

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

المعهد الوطني للعلوم الزراعية
Institut National Agronomique El-Harrach. Alger

Thèse

Présentée par:

CHENNAFI Houria

Pour obtenir le titre de Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques

Thème

**Stratégie de gestion des apports d'eau limités
sur la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.)
en milieu semi-aride des
hautes plaines sétifiennes (Algérie)**

Membres du jury

Président:	Dr. B. MOUHOUCHE	mc.	Dept. Génie Rural. INA. El-Harrach
Directeur de Thèse:	Dr. A. AIDAOU	prof.	Dept. Génie Rural. INA. El-Harrach
Co-Directeur de thèse:	Dr. H. BOUZERZOUR	prof.	Fac. des Sciences. Université. Sétif
Examineurs:	Dr. B. TOUAIBIA	prof.	ENSH Blida
	Dr. T. HARTANI	mc.	Dept. Génie Rural. INA. El-Harrach

Année Universitaire: 2007/2008

Stratégie de gestion des apports d'eau limités sur la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en milieu semi-aride des hautes plaines sétifiennes (Algérie)

Résumé

Le développement du potentiel de production de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) est pénalisé par les conditions naturelles des hauts plateaux. Le déficit hydrique réduit de la production dans des proportions relatives variant de 58%, à 100%. L'apport d'eau d'appoint améliore le rendement en grains qui varie de 8,4 à 46,3 q ha⁻¹, réduisant ainsi les risques de production nulle. Le gain de rendement en grains est fonction du stade végétatif d'apport d'eau, du type de variété adoptée et du scénario climatique observé au cours de la campagne considérée; il varie de 1,3 à 28,1 q ha⁻¹. La réponse des variétés indique qu'un cycle végétatif court valorise mieux les apports d'eau d'appoint. L'efficacité d'utilisation de l'eau reste faible et varie de 3,2 à 14,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹. L'analyse du bilan climatique indique que seule la période hivernale permet la recharge en eau du réservoir sol. Le déficit pluviométrique moyen observé au cours du cycle végétatif est de 430 mm. La phase de la croissance active de la végétation enregistre un déficit pluviométrique moyen de 300 mm. Les besoins de la culture du blé dur s'accroissent à partir de la première décennie de mars. Ils sont de l'ordre de 46 mm aux stades tallage et 2-nœuds, et atteignent 103 mm au stade épiaison. La demande en eau de la culture du blé dur s'élève à 666 mm. Les résultats indiquent que la pratique de l'irrigation régulée qui assure 50% des besoins de la culture améliore significativement la production comparativement à la conduite pluviale, dans des proportions allant de 47,0 à 88,8%.

Mots clés – *Triticum durum* Desf.- efficacité d'utilisation de l'eau – semi-aride - irrigation déficitaire régulée - gain de rendement – déficit pluviométrique

Abstract

Title: [Management strategy of limited water applications on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semi-arid environment]

The potential development of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop is limited by the natural conditions of the high plateaus. Water deficit reduces crop yields in the proportion ranging from 58 to 100%. Deficit irrigation increased grain yield which varied from 8,4 to 46,3 q ha⁻¹, reducing thereby the risk of crop failure. Yield increase is function of the crop vegetative stage at which water was added, the kind of variety adopted and the observed climatic scenario during the given cropping seasons. Genotypic response indicates that short vegetative cycle is best suited to optimize the applied water. Water use efficiency remains low and varied from 3.2 to 14.4 kg⁻¹ ha⁻¹ mm⁻¹. The analysis of the climatic data indicated that only winter period allows the soil profile water recharge. The average rainfall deficit observed during the cropping cycle is 430 mm. The active growth phase registered 300 mm deficit. Wheat crop water requirements start getting higher from the first decade of March. They are in the order of 46 mm during the tillering to 2nd node growth stages, and reach 103 mm by the heading stage. Water requirements of the durum wheat crop during the whole cycle are estimated to be 666 mm. The results indicated too that the regulated deficit irrigation, which satisfies 50 % of crop water requirements, significantly improved the crop production comparatively to the rainfed crop, in the proportions ranging from 47,0 to 88,8 %.

Key words - *Triticum durum* Desf. – water use efficiency – semi-arid – regulated deficit irrigation – yield gain - rain deficit

المخلص

التنمية الكامنة لمحصول القمح الصلب (تريتيكوم دوروم ديساف). مرهونة بالظروف الطبيعية لوسط الإنتاج الممثل في منطقة الهضاب العليا. الإجهاد المائي يقلل من الغلة بنسبية تتراوح بين 58 إلى 100%. الجلب المائي المحدد يحسن المردود الحبي الذي يتراوح مستواه من 8.4 إلى 46.3 ق ه⁻¹, مبعدا احتمال إنتاج ضعيف. فائض الغلة الحبيبي مرتبط بالجلب المائي حسب المرحلة النباتية, الصنف و سيناريو المناخ الملاحظ خلال الموسم الزراعي. تجاوب الأصناف يبين أن الأنماط قصير دورة الحيات تتم أفضل الجلب المائي المحدد. كفاءة استعمال الماء تبقى ضعيفة وقيمتها 3.2 إلى 14.4 كغ ه⁻¹ مم⁻¹. تحليل الميزانية المناخية ثبت أن فترة الشتاء وحدها فقط لها القدرة على إعادة الشحن للخزان المائي للتربة. معدل النقص المطري الملاحظ خلال المرحلة النباتية قيمته 430 مم. مرحلة النمو النشط النباتي تسجل معدل نقص مطري قيمته 300 مم. الاحتياجات المائية لنبته القمح الصلب تزداد خلال العشرة الأيام الأولى من مارس. فهي تبلغ 46 مم في مرحلة الأشياء و 2 عقدة و تصل إلى 103 مم عند الإسبال. متطلبات الماء لدورة نبته القمح قيمتها 666 مم. النتائج تبين أن تطبيق الري المنتظم الذي يؤكد 50% من اللوازم المائية لنبته القمح يحسن معنويا الغلة مقارنة بالزرع المطري بنسب تتراوح من 47 إلى 88.8%.

الكلمات الدالة: قمح – كفاءة استعمال الماء – شبه جاف – جلب الماء المحدود – الغلة الحبية – الإجهاد المائي

DEDICACES

A

La mémoire de:

Tous les Martyrs d'Algérie,

Mon Frère Chennafi Mohamed, tombé au champ d'honneur lors de la guerre de libération, au sein du Lycée Saint Augustin d'Annaba,

Pour la libération de ce grand et beau pays qui est l'Algérie.

A

La mémoire de mon père

A

Tous les peuples qui luttent pour L'indépendance,
la paix, la justice et la démocratie,

Aux Enseignants qui ont supervisé les études que j'ai réalisées,

Ma mère, Mes frères et Sœurs,

Toutes les personnes qui ont apporté
soutien ou encouragement,

Je dédie cette thèse de Doctorat d'état en Sciences agronomiques.

Houria Chennafi

REMERCIEMENTS

J'adresse mes vifs remerciements à mes Directeurs de thèse, les Professeurs, Abdellah Aidaoui et Hamena Bouzerzour pour m'avoir encadrée, orientée, encouragée et conseillée avec beaucoup de bienveillance. J'exprime en cette occasion, ma profonde gratitude de témoignage au Professeur H. Bouzerzour pour sa patience d'avoir supervisé et valorisé cette recherche avec beaucoup d'enseignements et de rigueur scientifique.

Je remercie avec bienveillance les membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer cette recherche:

Docteur Mouhouche Brahim, maître de conférence au département du génie rural de l'Institut National Agronomique (INA) d'El-Harrach, qui préside le jury.

Dr Touaibia Bénina, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH) de Blida,

Dr Hartani Tarik, Maître de conférence au Département de Génie Rural de l'Institut National Agronomique (INA) d'El-Harrach.

Je présente également mes remerciements:

Au Directeur Djaghaba Fayçal et au personnel, de la station expérimentale de l'Institut Technique des grandes cultures (ITGC) de sétif,

Mr Habibi M et Mr Latrache, de la Station Météorologique Ain Sfiha de Sétif,

Mr Mezouar M. enseignant à l'Université de Tlemcen, M^{elle} Saida Adjroud, Messieurs Benmahammed A., Makhlouf A. et Adjabi A., enseignants à l'université de Sétif,

M^{me} Sadouki Rachida et le personnel de la direction de post-graduation, M^{me} Logo Hasna enseignante au département de Zootechnie, INA (Alger),

Le jeune Adel Gjeddou responsable de l'INTERNET, Cité Houari Boumedienne, El-Eulma,

Toutes les personnes qui m'ont soutenue.

Houria Chennafi

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I-Variabilité des réponses de la culture du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) à l'irrigation déficitaire sous climat semi-aride	
Résumé.....	3
1-1-Introduction.....	4
1-2- Matériel et méthodes.....	6
1-1- Site expérimental.....	6
1-2- Matériel végétal.....	6
1-3- Mise en place, suivi et notations.....	7
1-3- Analyse des données.....	10
1-4- Résultats et discussion.....	11
1-4-1- Réponse des variétés contrastées de blé dur aux apports d'eau d'appoint.....	11
1-4-2- Réponse de la variété Waha (<i>Triticum durum</i> Desf.) à l'irrigation d'appoint déficitaire.....	19
1-4-2-1- Espérance du rendement en grains et variation climatique.....	19
1-4-2-2- Irrigation d'appoint déficitaire et stabilité du rendement en grains.....	23
Conclusion.....	28
Références bibliographiques.....	29

CHAPITRE II- Evaluation du déficit climatique et de la demande en eau de la culture du blé dur en milieu semi-aride

Résumé.....	35
2-1-Introduction.....	36
2-2- Matériel et méthodes.....	38
2-3- Résultats et discussions.....	39
2-3-1-Evaluation du déficit climatique moyen.....	39
2-3-1-1- Seuil du déficit pluviométrique saisonnier.....	43
2-3-1-2- Seuil de pluviométrie critique.....	45
2-3-2- Besoins en eau de la culture de blé dur.....	47
2-3-3-Relations entre le rendement en grains du blé dur, le déficit hydrique et le cumul pluviométrique saisonniers de la période 1981-2003.....	51
Conclusion.....	56
Références bibliographiques.....	57

CHAPITRE III- Amélioration des performances de rendement en grains du blé dur (Triticum durum Desf.) sous irrigation déficitaire régulée en zone semi-aride

Résumé.....	62
3-1- Introduction.....	63
3-2- Matériels et méthodes.....	68
3-2-1- Expérimentation en pots de végétation.....	68

3-2-2- Expérimentation en tubes de PVC.....	71
3-3- Résultats et discussions.....	72
3-3-1- Réponse de la variété Waha à l'irrigation déficitaire régulée	72
3-3-2- Développement du système racinaire.....	78
Conclusion.....	83
Références Bibliographiques.....	84
Synthèse	90
Conclusion générale	97
Références Bibliographiques.....	100

Liste des Tableaux et Figures

Chapitre I-Variabilité des réponses de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) à l'irrigation déficitaire sous climat semi-aride

I-1-Tableaux

Tableau- 1- Carrés moyens des écarts (CME) de l'analyse de la variance du rendement en grains des trois variétés irriguées à trois stades différents au cours de deux années.....12

Tableau- 2- Moyennes de rendement en grains obtenues sous conditions pluviales et d'apport d'eau d'appoint au cours des deux années et pour les trois variétés étudiées.....12

Tableau- 3- Gain de rendement en grains, en valeurs réelle et relative, pluie enregistrée au cours du cycle (novembre à juin), quantités d'eau apportées par stade végétatif et efficience d'utilisation de l'eau pour produire du grain au cours des deux années et pour les trois variétés étudiées.....15

Tableau- 4- Analyse de la variance du rendement en grains de la variété Waha conduite sous irrigation d'appoint déficitaire au cours de 10 campagnes agricoles sur le site ITGC de Sétif.....19

Tableau- 5- Moyennes du rendement en grains (g.m^{-2}) en fonction des stades d'apport, des campagnes agricoles et de l'interaction stade x année.....23

I-2- Figures

Figure- 1- Effets année et variété du gain relatif (en % du rendement du pluvial) du rendement en grains suite à l'apport d'eau d'appoint.....13

Figure- 2- Gain de rendement, en % du rendement du pluvial, en fonction de la variété x stade végétatif x année.....14

Figure- 3- Variation de la pluie et de la température moyenne mensuelle des deux campagnes d'étude.....17

Figure- 4- Variation des cumuls de pluies des périodes octobre-février (hivernale) et mars à juin (printanière) des campagnes étudiées.....20

Figure- 5- Relations entre l'écart de rendement (par rapport au RDT max), la température moyenne de décembre et le cumul des pluies hivernales.....21

Figure- 6- Relation entre le gain de rendement en grains dû à l'irrigation et le cumul des pluies hivernales et celle de mai.....24

Figure- 7- Gain de rendement en grains (% du RDT du pluvial) dû à l'irrigation déficitaire d'appoint appliquée aux stades montaison (M), épiaison (E) et montaison + épiaison (M+E).....26

CHAPITRE II- Evaluation du déficit climatique et de la demande en eau de la culture du blé dur en milieu semi-aride

II-1-Tableaux

Tableau- 1- Précipitations et déficits climatiques (mm) de la période 1981/03.....42

Tableau- 2- Valeurs des déficits pluviométriques et des hauteurs pluviométriques saisonnières et des seuils de déficit pluviométriques (SDP) et seuils pluviométriques critique (SP).....44

Tableau- 3- Valeurs décadaires moyennes des précipitations (PP, mm), l'ETP, l'ETR et du déficit (P-ETR) au cours du cycle de la culture du blé pour la période 1981- 2003.....48

Tableau- 4- Régression multiple du rendement en grain du blé dur sur la pluviométrie et le déficit hydrique saisonniers de la période 1981-2003.....52

Tableau- 5- Le rendement observé en fonction du déficit et pluie saisonniers et rendement attendu pour un apport d'eau de 50 mm au printemps de la période 1981/2003.....54

II-2- Figures

Figure- 1- Variation du bilan climatique annuel (septembre – août, A) et du cycle de la culture de blé (octobre-mai, B) des 23 campagnes agricoles étudiées40

Figure- 2- Valeurs décadaires caractéristiques du bilan climatique du cycle de la culture de céréale déterminé pour la période 1981- 2003.....41

Figure- 3- Evolution de l'ETR de la culture du blé dur sur les hauts plateaux.....47

Figure- 4- Déficit décadaire moyen. Période 1981-2003.....50

Figure- 5- Ecart de rendement en grain prévisibles suite à une irrigation de complément au printemps de 50 mm.....55

CHAPITRE III- Amélioration des performances de rendement en grains du blé dur (Triticum durum Desf.) sous irrigation déficitaire régulée en zone semi-aride

III-1-Tableaux

Tableau- 1- Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des caractères mesurés.....72

Tableau- 2- Valeurs moyennes des variables mesurées.....74

Tableau- 3- Carré moyen de l'analyse de variance du poids et du volume racinaires des différents horizons, en fonction des stades de développement de la variété de blé dur Waha (2000/01).....78

Tableau- 4- Evolution du système racinaire en fonction des stades végétatifs.....79

Tableau- 5- Carrés moyens de l'analyse de la variance de la biomasse aérienne, du nombre de tiges et de la hauteur en fonction des stades de développement de la variété Waha. (2000/01).....81

Tableau- 6- Evolution du système aérien de la variété Waha en fonction des stades végétatifs (2000/01).....82

III-2- Figures

Figure- 1- Distribution de la pluviométrie mensuelle des trois campagnes 2000/01 à 2002/03.....73

Figure- 2- Réponses du rendement en grains, du nombre d'épis, de la biomasse aérienne et du rendement paille du blé dur Waha à l'irrigation déficitaire régulée.....75

