    | 3           | 487,3                  | 1500                     | 52      | 25,6    | 65      | 5        | 0,32           |
|              | N                  | 1           | 279,8                  | 880                      | 55      | 36      | 58      | 5        | 0,32           |
|              |                    | 2           | 476                    | 1200                     | 54      | 35,6    | 59      | 5        | 0,40           |
|              |                    | 3           | 635                    | 1480                     | 57      | 28      | 65      | 6        | 0,43           |
|              | NK                 | 1           | 451,4                  | 1130                     | 55      | 38      | 63      | 5        | 0,40           |
|              |                    | 2           | 470,8                  | 1075                     | 61      | 32,4    | 63      | 6        | 0,44           |
|              |                    | 3           | 539                    | 1375                     | 48      | 30,4    | 62      | 5        | 0,39           |
| III          | N                  | 1           | 367,3                  | 750                      | 59      | 38,4    | 61      | 4,5      | 0,49           |
|              |                    | 2           | 577,8                  | 1380                     | 56      | 34,8    | 65      | 4,5      | 0,42           |
|              |                    | 3           | 483,1                  | 1235                     | 59      | 31,6    | 64      | 5        | 0,39           |
|              | NK                 | 1           | 430,4                  | 960                      | 61      | 38,4    | 60      | 4,5      | 0,45           |
|              |                    | 2           | 841,6                  | 2010                     | 67      | 33,6    | 69      | 5,5      | 0,42           |
|              |                    | 3           | 637,8                  | 1720                     | 55      | 30,8    | 64      | 4,5      | 0,37           |
|              | NP                 | 1           | 673,2                  | 1740                     | 60      | 36      | 66      | 5,5      | 0,39           |
|              |                    | 2           | 553,5                  | 1670                     | 57      | 31,6    | 66      | 5,5      | 0,33           |
|              |                    | 3           | 450                    | 1300                     | 67      | 29,2    | 66      | 5,5      | 0,35           |
|              | NPK                | 1           | 397,6                  | 1090                     | 56      | 38,4    | 69      | 5        | 0,36           |
|              |                    | 2           | 525,3                  | 1550                     | 66      | 32      | 70      | 6        | 0,34           |
|              |                    | 3           | 526,2                  | 1325                     | 64      | 30,4    | 69      | 5        | 0,40           |

Annexe 1 : Rendement et ses composantes (première campagne) (suite)

| Traitements  |                    |             | Rendement              | Composantes de rendement |         |         |         |          |                |
|--------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------------|
| T. Hydriques | T.de Fertilisation | Répétitions | Rd (g/m <sup>2</sup> ) | B.m (g/m <sup>2</sup> )  | N.G/Epi | PMG (g) | LT (cm) | L.E (cm) | Indice Récolte |
| IV           | N                  | 1           | 254                    | 750                      | 45      | 40,4    | 53      | 5        | 0,34           |
|              |                    | 2           | 458                    | 1020                     | 53      | 41,6    | 63      | 5        | 0,45           |
|              |                    | 3           | 525,4                  | 1275                     | 57      | 41,6    | 69      | 4,5      | 0,41           |
|              | NPK                | 1           | 296,4                  | 980                      | 63      | 35,6    | 73      | 5        | 0,30           |
|              |                    | 2           | 509                    | 1220                     | 62      | 39,6    | 65      | 5        | 0,42           |
|              |                    | 3           | 425,6                  | 1150                     | 55      | 36,8    | 71      | 4,5      | 0,37           |
|              | NP                 | 1           | 229                    | 1080                     | 51      | 41,6    | 63      | 5        | 0,21           |
|              |                    | 2           | 527,9                  | 1260                     | 60      | 41,2    | 65      | 5        | 0,42           |
|              |                    | 3           | 393,7                  | 1040                     | 60      | 35,2    | 64      | 5        | 0,38           |
|              | NK                 | 1           | 278,3                  | 775                      | 59      | 36,8    | 64      | 5        | 0,36           |
|              |                    | 2           | 451,4                  | 1030                     | 59      | 36,8    | 62      | 5        | 0,44           |
|              |                    | 3           | 459                    | 1120                     | 60      | 36,8    | 63      | 6        | 0,41           |
| V            | NPK                | 1           | 405,3                  | 1050                     | 59      | 24      | 62      | 5        | 0,39           |
|              |                    | 2           | 328,8                  | 1050                     | 60      | 27,6    | 68      | 5        | 0,31           |
|              |                    | 3           | 358,3                  | 1000                     | 55      | 32      | 70      | 5        | 0,36           |
|              | N                  | 1           | 283                    | 720                      | 59      | 37,2    | 62      | 5,5      | 0,39           |
|              |                    | 2           | 420                    | 900                      | 66      | 33,2    | 62      | 5,5      | 0,47           |
|              |                    | 3           | 420,3                  | 1270                     | 60      | 28,4    | 68      | 5,5      | 0,33           |
|              | NP                 | 1           | 338,3                  | 850                      | 53      | 33,2    | 62      | 5,5      | 0,40           |
|              |                    | 2           | 450,9                  | 1330                     | 56      | 32      | 65      | 5        | 0,34           |
|              |                    | 3           | 432,2                  | 1220                     | 54      | 35,2    | 72      | 4,5      | 0,35           |
|              | NK                 | 1           | 207,1                  | 600                      | 40      | 35,2    | 50      | 4        | 0,35           |
|              |                    | 2           | 256,3                  | 630                      | 45      | 34,8    | 68      | 4,5      | 0,41           |
|              |                    | 3           | 555,8                  | 1150                     | 44      | 34,4    | 60      | 4,5      | 0,48           |

Annexe 2 : Rendement et ses composantes (deuxième campagnes)

| Traitements  |                    |             | Rendement              | Composantes de rendement |         |         |         |          |                |
|--------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------------|
| T. Hydriques | T.de Fertilisation | Répétitions | Rd (g/m <sup>2</sup> ) | B.m (g/m <sup>2</sup> )  | N.G/Epi | PMG (g) | LT (cm) | L.E (cm) | Indice Récolte |
| I            | N                  | 1           | 284,5                  | 715                      | 62      | 41      | 53      | 6,8      | 0,40           |
|              |                    | 2           | 254,5                  | 345                      | 50      | 51,5    | 57      | 6,4      | 0,74           |
|              |                    | 3           | 289,5                  | 665                      | 52      | 45      | 65      | 7        | 0,44           |
|              | NK                 | 1           | 391,5                  | 960                      | 58      | 48,5    | 71      | 6,4      | 0,41           |
|              |                    | 2           | 244                    | 655                      | 59      | 49      | 64      | 6,7      | 0,37           |
|              |                    | 3           | 344                    | 635                      | 69      | 44      | 60      | 6,8      | 0,54           |
|              | NPK                | 1           | 603,4                  | 1640                     | 56      | 49      | 78      | 5,4      | 0,37           |
|              |                    | 2           | 525                    | 1185                     | 69      | 45      | 74      | 6,8      | 0,44           |
|              |                    | 3           | 531,3                  | 1285                     | 63      | 44      | 68      | 7        | 0,41           |
|              | NP                 | 1           | 634                    | 1345                     | 70      | 51,5    | 72      | 6,5      | 0,47           |
|              |                    | 2           | 597,3                  | 1340                     | 77      | 43,5    | 73      | 7,7      | 0,45           |
|              |                    | 3           | 566                    | 1302                     | 47      | 43      | 74      | 7        | 0,43           |
| II           | NP                 | 1           | 715                    | 1670                     | 39      | 46      | 79      | 7,4      | 0,43           |
|              |                    | 2           | 482                    | 1175                     | 76      | 46      | 65      | 6,5      | 0,41           |
|              |                    | 3           | 645                    | 1480                     | 62      | 46      | 75      | 7        | 0,44           |
|              | NPK                | 1           | 862                    | 2140                     | 50      | 42,5    | 81      | 5,9      | 0,40           |
|              |                    | 2           | 647                    | 1435                     | 62      | 45      | 70      | 6,3      | 0,45           |
|              |                    | 3           | 534                    | 1280                     | 67      | 38,5    | 76      | 7,5      | 0,42           |
|              | N                  | 1           | 278,6                  | 805                      | 40      | 43,5    | 69      | 5,3      | 0,35           |
|              |                    | 2           | 646                    | 1795                     | 64      | 42,5    | 73      | 7        | 0,36           |
|              |                    | 3           | 458,4                  | 1125                     | 70      | 41      | 76      | 7,4      | 0,41           |
|              | NK                 | 1           | 437,5                  | 1175                     | 50      | 41,5    | 80      | 5,8      | 0,37           |
|              |                    | 2           | 405                    | 1005                     | 43      | 42      | 72      | 7        | 0,40           |
|              |                    | 3           | 335,2                  | 770                      | 64      | 43,5    | 69      | 6,6      | 0,44           |
| III          | N                  | 1           | 276,3                  | 855                      | 37      | 42,5    | 78      | 5,9      | 0,32           |
|              |                    | 2           | 652                    | 1475                     | 63      | 45      | 84      | 7,4      | 0,44           |
|              |                    | 3           | 339,2                  | 885                      | 74      | 35      | 77      | 7        | 0,38           |
|              | NK                 | 1           | 547,7                  | 1385                     | 59      | 44      | 74      | 6,5      | 0,40           |
|              |                    | 2           | 495                    | 1375                     | 55      | 45      | 72      | 6,5      | 0,36           |
|              |                    | 3           | 516,7                  | 1430                     | 60      | 37,5    | 65      | 6,8      | 0,36           |
|              | NP                 | 1           | 709                    | 1845                     | 27      | 45,5    | 88      | 6        | 0,38           |
|              |                    | 2           | 554,4                  | 1440                     | 66      | 39,5    | 84      | 6,8      | 0,39           |
|              |                    | 3           | 450,3                  | 1460                     | 62      | 35      | 71      | 7        | 0,31           |
|              | NPK                | 1           | 714                    | 2005                     | 68      | 42      | 85      | 6,7      | 0,36           |
|              |                    | 2           | 620                    | 1755                     | 73      | 41      | 77      | 7,1      | 0,35           |
|              |                    | 3           | 432                    | 1435                     | 64      | 31      | 70      | 7        | 0,30           |