Liste des Abréviations

b= Coefficient de régression

BIO= Biomasse aérienne

Camp= Campagne agricole

CC= Capacité au champ

CIC= Centre International des Céréales

D= Drainage

D1=Déficit hydrique automnale

da= densité apparente

Da= Déficit agricole

Dc= Déficit climatique relatif au cycle végétatif de la culture

Dc.pr= Déficit (cycle) prédit

ddl= Degré de liberté

E= Stade épiaison

Et= Ecart type

ETc = Demande en eau de la culture

ET₀= Evapotranspiration potentielle de référence

ETp= Evapotranspiration potentielle

ETR= Evapotranspiration réelle

EUE= Efficience d'utilisation de l'eau

HI= Indice de récolte

HT= Hauteur de la plante

Hcr= Humidité à la capacité de rétention

Hf= Humidité au point de flétrissement

Hp= Humidité pondérale

h/H= Insolation relative

HR= Humidité relative de l'air

Hvd= Humidité volumique au <<point de danger>>

I= Irrigation

Kc= Coefficient cultural

M= Stade montaison

MBB= Mohamed Ben Bachir, variété de blé dur

Moy= Moyenne

Max= Maximum

Min= Minimum

2 N= Stade 2 nœuds

NE= Nombre d'épis

P3= Pluviométrie printanière

P= Précipitation

Pa= Pluie annuelle

Pc= Pluie au cours du cycle de la plante

PCC= Pot conduit à la capacité au champ

PCCE= Pot conduit à la capacité au champ, jusqu'au stade épisaison

Pc.pr= Pluie cycle prédite

P3.pr= Pluie printanière prévue

PLL= Rendement en paille

Pf= Poids frais

PMG= Poids de mille grains

PS= Hauteur de Pluie reçue par Saison

Ps= Poids sec

1^{er} q= Premier quartile

2^{eme} q= second quartile

3^{eme} q= Troisième quartile

q= quintal

R²= Coefficient de détermination

R= Ruissellement

RDT= Rendement en grains

Rdt. Obs= Rendement observé

Rdt.pr= Rendement prédit

Δ RDT= Le gain du rendement en grains

RFU= Réserve facilement utilisable

RG= rayonnement global

SDPA= Seuil de déficit pluviométrique annuel

SDPS= Seuil de Déficit Pluviométrique Saisonnier

SPS= Seuil pluviométrique saisonnier

ΔS = Variation de la réserve en eau d'eau du sol (mm)

t= Température de l'air

T= Tallage

TNE= Apport étalé sur trois stades (tallage, 2 nœuds et épiaison)

TEU= Total eau utilisée

Waha= Variété de blé dur

WR= Besoins en eau d'irrigation

W_T = quantité d'eau totale, utilisée au cours du cycle par la plante

Z_i = Profondeur d'enracinement

ZB/Fg= Zenati Bouteuille Flamengo, variété de blé dur

- *Introduction générale*

- **Chapitre I**

Variabilité des réponses de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) à l'irrigation déficitaire sous climat semi-aride

INTRODUCTION GENERALE

Les céréales représentent une spéculation stratégique pour l'Algérie. La consommation est estimée à 185 kg/an/habitant. La population dépasse actuellement les 35 millions d'habitants. La production nationale des céréales reste, malgré cela, faible et surtout variable d'une année à l'autre, avec une moyenne, toutes céréales confondues, estimée à 1,6 millions de tonnes. L'Algérie importe de ce fait plus de 65% du blé dur destiné à l'Afrique du Nord, et occupant ainsi la première place pour les importations du blé dur (CIC, 2005).

La culture du blé dur occupe, dans l'étage bioclimatique semi-aride, de larges étendues. Cette spéculation, essentiellement pluviale, est le plus souvent soumise aux contraintes climatiques. Quoique les bas rendements sont dus pour une grande partie aux techniques culturales pratiquées et au matériel végétal utilisé, de nombreuses études s'accordent à mentionner que la faiblesse et l'instabilité de la production des céréales sont liées à l'irrégularité inter-annuelles et saisonnières des précipitations des régions arides et semi arides (Bouzerzour et Oudina, 1990; Kayyal *et al.*, 1993; Chennafi, 1996; Chennafi *et al.*, 2005a).

Pour réduire des effets des contraintes climatiques, il est nécessaire de caractériser les potentialités du milieu naturel, pour lui adapter des techniques culturales et un matériel végétal appropriés. Les techniques culturales recouvrent les dates et densités de semis, le désherbage, la fertilisation azotée et la rotation. L'emploi de variétés adaptées, suite à leur cycle de développement plus court, esquivant les stress de fin de cycle, ou bien possédant une résistance intrinsèque, permet aussi de donner une certaine régularité à la production (Giunta *et al.*, 1992; Ehdaie, 1995). La pratique de l'irrigation déficitaire, dans les régions arides et semi arides, reste, sans aucun doute, la technique dont les effets sont les plus évidents et immédiats, lorsque l'eau disponible est bien gérée (Tavakkoli et Oweis, 2004; Huang *et al.*, 2005).

La caractérisation des aptitudes culturales de la région des hauts plateaux montre les limites de l'aptitude des sols ainsi que celle du climat pour une culture de céréale pluviale. La région appartient, en effet, à l'étage bioclimatique semi-aride. Elle se caractérise par des hivers froids, la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, associées aux fortes températures en fin de cycle de la culture.

Plus de 70% des pluies sont limitées aux mois de l'hiver, dont les basses températures limitent l'utilisation de l'eau par la culture. Les sols se distinguent par une faible profondeur de la couche arable, d'où une faible capacité de recharge par les pluies hivernales (Chennafi *et al.*, 2005a).

La valorisation de l'eau est donc un facteur déterminant de la production sous ce climat semi-aride. L'eau est, en effet, nécessaire pour atténuer les effets des aléas climatiques, et augmenter les rendements (Perrier, 1988). Suite à sa rareté, la gestion de l'eau disponible doit donc s'intégrer dans une réflexion d'optimisation de son utilisation. De nombreux travaux évoquent l'intérêt de l'irrigation de complément, de l'irrigation d'appoint ou de l'irrigation déficitaire sur la culture des céréales dans des régions arides et semi- arides (Bouzerzour et Oudina, 1990; Verdier, 1995; Tavakkoli et Oweis, 2004; Chennafi *et al.*, 2005 b; Zhang *et al.*, 2006; Sepaskhah *et al.*, 2006).

C'est dans ce contexte que s'insère l'objectif de ce travail qui étudie l'influence de l'irrigation déficitaire sur les performances de rendement en grains de la culture du blé dur en milieu semi-aride. La thèse comporte, en plus d'une introduction de la problématique, trois chapitres intitulés:

1- Variabilité des réponses de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) à l'irrigation déficitaire sous climat semi- aride.

2- Evaluation du déficit climatique et de la demande en eau de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en milieu semi- aride.

3- Performances de rendement en grains du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous irrigation déficitaire régulée en milieu semi-aride.

La synthèse de l'ensemble des résultats est présentée à la fin des trois chapitres introductifs. Le tout est finalisé par une conclusion du sujet traité.

Les résultats de la présente étude ont été communiqués lors de nombreuses manifestations scientifiques dont six internationales qui se sont déroulés entre 2005 et 2006 en Algérie, au Maroc et au Liban. Une autre partie, synthétisée dont un article, a été publiée en 2006 dans Asian Journal of Plant Sciences sous le titre: Yield Response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) Cultivar waha to deficit irrigation under semi-arid Growth Conditions.

CHAPITRE I-VARIABILITE DES REPONSES DE LA CULTURE DU BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.) A L'IRRIGATION DEFICITAIRE SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

RESUME

Deux expérimentations ont été menées en plein champ sur le site expérimental de l'ITGC de Sétif. La première a pour objectif l'étude de la réponse de trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux apports d'eau d'appoint faits à différents stades végétatifs (tallage, 2 nœuds, épiaison) au cours de deux campagnes consécutives. La seconde a pour objectif de synthétiser les données de 10 campagnes sur la variation de la réponse du rendement en grains de la variété Waha à l'irrigation déficitaire. L'analyse des résultats relève la sensibilité de la culture du blé dur au manque d'eau sous le climat des hauts plateaux. Le rendement est réduit, en moyenne, de plus de 58% sous l'effet du déficit hydrique. L'apport d'eau d'appoint améliore le rendement en grains qui varie de 8,4 à 46,3 q ha⁻¹. En moyenne des 10 campagnes, le gain de rendement en grains dû à l'irrigation déficitaire est l'équivalent de 93.4% du rendement moyen du pluvial. La réponse du rendement aux apports d'eau est variable et dépendante du stade d'apport, de la variété et de la campagne. Le gain de rendement, dû à l'apport d'eau, varie de 1,3 à 28,1 q ha⁻¹. L'apport tardif (épiaison) engendre une meilleure réponse comparativement aux apports faits à des stades végétatifs plus précoces. Le gain de rendement sous irrigation déficitaire est positivement corrélé avec la pluie du mois de mai ($r= 0.658$, $P<5\%$). Les variétés à cycle végétatif court valorisent mieux les apports d'eau d'appoint. L'efficacité d'utilisation de l'eau reste faible et varie de 3,2 à 14,4 kg mm⁻¹ ha⁻¹.

Mots clés - *Triticum durum* Desf. - efficacité d'utilisation de l'eau - stade végétatif - réponse variétale - semi-aride - irrigation déficitaire - gain de rendement - stabilité.

1-1- INTRODUCTION

La faiblesse de la production de la culture des céréales est liée en grande partie aux contraintes climatiques. L'irrégularité des précipitations et la variation des températures extrêmes déterminent le plus souvent le niveau des rendements en grains plus que les techniques culturales mises en œuvres (Kayyal et *al.*, 1993). Le déficit hydrique, en fonction de son intensité et du stade végétatif de son avènement, cause des réductions de rendement en grains allant jusqu'au rendement nul (Giunta et *al.*, 1992; Chennafi et *al.*, 2005 a). Le stress hydrique figure donc comme la principale contrainte de la production des céréales en zones arides et semi-arides (Baldy, 1974; Ehdaie, 1995; Fontès et *al.*, 1999).

Quoique réputée comme étant une espèce tolérante à la sécheresse, il n'en demeure pas moins que la culture du blé dur ne doit pas trop souffrir des effets du stress hydrique lors des phases critiques de son développement, sous peine de fortes réductions de sa production. Cette culture se montre, en fait, très sensible au déficit hydrique sous ces conditions pédo-climatiques des hauts plateaux où le rendement en grains, en conditions pluviales, est des plus faibles (Bouthier et Bonnefoy, 1993; Belaid et Moussaoui, 1999).

Le manque d'eau à certains stades végétatifs du cycle de la plante est plus dépressif qu'à d'autres stades. Entre les stades gonflement et épiaison, le manque d'eau réduit le nombre de grains m^{-2} , suite à l'avortement des talles fertiles et à la sénescence précoce du feuillage (Chennafi, 1996). Day et Intalap (1970) mentionnent que la période la plus critique pour l'eau est le début de la montaison. Tout manque sévère d'eau lors de cette phase réduit le nombre d'épis, la taille des organes, la durée du cycle et finalement le rendement en grains.

Hang et Miller (1983) constatent que la céréale peut supporter des manques d'eau durant certains stades végétatifs sans souffrir de baisses significatives de rendement en grains. Sur les hauts plateaux, la période du cycle de développement de la céréale, la plus critique pour l'eau, se situe 30 jours avant et 15 à 20 jours après l'épiaison (Baldy, 1974). C'est au cours de cette période que la végétation devient active, et que se détermine la composante la

plus corrélée avec le rendement en grains, le nombre de grains produit par unité de surface (Bouzerzour et *al.*, 1994).

Des apports d'eau d'appoint doivent être faits, lorsque c'est matériellement possible, pour réduire des effets du stress hydrique. Ces apports d'eau d'appoint améliorent et stabilisent le rendement en grains sous de tels climats (Perrier et *al.*, 1988; Oweis et *al.*, 1998). Pour économiser l'eau à apporter lors des phases sensibles au déficit hydrique, il est souvent recommandé de semer des cultivars plus tolérants au manque d'eau (Blum, 1985). L'échappement qui consiste à réaliser le cycle de développement pendant la période favorable, qu'adoptent souvent de tels cultivars, est un moyen pour renforcer la valorisation de l'eau apportée (Monneveux, 1997).

L'apport d'appoint d'eau pour atténuer les effets des contraintes climatiques, sous conditions arides et semi- arides, s'avère souvent indispensable (Sarr et *al.*, 1999). L'eau étant précieuse et rare, il est, en effet, important de la valoriser au mieux en cherchant à tirer le maximum de production par unité d'eau apportée. En plus du choix de variétés qui esquivent ou tolèrent la contrainte hydrique, l'utilisation efficiente par la plante des quantités limitées d'eau apportées repose sur la détermination des stades végétatifs qui valorisent le plus ces apports d'appoint (Chennafi et *al.*, 2005a; Chennafi et *al.*, 2005c). Oweis et Zhang (1998) montrent que des apports de quantités limitées d'eau, au cours des phases critiques de la céréale, minimisent les baisses de rendement en grains observées sous contraintes hydriques en régions semi-arides.

Mobiliser la ressource eau, réfléchir à sa gestion, identifier et utiliser des variétés qui en font une bonne utilisation et adopter des techniques culturales qui préservent le maximum de ce facteur de production pour la seule utilisation de la plante cultivée, constituent donc les différents aspects d'une stratégie qu'il faut mettre en œuvre pour hisser les rendements de la céréale à un niveau compatible avec la demande qu'elle engendre. La présente contribution se fixe comme objectifs (1) d'étudier la réponse de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux apports d'eau d'appoint, (2) d'identifier les phases ou stades végétatifs de la plante qui répondent mieux aux quantités limitées d'eau apportées, (3) de définir le type de variétés qui valorise mieux l'eau apportée et (4) d'analyser la stabilité du rendement en grains des variétés adaptées à la

technologie d'irrigation d'appoint sous les conditions semi-arides des Hauts Plateaux.

1-2- MATERIEL ET METHODES

1- 2-1- Site expérimental

Le site expérimental est situé à une altitude de 1080 m, à la latitude 36° 9' N et à la longitude 5° 21' E. Les paramètres morphologiques et analytiques du profil cultural ayant fait l'objet de la caractérisation pédologique de la parcelle expérimentale indiquent des horizons homogènes, une texture limono-argileuse et une forte teneur de 40% en calcaire total. Le pH est de 8,2. Les horizons de surface et sous-jacents sont moyennement humifères avec 1,3 à 2,4% de matière organique (Chennafi, 1996).

La région d'étude appartient à l'étage bioclimatique semi-aride. Elle se caractérise par deux saisons très marquées, un hiver froid et humide et un été chaud et sec. La sécheresse s'étale sur 5 mois, de mai à septembre. La moyenne des précipitations enregistrées au cours du cycle de développement de la plante, de septembre à juin inclus, est de 389,8 mm pour la période 1981/1994. Mekhlouf *et al.*, (2003) rapportent une variation de 170 à 450 mm pour la période 1980-2004 et pour le même site expérimental, avec une moyenne de 321,2 mm.

1-2-2- Matériel végétal

Parmi les nombreuses variétés de céréales incluses dans l'expérimentation, trois variétés représentatives de blé dur (*Triticum durum* Desf) ont été retenues. Ces variétés typiques diffèrent pour plusieurs caractères dont l'origine géographique, le potentiel de production et la longueur du cycle. Mohamed Ben Bachir est originaire de Sétif. Elle est tardive d'épiaison et haute de taille (ITGC, 1994).

Waha est une sélection relativement récente, mise en culture à la fin des années mille neuf cent quatre vingt. Elle se distingue par une large adaptation couvrant les zones littorale, sub-littorale et hautes plaines. Elle a un cycle et un chaume courts. Zenati-Bouteille/Flamengo est une sélection récente. Elle

appartient au même groupe de précocité que Waha. Toutes deux sont relativement plus productives que Mohammed Ben Bachir, Waha se montre, cependant, plus plastique vis-à-vis des conditions climatiques de la zone de production que Zenati- Bouteille/Flamengo (Chennafi *et al.*, 2005 a).

Le cycle de développement de Waha est constitué d'une courte phase levée - épiaison et d'une longue phase épiaison-maturité, comparativement au cycle de la variété locale Mohammed Ben Bachir (Bouzerzour *et al.*, 1994). Waha est très sensible aux degrés - jours accumulés et de ce fait échappe souvent aux stress de fin de cycle; mais elle n'arrive pas à éviter les basses températures dont elle subit les effets lors des printemps trop froids (Bouzerzour *et al.*, 2000; Mekhlouf *et al.*, 2006).