Annexe 2 : Rendement et ses composantes (deuxième campagnes) (suite)

| Traitements  |                     |             | Rendement              | Composantes de rendement |         |         |         |          |                |
|--------------|---------------------|-------------|------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------------|
| T. Hydriques | T. de Fertilisation | Répétitions | Rd (g/m <sup>2</sup> ) | B.m (g/m <sup>2</sup> )  | N.G/Epi | PMG (g) | LT (cm) | L.E (cm) | Indice Récolte |
| IV           | N                   | 1           | 159                    | 580                      | 41      | 44,5    | 47,8    | 3,1      | 0,27           |
|              |                     | 2           | 390                    | 955                      | 40      | 44      | 62      | 5        | 0,41           |
|              |                     | 3           | 362                    | 855                      | 41      | 34      | 67,3    | 6,6      | 0,42           |
|              | NPK                 | 1           | 555                    | 1200                     | 63      | 47,5    | 76,3    | 6,2      | 0,46           |
|              |                     | 2           | 495                    | 1345                     | 60      | 35,5    | 73,4    | 6        | 0,37           |
|              |                     | 3           | 550,3                  | 1275                     | 51      | 39      | 73      | 6        | 0,43           |
|              | NP                  | 1           | 582,3                  | 1435                     | 63      | 46,5    | 70      | 6,8      | 0,41           |
|              |                     | 2           | 476                    | 1185                     | 49      | 48      | 75      | 5,8      | 0,40           |
|              |                     | 3           | 395,5                  | 1010                     | 49      | 36      | 70      | 5        | 0,39           |
|              | NK                  | 1           | 420                    | 1080                     | 39      | 43,5    | 70      | 6,3      | 0,39           |
|              |                     | 2           | 597,4                  | 945                      | 52      | 46,5    | 74      | 4,8      | 0,63           |
|              |                     | 3           | 361,2                  | 1010                     | 49      | 38      | 74      | 5,6      | 0,36           |
| V            | NPK                 | 1           | 642                    | 1080                     | 51      | 45      | 71      | 5,9      | 0,59           |
|              |                     | 2           | 360                    | 945                      | 48      | 46,5    | 70      | 4,5      | 0,38           |
|              |                     | 3           | 384,3                  | 920                      | 47      | 36      | 65      | 5        | 0,42           |
|              | N                   | 1           | 375                    | 1475                     | 57      | 49,5    | 86      | 5,5      | 0,25           |
|              |                     | 2           | 353                    | 1530                     | 61      | 43,5    | 75      | 5        | 0,23           |
|              |                     | 3           | 334                    | 1355                     | 50      | 35      | 67      | 6        | 0,25           |
|              | NP                  | 1           | 685                    | 1475                     | 56      | 52      | 81      | 5,8      | 0,46           |
|              |                     | 2           | 544                    | 1530                     | 48      | 46      | 85      | 6,4      | 0,36           |
|              |                     | 3           | 557,5                  | 1355                     | 57      | 37,5    | 76      | 5,8      | 0,41           |
|              | NK                  | 1           | 218,6                  | 525                      | 50      | 46      | 66      | 4        | 0,42           |
|              |                     | 2           | 258                    | 725                      | 48      | 41,5    | 73      | 5,3      | 0,36           |
|              |                     | 3           | 360,4                  | 940                      | 66      | 35,5    | 78      | 7,5      | 0,38           |

Annexe 3: Rendement et ses composantes (troisième campagne)

| Traitements  |                    |             | Rendement              | Composantes de rendement |         |         |         |          |                |
|--------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------------|
| T. Hydriques | T.de Fertilisation | Répétitions | Rd (g/m <sup>2</sup> ) | B.m (g/m <sup>2</sup> )  | N.G/Epi | PMG (g) | LT (cm) | L.E (cm) | Indice Récolte |
| I            | NP                 | 1           | 327                    | 1000                     | 60      | 32      | 41      | 5        | 0,33           |
|              |                    | 2           | 367                    | 900                      | 59      | 36      | 48      | 5,5      | 0,41           |
|              |                    | 3           | 380                    | 940                      | 68      | 33,5    | 46      | 5        | 0,40           |
|              | NPK                | 1           | 377                    | 840                      | 60      | 43,5    | 45      | 5,5      | 0,45           |
|              |                    | 2           | 314                    | 850                      | 55      | 32      | 43      | 5        | 0,37           |
|              |                    | 3           | 471,3                  | 1000                     | 60      | 41      | 43      | 5        | 0,47           |
|              | N                  | 1           | 217                    | 650                      | 61      | 40      | 37      | 4,9      | 0,33           |
|              |                    | 2           | 418,9                  | 1000                     | 65      | 39,5    | 45      | 5        | 0,42           |
|              |                    | 3           | 305,1                  | 930                      | 60      | 40      | 45      | 5        | 0,33           |
|              | NK                 | 1           | 429                    | 1050                     | 62      | 37      | 48      | 5        | 0,41           |
|              |                    | 2           | 314                    | 800                      | 62      | 37,5    | 47      | 4,8      | 0,39           |
|              |                    | 3           | 318,9                  | 900                      | 64      | 36,5    | 46      | 5        | 0,35           |
| II           | NPK                | 1           | 790,1                  | 1850                     | 71      | 48,5    | 51      | 5        | 0,43           |
|              |                    | 2           | 1102                   | 2050                     | 73      | 54      | 57      | 6,5      | 0,54           |
|              |                    | 3           | 960                    | 1800                     | 86      | 49      | 61      | 5        | 0,53           |
|              | NK                 | 1           | 811                    | 1550                     | 75      | 48      | 63      | 5        | 0,52           |
|              |                    | 2           | 955                    | 1950                     | 76      | 50,5    | 52      | 5,5      | 0,49           |
|              |                    | 3           | 877,1                  | 1850                     | 73      | 48      | 63      | 6        | 0,47           |
|              | NP                 | 1           | 971,8                  | 1900                     | 80      | 54      | 58      | 5        | 0,51           |
|              |                    | 2           | 864,2                  | 1650                     | 78      | 51,5    | 56      | 5        | 0,52           |
|              |                    | 3           | 770                    | 1750                     | 76      | 50      | 51      | 5,5      | 0,44           |
|              | N                  | 1           | 766,6                  | 1750                     | 73      | 50      | 55      | 5        | 0,44           |
|              |                    | 2           | 530                    | 1300                     | 72      | 48      | 45      | 6        | 0,41           |
|              |                    | 3           | 666,2                  | 1550                     | 71      | 41,5    | 58      | 5        | 0,43           |
| III          | NP                 | 1           | 579,6                  | 1500                     | 72      | 40      | 51      | 5        | 0,39           |
|              |                    | 2           | 531,7                  | 1250                     | 70      | 45,55   | 64      | 5        | 0,43           |
|              |                    | 3           | 862,3                  | 1800                     | 74      | 47      | 50      | 5        | 0,48           |
|              | N                  | 1           | 444,3                  | 1150                     | 61      | 44      | 36      | 5        | 0,39           |
|              |                    | 2           | 549,2                  | 1330                     | 61      | 47,5    | 35      | 4,5      | 0,41           |
|              |                    | 3           | 402,8                  | 1000                     | 68      | 42,5    | 55      | 5,2      | 0,40           |
|              | NK                 | 1           | 666,2                  | 1500                     | 77      | 48      | 62      | 5,5      | 0,44           |
|              |                    | 2           | 667,3                  | 1500                     | 61      | 49      | 57      | 6        | 0,44           |
|              |                    | 3           | 670,3                  | 1500                     | 68      | 45      | 50      | 5,2      | 0,45           |
|              | NPK                | 1           | 471,7                  | 1200                     | 67      | 42      | 50      | 5,5      | 0,39           |
|              |                    | 2           | 522,3                  | 1200                     | 67      | 45      | 51      | 5,2      | 0,44           |
|              |                    | 3           | 403,2                  | 900                      | 68      | 40,5    | 48      | 5,5      | 0,45           |