Les variétés sont conduites dans un dispositif expérimental en blocs avec 3 répétitions et 5 traitements relatifs à l'irrigation d'appoint. La parcelle expérimentale est de dimensions 12 m x 12 m. Les cinq traitements relatifs à l'irrigation sont un témoin conduit en régime pluvial (P), un apport d'eau fait au stade plein tallage (T), un apport d'eau fait au stade 2 nœuds (2N), un apport d'eau fait au stade épiaison (E) et un apport étalé sur ces trois stades (TNE).

1-2-3- Mise en place, suivi et notations

Deux types d'essais ont été retenus, pour les besoins de la présente étude. Le premier, d'une durée de deux campagnes agricoles, porte sur l'étude de la réponse aux apports d'eau d'appoint faits à différents stades végétatifs des trois variétés contrastées: Mohammed Ben Bachir, Waha et Zenati Bouteille/Flamengo. Cet essai est ci-après désigné "*Réponse des variétés contrastées de blé dur aux apports d'eau d'appoint*". Le second porte sur la réponse de la variété Waha à l'irrigation d'appoint sur une période plus longue, s'étalant sur 10 campagnes agricoles. Il est ci-après désigné "*Réponse du cultivar Waha à l'irrigation d'appoint déficitaire*".

Le semis des essais se fait, selon la campagne agricole, entre le 15 novembre et la mi-décembre, à une densité de 300 grains m⁻². 100 kg ha⁻¹ de superphosphate à 45% sont épandus juste avant semis. Au stade tallage, un apport d'azote 150 kg ha⁻¹ est réalisé, suivi du désherbage chimique, avec de l'Illoxan B à raison de 4 litres de produit commerciale dans 300 l ha⁻¹ d'eau ou du

Grand Star. Le précédent cultural est une jachère travaillée ou une légumineuse alimentaire.

Pour l'essai portant sur la réponse des variétés contrastées aux apports d'eau d'appoint, la quantité d'eau à apporter par irrigation est déterminée en tenant compte des paramètres suivants:

- * densité apparente, $da = 1,34 \text{ g cm}^{-3}$,
- * profondeur d'enracinement correspondante aux différents stades végétatifs d'appoint, 50 cm au stade tallage, 70 cm au stade 2 nœuds et 100 cm au stade épiaison,
- * humidité à la capacité au champ de 25%,
- * humidité au point de flétrissement de 12%,
- * stock en eau du sol.

La capacité de rétention est déterminée par la différence de poids d'humidité de l'échantillon de sol saturé, ressuyé et séché à 105 C° pendant 24h (Ollier et Poirée, 1981; Favrot, 1983; Samarah, 2005)). La densité apparente (da) est évaluée par la méthode du cylindre avec double pesée (Anonyme, 1975, Cornet, 1980). Les profondeurs d'enracinement de la culture de blé en milieu semi-aride sont de 26 à 210 cm (Bonfil et *al.*, 1999; Kätterer et *al.*, 1993), Nicoullaud et *al.*, (1995) évoquent 50 à 100 cm. Sur le site de l'ITGC de Sétif, Kribaa (1992) note une humidité au point de flétrissement de 12%. Ce seuil caractérise les sols à texture limoneuse (Turc, 1978).

A chaque stade végétatif d'appoint, le stock d'eau est déterminé sur la base de l'humidité des différentes profondeurs. La différence entre l'humidité du sol à la capacité de rétention et le stock en eau du sol est ramenée par irrigation. La quantité d'eau (Q) à apporter est déterminée par la différence entre l'humidité du sol à la capacité de rétention et le stock en eau du sol selon la méthode décrite par Sarr et *al.*, (1999):

$$Q \text{ (mm)} = 0,10 Z_i \times da \times (H_{cr} - H_p) \quad (1)$$

où

0,10 = facteur de conversion

Zi = profondeur d'enracinement (cm)

da = densité apparente du sol (g cm⁻³)

Hcr: Humidité du sol à la capacité de rétention (%)

Hp: Humidité pondérale de l'horizon du sol (%)

L'humidité pondérale (Hp) est déduite par la formule:

$$\mathbf{Hp\ (\%) = 100 [(Pf- Ps)/ (Ps- tare)]\ (2)}$$

avec

Pf= Poids frais de l'échantillon de terre (g),

Ps = Poids sec de l'échantillon étuvé à 105°C pendant 24 heures (g).

L'irrigation est pratiquée par aspersion. Le rendement en grains est obtenu après la récolte mécanique de l'essai. Le gain du rendement en grains, en valeurs réelle et relative, dû à l'irrigation est déterminé par:

$$\mathbf{\Delta RDT\ (q/ha) = RDT_{\text{Irrigué}} - RDT_{\text{Pluviale}}\ (3)}$$

$$\mathbf{\Delta RDT\ (\%) = 100 (RDT_{\text{Irrigué}} - RDT_{\text{Pluviale}}) / RDT_{\text{Pluviale}}\ (4)}$$

L'efficacité d'utilisation de l'eau est calculée par:

$$\mathbf{EUE\ (kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}) = RDT/W_T\ (5)}$$

avec

EUE= Efficience d'utilisation de l'eau (kg mm⁻¹ ha⁻¹)

RDT= Rendement en grains (q ha⁻¹),

W_T = quantité d'eau totale, pluie + irrigation, utilisée au cours du cycle par la plante.

Pour l'essai portant sur la réponse du cultivar Waha à l'irrigation d'appoint déficitaire, quatre modalités d'apport d'eau d'appoint ont été comparées dans un dispositif en blocs avec quatre répétitions. Les modalités 1 et 2 sont des apports de 50 mm au stade montaison (M) ou au stade épiaison (E), la modalité 3 est une application successive de 50 mm à chacun de ces deux stades (M+E) et la modalité 4 est la conduite pluviale (T= témoin). La parcelle élémentaire est de dimensions 12 x 12 m. Un espacement entre parcelles de 1 m est utilisé pour la pose des conduites portant les aspenseurs qui débitent 6,5 mm h⁻¹.

1-3- ANALYSE DES DONNEES

Pour l'essai portant sur la réponse des variétés contrastées aux apports d'eau d'appoint, la variable rendement en grains a été soumise à une analyse de la variance à trois facteurs étudiés (année, génotype et irrigation) et un facteur contrôlé (blocs) (Steel et Torrie, 1982). Les corrélations ont été calculées entre le gain de rendement en grains, les moyennes de rendement en grains et l'efficacité d'utilisation de l'eau. Pour le second essai, les moyennes de la variable rendement en grains ont été traitées par l'analyse de la variance à deux facteurs étudiés. La signification statistique des différences entre facteurs est déduite à partir du test des contrastes.

Les données climatiques (pluie et température) enregistrées par la station de l'Office National de la Météorologie, située à 2 km du site expérimental ont été utilisées dans le calcul des coefficients de corrélations entre le gain moyen de rendement en grains obtenu et les variables descriptives du milieu (Feyerherm et al., 1984). Le gain de rendement obtenu suite à l'application des modalités d'irrigation est calculé par différentes formules en fonction du facteur étudié.

En conditions pluviales la baisse de rendement ($\Delta RDT_{\text{Pluviale}}$) due au stress hydrique est calculée par:

$$\Delta RDT_{\text{Pluviale}} = X_{Pi} - X_{Pmax} \quad (6)$$

avec

X_{PI} = rendement en grains obtenu une campagne i donnée

X_{Pmax} = rendement en grains maximal réalisé en conditions pluviales, il représente le potentiel de rendement du cultivar utilisé.

Sous irrigation déficitaire le gain de rendement réalisé est calculé ainsi:

$$\Delta RDT_M = X_M - X_P ; \quad (7)$$

$$\Delta RDT_E = X_E - X_P ; \text{ et} \quad (8)$$

$$\Delta RDT_{M+E} = X_{M+E} - X_P \quad (9)$$

avec X_M , X_E , X_{M+E} et X_P = rendements moyens des traitements irrigués aux stades montaison, épiaison, montaison + épiaison et pluviale, respectivement dans l'ordre cité.

Les co-variables climatiques les plus liées au gain de rendement sont incluses, en utilisant l'option régression progressive pas à pas du logiciel Statitcf (1985), dans un modèle linéaire décrivant la variation du gain de rendement en fonction de ces co-variables.

1-4- RESULTATS ET DISCUSSION

1-4-1- Réponse des variétés contrastées de blé dur aux apports d'eau d'appoint

L'analyse de la variance indique des effets année, génotype, irrigation et interactions entre ces trois facteurs significatifs (Tableau 1). L'effet moyen année indique l'avantage de la campagne 1992/93 sur celle de 1993/94 avec des moyennes de rendement en grains de 34,3 et 21,3 q ha⁻¹ (Tableau 2). L'écart de 13,0 q ha⁻¹ s'explique par la différence de 144,4 mm entre les cumuls pluviométriques des deux campagnes étudiées.

Les différences spécifiques aux trois génotypes, en moyennes des deux années, montrent que le cultivar Waha avec 33,7 q ha⁻¹ est le plus performant. Il est suivi de Zenati Bouteille/Flamengo avec un rendement en grains moyen de 27,7 q ha⁻¹, alors que Mohammed Ben Bachir fait un rendement moyen de 22,1 q

ha⁻¹ (Tableau 2). L'avantage de Waha sur Mohammed Ben Bachir est de 11,6 q ha⁻¹ et celui de Zenati Bouteille/Flamengo est de 6 q ha⁻¹. Ces valeurs stressent la priorité en productivité du cultivar Waha, en particulier.

Tableau -1- Carrés moyens des écarts (CME) de l'analyse de la variance du rendement en grains des trois variétés irriguées à trois stades différents au cours de deux années

Source	ddl	CME
Année (A)	1	3937.4**
Génotype (G)	2	1015.8**
A x G	2	18.5 ns
Irrigation (I)	4	581.3**
A x I	4	473.2**
G x I	8	13.0 ns
A x G x I	8	26.6 ns
Résiduelle	60	25.3

ns, *, ** = effet non significatif et significatif au seuil de 5 et 1% respectivement

Le rendement en grains de la conduite pluviale et celui obtenu sous irrigation, moyennes des deux années et des trois variétés, sont respectivement de 20,9 et 29,6 q ha⁻¹. L'eau d'appoint améliore le rendement en grains de 8,7 q ha⁻¹ soit 41,6% du rendement en grains de la conduite en sec (Tableau 2, Figure 2).

Tableau-2- Moyennes de rendement en grains obtenues sous conditions pluviales et d'appoint d'eau d'appoint au cours des deux années et pour les trois variétés étudiées

	P	T	2N	E	C	P	T	2N	E	C
	1992/93					1993/94				
Zb/FG	28.9	38.8	26.7	39.1	32.0	12.6	15.6	27.6	17.8	38.3
Waha	33.1	43.7	40.7	46.3	41.0	17.7	19.8	26.8	22.1	45.8
MBB	24.6	27.7	26.9	32.0	33.7	8.4	10.6	18.6	9.7	28.8

ZB/FG= Zenati Bouteille/Flamengo, MBB= Mohammed Ben Bachir; P= pluvial, T= tallage, 2N= 2 nœuds, E= épiaison, C= cumul; Ppds 5%= 4.20 q/ha

Le gain de rendement en grains dû à l'irrigation (équations 3 et 4) est variable selon les années. L'avantage de l'appoint d'eau est de 6,9 q ha⁻¹ en 1992/93 contre 10,6 q ha⁻¹ en 1993/94. Ces gains, exprimés en pourcentage du rendement de la conduite pluviale, représentent respectivement 23,9% et 82,2% (Figure 1).

Lors des années sèches, l’avantage de l’apport d’eau d’appoint est relativement plus conséquent. En d’autres termes les années pluvieuses réduisent la différence entre les conduites pluviale et irriguée, alors que les années sèches augmentent cette différence (Figure 1).

Il y a peu de différences, en terme de gain de rendement en grains, exprimé en pourcentage du rendement de la conduite pluviale, entre les trois génotypes (en moyenne des deux années). Les différences sont cependant plus nettes par campagne, vu que Waha répond mieux lors de la campagne 1992/93 alors que les deux autres génotypes répondent mieux aux apports d’appoint lors de la seconde campagne (Figure 1, Tableau 3).

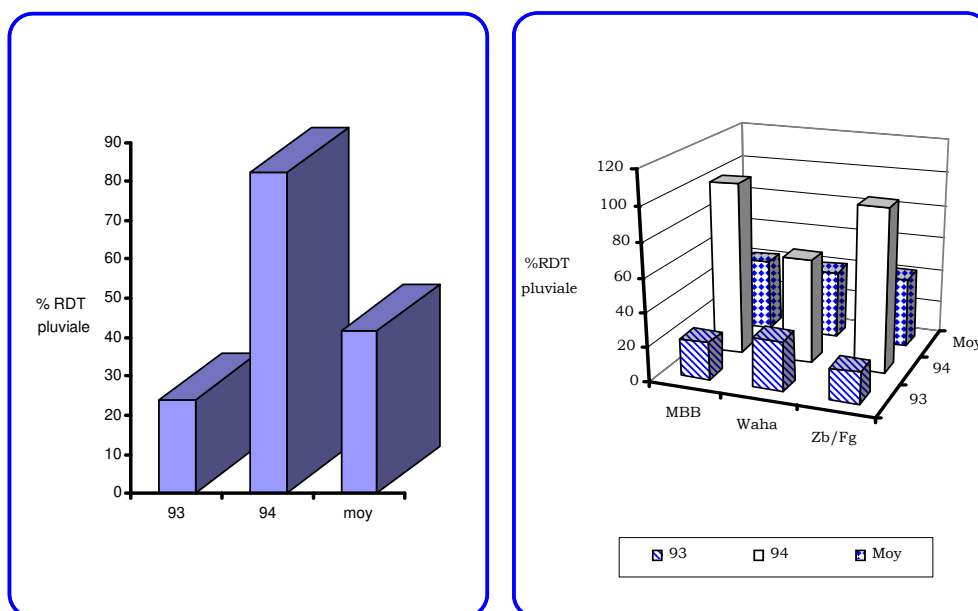


Figure-1- Effets année et variété du gain relatif (en % du rendement du pluvial) du rendement en grains suite à l’apport d’eau d’appoint

Tenant compte de l’année, la variété et le stade d’apport, le gain de rendement en grains obtenu est très variable en valeur relative (Tableau 3). Lors de la première campagne la variété Zenati Bouteille/Flamengo répond favorablement à l’apport réalisé au stade tallage, et ne répond pas du tout ou peu aux apports faits à des stades plus tardifs (Figure 2, Tableau 3). La variété Mohammed Ben Bachir adopte le comportement inverse, elle répond peu aux apports précoces et plus aux apports tardifs.

La réponse de Waha ne montre pas de tendance précise, les apports des stades tallage et épiaison sont mieux valorisés que ceux réalisés aux stades 2N et simultanément aux trois stades TNE (Figure 2, Tableau 3). Durant la seconde campagne, les réponses des trois variétés sont très similaires. Elles réagissent fortement aux apports étalés sur les trois stades végétatifs (TNE) et relativement moins à l'apport fait au stade 2N. Il y a par contre une faible réponse aux apports faits aux stades tallage et épiaison (Figure 2, Tableau 3).

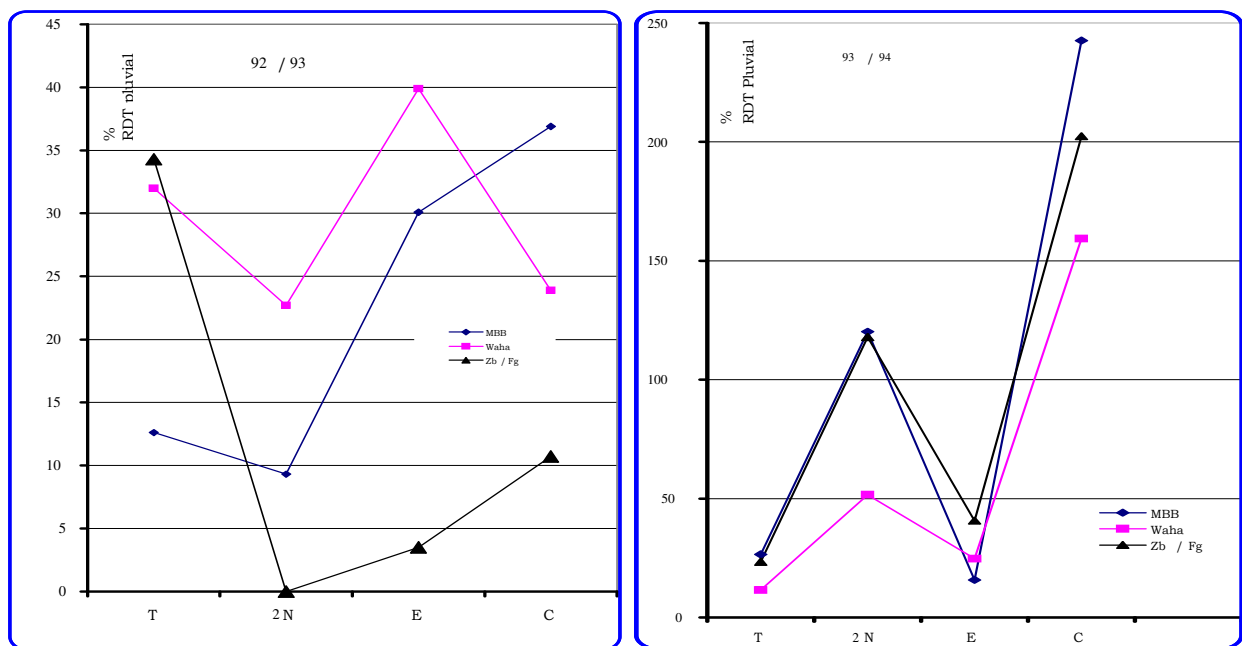


Figure-2- Gain de rendement, en % du rendement du pluvial, en fonction de la variété x stade végétatif x année

Les gains de rendement obtenus selon les différentes modalités d'apport d'eau (équations 7, 8 et 9), sont peu liés avec le cumul pluie + irrigation chez la variété Zenati Bouteille/Flamengo ($R = 0,190^{ns}$). Ils le sont au seuil de 10% pour Waha ($r = 0,552^x$) et pour Mohammed Ben Bachir ($r = 0,559^x$). Cette liaison, dépendante de la variété, devient plus élevée en valeur lorsque la corrélation est calculée entre le gain de rendement et les quantités d'eau apportées par stade végétatif.

Les valeurs prises par le coefficient de corrélation sont de $0,555^x$ pour Zenati Bouteille/Flamengo, $0,670^{**}$ pour Waha et $0,807^{**}$ pour MBB. Elles suggèrent des différences variétales de réponse aux apports d'eau d'appoint. La variation des rendements de MBB et Waha s'explique mieux que celle Zenati

bouteille/Flamengo par la variation des quantités d'eau apportées. D'autres facteurs, probablement la température, affectent la réponse de la variété Zenati Bouteille/Flamengo.

Tableau-3- Gain de rendement en grains, en valeurs réelle et relative, pluie enregistrée au cours du cycle (novembre à juin), quantités d'eau apportées par stade végétatif et efficence d'utilisation de l'eau pour produire du grain au cours des deux années et pour les trois variétés étudiées

	P	T	2N	E	C	P	T	2N	E	C
ΔRDT (q ha⁻¹)										
	1992/93					1993/94				
Zb/FG	-	9.9	0.0	10.2	3.1	-	3.0	15.0	5.2	25.7
Waha	-	10.6	7.6	13.2	7.9	-	2.1	9.1	4.4	28.1
MBB	-	3.1	2.3	7.4	9.1	-	2.8	10.2	1.3	20.4
ΔRDT (%)										
	1992/93					1993/94				
Zb/FG	-	34.3	0.0	35.3	10.7	-	23.8	120.0	41.3	203.9
Waha	-	32.0	22.9	39.8	23.9	-	11.9	51.4	24.9	158.7
MBB	-	12.6	9.3	30.1	36.9	-	33.3	121.4	15.5	242.9
EUE (kg ha⁻¹ mm⁻¹)										
	1992/93					1993/94				
Zb/FG	9.9	12.7	7.6	10.1	6.9	6.3	6.8	9.9	5.8	9.2
Waha	11.4	14.4	11.6	12.0	8.9	8.8	8.6	9.6	7.2	11.1
MBB	8.4	9.1	7.7	8.3	7.4	4.2	4.6	6.6	3.2	6.9
I (mm)	0.0	13.0	60.0	94.0	167.0	0.0	30.0	80.0	105.0	215.0
P+I	291	304	351	385	458	200	230	280	305	415

P = pluvial, T = tallage, 2N = 2 nœuds, E = épiaison, C= cumul, P+I = cumul pluie novembre à juin inclus+ eau d'appoint

L'efficence d'utilisation de l'eau (équation 5) est variable selon les stades d'apports, de la variété et de la campagne. Les valeurs prises par cette variable varient de 3,2 à 14,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Tableau 3). Elles restent inférieures à celles trouvées par Steiner *et al.*, (1985) qui rapportent des moyennes allant de 16,0 à 20,0 kg ha⁻¹ mm⁻¹ et aux moyennes, variant de 20,0 à 30,0 kg ha⁻¹mm⁻¹, rapportées par Bouthier et Bonnefoy (1993). Elles sont cependant assez proches et même similaires aux moyennes de 5,0 à 14,5 Kg ha⁻¹mm⁻¹ rapportées par Kribaa (1992).

L'efficacité d'utilisation de l'eau est positivement et significativement corrélée avec le rendement en grains des différents traitements chez les trois variétés ($r = 0,772^{**}$, $0,740^{**}$ et $0,875^{**}$) respectivement pour Zenati Bouteille/Flamengo, Waha et Mohammed Ben Bachir. Cette liaison indique que l'augmentation des rendements est liée à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau.

Le gain de rendement en grains, en valeur réelle, est lié positivement avec les moyennes de rendement uniquement chez Waha ($r = 0.694^*$). Cette corrélation indique que l'augmentation du gain (ΔRDT) est due essentiellement à l'augmentation du rendement en réponse à l'apport d'eau et non pas à la baisse du rendement en grains chez le pluvial suite à l'effet de l'intensité du stress hydrique.

Les résultats de la présente étude indiquent des réponses variées aux apports d'eau d'appoint, de sorte qu'il reste très difficile d'identifier le stade critique pour faire les apports d'eau d'appoint. La variation de ces réponses est liée à la variation des régimes hydrique et thermique de l'environnement de production et à la nature même du génotype utilisé. Ainsi, le cultivar Waha arrive à donner un meilleur rendement en sec que les deux autres variétés irriguées à certains stades végétatifs.

Ceci indique que l'adoption de cultivars tolérants (dans le sens où tolérance signifie la capacité génotypique à produire plus sous stress hydrique) permet d'obtenir des rendements plus élevés ou égaux à ceux obtenus sous irrigation en utilisant des variétés trop sensibles au stress hydrique. La variété Waha se distingue aussi par la capacité de répondre aux apports d'eau puisqu'elle réussit à faire de meilleurs rendements en grains sous irrigation comparativement aux deux génotypes auxquels elle est comparée.

L'effet de la variation des régimes hydriques et thermique est indiqué par les différences dans la répartition de la pluviométrie et de la température moyenne mensuelle entre les deux années (Figure 3). Le printemps de la seconde campagne a été globalement plus sec et plus chaud, ce qui a engendré des gains de rendement, en réponse aux apports d'appoint, relativement plus élevés.

Ces résultats indiquent que les apports d'eau sont relativement mieux valorisés lorsque le stress est intense, mais le niveau de rendement obtenu est généralement plus faible sous ces conditions. Ces résultats indiquent aussi que les apports faits plus fréquemment (plusieurs apports au cours du cycle) donnent de meilleurs résultats comparativement à un seul apport fait à un stade végétatif donné.

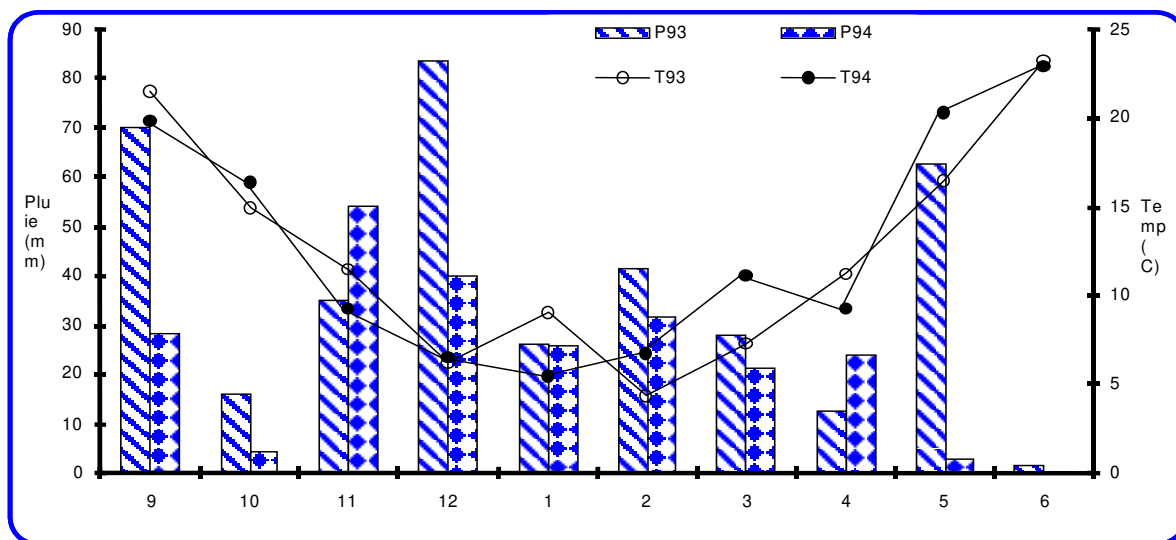


Figure-3- Variation de la pluie et de la température moyenne mensuelle des deux campagnes d'étude

La valorisation de l'apport fait à un stade donné semble dépendre des événements climatiques précédents et venant après ce stade et de la réaction de la plante à ces événements. Cette réponse est aussi dépendante de la quantité d'eau apportée, de la répartition de cette quantité et de la sensibilité du génotype.

Dans la présente étude, les différents traitements forment, du point de vue cumul d'eau reçu par cycle, une progression passant de 200,2 à 458,4 mm. La régression des rendements en grains sur ces cumuls donne les modèles suivants:

$$RDT_{ZB/FG} (q \text{ ha}^{-1}) = 0,087(P+I) - 0,5 \quad (R^2 = 0,527) \quad (10)$$

$$RDT_{Waha} (q \text{ ha}^{-1}) = 0,113 (P+I) - 2,9 \quad (R^2 = 0,668) \quad (11)$$

$$RDT_{MBB} (q \text{ ha}^{-1}) = 0,100 (P+I) - 10,1 \quad (R^2 = 0,714) \quad (12)$$

L'efficacité moyenne d'utilisation de l'eau est de 8.7, 11.3 et 10.0 kg ha⁻¹ mm⁻¹ respectivement pour Zenati Bouteille /Flamengo, Waha et Mohammed Ben Bachir. Ces valeurs sont similaires à celles mentionnées par Oosterom *et al.*, (1993) qui rapportent des moyennes de 8,6 kg ha⁻¹mm⁻¹ pour la variété Arabi Aswad et 11,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ pour la variété Harmal.

Dans la mesure où le rendement en grains est régressé sur le cumul pluviométrique, dont la répartition est biaisée par des apports d'eau faits surtout en fin de cycle, la constante des modèles ci- dessus donne une estimation brute du degré de tolérance au déficit hydrique de fin de cycle des géotypes évalués. Cette estimation indique que Mohammed Ben Bachir est le plus sensible au manque d'eau en fin de cycle alors que Waha et Zenati Bouteille/Flamengo sont relativement plus tolérants.

Le coefficient de détermination (équations 10, 11 et 12) indique que la variation des cumuls pluviométriques explique une grande part de la variation des rendements chez Mohammed Ben Bachir plus que chez les deux autres variétés. En d'autres termes le modèle prédisant le comportement de Mohammed Ben Bachir est plus précis que ceux de Zenati Bouteille/Flamengo et Waha.

Selon Blum et Pnuel (1990), la variation des cumuls pluviométriques par cycle, dans la plage des 230 à 765 mm, explique 75% de la variation des rendements en grains des céréales des régions semi-arides. Hadjichristodoulou (1987) rapporte cependant que c'est la distribution plus que la quantité enregistrée par cycle qui explique mieux la variation des rendements en grains. Ceccarelli *et al.*, (1992) mentionnent que le régime thermique joue aussi un rôle prépondérant, ils rapportent des rendements en grains variant de 32 et 1562 kg ha⁻¹ pour deux années consécutives dont la distribution des cumuls pluviométriques est similaire mais les régimes thermiques très différents.

Les résultats de l'étude, conduite sur deux années, indiquent que la valorisation des apports d'eau d'irrigation faits à différents stades après le tallage, est dépendante des conditions climatiques précédant et celles survenant après l'apport. Elle est aussi dépendante du géotype et de son degré de sensibilité à la variation des conditions de croissance du milieu. Les variétés améliorées, à cycle plus court, type Waha, répondent plus favorablement aux

apports d'eau comparativement aux variétés à cycle plus long, type Mohammed Ben Bachir.

La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la discussion des résultats de l'étude portant sur la variabilité des réponses de la variété Waha à l'irrigation déficitaire.

1-4-2- Réponse de la variété Waha (*Triticum durum* Desf.) à l'irrigation d'appoint déficitaire

1-4-2-1-Espérance du rendement en grains et variation climatique

L'analyse de la variance de la variable rendement en grains montre des effets irrigation, années et interaction irrigation x année significatifs (Tableau 4).

Tableau -4- Analyse de la variance du rendement en grains de la variété Waha conduite sous irrigation d'appoint déficitaire au cours de 10 campagnes agricoles sur le site ITGC de Sétif

Sources de variation	ddl	Carrés moyens des écarts
Irrigation (I)	3	453548.87**
Irrigué vs pluvial	1	883568.44**
1 vs 2 apports	1	408457.50**
Montaison vs épiaison	1	68650.61**
Année (A)	9	49775.11**
I x A	27	10964.00**
Erreur	117	1336.22

** effet significatif à 1%.

L'interaction significative indique que le rendement en gains varie en fonction des stades d'apport et des années. Il s'avère donc difficile de pouvoir prédire le stade d'apport le plus efficace en matière d'irrigation déficitaire suite à la nature de cette interaction. Le rendement en grains de la culture pluviale varie de 106,3 à 256,3 g.m⁻², selon les campagnes. La variation des cumuls pluviométriques des saisons 'hivers' (octobre à février) et 'printemps' (mars à juin) conduisant à ces niveaux de rendements est donnée en figure 4.

Les écarts de rendement en grains, par rapport au rendement maximal obtenus sous ces conditions, ne sont pas liés à la moyenne mensuelle ni au total

pluviométrique du cycle de la culture. Ils sont liés par contre avec le cumul pluviométrique des mois d'octobre à février inclus ($r= 0.6562, P<0.05$).