Annexe 3: Rendement et ses composantes (troisième campagne) (suite)

| Traitements  |                    |             | Rendement              | Composantes de rendement |         |         |         |          |                |
|--------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------------|
| T. Hydriques | T.de Fertilisation | Répétitions | Rd (g/m <sup>2</sup> ) | B.m (g/m <sup>2</sup> )  | N.G/Epi | PMG (g) | LT (cm) | L.E (cm) | Indice Récolte |
| IV           | N                  | 1           | 351,3                  | 980                      | 58      | 42      | 45      | 5        | 0,36           |
|              |                    | 2           | 554,7                  | 1350                     | 62      | 51      | 37      | 4,8      | 0,41           |
|              |                    | 3           | 358,3                  | 900                      | 61      | 45      | 45      | 5,5      | 0,40           |
|              | NK                 | 1           | 456                    | 1150                     | 63      | 44      | 41      | 4,7      | 0,40           |
|              |                    | 2           | 644                    | 1250                     | 65      | 44,5    | 49      | 5        | 0,52           |
|              |                    | 3           | 484,3                  | 1000                     | 63      | 40      | 44      | 5        | 0,48           |
|              | NP<br>K            | 1           | 809,2                  | 1700                     | 75      | 44      | 51      | 5        | 0,48           |
|              |                    | 2           | 705,4                  | 1500                     | 75      | 47      | 49      | 4,7      | 0,47           |
|              |                    | 3           | 706                    | 1550                     | 69      | 42      | 45      | 5,5      | 0,46           |
|              | NP                 | 1           | 545                    | 1570                     | 71      | 45,5    | 55      | 5        | 0,35           |
|              |                    | 2           | 535,4                  | 1200                     | 69      | 36,5    | 50      | 5,5      | 0,45           |
|              |                    | 3           | 537                    | 1200                     | 65      | 37,5    | 53      | 5        | 0,45           |
| V            | NK                 | 1           | 753,5                  | 1500                     | 65      | 50,5    | 54      | 5,5      | 0,50           |
|              |                    | 2           | 803,3                  | 1450                     | 70      | 48      | 62      | 5,5      | 0,55           |
|              |                    | 3           | 689,5                  | 1500                     | 65      | 46,5    | 52      | 5        | 0,46           |
|              | NP<br>K            | 1           | 718                    | 1350                     | 72      | 45,5    | 53      | 5,5      | 0,53           |
|              |                    | 2           | 830,3                  | 1800                     | 70      | 50,5    | 60      | 5,5      | 0,46           |
|              |                    | 3           | 561                    | 1450                     | 66      | 34      | 55      | 5,5      | 0,39           |
|              | N                  | 1           | 554,6                  | 1500                     | 76      | 44      | 50      | 5        | 0,37           |
|              |                    | 2           | 845,5                  | 1750                     | 80      | 49      | 47      | 5,5      | 0,48           |
|              |                    | 3           | 644,6                  | 1650                     | 72      | 44      | 57      | 5        | 0,43           |
|              | NP                 | 1           | 815                    | 1850                     | 79      | 42,5    | 54      | 5        | 0,44           |
|              |                    | 2           | 956,8                  | 2050                     | 77      | 45,5    | 44      | 5,5      | 0,47           |
|              |                    | 3           | 616,8                  | 1500                     | 85      | 44,5    | 49      | 5,5      | 0,41           |

Annexe 4 : Bilans hydrique du blé ; première campagne et deuxième Campagne

| stade végétatif | irrigation+précipitation (mm/j) |                    | Drainage (mm/j)    |                    | Evapotranspiration maximale (mm/j) |                    |
|-----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|
|                 | 1 <sup>ère</sup> C              | 2 <sup>ème</sup> C | 1 <sup>ère</sup> C | 2 <sup>ème</sup> C | 1 <sup>ère</sup> C                 | 2 <sup>ème</sup> C |
|                 | 3,185                           |                    | 1,783              |                    | 1,401                              |                    |
| levée           | 3,185                           |                    | 1,911              |                    | 1,274                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 1,083              |                    | 2,102                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 0,303              |                    | 2,882                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 2,229              |                    | 0,955                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 2,261              |                    | 0,924                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 1,592              |                    | 1,592                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 2,07               |                    | 1,115                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 0,494              |                    | 2,691                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 1,959              |                    | 1,226                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 2,197              |                    | 0,987                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 1,354              |                    | 1,831                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    | 2,548              |                    | 0,637                              |                    |
| 3 feuilles      | 3,185                           |                    | 1,354              |                    | 1,831                              |                    |
|                 | 3,185                           |                    |                    |                    |                                    |                    |
|                 | 3,185                           |                    |                    |                    |                                    |                    |
|                 | 3,185                           | 3,18               |                    | 1                  |                                    | 2,19               |
|                 | 3,185                           | <b>3,18</b>        |                    | 0,6                |                                    | 2,58               |
|                 | 3,185                           | 3,18               |                    | 1,76               |                                    | 1,42               |
|                 | 3,185                           | 3,18               |                    | 0,55               |                                    | 2,63               |
| tallage         | 3,185                           | <b>3,18</b>        | 1,162              | 0,28               | 2,022                              | 2,91               |
|                 | 6,369                           | 3,18               | 0,955              | 0,16               | 2,229                              | 3,02               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0,955              | 1,96               | 2,229                              | 4,41               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0,924              | 2,38               | 2,261                              | 3,99               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 1,162              | 2,39               | 2,022                              | 3,98               |
|                 | 3,185                           | 6,37               | 0,111              | 2,38               | 3,073                              | 3,99               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0,111              | 2,19               | 3,073                              | 4,18               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0,478              | 2,07               | 5,892                              | 4,3                |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 1,194              | 2,21               | 5,175                              | 4,16               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0,955              | 2,39               | 5,414                              | 3,98               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0,876              | 1,79               | 5,494                              | 4,58               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0,398              | 2,07               | 2,787                              | 4,3                |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0,366              | 2,1                | 6,003                              | 4,27               |
|                 | 6,369                           | 6,37               | 0                  | 2,26               | 6,369                              | 4,11               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 0,685              | 2,5                | 5,685                              | 3,87               |
|                 |                                 | 6,37               | 0,096              | 2,33               | 6,274                              | 4,04               |
|                 |                                 | 6,37               | 0,494              | 2,19               | 5,876                              | 4,18               |
|                 |                                 | 6,37               | 1,035              | 2,03               | 5,334                              | 4,34               |
|                 |                                 | 6,37               | 0,239              | 2,31               | 6,131                              | 4,06               |
| montaison       | 12,74                           | <b>6,37</b>        | 2,45               | <b>2,38</b>        | 10,29                              | <b>3,99</b>        |

Annexe 4 : Bilans hydrique du blé ; première campagne et deuxième Campagne (suite)

| stade végétatif | irrigation+précipitation (mm/j) |                    | Drainage (mm/j)    |                    | Evapotranspiration maximale (mm/j) |                    |
|-----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|
|                 | 1 <sup>ère</sup> C              | 2 <sup>ème</sup> C | 1 <sup>ère</sup> C | 2 <sup>ème</sup> C | 1 <sup>ère</sup> C                 | 2 <sup>ème</sup> C |
|                 | 12                              | 6,37               | 1,9                | 2,54               | 10,1                               | 3,83               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 3,5                | 2,52               | 9,24                               | 3,85               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,3                | 2,4                | 10,44                              | 3,97               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,13               | 2,26               | 10,61                              | 4,11               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 1,33               | 2,38               | 11,41                              | 3,99               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,93               | 2,04               | 9,81                               | 4,34               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,35               | 2,26               | 10,39                              | 4,11               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 3,18               | 0,11               | 9,56                               | 6,27               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,5                | 0,07               | 10,24                              | 6,31               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,22               | 0,06               | 10,52                              | 6,32               |
|                 | 12,74                           | 12,74              | 3,18               | 0,6                | 9,56                               | 12,14              |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,7                | 1,05               | 10,04                              | 5,32               |
|                 | 12,74                           | 12,74              | 4,04               | 2,27               | 8,7                                | 10,47              |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 3,6                | 2,37               | 9,14                               | 4                  |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,4                | 1,57               | 10,34                              | 4,8                |
|                 |                                 | 6,37               |                    | 1,05               |                                    | 5,32               |
|                 |                                 | 12,74              |                    | 1,29               |                                    | 11,45              |
| épiaison        | 12,74                           | <b>12,74</b>       | 3,67               | <b>2,79</b>        | 9,07                               | <b>9,95</b>        |
|                 | 12,74                           | 12,74              | 2,6                | 4,1                | 10,14                              | 8,64               |
|                 | 12,74                           | 12,74              | 1,97               | 5,67               | 10,77                              | 7,07               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,26               | 3,98               | 10,48                              | 2,39               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,45               | 2,41               | 10,29                              | 3,96               |
|                 | 12,74                           | 6,37               | 2,35               | 1,43               | 10,39                              | 4,94               |
| floraison       | 12,74                           | <b>12,74</b>       | 0,8                | <b>2,46</b>        | 11,94                              | <b>10,28</b>       |
|                 | 12,74                           | 12,74              | 0,25               | 3,87               | 12,49                              | 8,87               |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 5,7                | 4,24               | 13,41                              | 8,5                |
|                 | 19,11                           | 6,37               | 7                  | 2,37               | 12,11                              | 4                  |
|                 | 19,11                           | 6,37               | 3                  | 0,5                | 16,11                              | 5,87               |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 4,9                | 1,38               | 14,21                              | 11,36              |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 5,7                | 3,73               | 13,41                              | 9,01               |
| laiteux         | 19,11                           | 12,74              | 7,7                | 3,3                | 11,41                              | 9,44               |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 4,42               | 3,4                | 14,69                              | 9,34               |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 3,77               | 4,43               | 15,34                              | 8,31               |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 3,21               | 3,49               | 15,9                               | 9,25               |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 2,8                | 3,07               | 16,31                              | 9,67               |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 3,02               | 2,41               | 16,09                              | 10,33              |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 5,08               | 1,99               | 14,03                              | 10,75              |
|                 | 19,11                           | 12,74              | 4,7                | 2,55               | 14,41                              | 10,19              |
|                 |                                 | 12,74              |                    | 2,55               |                                    | 10,19              |
|                 |                                 | 12,74              |                    | 2,23               |                                    | 10,51              |

Annexe 4 : Bilans hydrique du blé ; première campagne et deuxième Campagne (suite)

| stade<br>végétatif | irrigation+précipitation (mm/j) |                     | Drainage (mm/j)     |                     | Evapotranspiration maximale<br>(mm/j) |                     |
|--------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
|                    | 1 <sup>ière</sup> C             | 2 <sup>ième</sup> C | 1 <sup>ière</sup> C | 2 <sup>ième</sup> C | 1 <sup>ière</sup> C                   | 2 <sup>ième</sup> C |
|                    |                                 | <b>12,74</b>        |                     | <b>2,41</b>         |                                       | <b>10,33</b>        |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 1,94                |                                       | 10,8                |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 1,62                |                                       | 11,12               |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 1,47                |                                       | 11,27               |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 0,82                |                                       | 11,92               |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 0,21                |                                       | 12,53               |
|                    |                                 | 19,11               |                     | 1,18                |                                       | 17,93               |
|                    |                                 | 19,11               |                     | 4,26                |                                       | 14,85               |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 1,52                |                                       | 11,22               |
|                    |                                 | 19,11               |                     | 3,3                 |                                       | 15,81               |
|                    |                                 | 19,11               |                     | 5,24                |                                       | 13,87               |
|                    |                                 | 19,11               |                     | 5,57                |                                       | 13,54               |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 3,63                |                                       | 9,11                |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 1,83                |                                       | 10,91               |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 1,19                |                                       | 11,55               |
|                    |                                 | 12,74               |                     | 2,48                |                                       | 10,26               |
| <b>pâteux</b>      | 19,11                           | 12,74               | 6,05                | 0,91                | 13,06                                 | 11,83               |
|                    | 19,11                           | 19,11               | 6,05                | 0,96                | 13,06                                 | 18,15               |
|                    | 19,11                           | 19,11               | 5,9                 | 1,26                | 13,21                                 | 17,85               |
|                    | 19,11                           | 19,11               | 7,3                 | 2,1                 | 11,81                                 | 17,01               |
|                    | 12,74                           | 19,11               | 4,8                 | 2,55                | 7,94                                  | 16,56               |
|                    | 12,74                           | 19,11               | 2,27                | 3,3                 | 10,47                                 | 15,81               |
|                    | 12,74                           | 19,11               | 2,36                | 3,68                | 10,38                                 | 15,43               |
|                    | 12,74                           | 19,11               | 0,32                | 4,1                 | 12,42                                 | 15,01               |
|                    | 12,74                           |                     | 0,44                |                     | 12,3                                  |                     |
|                    | 12,74                           |                     | 0,19                |                     | 12,55                                 |                     |
|                    | 12,74                           |                     | 0,06                |                     | 12,68                                 |                     |
|                    | 12,74                           |                     | 0,48                |                     | 12,26                                 |                     |
| <b>maturation</b>  | 12,74                           | 12,74               | 3,18                | 2,55                | 9,56                                  | 10,19               |
|                    | 12,74                           | 12,74               | 5                   | 2,61                | 7,74                                  | 10,13               |
|                    | 6,37                            | 12,74               | 2,6                 | 3,4                 | 3,77                                  | 9,34                |
|                    | 6,37                            | 12,74               | 1,27                | 3,95                | 5,1                                   | 8,79                |
|                    | 6,37                            | 12,74               | 2,27                | 4,99                | 4,1                                   | 7,75                |
|                    | 6,37                            | 9,56                | 3,02                | 2,98                | 3,35                                  | 6,58                |
|                    |                                 | 6,37                |                     | 2,25                |                                       | 4,12                |
|                    |                                 | 6,37                |                     | 1,05                |                                       | 5,32                |