Sous conditions pluviales, la recharge du sol est limitée à la période hivernale, suite à la nature méditerranéenne du climat. A la sortie de l'hiver, l'élévation de la température active la croissance végétative. Cette dernière ne devient possible, en l'absence de pluies printanières suffisantes, que si le stock en eau du sol est à même de la soutenir

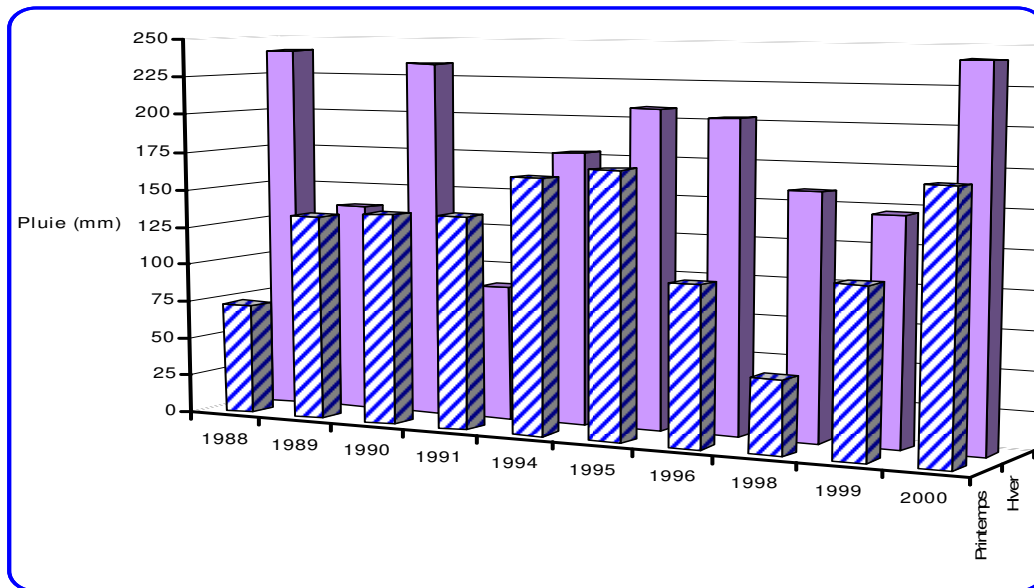


Figure-4- Variation des cumuls de pluies des périodes octobre -février (hivernale) et mars à juin (printanière) des campagnes étudiées

L'effet de la pluie n'est, cependant, pas toujours prépondérant. Le régime thermique intervient, en effet, en interaction pour permettre ou non la valorisation de l'eau mise à la disposition de la plante. Ainsi sous conditions pluviales de la présente expérience, les écarts de rendement en grains relativement au rendement maximal obtenu sont négativement corrélés avec la température moyenne du mois de décembre ($r=-0.9597, P< 0.01$). Un mois de décembre trop doux réduit donc de l'espérance de rendement en grains attendue de la culture de cette variété (Figure 5).

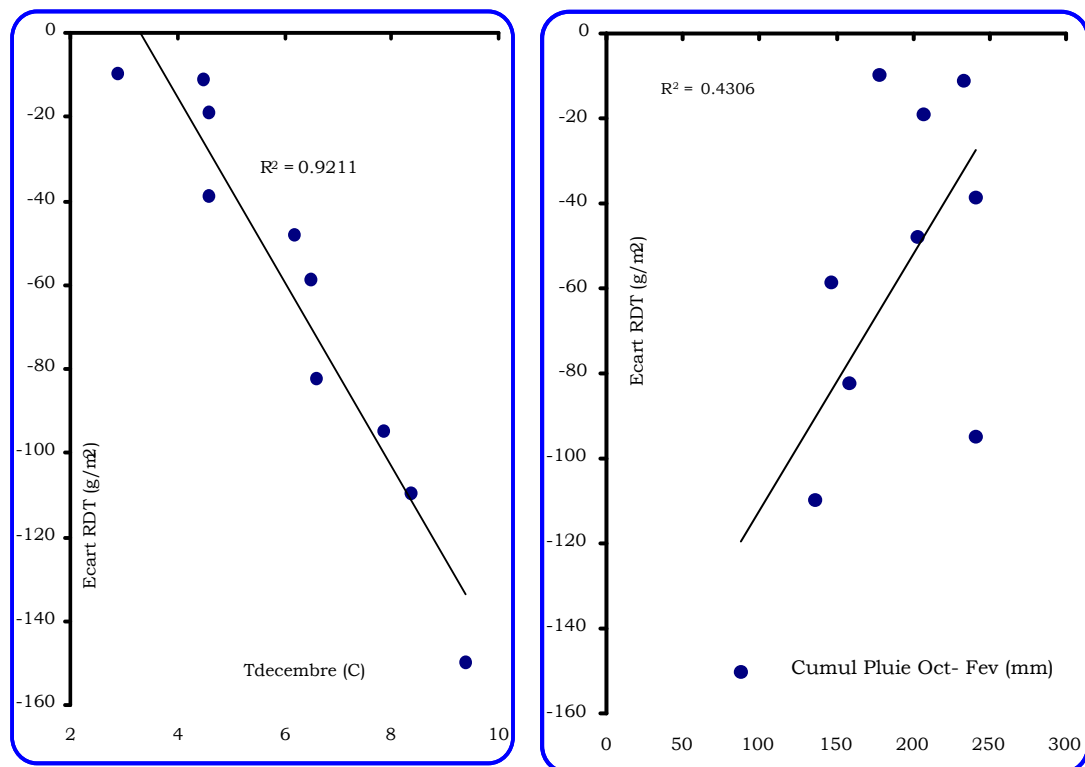


Figure -5- Relations entre l'écart de rendement (par rapport au RDT max), la température moyenne de décembre et le cumul des pluies hivernales

La baisse du rendement en grains est de -17.4 g m^{-2} par $^{\circ}\text{C}$ d'augmentation de la température moyenne du mois de décembre qui varie de 2,8 à 9,4 $^{\circ}\text{C}$ pour la période étudiée. Le modèle linéaire explicatif de la variation des écarts de rendement sous ces conditions est:

$$\Delta\text{RDT}_{\text{Pluviale}} = -17.4 T_{12} + 34.6 \quad (R^2 = 0.9211) \quad (13)$$

Ce modèle associe le cumul des pluies hivernales (octobre à février inclus) au seuil de 10% pour devenir:

$$\Delta\text{RDT}_{\text{Pluviale}} = -17.7 T_{12} + 0.02 P_{10-02} + 40.3 \quad (R^2 \text{ multiple} = 0.9415) \quad (14)$$

La variété Waha est de type printemps. Elle présente donc peu de besoins en matière de températures vernalles. Elle se montre très sensible à l'élévation de la température (Bouzerzour et *al.*, 1994). Un mois de décembre trop doux accélère le développement de cette variété. Le départ précoce en végétation

hâte la réalisation des stades montaison et épiaison et les fait coïncider avec la période gélive, phénomène auquel cette variété est très sensible (Mekhlouf et *al.*, 2006). De tels cultivars s'adaptent plus, en conduite pluviale, à un hiver frais qu'à un hiver trop doux qui accélère le développement aux dépens de la croissance et raccourcit la durée du cycle de la plante (Bouzerzour et *al.*, 2002).

Ces résultats suggèrent que sous climat de type méditerranéen et en culture pluviale, la chance d'obtenir un rendement proche du potentiel du cultivar utilisé dépend de plusieurs scénarios climatiques difficilement prévisibles. Ainsi un hiver pluvieux, associé à des températures relativement fraîches, assure un développement de la plante qui ne prime pas au dépend de la croissance. La plante utilise au mieux les eaux de pluies hivernales et constitue assez de biomasse, avant de monter en épi, pour assurer un rendement en grains acceptable (Cantero et *al.*, 1995).

Parmi les alternatives à ces multiples scénarios, il semble judicieux de faire des apports d'eau après la sortie de l'hiver, une fois que la température de l'air n'est plus un obstacle majeur pour la croissance végétative. Au cours de cette phase, se détermine le nombre de grains produit par unité de surface semée. En effet, l'eau est un facteur de production relativement peu abondant en quantité et en qualité sur les hauts plateaux.

L'utilisation de l'eau est de plus en plus privilégiée sur les cultures à forte plus value, en dehors des utilisations domestiques et industrielles. A cet effet, sur céréales, il est plus opportun de faire des apports de quantités assez limitées, ou irrigation déficitaire, et à des stades où l'eau est mieux valorisée par la plante pour produire du grain (Bennani et *al.*, 1992).

Le stress hydrique, observé dans le cadre de la présente expérience, réduit le rendement en grains de $(256,3-106,3)/256,3= 58,5\%$. Un stress d'une telle intensité justifie, lorsque les disponibilités en eau sont suffisantes, le recours à l'irrigation pour éviter des baisses de rendement trop importantes voire le rendement nul (Oweis et Zhang, 1998).

1-4-2-2- Irrigation d'appoint déficitaire et stabilité du rendement en grains

En moyenne des 10 campagnes, le gain de rendement en grains dû à l'irrigation déficitaire est de 181,6 g.m⁻². Il représente un accroissement de 93,4% par rapport au rendement moyen du témoin pluvial (Tableau 5). Le gain de rendement en grains dû à l'effet de l'irrigation déficitaire est positivement corrélé avec la pluie du mois de mai ($r= 0.658$ $P < 0.05$) et négativement corrélé avec le cumul des pluies hivernales ($r=-0.709$ $P < 0.05$).

Le gain de rendement de blé irrigué est relativement moins important lorsque l'hiver est pluvieux, donc lorsque le sol a eu la possibilité de reconstituer ses réserves qui permettent au pluvial de se rapprocher du potentiel permis par le milieu. Le gain est cependant plus conséquent dans les situations où le mois de mai est plus pluvieux (Figure 6).

Tableau -5- Moyennes du rendement en grains (g.m⁻²) en fonction des stades d'apport, des campagnes agricoles et de l'interaction stade x année

		Effet Irrigation (I)									
Stade	Montaison (M)	Epiaison(E)		M+E	Irrigué(I)		Pluvial(P)				
RDT	305.6	364.1		458.6	376.1		194.5				
		Effet année (A)									
Année	1988	1989	1990	1991	1994	1995	1996	1998	1999	2000	
RDT	274.0	383.1	341.3	349.6	375.7	434.1	322.9	248.3	314.8	262.9	
		Interaction I x A									
M	218.5	402.5	338.3	339.3	365.0	418.8	295.5	197.5	263.8	226.5	
E	280.5	437.5	335.8	441.8	424.0	462.5	359.3	233.8	365.0	301.3	
M+E	389.5	546.3	434.8	511.3	491.3	600.0	428.8	387.8	432.8	363.8	
Pluvial	217.5	146.3	256.3	106.3	222.5	255.0	208.3	174.0	197.5	161.3	

Ces résultats indiquent que les apports d'eau durant cette période sont en général mieux valorisés par la culture. Il indique aussi que dans les conditions climatiques des hauts plateaux, le printemps est le plus souvent relativement peu pluvieux par rapport aux besoins de la plante (Figure 4). D'où l'intérêt des apports limités d'eau au cours de cette période.

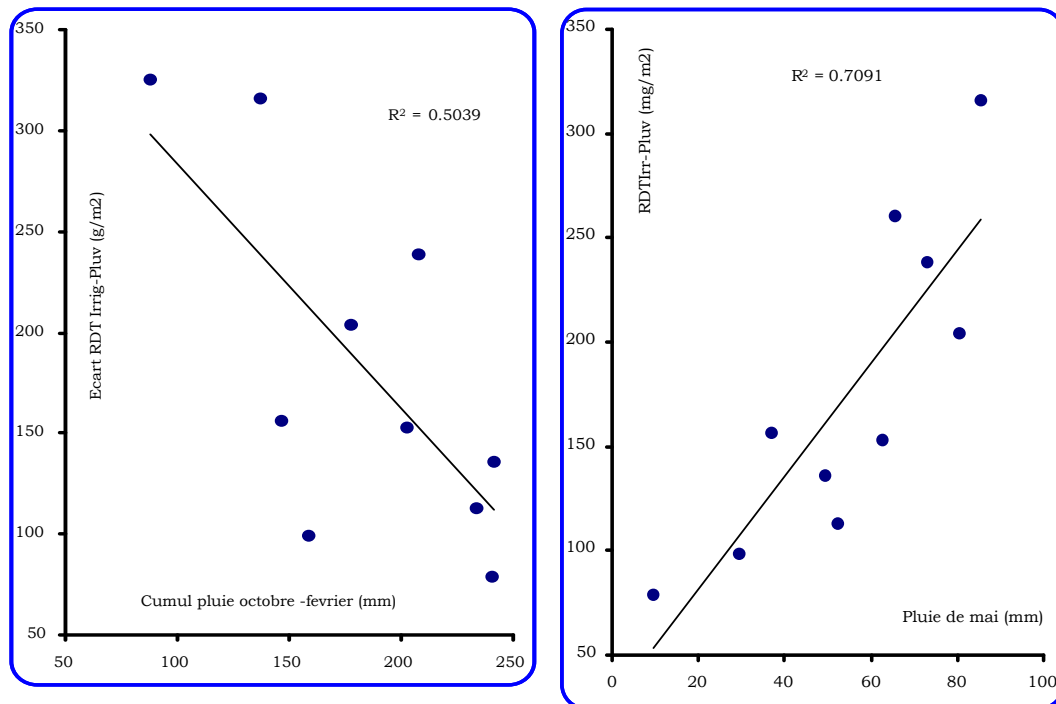


Figure-6- Relation entre le gain de rendement en grains dû à l’irrigation et le cumul des pluies hivernales et celle de mai

Le test des contrastes indique que l’apport unique fait au stade montaison ou au stade épisaison donne un rendement en grains significativement inférieur au rendement en grains des apports faits à la fois aux stades montaison et épisaison (Tableau 4). L’irrigation faite au stade épisaison est significativement plus efficace, en terme d'augmentation du rendement en grains que celle faite au stade montaison (Tableaux 4 et 5).

Le gain de rendement en grains dû à l’irrigation déficitaire précoce (montaison) est lié aux moyennes des pluies mensuelles de février, de mai et à la température de décembre. Ce gain suit une fonction dont le modèle linéaire est:

$$Y = -2.16P_{02} + 2.1P_{05} + 13.7 T_{12} + 9.4 \quad (R^2_{\text{multiple}} = 0.9549) \quad (15)$$

L’efficacité de l’irrigation précoce relativement au pluvial dépend significativement des pluies qui sont enregistrées juste avant et juste après l’apport d’eau. Plus ces pluies sont importantes, moins net est l’effet de

l'irrigation. Le gain de rendement en grains est lié positivement à la pluie de mai qui en améliore le niveau ainsi qu'à la température moyenne de décembre. Une température clémente au mois de décembre permet une installation rapide et une couverture du sol par la plante qui serait en état de mieux valoriser les apports d'eau précoces (Zhang et *al.*, 1998).

L'efficacité de l'irrigation déficitaire tardive (équation 16) effectuée au stade épiaison est dépendante de trop de paramètres. Son impact est donc très difficile à prévoir suite au nombre important de variables dont elle est dépendante. Le gain de rendement par rapport au témoin est une fonction complexe des variables climatiques suivantes:

$$Y = 1.1 P_{04} + 1.7P_{05} - 1.6 P_{10-02} - 16.4T_{03} + 8.7T_{04} + 384.8 \quad (R^2_{\text{multiple}} = 0.996) \quad (16)$$

La réponse du rendement en grains aux apports tardifs est liée à l'état physiologique de la plante au moment de l'apport. Cet état est le plus souvent l'expression des conditions de croissance pendant la période précédant l'apport d'eau. La réponse dépend aussi des conditions de croissance qui surviennent après l'apport. Un apport fait sur une végétation en très mauvais état physiologique suite à l'effet des stress ne sera pas valorisé de la même manière qu'un apport fait sur une végétation non stressée.

De même un apport sur une végétation bien développée ne donne pas la même réponse, s'il est suivi de stress intenses qui affectent fortement la végétation. L'apport d'appoint agit donc comme une pluie reçue à un stade donné. La valorisation de cette pluie ou de cet apport d'appoint dépend des effets des événements climatiques, subis par la plante, qui ont précédé et ceux qui viennent après cette pluie ou cet apport.

Le gain de rendement en grains dû à l'irrigation faite successivement aux deux stades est favorisé par les pluies de mai et défavorisé par le cumul d'octobre à février. Le gain est une fonction linéaire de ces deux variables:

$$Y = 1.9 P_{05} - 1.6 P_{10-02} + 467.4 \quad (R^2_{\text{multiple}} = 0.8806) \quad (17)$$

La réduction du nombre de variables explicatives du gain est une indication que l'apport fait successivement aux deux stades sera le plus souvent favorable à l'extériorisation d'un meilleur rendement en grains. En effet, au cours des 10 campagnes, ce traitement s'est montré plus avantageux que les deux autres (Figure 7).

Les résultats de la présente étude montrent que deux apports s'avèrent plus sécurisants de point de vue gain de rendement en grains qu'un seul apport. Le choix de faire un ou deux apports relève plutôt des disponibilités en eau, des superficies concernées et des moyens à mettre en place pour irriguer. Il reste néanmoins vrai que le recours à l'irrigation d'appoint est dicté surtout par le souci de réduire des baisses de rendements et de stabiliser la production à un niveau qui rend possible la prévision de la production.

Dans ce contexte, les variances du rendement en grains sont plus élevées pour les traitements irrigués (6.1×10^3 , 5.9×10^3 et 5.8×10^3 respectivement pour M, E et M+E) que pour le témoin (2.3×10^3). Ce qui indique que sous irrigation déficitaire, il y a un gain de rendement mais que ce gain est très variable suite à la dispersion des rendements. En conduite pluviale, le faible niveau des rendements en grains donne à leur distribution une relative stabilité.

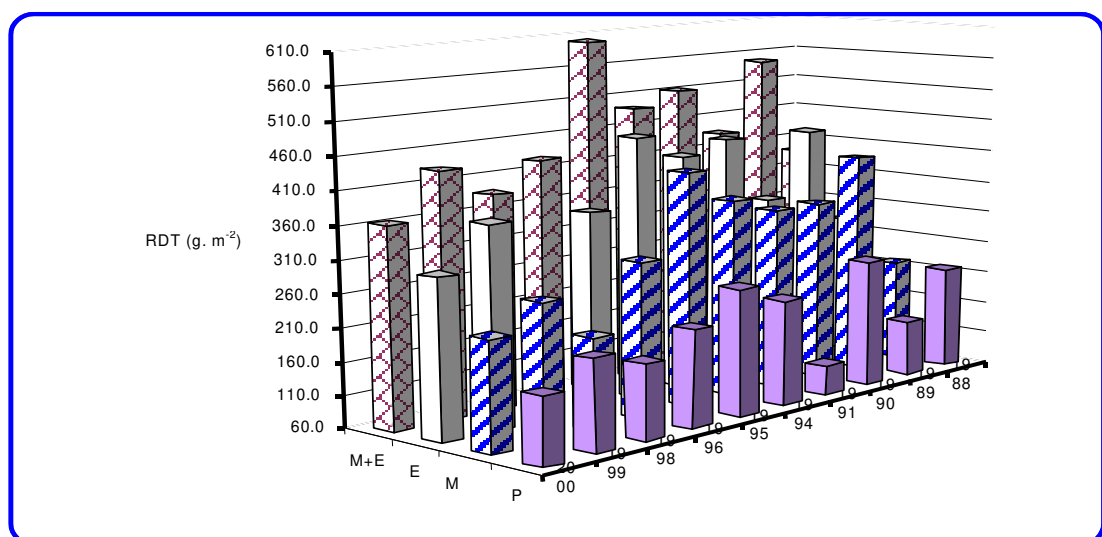


Figure -7- Gain de rendement en grains (% du RDT du pluvial) dû à l'irrigation déficitaire d'appoint appliquée aux stades montaison (M), épiaison (E) et montaison + épiaison (M+E)

Le facteur le plus important dans la pratique de l'irrigation d'appoint déficitaire sur céréales est la connaissance du stade végétatif le plus sensible au

stress hydrique conduisant à une réduction importante du rendement en grains. La connaissance de ce stade est aussi importante que le degré de stress lui-même.

En effet, il y a difficulté à départager les stades végétatifs selon leur degré de sensibilité au stress hydrique, ceci suite à la difficulté de maintenir un même degré de stress sur tous les stades végétatifs en plein champ. L'autre difficulté émerge du fait que différents génotypes peuvent présenter différentes réponses au stress hydrique et donc répondent différemment aux applications de l'irrigation déficitaire. Oweis et Zhang (1998) ont analysé la variabilité des réponses de divers génotypes au stress hydrique et aux apports d'eau. Ils trouvent une variation de la réponse des génotypes à cette pratique.

Le succès de la pratique de l'irrigation d'appoint déficitaire dépend donc de la quantité d'eau apportée, du génotype utilisé, de l'état de la végétation au moment de l'apport d'eau, suite aux effets des événements climatiques précédant l'irrigation et de ceux qui interviendront après l'apport.

Un génotype tolérant au stress répondra certainement moins bien qu'un génotype sensible d'autant plus que la stratégie de l'irrigation déficitaire n'est pas d'éviter totalement le stress hydrique mais de le contrôler favorablement. L'eau économisée permet d'augmenter les surfaces à irriguer (Stewart, 1989; Bennani et *al.*, 1992).

Dans cette stratégie le stade d'apport est très important parce qu'il détermine l'efficacité d'utilisation des quantités limitées d'eau apportées par irrigation. La détermination de ce stade n'est possible que si le stress hydrique en question se distingue par une certaine périodicité et qu'il induit une forte baisse du rendement en grains sans l'apport d'eau. Sous climat méditerranéen, le stade de la plante sensible au stress hydrique est variable comme le sont les événements climatiques caractéristiques de cet environnement.

Le stade végétatif qui valorise le mieux les apports d'irrigation déficitaire est donc fonction des conditions climatiques spécifiques à chaque campagne agricole. La probabilité qu'un apport d'eau à un stade critique ou à un autre soit

efficient, dépendra donc beaucoup plus de la variabilité climatique spécifique à l'environnement de production.

Les résultats de la présente étude indiquent cependant que l'irrigation déficitaire, avec un seul apport, faite entre les stades montaison et épiaison engendre un gain de rendement en grains. Ce gain est cependant variable en valeur, allant de nul à 3 fois le rendement en grains obtenu sous conditions pluviales. Deux apports faits à ces deux stades sont plus sécurisants en matière de gain de rendement. Ceci corrobore les résultats de Zhang et *al.*, (1998) qui mentionnent que les apports d'eau limités augmentent significativement le rendement en grains.

Van Der Boogaard et *al.*, (1996) rapportent que l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour produire du grain sous irrigation déficitaire est due au changement de la transpiration causé par l'augmentation de la conductance stomatique, quand la végétation devient active après la sortie de l'hiver. Cantero- Martinez et *al.*, (1995) mentionnent l'existence d'une corrélation positive entre le rendement en grains et le cumul pluviométrique saisonnier. Ces mêmes auteurs observent par contre que le cumul de pluie hivernal est celui qui déterminait le plus le rendement en grains, sous conditions pluviales. Ils notent que les pluies printanières étaient relativement moins efficaces et moins importantes dans la détermination du niveau de rendement en grains (Cantero - Martinez et *al.*, 1995).

CONCLUSION

Les résultats de la présente étude indiquent que la valorisation des apports d'eau d'irrigation faits à différents stades après le tallage, est dépendante des conditions climatiques précédant et celles survenant après l'apport. Elle est aussi dépendante du génotype et de son degré de sensibilité à la variation des conditions de croissance du milieu. L'efficacité d'utilisation de l'eau pluviale plus celle des apports d'appoints varie de 3,2 à 14,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹ et le gain de rendement de 0 à 242,8% en valeur relative selon la variété, l'année et le stade d'apport. Les variétés améliorées, à cycle plus court, type Waha, répondent plus favorablement aux apports d'eau comparativement aux variétés à cycle plus long, type Mohammed Ben Bachir.

La pratique de l'irrigation d'appoint déficitaire sur des variétés à cycle relativement court, améliore significativement le rendement en grains. Le gain de rendement en grains est cependant variable, car trop dépendant des effets perçus par la plante suite aux événements climatiques intervenant en amont et en aval de la date d'apport d'eau et probablement de la quantité d'eau apportée elle-même. Le gain de rendement en grains relativement au témoin pluviale est le plus souvent négativement corrélé avec le cumul pluviométrique de la période octobre à février inclus et positivement corrélé avec les pluies reçues au mois de mai. La température hivernale affecte aussi significativement la réponse de la variété utilisée.

Les résultats indiquent qu'il est difficile dans le cadre de la pratique de l'irrigation d'appoint déficitaire de déterminer le stade végétatif qui valorise le plus l'apport d'eau. La pratique en elle même, faite au printemps, est cependant une source de gain de rendement en grains qui est plus conséquent lorsque deux apports, étalés dans le temps, sont réalisés comparativement à un seul apport.

Références Bibliographiques

- Anonyme. (1975). Méthodes d'analyses physiques et chimiques du sol 3^{eme} et 4^{eme} Année. *ITAA. Mostaganem*. 105 p.
- Baldy C. (1974). Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques, son influence sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. *Doc. Projet Céréale*, 152 p.
- Belaid A. & Moussaoui M. (1999). Le blé dur dans le monde: Production, commerce et effets attendus des récents changements économiques. *In: Séminaire régional sur l'amélioration du blé dur dans les régions arides de l'Asie de l'ouest et de l'Afrique du nord (WANA)*, Alger les 27-29 Novembre, 1999, 20 p.
- Bennani S., Ouattar S. & Ismaïli M. (1992). Modèle de quantification des déficits hydriques subis par des blés de différentes durées de cycle en climat méditerranéen sub-humide. *Cahiers Agricultures*, 1: 341-347.

Blum A. (1985). Photosynthesis and transpiration in leaves and ears of wheat and barley varieties. *J. Exp.Bot.*, 36: 432-440.

Blum A. & Pnuel Y. (1990). Physiological attributes associated with drought resistance of wheat cultivars in a Mediterranean environment. *Aust. J. Agric. Res.*, 41: 799-810.

Bonfil D., Mufradi I., Kliman S. & Asido S. (1999). Wheat grain yield and soil profile water distribution in a no-till arid environment. *Agron.J.*, 91: 368-373.

Bouthier A. & Bonnefoy M. (1993). Besoin en eau et valorisation de l'irrigation des céréales. Une pratique à adapter selon les sols et les espèces. *Doc. Optimum Eau-ITCF*, 7 p.

Bouzerzour H. & Oudina M. (1990). Association de certains caractères morphologiques du rendement grain chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) en conditions semi-arides. *Annales INA El-harrach*. 13: 157-167.

Bouzerzour H., Zerargui H. & Dekhili M. (1994). Relationships among duration of vegetative and grain filling periods, yield components and grain yield in durum wheat. *Awamia*, 75: 15-21.

Bouzerzour H., Benmahammed A., Benbelkacem A., Hazmoune T., Mimoun H., Bourmel S. & Mekhlouf A. (2000). Stabilité des performances et caractéristiques phéno-morphologiques de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) issues d'une sélection multilocale. In: *Proceedings du premier symposium International sur la filière blé-enjeux et stratégie*, Alger, 7-9 Février, 2000. P: 178-184.

Bouzerzour H., Benmahammed A., Benkharbache A. & Hassous A. (2002). Contribution des nouvelles obtentions à l'amélioration et à la stabilité du rendement d'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. *Revue Recherche Agronomique de l'INRAA*, 10: 45-58.

Cantero-Martinez C., Villas J.V., Ramagosa I. & Fereres E. (1995). Growth and yield responses of two contrasting cultivars in a Mediterranean environment. *Eur. J. Agron.*, 4: 317-326.

Ceccarelli S., Grando S. & Hamblin J. (1992). Relationships between barley grain yield measured in low and high yielding environments. *Euphytica*, 64: 49-58.

Chennafi H. (1996). Optimisation de l'apport d'appoint d'eau sur trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à différents stades végétatifs. Cas des hautes plaines Sétifiennes. *Thèse magister, INA El-Harrach*, 64 p.

Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. & Saci A. (2005a). Valorisation des apports d'appoint d'eau sur blé dur (*Triticum Durum* Desf.) en zone semi-aride: Effets variété et stade d'apport. In: *Proceedings du premier Séminaire international sur l'Environnement et ses Problèmes connexes <<SIEPC 2005>>*.

Chennafi H., Bouzerzour H. & Chenafi A. (2005b). L'irrigation déficitaire sur blé dur (*Triticum durum* Desf.) en milieu semi-aride. In *Proceedings du Premier Séminaire national sur la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau <<MEREAU>>*. Université de Batna 12-13 Décembre 2005. P: 66-68.

CIC. (2005). Division de l'analyse du marché. Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Bulletin bimensuel*, 18 (17).

Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. & Saci A. (2005c). L'optimisation des apports d'eau d'appoint sur des variétés contrastées de blé dur (*Triticum Durum* Desf.) en zone semi-aride In: *Proceedings du 3^{ème} Congrès Méditerranéen <<WATMED>>*, Marrakech, p: 54-59.

Cornet A. (1980). Observation sur la capacité de rétention, ses relations avec les valeurs du potentiel et la texture des sols sableux du nord du Sénégal. *Cahiers ORSTOM., série Biol.*, 42: 53-59.

Day A. D. & Intalap S. (1970). Some effects of soil moisture stress on the growth of wheat. *Agron.J.*, 62: 27-29.

Ehdaie B. (1995). Variation in water-use efficiency and its components in wheat: pot and field experiments. *Crop Sci.*, 35: 1617-1626.

Favrot J. (1983). Cartographie et caractérisation du comportement hydrique des sols. Définition, mesure, interprétation, application des paramètres utilisés en France. *INRAF*. Montpellier. 33 p.

Feyerherm A.M., Paulsen G. M. & Sebaugh J.L. (1984). Contribution of genetic improvement to recent wheat yield increases in the USA. *Agron J.*, 76: 985-988.

Fontès J., Airzpuru M., Carayon J.L., Larincq P., Guinko S. & Hien M. (1999). L'amélioration variétale et les autres actions contribuant à la sécurité alimentaire en Tunisie, en matière de céréales. *Sécheresse*, 10: 27-33.

Giunta F., Motzo R. & Deidda M. (1992). Effect of drought and yield components of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *Field Crop Research*, 33: 399-409.

Hadjichristodoulou A. (1987). The effects of optimum heading date and its stability on yield and consistency of performance of barley and durum wheat in dry areas. *J. Agric. Sci. Camb.*, 108: 599-608.

Hang A. N. & Miller D. E. (1983). Wheat development as affected by deficit and high frequency sprinkler irrigation. *Agron. J.*, 75: 234-239.

ITGC. (1994). Principales caractéristiques des variétés de céréales cultivées en Algérie. *Doc. Technique ITGC*, 72 p.

Kätterer T., Hansson A. & Andrén O. (1993). Wheat root and nitrogen dynamics-effects of daily irrigation and fertilisation. *J. Plant and soil*, 151: 21-30.

Kayyal H., Hamze A., Jarrah M. & Nachit M.M. (1993). Durum wheat production and quality in syria. *In: Seminar on Durum Wheat Quality in the Mediterranean Region. CIHAM, Options Méditerranéennes*. Zaragoza (Spain): 17-19 Nov: 127-132.

Kribaa M. (1992). Contribution à l'étude de l'irrigation d'appoint et de la fertilisation azotée du blé dur Waha en zone semi-aride. *Thèse de magister, INA El-Harach*, 103 p.

Mekhlouf A., Bouzerzour H, Benmouhammed A., Hadj Sahraoui A. & Harkati N. (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse*, 17: 507-13

Monneveux P. (1997). La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse: Espoirs et difficultés. *Sécheresse*, 8: 29-37.

Nicoullaud D., Dartouth R. & Odile D. (1995). Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de petite Beauce. *Etude et gestion des sols*, 2: 183-200.

Ollier C. & Poirée M. (1981). Irrigation, les réseaux d'irrigation théorie, technique et économie des arrosages. 5^{ème} Ed. *Erolles*. Paris, 503 p.

Oosterom V.E., Ceccarelli S. & Peacock J.M. (1993). Yield response of barley to rainfall and temperature in Mediterranean environments. *J. Agri. Sci.*, 121:307-313.

Oweis T., Pala M. & Ryan J. (1998). Stabilizing rainfed wheat yield with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediterranean climate. *Agron. J.*, 90: 672-681.

Oweis T. & Zhang H. (1998). Water use efficiency: index for optimizing supplement irrigation of wheat in water scarce areas. *J. Applied Irrigation Science*, 33: 321-336.

Perrier E R. (1988). Opportunities for the production using rainfall normally lost of cropping for temporal or spatial seasons. *ICRISAT. Drought research priorities for the dryland tropics*. Patancheru: Bidinger F R, Johansen C., 113-129.

Samarah N. (2005). Effects of drought stress on growth and yield of barley. *Agron. Sustain. Dev.*, 25: 145-149.

Sarr B., Diouf O., Diouf M. & Roy-Macauley H. (1999). Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal. *Sécheresse*, 10: 129-135.