Annexe 5 : Bases de données utilisées pour l'implémentation  
des réseaux de neurones (données décadaires)

| Décades | Température<br>moyenne de<br>l'air °C | Humidité relative<br>moyenne de l'air<br>% | vitesse<br>du vent<br>(m/s) | Insolation<br>(nombre<br>d'heures/j) | Evapotranspiration<br>de référence<br>(mm/j) |
|---------|---------------------------------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| 1       | 14,1                                  | 53,8                                       | 1,7                         | 6,7                                  | 3,3  |
| 2       | 13,7                                  | 47,2                                       | 1,8                         | 7,7                                  | 3,6  |
| 3       | 14,6                                  | 53,2                                       | 1,8                         | 7,6                                  | 3,5  |
| 4       | 14,4                                  | 49,0                                       | 1,9                         | 8,9                                  | 4,2  |
| 5       | 18,6                                  | 36,0                                       | 1,1                         | 6,9                                  | 4,2  |
| 6       | 16,9                                  | 41,0                                       | 1,7                         | 8,7                                  | 4,7  |
| 7       | 18,3                                  | 42,2                                       | 1,4                         | 9,0                                  | 5,2  |
| 8       | 18,9                                  | 35,9                                       | 1,6                         | 9,0                                  | 5,7  |
| 9       | 23,1                                  | 37,0                                       | 1,2                         | 9,0                                  | 5,8  |
| 10      | 31,1                                  | 39,9                                       | 1,8                         | 8,1                                  | 7,9  |
| 11      | 31,3                                  | 38,8                                       | 1,6                         | 9,3                                  | 8,0  |
| 12      | 30,9                                  | 34,5                                       | 2,3                         | 10,0                                 | 9,3  |
| 13      | 18,5                                  | 33,9                                       | 1,8                         | 9,5                                  | 6,8  |
| 14      | 21,4                                  | 39,1                                       | 2,1                         | 11,0                                 | 7,6  |
| 15      | 21,9                                  | 41,7                                       | 1,5                         | 8,6                                  | 6,6  |
| 16      | 31,9                                  | 26,1                                       | 1,6                         | 10,4                                 | 9,2  |
| 17      | 32,5                                  | 27,3                                       | 1,9                         | 9,5                                  | 9,4  |
| 18      | 34,3                                  | 24,4                                       | 1,8                         | 12,3                                 | 10,3   |
| 19      | 35,5                                  | 25,6                                       | 1,1                         | 5,0                                  | 7,4  |
| 20      | 36,9                                  | 24,5                                       | 1,6                         | 7,2                                  | 8,4  |
| 21      | 36,5                                  | 25,5                                       | 1,8                         | 8,9                                  | 9,3  |
| 22      | 36,2                                  | 28,5                                       | 1,6                         | 8,0                                  | 8,6  |
| 23      | 37,5                                  | 29,6                                       | 1,4                         | 8,7                                  | 8,2  |
| 24      | 36,2                                  | 29,9                                       | 2,1                         | 5,7                                  | 8,6  |
| 25      | 21,0                                  | 43,3                                       | 1,8                         | 8,5                                  | 4,9  |
| 26      | 17,2                                  | 50,6                                       | 1,7                         | 7,8                                  | 4,0  |
| 27      | 17,1                                  | 54,8                                       | 1,6                         | 7,0                                  | 3,7  |
| 28      | 15,0                                  | 25,3                                       | 1,2                         | 8,0                                  | 3,7  |
| 29      | 17,8                                  | 26,3                                       | 1,0                         | 6,9                                  | 3,7  |
| 30      | 16,5                                  | 28,7                                       | 0,9                         | 8,5                                  | 3,5  |
| 31      | 16,6                                  | 45,7                                       | 0,8                         | 8,5                                  | 3,2  |
| 32      | 11,7                                  | 60,6                                       | 1,7                         | 7,6                                  | 2,9  |
| 33      | 11,3                                  | 52,3                                       | 1,2                         | 8,3                                  | 2,9  |
| 34      | 13,7                                  | 40,8                                       | 1,2                         | 8,8                                  | 3,9  |
| 35      | 13,9                                  | 39,8                                       | 1,7                         | 7,9                                  | 4,2  |
| 36      | 16,8                                  | 38,3                                       | 1,1                         | 7,5                                  | 4,1  |
| 37      | 19,9                                  | 36,5                                       | 1,8                         | 8,1                                  | 6,0  |
| 38      | 23,2                                  | 31,8                                       | 2,4                         | 9,1                                  | 7,6  |
| 39      | 19,4                                  | 31,9                                       | 1,8                         | 8,6                                  | 6,0  |

Annexe 5 : Bases de données utilisées pour l'implémentation des réseaux de neurones  
(données décadaires) (suite)

| Décades | Température moyenne de l'air °C | Humidité relative moyenne de l'air % | vitesse du vent (m/s) | Insolation (nombre d'heures/j) | Evapotranspiration de référence |
|---------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 40      | 23,9                            | 27,2                                 | 1,9                   | 9,8                            | 8,0                             |
| 41      | 23,7                            | 28,1                                 | 1,5                   | 8,3                            | 7,0                             |
| 42      | 27,8                            | 21,9                                 | 1,5                   | 9,8                            | 8,1                             |
| 43      | 32,3                            | 23,8                                 | 1,6                   | 8,1                            | 8,9                             |
| 44      | 31,6                            | 21,9                                 | 2,1                   | 8,8                            | 9,7                             |
| 45      | 31,8                            | 20,6                                 | 2,0                   | 6,1                            | 9,1                             |
| 46      | 33,6                            | 19,3                                 | 1,5                   | 9,0                            | 9,1                             |
| 47      | 36,2                            | 20,7                                 | 1,8                   | 9,8                            | 9,9                             |
| 48      | 37,0                            | 19,1                                 | 1,6                   | 11,1                           | 10,0                            |
| 49      | 39,5                            | 17,4                                 | 1,5                   | 8,0                            | 9,0                             |
| 50      | 38,4                            | 16,6                                 | 1,5                   | 7,1                            | 8,9                             |
| 51      | 37,5                            | 18,0                                 | 1,7                   | 9,0                            | 9,6                             |
| 52      | 32,1                            | 31,4                                 | 2,0                   | 8,9                            | 9,5                             |
| 53      | 33,5                            | 27,9                                 | 1,9                   | 8,1                            | 8,8                             |
| 54      | 38,0                            | 21,5                                 | 1,5                   | 7,5                            | 8,6                             |
| 55      | 21,8                            | 35,5                                 | 2,2                   | 8,4                            | 5,4                             |
| 56      | 18,7                            | 44,7                                 | 1,5                   | 7,8                            | 4,2                             |
| 57      | 16,9                            | 39,7                                 | 1,1                   | 9,0                            | 3,7                             |
| 58      | 14,3                            | 36,0                                 | 1,1                   | 8,9                            | 3,3                             |
| 59      | 14,4                            | 50,7                                 | 1,4                   | 8,8                            | 3,2                             |
| 60      | 12,2                            | 45,4                                 | 1,3                   | 8,6                            | 3,0                             |
| 61      | 13,3                            | 43,7                                 | 1,7                   | 9,2                            | 3,6                             |
| 62      | 15,2                            | 43,0                                 | 1,2                   | 5,4                            | 3,2                             |
| 63      | 14,8                            | 46,9                                 | 1,0                   | 8,9                            | 3,2                             |
| 64      | 16,9                            | 45,0                                 | 2,1                   | 9,1                            | 5,0                             |
| 65      | 16,3                            | 45,1                                 | 1,9                   | 7,9                            | 4,5                             |
| 66      | 19,7                            | 48,9                                 | 1,3                   | 6,6                            | 4,2                             |
| 67      | 16,6                            | 38,7                                 | 1,5                   | 8,4                            | 4,6                             |
| 68      | 20,1                            | 36,3                                 | 1,7                   | 9,6                            | 6,2                             |
| 69      | 23,4                            | 47,6                                 | 1,7                   | 6,7                            | 5,7                             |
| 70      | 23,4                            | 34,6                                 | 1,7                   | 10,5                           | 7,4                             |
| 71      | 22,3                            | 61,7                                 | 1,5                   | 5,5                            | 4,9                             |
| 72      | 27,2                            | 34,1                                 | 1,5                   | 9,2                            | 7,5                             |
| 73      | 25,1                            | 32,7                                 | 1,6                   | 10,3                           | 7,8                             |
| 74      | 26,8                            | 30,2                                 | 1,6                   | 10,3                           | 8,2                             |
| 75      | 28,1                            | 39,5                                 | 2,0                   | 11,1                           | 6,2                             |
| 76      | 32,7                            | 31,3                                 | 1,4                   | 7,5                            | 5,3                             |
| 77      | 32,6                            | 31,6                                 | 2,0                   | 9,9                            | 6,1                             |
| 78      | 36,1                            | 24,9                                 | 1,1                   | 9,9                            | 6,0                             |