Sepaskhah A.R., Azizian A. & Tavakkoli A.R. (2006). Optimal applied water and nitrogen for winter wheat under variable seasonal rainfall and planning scenarios for consequent crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 84: 113-122.

Steel G.D.S. & Torrie J.H. (1980). Principles and procedures of Statistics: a biometrical approach. *Ed. Mc Graw Hill Book Company*. NY. 633 p.

Statitcf. (1985). Logiciel de calculs statistiques, Version 3.5, *Institut Technique des Céréales et Fourrages (France)*.

Steiner J. L., Smith R., Meyer WS. & Adeney J. A. (1985). Water use, foliage temperature and yield of irrigated wheat in south-eastern Australia. *Agric. Res.*, 36:1-11.

Stewart B A. (1989). Conjunctive use of rainfall and Irrigation in semi-arid regions. *In Proceedings of an International Workshop on Soil, Crop, and Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone*. ICRITSAT, Indian, 107-115.

Tavakkoli A.R. & Oweis T. (2004). The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. *Agricultural Water Management*, 65: 225-236.

Turc L. (1978). Sécheresse du sol: Index physiques des réserves d'eau et signification agrologique des "déficits d'humidité" dans le sol. *Bull. B.R.G.M.*, 2: 197-202.

Van Der Boogaard R., Veneklaas E.J., Peacock J.M. & Lambres H. (1996). Yield and water use of wheat (*T.aestivum L.*) in a Mediterranean environment: cultivar differences and sowing density effects. *Plant and Soil*, 181: 251-262.

Verdier J. (1995). L'avenir de l'irrigation dans le monde et place de l'école française d'irrigation. *In: C.R. Acad. Agric.Fr.*, 81: 1-200.

Zhang H., Oweis T., Garab S. & Pala M. (1998). Water use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rainfed conditions and supplemental irrigation in a Mediterranean type environment. *Plant and Soil*, 201: 295-305.

Zhang B., Li F.M., Huang G., Cheng Z.Y. & Zhang Y. (2006). Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agricultural Water Management*, 76: 28-42.

Chapitre II

Evaluation du déficit climatique et de la
demande en eau du blé dur en
milieu semi-aride

CHAPITRE II- EVALUATION DU DEFICIT CLIMATIQUE ET DE LA DEMANDE EN EAU DU BLE DUR EN MILIEU SEMI-ARIDE

RESUME

L'étude, dont l'objectif est l'évaluation du déficit pluviométrique, a porté sur l'analyse d'une série de données climatiques journalières de 23 années, de la station météorologique Ain Sfiha, Sétif. L'approche décadaire du bilan climatique indique que le déficit s'étale sur plus de 9 mois. Seule la période hivernale permet la recharge du réservoir sol. Le déficit pluviométrique couvrant le cycle végétatif de la céréale varie de 60 et 754 mm avec une moyenne de 430 mm. Le déficit moyen par saison végétative est 112 mm pour la phase d'installation de la céréale (octobre - décembre), 17 mm pour la saison intermédiaire (janvier-février) et de 300 mm après la sortie de l'hiver (mars- mai). Le déficit annuel moyen est de 1278 mm.

La confrontation de ces éléments avec la demande en eau de la culture du blé dur représente un outil intéressant pour asseoir une bonne gestion technique et pratique des apports d'eau. L'estimation décadaire montre que les besoins de la culture du blé dur s'accroissent à partir de la première décennie de mars. Ces besoins sont de 46 mm au cours de la période de la fin du tallage au début de la montaison (mars - avril). Ils s'élèvent à 103 mm pour la période gonflement - épiaison. La demande en eau globale de la culture du blé dur est de 672 mm pour un cycle végétatif de la mi-novembre à la troisième décennie du mois de mai. Les périodes aux fortes demandes sont concomitantes à une offre limitante. Ces résultats suggèrent la nécessité des apports de quantités limitées d'eau au cours du cycle pour réduire des effets de la contrainte hydrique sur la culture du blé dur. Ils indiquent aussi que la période de végétation active est la plus soumise à la contrainte.

Mots clés- Déficit climatique décadaire - semi-aride – approche - irrigation déficitaire - besoins en eau- cycle végétatif.

2-1-INTRODUCTION

En milieu semi-aride, la variabilité du climat est la principale contrainte à laquelle est confrontée la céréaliculture. L'irrégularité des pluies associée à la forte demande climatique du milieu de production et à la simplification des pratiques culturales sont à l'origine de la faiblesse et de l'instabilité des rendements des céréales (Baldy, 1984; Giunta *et al.*, 1992; Tavakkoli et Oweis, 2004). La caractérisation du climat du milieu de production, est basée sur les notions variables telles que la demande climatique, le bilan climatique, le déficit climatique, le bilan hydrique et le déficit pluviométrique. Le terme de bilan climatique a été introduit par Bonneau et Soucier (1979). C'est la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, dite aussi déficit théorique ou climatique. Tuzet et Perrier (1998) utilisent la notion de bilan hydrique qu'ils estiment par la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration maximale. Ollier et Poirée (1981), par contre, évoquent le terme de déficit pluviométrique qu'ils définissent comme la différence entre l'évapotranspiration potentielle et la pluie.

Ces différentes notions sont illustrées par de simples formules qui introduisent d'une manière générale les termes de demande climatique ou d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de précipitation. Certains auteurs introduisent la notion de culture dans le contexte climatique pour définir le bilan climatique par les paramètres d'évapotranspiration. Ainsi, à travers les différentes définitions évoquées, les termes de bilan climatique prennent différentes dimensions, d'une échelle plus grande (climatique) à une dimension plus réduite correspondant à la parcelle (bilan hydrique).

La notion de bilan hydrique est importante à étudier et à analyser. C'est en fonction du bilan hydrique que s'évalue la quantité d'eau dont la plante a besoin au cours de son cycle végétatif. En effet, la teneur en eau de la plante varie entre 60 et 90% du poids frais. L'eau joue un rôle de transport des éléments nutritifs et de régulation thermique au niveau des feuilles. Chez les céréales, l'eau peut atteindre 95% du poids total de la plante qui est maximale à la floraison. Cette quantité représente l'eau de constitution et celle circulant dans les vaisseaux. L'eau de végétation ne fait que passer dans la plante et doit se

renouveler constamment. Elle représente jusqu'à 133 fois l'eau de constitution nécessaire à la formation de 1 kg de matière sèche (Ollier et Poirée, 1981).

Le calcul préalable des besoins en eau de la culture permet de cerner le contexte agropédoclimatique. Les besoins en eau d'une culture, en confort hydrique, représentent la hauteur d'eau nécessaire pour satisfaire l'évapotranspiration (Doorenbos et Pruit, 1976). Ils sont évalués à partir de la demande climatique du milieu de production et du coefficient cultural caractéristique de la culture, qui ajuste les besoins de la plante en fonction des stades végétatifs (Tiercelin, 1998). La demande climatique du milieu de production est représentée par la notion d'évapotranspiration potentielle climatique dite aussi référence climatique. Clément et Galand (1979) mentionnent que l'évapotranspiration potentielle est une référence climatique qui traduit l'incidence du climat sur le niveau de l'évapotranspiration de la culture.

L'évapotranspiration réelle (ET_c) est liée à la consommation en eau de la culture. Elle est fonction du stade végétatif, des conditions environnementales et des pratiques culturales appliquées (Doorenbos et Pruit, 1976). L'évapotranspiration réelle (ET_c) résulte du produit entre l'évapotranspiration de référence (ET_o) et le coefficient cultural (k_c): $ET_c = k_c \times ET_o$. (Tiercelin, 1998). Comme elle peut être déduite, selon Feng Kuo *et al.*, (2006), à partir de l'équation donnant le bilan hydrique: $ET_c = P + I - D - R + \Delta_s$; où P , I , D , R , et Δ_s représentent les éléments du bilan hydrique qui sont respectivement la pluie, l'irrigation, le drainage, le ruissellement et la variation du stock d'eau du sol.

L'étude du déficit climatique et le calcul des besoins en eau de la culture permettent de mieux cerner la gestion de l'eau en positionnant le cycle de la culture avec la période du déficit hydrique. Elle permet aussi d'identifier les périodes les plus critiques durant lesquelles la plante doit recevoir des apports d'appoint pour éviter les rendements nuls. Cette approche est très importante pour caractériser le contexte agropédoclimatique et analyser le comportement de la culture. Elle constitue une base pour la gestion de l'irrigation des cultures, surtout dans les situations où l'eau est peu abondante et la culture est économiquement non rentable sans apports d'appoints (Stewart, 1989; Perrier et

Salkini., 1991, Palla *et al.*, 2003). La présente étude se veut une approche d'évaluation du déficit climatique et d'estimation des besoins en eau de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) conduite sur les hauts plateaux Sétifiens.

2-2-Matériel et méthodes

L'étude du déficit climatique et de l'estimation des besoins en eau de la culture a été effectuée sur la base des données journalières, enregistrées par la Station de l'Office National de la Météorologique de Sétif sur une période climatique de 23 années. Le calcul du déficit climatique (D_c) décadaire est déterminé par la formule suivante: $D_c = \text{Pluie} - ET_p$ (1)

La méthode de Turc, mentionnée par Ollier et Poirée (1981) a été appliquée pour déterminer l'évapotranspiration potentielle décadaire (ET_p), dont le calcul est fait sur la base des valeurs de la température, la radiation solaire, l'ensoleillement et de l'humidité de l'air. La méthode de Turc donne des résultats satisfaisants sous climat méditerranéen (Anonyme, 1979; Ollier et Poirée, 1981). L'application de la formule de Turc est fonction de l'humidité relative de l'air. Dans le cas où l'humidité de l'air est supérieure à 50%, l' ET_p est déduite par:

$$ET_p = 0,13 \left(\frac{t}{t+15} \right) (RG+50) \quad (2)$$

Dans le cas où l'humidité de l'air est inférieure à 50%, la variante de la formule est:

$$ET_p = 0,13 \left(\frac{t}{t+15} \right) (RG + 50) [1 + (50 - HR)]/70 \quad (3)$$

Avec

t = la température moyenne de l'air, mesurée sous abri, (°C)

HR = l'humidité relative de l'air (%)

RG= le rayonnement global, estimé par: $RG \text{ (cal cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}) = Rg_0 (0,29 \cos \lambda + 0,52 \text{ h/H})$

h/H= l'insolation relative.

La demande en eau de la culture (ET_c) a été calculée par la formule: $ET_c = ET_p \times K_c$. Les valeurs K_c ont été puisées de la bibliographie des zones méditerranéennes similaires à la région des hauts plateaux (Doorenbos et Pruit, 1979; Guyot, 1999; Hamadi et Charfi, 2003). La quantité d'eau d'irrigation à apporter à la culture est l'équivalent du déficit agricole (D_a), elle est estimée par la formule mentionnée par Ollier et Poirée (1981): $D_a = ET_p - P - \Delta S$.

2-3- RESULTATS ET DISCUSSION

2-3-1- évaluation du déficit climatique moyen

L'analyse des résultats du bilan climatique décadaire (équation 1), de la période 1981- 2003, révèle une grande variabilité inter campagnes (Figure 1). Le déficit climatique moyen annuel des 23 campagnes agricoles étudiées est de 1278,0 mm. L'année 1983 est la plus déficitaire, avec une valeur moyenne de 1946,0 mm. La campagne 2002/03 a été relativement la plus humide avec un déficit climatique moyen de 558,0 mm (Figure 1A). Ces résultats corroborent ceux de Mendas et *al.*, (2003) qui rapportent des valeurs de même ordre de grandeur, avec déficit moyen annuel de 1235,0 mm, pour un cumul pluviométrique de 391,0 mm et 1626,0 mm d'évapotranspiration potentielle.

Bonneau et Souchier (1979), par contre, mentionnent la valeur du bilan climatique de 700,0 mm, alors que El-Jihad (2003) trouve une valeur moyenne de 917,0 mm. La grande variabilité du bilan climatique, sous climat aride et semi-aride, a été évoquée par Guyot (1999), et aussi par Ceballos et *al.*, (2004) qui signalent que la zone méditerranéenne est caractérisée par une grande variabilité interannuelle des précipitations associées à de fréquentes périodes sèches qui restent indépendantes du cumul total annuel des précipitations. Pour le cycle de la culture (octobre – mai), la moyenne du bilan climatique des 23 campagnes agricoles étudiées est de 430,0 mm. L'année 1996/97, avec une valeur moyenne de 754,0 mm, a été la plus sèche et celle de 2002/203 a été relativement la plus humide avec un bilan climatique moyen de 60,0 mm (Figure 1B).

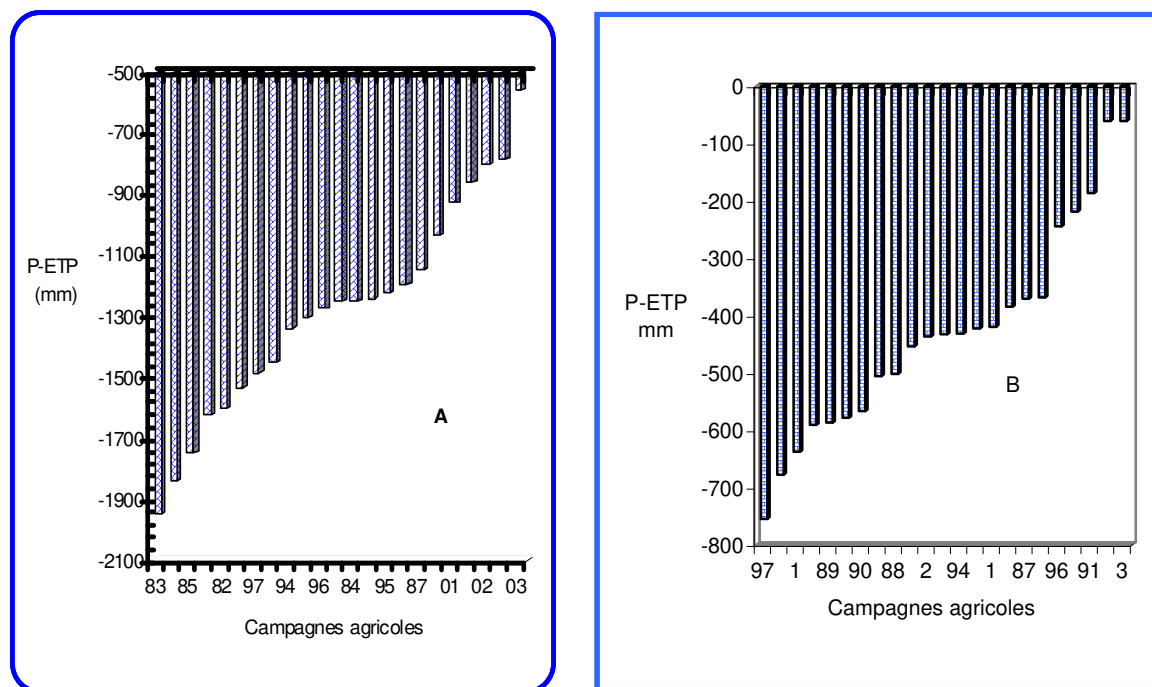


Figure -1- Variation du bilan climatique annuel (septembre – août, A) et du cycle de la culture de blé (Octobre–mai, B) des 23 campagnes agricoles étudiées

Le coefficient de corrélation entre les deux bilans climatiques (annuel et par cycle de culture) est de 0.977**. Il est hautement significatif, indiquant que le bilan est dû aux effets climatiques ayant lieu au cours de toute la campagne. La période estivale (juin à août) est cependant la plus prépondérante puisque sa contribution au bilan climatique annuel varie de 43 à 82%, selon l'année (Figure 1).

Les résultats de l'analyse fréquentielle des valeurs caractéristiques du bilan climatique décadaires du cycle de la plante montrent que le bilan est négatif en début et en fin du cycle. Il est équilibré, par contre, pendant la saison hivernale (Figure 2). C'est donc pendant cette période que la réserve en eau du sol se reconstitue. Ces résultats indiquent que la région des hauts plateaux est caractérisée par des déficits climatiques lors de la mise en place de la culture et au cours de la phase de croissance active de la céréale. Selon Tavakkoli et Oweis (2004), les valeurs fortement négatives du bilan climatique sont à l'origine des faibles rendements en grains des céréales en milieu semi-aride. L'irrigation déficitaire est préconisée pour atténuer l'effet de la contrainte hydrique.