Annexe 5 : Bases de données utilisées pour l'implémentation des réseaux de neurones (données décennales) (suite)

| Décades | Température moyenne de l'air °C | Humidité relative moyenne de l'air % | vitesse du vent (m/s) | Insolation (nombre d'heures/j) | Evapotranspiration de référence (mm/j) |
|---------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--|
| 79      | 37,4                            | 24,8                                 | 2,2                   | 10,7                           | 10,6                                   |
| 80      | 37,8                            | 25,7                                 | 1,9                   | 8,0                            | 9,5                                    |
| 81      | 35,8                            | 27,0                                 | 2,2                   | 9,4                            | 10,2                                   |
| 82      | 36,7                            | 28,8                                 | 1,5                   | 10,2                           | 9,0                                    |
| 83      | 38,3                            | 25,3                                 | 1,6                   | 7,3                            | 8,5                                    |
| 84      | 36,2                            | 28,5                                 | 2,2                   | 9,4                            | 9,9                                    |
| 85      | 35,8                            | 32,9                                 | 2,7                   | 9,7                            | 9,9                                    |
| 86      | 30,0                            | 32,8                                 | 2,0                   | 9,8                            | 8,4                                    |
| 87      | 28,2                            | 35,5                                 | 2,1                   | 10,1                           | 8,1                                    |
| 88      | 28,6                            | 38,1                                 | 1,3                   | 8,3                            | 6,1                                    |
| 89      | 28,1                            | 36,4                                 | 1,1                   | 7,6                            | 5,7                                    |
| 90      | 27,8                            | 35,4                                 | 1,7                   | 7,8                            | 6,6                                    |
| 91      | 20,5                            | 51,7                                 | 1,4                   | 8,1                            | 4,1                                    |
| 92      | 14,7                            | 58,1                                 | 2,0                   | 7,7                            | 3,5                                    |
| 93      | 17,2                            | 70,2                                 | 2,1                   | 5,1                            | 3,2                                    |
| 94      | 16,5                            | 56,0                                 | 1,0                   | 6,0                            | 2,8                                    |
| 95      | 14,3                            | 68,9                                 | 1,8                   | 7,2                            | 2,6                                    |
| 96      | 11,3                            | 62,2                                 | 2,0                   | 7,7                            | 2,8                                    |
| 97      | 12,0                            | 60,2                                 | 2,4                   | 7,4                            | 3,3                                    |
| 98      | 12,1                            | 60,5                                 | 2,1                   | 8,3                            | 3,1                                    |
| 99      | 11,4                            | 57,3                                 | 1,6                   | 6,9                            | 2,8                                    |
| 100     | 12,6                            | 67,8                                 | 2,1                   | 8,3                            | 3,6                                    |
| 101     | 13,8                            | 51,1                                 | 2,1                   | 7,6                            | 4,1                                    |
| 102     | 16,4                            | 50,4                                 | 1,3                   | 8,4                            | 3,9                                    |
| 103     | 17,7                            | 52,5                                 | 1,7                   | 8,8                            | 5,1                                    |
| 104     | 20,4                            | 46,4                                 | 1,9                   | 8,4                            | 5,6                                    |
| 105     | 25,4                            | 37,2                                 | 1,4                   | 9,8                            | 6,5                                    |
| 106     | 24,2                            | 37,0                                 | 1,9                   | 10,5                           | 7,7                                    |
| 107     | 24,3                            | 34,6                                 | 1,7                   | 9,8                            | 7,5                                    |
| 108     | 30,6                            | 30,7                                 | 1,2                   | 9,8                            | 7,8                                    |
| 109     | 32,0                            | 29,3                                 | 2,0                   | 10,1                           | 9,6                                    |
| 110     | 34,0                            | 29,8                                 | 1,7                   | 4,6                            | 7,9                                    |
| 111     | 33,6                            | 24,8                                 | 2,4                   | 8,5                            | 9,9                                    |
| 112     | 35,5                            | 28,8                                 | 1,9                   | 9,9                            | 9,7                                    |
| 113     | 33,0                            | 34,7                                 | 2,0                   | 10,6                           | 9,6                                    |
| 114     | 36,0                            | 28,0                                 | 2,0                   | 11,5                           | 10,4                                   |
| 115     | 39,4                            | 23,9                                 | 1,5                   | 8,1                            | 8,9                                    |
| 116     | 38,9                            | 25,4                                 | 2,2                   | 8,4                            | 9,4                                    |

|     |      |      |     |      |     |
|-----|------|------|-----|------|-----|
| 117 | 38,3 | 23,1 | 1,4 | 10,9 | 9,8 |
|-----|------|------|-----|------|-----|

Annexe 5 : Bases de données utilisées pour l'implémentation des réseaux de neurones  
(données décadales) (suite)

| Décades | Température moyenne de l'air °C | Humidité relative moyenne de l'air % | vitesse du vent (m/s) | Insolation (nombre d'heures/j) | Evapotranspiration de référence (mm/j) |
|---------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--|
| 118     | 33,5                            | 27,8                                 | 1,8                   | 10,0                           | 9,2                                    |
| 119     | 32,1                            | 26,8                                 | 1,4                   | 10,5                           | 8,6                                    |
| 120     | 35,0                            | 29,9                                 | 1,7                   | 9,8                            | 9,1                                    |
| 121     | 33,6                            | 35,6                                 | 1,8                   | 8,6                            | 8,1                                    |
| 122     | 34,7                            | 37,4                                 | 1,2                   | 8,6                            | 7,3                                    |
| 123     | 31,7                            | 49,7                                 | 2,1                   | 6,6                            | 6,7                                    |
| 124     | 29,0                            | 51,4                                 | 1,5                   | 6,0                            | 5,4                                    |
| 125     | 29,6                            | 41,2                                 | 1,1                   | 8,1                            | 5,9                                    |
| 126     | 26,0                            | 48,0                                 | 1,8                   | 7,6                            | 5,8                                    |
| 127     | 24,8                            | 44,7                                 | 1,9                   | 7,6                            | 5,3                                    |
| 128     | 19,9                            | 55,0                                 | 1,0                   | 7,4                            | 3,6                                    |
| 129     | 18,1                            | 53,9                                 | 1,5                   | 4,5                            | 3,4                                    |
| 130     | 15,7                            | 58,7                                 | 2,2                   | 8,4                            | 3,6                                    |
| 131     | 12,4                            | 51,5                                 | 1,3                   | 6,2                            | 2,8                                    |
| 132     | 14,1                            | 60,1                                 | 1,9                   | 7,0                            | 3,1                                    |
| 133     | 11,2                            | 58,4                                 | 1,5                   | 8,6                            | 2,8                                    |
| 134     | 11,1                            | 61,9                                 | 2,0                   | 6,6                            | 2,9                                    |
| 135     | 12,5                            | 67,2                                 | 1,5                   | 7,1                            | 2,6                                    |
| 136     | 14,3                            | 54,8                                 | 1,5                   | 8,2                            | 3,7                                    |
| 137     | 16,3                            | 63,0                                 | 1,7                   | 5,0                            | 3,4                                    |
| 138     | 16,0                            | 44,0                                 | 1,4                   | 9,1                            | 4,3                                    |
| 139     | 17,3                            | 42,8                                 | 1,7                   | 9,3                            | 5,4                                    |
| 140     | 22,9                            | 35,6                                 | 1,3                   | 9,1                            | 6,0                                    |
| 141     | 24,8                            | 32,6                                 | 1,7                   | 10,1                           | 7,0                                    |
| 142     | 29,7                            | 26,1                                 | 1,1                   | 9,6                            | 7,7                                    |
| 143     | 29,8                            | 28,4                                 | 1,9                   | 7,8                            | 8,4                                    |
| 144     | 25,4                            | 40,2                                 | 1,6                   | 8,7                            | 7,0                                    |
| 145     | 27,3                            | 40,4                                 | 1,8                   | 9,7                            | 8,0                                    |
| 146     | 33,3                            | 28,2                                 | 2,2                   | 10,5                           | 10,1                                   |
| 147     | 33,5                            | 39,7                                 | 2,1                   | 5,4                            | 7,9                                    |
| 148     | 30,4                            | 34,3                                 | 2,4                   | 9,5                            | 9,9                                    |
| 149     | 36,2                            | 31,3                                 | 1,4                   | 7,0                            | 8,2                                    |
| 150     | 37,9                            | 27,1                                 | 1,3                   | 7,6                            | 8,4                                    |
| 151     | 39,9                            | 23,9                                 | 1,4                   | 7,8                            | 8,7                                    |
| 152     | 36,8                            | 28,7                                 | 2,4                   | 10,4                           | 10,7                                   |
| 153     | 36,5                            | 26,6                                 | 2,6                   | 11,2                           | 11,2                                   |

|     |      |      |     |     |     |
|-----|------|------|-----|-----|-----|
| 154 | 38,7 | 26,3 | 1,3 | 5,8 | 7,7 |
| 155 | 36,9 | 29,9 | 1,1 | 7,9 | 7,8 |
| 156 | 36,5 | 26,1 | 1,8 | 7,3 | 8,9 |

Annexe 5 : Bases de données utilisées pour l'implémentation des réseaux de neurones  
(données décadales) (suite)

| Décades | Température<br>moyenne de<br>l'air °C | Humidité<br>relative<br>moyenne de<br>l'air % | vitesse du<br>vent (m/s) | Insolation<br>(nombre<br>d'heures/j) | Evapotranspiration<br>de référence<br>(mm/j) |
|---------|---------------------------------------|---|--------------------------|--------------------------------------|--|
| 157     | 31,7                                  | 37,6  | 2,1                      | 6,8                                  | 7,9  |
| 158     | 30,5                                  | 46,6  | 1,9                      | 6,9                                  | 7,0  |
| 159     | 28,5                                  | 37,2  | 1,3                      | 9,5                                  | 7,0  |
| 160     | 26,8                                  | 46,3  | 1,8                      | 8,8                                  | 6,2  |
| 161     | 29,0                                  | 42,3  | 1,0                      | 6,0                                  | 5,3  |
| 162     | 27,2                                  | 42,4  | 1,5                      | 6,5                                  | 5,7  |
| 163     | 24,1                                  | 46,1  | 2,3                      | 7,4                                  | 5,9  |
| 164     | 18,7                                  | 48,4  | 2,1                      | 8,0                                  | 4,7  |
| 165     | 19,4                                  | 51,2  | 2,3                      | 8,3                                  | 4,8  |
| 166     | 15,3                                  | 60,7  | 1,4                      | 7,7                                  | 3,0  |
| 167     | 13,9                                  | 68,8  | 1,6                      | 6,4                                  | 2,6  |
| 168     | 12,9                                  | 64,8  | 2,0                      | 6,5                                  | 2,8  |
| 169     | 13,3                                  | 60,4  | 2,3                      | 8,8                                  | 3,4  |
| 170     | 15,1                                  | 62,6  | 2,4                      | 8,9                                  | 3,6  |
| 171     | 17,8                                  | 50,0  | 1,3                      | 6,7                                  | 3,5  |
| 172     | 16,2                                  | 64,2  | 1,3                      | 6,9                                  | 3,4  |
| 173     | 20,2                                  | 48,2  | 1,1                      | 8,5                                  | 4,3  |
| 174     | 14,9                                  | 55,0  | 1,8                      | 7,9                                  | 3,9  |
| 175     | 20,2                                  | 39,1  | 2,1                      | 8,1                                  | 6,2  |
| 176     | 17,7                                  | 50,6  | 1,9                      | 9,5                                  | 5,4  |
| 177     | 18,8                                  | 47,6  | 1,8                      | 7,5                                  | 5,1  |
| 178     | 22,3                                  | 42,2  | 1,2                      | 9,7                                  | 6,2  |
| 179     | 25,3                                  | 39,7  | 1,3                      | 8,7                                  | 6,7  |
| 180     | 26,3                                  | 47,9  | 1,9                      | 9,1                                  | 7,2  |
| 181     | 25,5                                  | 45,6  | 2,3                      | 10,4                                 | 8,1  |
| 182     | 29,9                                  | 34,2  | 2,0                      | 11,0                                 | 9,2  |
| 183     | 31,0                                  | 37,4  | 1,8                      | 9,2                                  | 8,6  |
| 184     | 31,1                                  | 32,5  | 1,2                      | 10,0                                 | 8,1  |
| 185     | 32,8                                  | 31,1  | 1,0                      | 11,5                                 | 8,5  |
| 186     | 36,8                                  | 28,6  | 1,4                      | 10,6                                 | 9,3  |
| 187     | 39,8                                  | 30,2  | 1,6                      | 8,7                                  | 9,1  |
| 188     | 36,6                                  | 32,7  | 2,7                      | 10,3                                 | 10,9   |
| 189     | 36,9                                  | 31,2  | 2,1                      | 9,8                                  | 10,0   |
| 190     | 37,6                                  | 35,6  | 1,5                      | 8,4                                  | 8,3  |

|     |      |      |     |     |     |
|-----|------|------|-----|-----|-----|
| 191 | 37,9 | 35,9 | 1,5 | 8,3 | 8,2 |
| 192 | 36,2 | 35,9 | 1,7 | 7,9 | 8,5 |
| 193 | 36,8 | 35,5 | 1,5 | 5,8 | 7,3 |
| 194 | 34,7 | 38,8 | 1,7 | 6,3 | 7,4 |
| 195 | 33,8 | 34,9 | 1,1 | 7,9 | 7,1 |

Annexe 5 : Bases de données utilisées pour l'implémentation des réseaux de neurones  
(données décadales) (suite)

| Décades | Température<br>moyenne de<br>l'air °C | Humidité<br>relative<br>moyenne de<br>l'air % | vitesse du<br>vent (m/s) | Insolation<br>(nombre<br>d'heures/j) | Evapotranspiration<br>de référence<br>(mm/j) |
|---------|---------------------------------------|---|--------------------------|--------------------------------------|--|
| 196     | 32,3                                  | 33,9  | 1,3                      | 8,0                                  | 6,6  |
| 197     | 30,0                                  | 40,2  | 1,0                      | 5,6                                  | 5,3  |
| 198     | 25,5                                  | 46,3  | 1,4                      | 7,7                                  | 5,4  |
| 199     | 22,6                                  | 49,8  | 1,5                      | 8,1                                  | 4,5  |
| 200     | 21,3                                  | 47,7  | 0,9                      | 7,4                                  | 3,9  |
| 201     | 19,8                                  | 62,0  | 0,9                      | 7,6                                  | 3,3  |
| 202     | 14,3                                  | 66,6  | 1,8                      | 7,9                                  | 2,8  |
| 203     | 13,7                                  | 55,4  | 1,6                      | 7,3                                  | 3,0  |
| 204     | 13,9                                  | 65,2  | 1,8                      | 6,8                                  | 2,8  |

## RESUMES

### *Résumé*

Dans cette thèse, il est proposé d'utiliser les réseaux de neurones pour élaborer des modèles de l'évapotranspiration précis à l'instar de la méthode de Penman Monteith mais sans exigence d'un nombre élevé de paramètres météorologiques. La méthode classique de modélisation ; la régression linéaire multiple (RLM) est utilisée à titre comparatif pour mettre en relief l'importance de la méthode neuronal. Elle est aussi utilisée dans cette thèse lorsque la série des données observées est courte.

La comparaison des critères de performances obtenues lors des différentes étapes de modélisation par les deux méthodes et pour les différents sous ensembles de base de données, montre l'importance de la modélisation par les réseaux de neurones. En effet, les valeurs très réduites du pourcentage d'erreurs commises entre les valeurs réelles et les valeurs simulées de l'ET0 (MARE), ainsi que les valeurs élevées du coefficient de détermination ( $R^2$ ) indiquent la performance élevée des réseaux de neurones par rapport à celle de la RLM. Le grand avantage des réseaux de neurones par rapport à la méthode classique réside dans la possibilité d'améliorer la performance des modèles. Cependant nous devons avouer que la performance des modèles varie selon le nombre d'entrées ainsi que le pas de temps prévu. En effet, la performance est d'autant meilleure qu'on s'intéresse à la modélisation à pas de temps plus étendu. Doté d'une architecture simple, on a obtenu une très forte corrélation, c'est à dire,  $R^2$  proche de 1, Cette performance décroît lorsque le nombre d'entrées est réduit.

Des essais expérimentaux ont été effectués sur terrains en vue des étudier les facteurs d'amélioration de l'efficacité de l'eau d'irrigation notamment gestion de l'irrigation et la fertilisation.

Il en résulte que la fertilisation phosphorée du blé est nécessaire, car cette culture est exigeante vis-à-vis de cet élément et le sol de la région est très pauvre en phosphore. En cas de carence en phosphore, les symptômes apparaissent dès les premiers stades de croissance. Des lors, les apports de correction sont nécessaires. Leur effet pour l'amélioration des rendements est d'autant plus efficace que l'application est effectuée très tôt. La réponse aux apports de corrections est rapide notamment si la déficience est importante.

Deux contraintes majeures sont étudiées en détail dans ce travail. Il s'est avéré que la propagation des adventices dans les champs de blé est rapide et très nuisible à l'obtention de bons rendements. Les températures extrêmes notamment les minima absolus ont un impact significatif sur la récolte final du blé sous pivot dans la région d'étude.

Il est à noter que l'étude est effectuée dans la région d'Adrar au Sud Ouest algérien, caractérisée par des spécificités particulières. Pour cette raison on a jugé utile de mettre en évidence certaines caractéristiques propres à cette région.

**Mots clés :** Evapotranspiration, Penman Monteith, modélisation, réseaux de neurones, régression linéaire multiple, efficacité de l'eau d'irrigation.

## ملخص

في هذه الأطروحة، اقترح استخدام الشبكات العصبية لتطوير نماذج دقيقة لحساب التبخرنتح تضاهي طريقة بنمان مونثيث من حيث الدقة ولكن من دون اشتراط وجود عدد كبير من العوامل المناخية. وقد تم استخدام نمذجة الطريقة التقليدية أو الانحدار الخطي المتعدد للمقارنة وتبسيط الضوء على أهمية أسلوب الشبكة العصبية الاصطناعية. كما استخدم هذا الأسلوب في هذه الأطروحة عندما تكون قاعدة المعطيات المرصودة قصيرة. إن مقارنة معايير الأداء التي تم الحصول عليها في مراحل مختلفة من عمليات النمذجة للطريقتين ولمختلف المجموعات الفرعية من قاعدة المعطيات، دل على أهمية نماذج الشبكات العصبية من حيث الدقة و الأداء. حيث كانت نسبة الخطء ضئيلة و قيم عامل الارتباط ( $R^2$ ) عالية جدا، وهو ما يشير إلى الأداء العالي للشبكات العصبية مقارنة بما كان عليه الحال بالنسبة للطريقة التقليدية.

إن الميزة الكبرى للشبكات العصبية مقارنة مع الطريقة التقليدية يكمن في إمكانية تحسين أداء النماذج. غير أنه يجب علينا أن نعترف، بالتالي، أن أداء النموذج ودقته يختلف تبعا لعدد المداخل وخطوة الزمن المعتمدة، ذلك لأن الأداء يكون أفضل كلما كانت خطوة الزمن المعتمدة أكبر. باعتماد بنية بسيطة تم الحصول على علاقة قوية، أي  $R^2$  قريب من 1، ويقل هذا الأداء كلما تم تقليل عدد المداخل.

هناك عوامل أخرى قد تتدخل فتؤثر على أداء النماذج، نذكر على الخصوص، الانحراف المعياري لقيم عوامل الإدخال وكذا قوة ترابطها مع عامل الإخراج. وقد لوحظ أن الانحرافات المعيارية لقيم الإدخال تقل كلما انتقلنا من خطوة الزمن اليومي إلى خطوة الزمن الشهري.

و من أجل استكشاف عوامل تحسين كفاءة مياه الري أجريت اختبارات تجريبية على الأرض الزراعية، استهدفت على الخصوص الري والتسميد. وقد تبين أن التسميد الفسفوري للقمح ضروري لأن هذا المحصول مطالب لهذا العنصر وأن تربة المنطقة فقيرة جدا منه. وقد دلت النتائج على أنه في حالة نقص الفسفور تظهر الأعراض في المراحل المبكرة من النمو، وحينها يجب المسارعة إلى تزويد المحصول بالأسمدة اللازمة للتصحيح. تكون نسبة التحسين أعلى كلما كان التدخل أسرع، ويكون التدخل أكثر فعالية كلما تمكنا من تقديم الطلب في وقت مبكر من مراحل النمو وخاصة إذا كان العجز كبيرا. معوقان رئيسيان تمت دراستهما بالتفصيل في هذا العمل. تبين من خلالها أن الحشائش الضارة تنتشر في حقول القمح بشكل سريع وخطير جدا بشكل يمنع الحصول على عوائد جيدة. كما أن لدرجات الحرارة القصوى والدينا تأثير كبير على محصول القمح تحت المرشات المحورية في منطقة الدراسة.

تجدر الإشارة إلى أن هذه الدراسة قد أجريت في منطقة أدرار في جنوب غرب الجزائر، والتي تتميز بخصائص متميزة. لهذا السبب اعتبر أنه من المفيد تبسيط الضوء على بعض الخصائص الهامة لهذه المنطقة.

## الكلمات المفتاحية

التبخر النتح، بنمان مونثيث، النمذجة، الشبكات العصبية الاصطناعية، الانحدار الخطي المتعدد، كفاءة مياه الري.

## Summary

In this thesis, it is proposed to use neural networks to develop accurate models of evapotranspiration like Penman Monteith method but without requirement of a large number of meteorological parameters. The conventional method of modeling, multiple linear regression (MLR) is used for comparison and to highlight the importance of neural network method. This method is also used in this thesis when the observed data series is short.

Comparison of performance criteria obtained at different stages of modeling of both methods and for different subsets of database, demonstrates the importance of modeling by artificial neural networks. Very small values of mean absolute relative errors (MARE) committed between the observed values and simulated values of  $ET_0$ , also high values of determination coefficient ( $R^2$ ) indicate the high performance of neural networks compared to that of the MLR. The great advantage of neural networks compared to the conventional method lies in the possibility of improving the performance of models.

We must admit, therefore, that model performance varies depending on the number of inputs and the expected time step. Thus, performance is even better that we are interested in modeling at larger time step. Has a simple architecture, we obtained a strong correlation, ie,  $R^2$  close to 1, this performance decreases when the number of inputs is reduced.

Other factors probably intervene and affect the performance of the models. These include the variability (standard deviation) of the input parameters values and the correlation between output and input parameters. We note that the standard deviations of input values are much lower from daily time step to monthly time step.

Experimental tests were carried out on land to explore the factors improving the efficiency of irrigation water including irrigation management and fertilization. Results showed that Phosphorus fertilization of wheat is necessary because this culture is demanding this element and the soil of the region is very low in phosphorus. In the case of phosphorus deficiency, symptoms started at early growth stages. Then, correction supplies are necessary. The effect for yield improvement is even more effective than the application is made early. Response for corrections is to fast especially if deficiency is important.

Two major constraints are discussed in detail in this work. It turned out that the spread of weeds in wheat fields is fast and very detrimental to obtaining good yields. Also extreme temperatures such as absolute minima and absolute maxima have a significant impact on the final harvest of wheat under pivot centers in the study area.

It should be noted that the study is carried out in the Adrar region in South Western of Algeria, characterized by specific characteristics. For this reason it was considered useful to highlight certain features specific to this region.

## Keywords

Evapotranspiration, Penman Monteith, modeling, neural networks, multiple linear regression, efficiency of irrigation water.