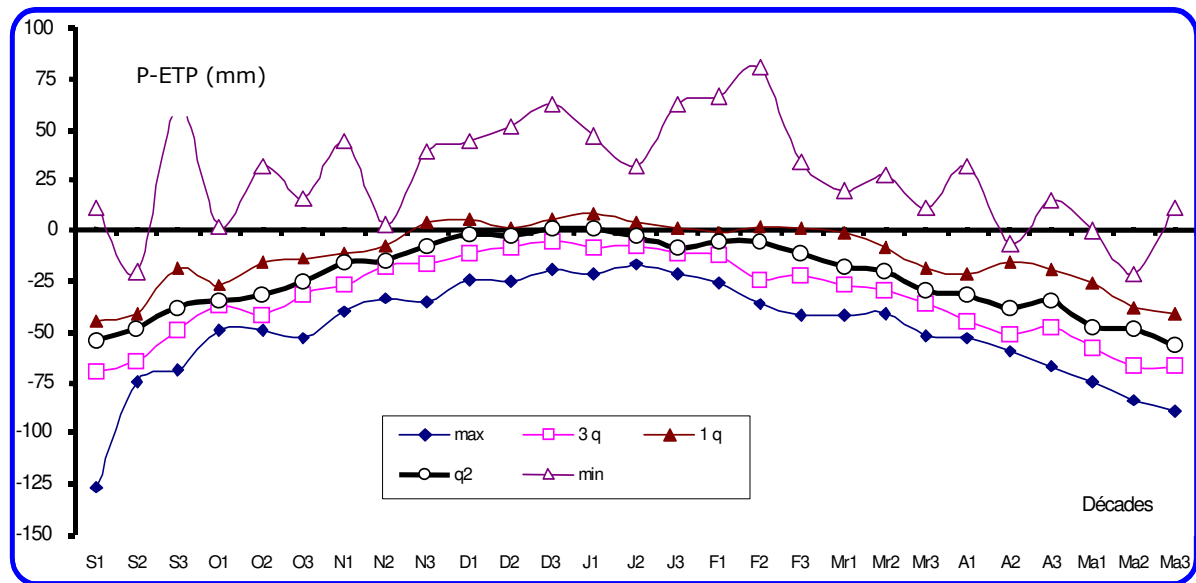


Figure -2- Valeurs décennales caractéristiques du bilan climatique du cycle de la culture de la céréale déterminé pour la période 1981- 2003

Les valeurs critiques seuils du déficit pluviométrique et la quantité de précipitation enregistrée déterminent le type de campagne agricole. L'année normale se caractérise par une valeur du bilan climatique du cycle de la culture de 432,0 mm et une valeur du bilan annuel de 1278,0 mm (Tableau 1). La moyenne pluriannuelle pluviométrique est de 391 mm, la médiane est de 403 mm (Tableau 1). L'année sèche se caractérise par un bilan climatique du cycle de 566,0 mm, et un bilan annuel de 1568,0 mm (Tableau 1, Figure 2). La valeur du cumul pluviométrique annuel correspondant au 3^{ème} quartile est de 320,0 mm. Cette valeur représente le seuil critique au dessous duquel l'année est dite sèche pour la culture du blé dur. Yacoubi et El Mourid (1998) rapportent la valeur pluviométrique de 290.0 mm comme la limite inférieure des années dites favorables à la céréaliculture en milieu semi-aride. L'année favorable correspond au 1^{er} quartile. Le niveau des précipitations est de 432,0 mm (Tableau 1, Figure 2). La valeur du déficit climatique annuel est de 1168,0 mm et celui correspondant au cycle de la plante est de 368,0 mm (Tableau 1, Figure 2).

Tableau –1-Précipitations et déficits climatiques (mm) de la période 1981/03

	Et	Moy	Min	Max	Med	3 ^{eme} Q	1 ^{er} Q
Pa	94	391	200	559	403	320	432
Pc	90	304,5	154	475	301	262	372
Da	344	1278	558	1946	1249	1568	1168
Dc	183	429,4	60	754	432	566	368

(Pa, Da)= (Précipitations, déficits) annuels, (Pc, Dc)= (précipitations, déficits) au cours du cycle de la culture (octobre – mai), Et= écart type, Q= quartile

Ces résultats indiquent que les valeurs annuelles des précipitations fluctuent entre 200,0 et 559,0 mm pour des bilans climatiques variant de 558,0 à 1946,0 mm (Tableau 1). La région des hauts plateaux se caractérise donc par des précipitations annuelles inférieures ou égales à 320,0 mm lors des années défavorables (valeur seuil du 3^{eme} quartile), et supérieures à 432,0 mm (valeur seuil du 1^{er} quartile) lors des années favorables (Tableau 1). Toute année dont la valeur des précipitations est inférieure à la valeur moyenne annuelle de 391,0 mm est considérée comme une année défavorable pour la production agricole.

Les campagnes agricoles sont caractérisées, d'une part, par le cumul de pluie reçu au cours du cycle de la culture, et d'autre part, par le cumul saisonnier. Ainsi, la typologie des différentes campagnes agricoles en fonction du déficit pluviométrique saisonnier est utile, vu que tout stress hydrique qui survient à une phase végétative donnée affecte la formation d'une des composantes du rendement et par conséquent affecte le rendement final. Le cycle de la céréale peut être subdivisé en trois phases correspondant à des saisons climatiques distinctes. La phase d'installation de la culture, d'octobre à décembre, correspond à la saison automnale. La phase tallage, de janvier à février, correspond à la saison hivernale et la phase de croissance active, de mars à mai, couvre la saison printanière. Les différentes campagnes agricoles sont caractérisées par le Seuil de Déficit Pluviométrique Saisonnier (SDPS) et la hauteur de Pluie reçue par Saison (PS).

Selon Caughlan (1987) une saison est dite déficitaire si son cumul pluviométrique est inférieur à son seuil de déficit pluviométrique ($PS < SDPS$). Le SDPS est lié au seuil de déficit pluviométrique annuel (SDPA) correspondant au

cycle de la culture, par la relation: $SDPS = SDPA \times R$, avec $R = \text{pluie saisonnière} / \text{pluie annuelle}$ (Caughlan, 1987; Yacoubi et El Mourid, 1998). Dans le cadre de la présente étude le SDPA correspond au 3^{ème} quartile et prend la valeur de 566,0 mm au cours du cycle de la culture (Tableaux 1 et 2).

Le cumul pluviométrique moyen correspondant au cycle de la culture est de 304,5 mm. Les cumuls pluviométriques moyens saisonniers sont de 116,8 mm pour la saison automnale, (38,4% du cumul du cycle), 75,0 mm pour la saison hivernale (24,6%) et 112,7 mm pour la saison du printemps (37,01%) (Tableau 2). Le cumul pluviométrique du cycle de la culture représente 78% du cumul annuel (304,5 vs 391 mm), en moyenne pour la période considérée par l'étude.

2-3-1-1- Seuil du déficit pluviométrique saisonnier

La valeur seuil du déficit pluviométrique de la campagne dit annuel (SDPa) correspondant au cycle de la culture pour la période 1981/2003 est de 566.0mm. Elle correspond à la valeur du 3^{ème} quartile. Les valeurs seuils du déficit pluviométrique saisonnier sont de $SDPS_1 = 566 \times 116,8/304,5 = 217.11$, pour la saison automnale; $SDPS_2 = 139.41$ pour la saison hivernale et $SDPS_3 = 209.49$ mm. La comparaison des valeurs des SDP aux PS indique que toutes les saisons sont classées déficitaires. La période d'installation de la culture, avec une hauteur de pluie de 116.8, reste inférieure à 217.11 mm; les phases de tallage, avec 75 mm, et de croissance, avec 113 mm, demeurent aussi déficitaires et inférieures respectivement aux valeurs seuils de 139,41 et 209,5. Le déficit pluviométrique moyen du cycle est de 429,5 mm pour la période 1981-2003 (Tableau 2).

Ces résultats montrent qu'au cours de la période 1981-2003, 12 campagnes sur 23 sont classées comme étant sèches. Elles se caractérisent par une pluviométrie moyenne de 235,8 mm. Elles accusent un déficit pluviométrique moyen de 534,2 mm (Tableau 2). Sur la base de la valeur SDPC, toutes les campagnes recevant moins de 566,0 mm sont classées déficitaires. 73,9% des campagnes analysées ont ainsi reçu moins de la moitié des besoins théoriques en eau nécessaires à la culture du blé (Tableau 2). Ces résultats

Tableau-2-Valeurs des déficits pluviométriques et des hauteurs pluviométriques saisonnières et des seuils de déficit pluviométriques (SDP) et seuils pluviométriques critiques (SP)

Camp	P-ETP o-d	P-ETP j-f	P-ETP m-m	P-ETP o-mai	Ps1 o-d	Ps2 J-F	Ps3 m-m	P.cycle o-m
81	-107	-58	-413	-578	119	34	62	215
82	-245	24	-211	-432	93	124	213	430
83	-102	-88	-400	-590	134	21	61	216
84	-191	92	-323	-422	71	183	96	350
85	-101	-48	-235	-384	222	66	187	475
86	-156	-26	-271	-453	101	73	127	301
87	-21	7	-356	-370	147	94	73	314
88	-80	-29	-392	-501	101	36	136	273
89	-129	-77	-380	-586	176	58	138	372
90	-164	-97	-305	-566	50	39	193	282
91	-127	31	-90	-186	131	85	99	315
92	-1	3	-62	-60	138	64	172	374
93	-39	20	-199	-218	135	74	96	305
94	-94	14	-351	-431	99	58	48	205
95	-88	2	-282	-368	74	89	109	272
96	-80	94	-258	-244	85	154	170	409
97	-217	-84	-453	-754	50	42	62	154
98	-101	-89	-315	-505	158	48	162	368
99	-168	-18	-491	-677	88	81	32	201
0	-112	-130	-395	-637	155	12	112	279
1	-138	12	-293	-419	121	99	42	262
2	-120	-46	-270	-436	60	47	62	169
3	4	93	-157	-60	179	145	139	463
ET	62,8	62,5	108,8	182,5	44,3	43,3	53,0	90,2
Moy	-112,0	-17,3	-300,1	-429,4	116,8	75,0	112,7	304,5
Min	4	94	-62	-60	50	12	32	154
Max	-245	-130	-491	-754	222	183	213	475
Med	-107	-18	-305	-432	119	66	109	301
75%	-138	-58	-380	-566	88	47	62	262
25%	-80	20	-235	-368	147	94	162	372
SDPs	217,1	139,41	209,5	566	217,11	139,41	209,5	566
SPs					100,5	64,53	96,97	277,1

SDPs= Seuil de déficit pluviométrique saisonnier, SPs= Seuil de pluviométrie critique saisonnier, Ps= Hauteur de pluie au cours des saisons d'installation, intermédiaire ou de croissance, Pc= Pluie au cours du cycle de la plante. Moy, Min, Max, représentent respectivement la valeur moyenne, minimale et maximale, P-ETP= Déficit climatique (mm)

expliquent, en partie, pourquoi la culture de blé dur a du mal à exprimer son potentiel de production et pourquoi sa production est sujette à de grandes variations sur les hauts plateaux. Ils indiquent aussi que les saisons automnale et printanière sont celles qui subissent le plus le déficit hydrique comparativement à la demande climatique du milieu de production. Selon Marie

et *al.*, (1995), dans les milieux où le déficit de pression de la vapeur d'eau de l'air est élevé, l'évapotranspiration réelle demeure très réduite et représente moins de 50% de la valeur de l'évapotranspiration potentielle.

2-3-1-2- Seuil de pluviométrie critique

La même démarche est adoptée pour la détermination du seuil pluviométrique critique saisonnier (SPS): $SPS = Q3 \times R$. Q3 est la valeur des précipitations correspondant au 3^{ème} quartile et qui a pour valeur 262 mm pour la période d'octobre à mai (Tableau 1). R est le ratio du cumul des pluies saisonnier sur celui du cycle ($R = PS/PC$). Les valeurs prises par le seuil de pluviométrie critique pour les trois saisons dans l'ordre automnale, hivernale, printanière sont de 100.5, 64.53 et 97.0 mm. Ainsi au cours de la phase d'installation de la culture, 9 campagnes ont un cumul pluviométrique inférieur au cumul seuil attendu. C'est le cas aussi pour la saison hivernale où 10 campagnes sont classées déficitaires, et 8 campagnes déficitaires pour la saison printanière (Tableau 2). Yacoubi et El-Mourid (1998) rapportent les valeurs seuils de pluviométrie saisonnière critique de 119.3, 89.2 et 86.1 mm pour les trois saisons dans l'ordre. Les résultats indiquent que 18 campagnes sur 23 présentent au moins une saison dont le cumul pluviométrique est inférieur au seuil pluviométrique critique saisonnier.

Ces résultats, comme ceux du déficit climatique, indiquent que la région se caractérise par la faiblesse de la pluviométrie tout le long du cycle de la plante, avec des déficits plus prononcés lors des phases de l'installation et de la croissance active de la culture. Dans ce contexte, l'utilisation de variétés qui s'adaptent à des zones caractérisées par un climat fortement variable induisant un déficit climatique sévère qui peut se positionner sur tous les stades végétatifs avec des intensités plus grandes en fin de cycle, est très recommandée. Tewelde et *al.*, (2006) les cultivars de blé caractérisés par une épiaison précoce sont plus productifs que ceux à épiaison tardive. La gestion, à travers l'itinéraire technique notamment les dates et densités de semis et la réduction de la concurrence des plantes adventices, permet d'économiser de l'eau pour la seule utilisation de la plante cultivée. Hatfied et *al.*, (2001) considèrent que la gestion des pratiques

relatives au sol, à la plante et à la nutrition, améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau de 15 à 40%. Bootsma et *al.*, (1996) rapportent que le travail minimum du sol et le contrôle chimique des mauvaises herbes sont des pratiques adoptées pour réduire des effets de la sécheresse. Les systèmes de labour, le précédent cultural et la fertilisation azotée améliorent l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture du blé (Lopez-Bellido et *al.*, 2007).

L'introduction de la jachère comme précédent cultural de la céréale est acceptée avec ce souci d'augmenter l'efficacité d'utilisation des eaux pluviales par la plante cultivée (Klein et *al.*, 2002). Ces auteurs rapportent que la jachère emmagasine, pour la culture de blé qui suit, l'équivalent de 60,0 mm de pluie dans l'horizon de 0 - 120 cm du profil cultural. Bootsma et *al.*, (1996) rapportent un stock de 50,0 mm pour une jachère d'été. La gestion agronomique, technique et technologique contribue donc à l'amélioration de la productivité de l'eau dans les milieux semi-arides. En agriculture pluviale, l'efficacité d'utilisation de l'eau est améliorée de 50% par la gestion agronomique (Turner, 2004). Le souci d'améliorer la capacité du sol à emmagasiner l'eau suite à l'accumulation des résidus de matière sèche en surface associée à la notion d'agriculture de conservation et au semis direct sous couverture végétale entre aussi dans la stratégie de mieux gérer l'eau reçue pour assurer la durabilité du système (Mrabet et *al.*, 2002).

Dans la région des hauts plateaux, la jachère travaillée tôt est considérée comme étant une méthode culturale favorable à l'établissement et le maintien d'un bon état structural sous le système de rotation céréale-jachère (Kribaa et *al.*, 2001). Le recours à l'irrigation d'appoint s'avère souvent indispensable pour stabiliser la production à un seuil acceptable relativement à la demande nationale (Chennafi, 1996). En effet, sous ces conditions, l'apport de quantités limitées d'eau devient incontestable et la pratique d'une irrigation déficitaire est préconisée pour atténuer l'effet de la contrainte hydrique et réaliser ainsi des rendements satisfaisants.

2-3-2- Besoins en eau de la culture du blé dur

L'analyse des résultats montre que les besoins en eau de la culture du blé dur sur les hauts plateaux, augmentent à partir de la première décennie du mois de mars. Pour les seuls mois de mars et d'avril, l'évapotranspiration réelle correspondant à la quantité d'eau nécessaire à la culture du blé, atteint les 276,0 mm (Figure 3, Tableau 3).

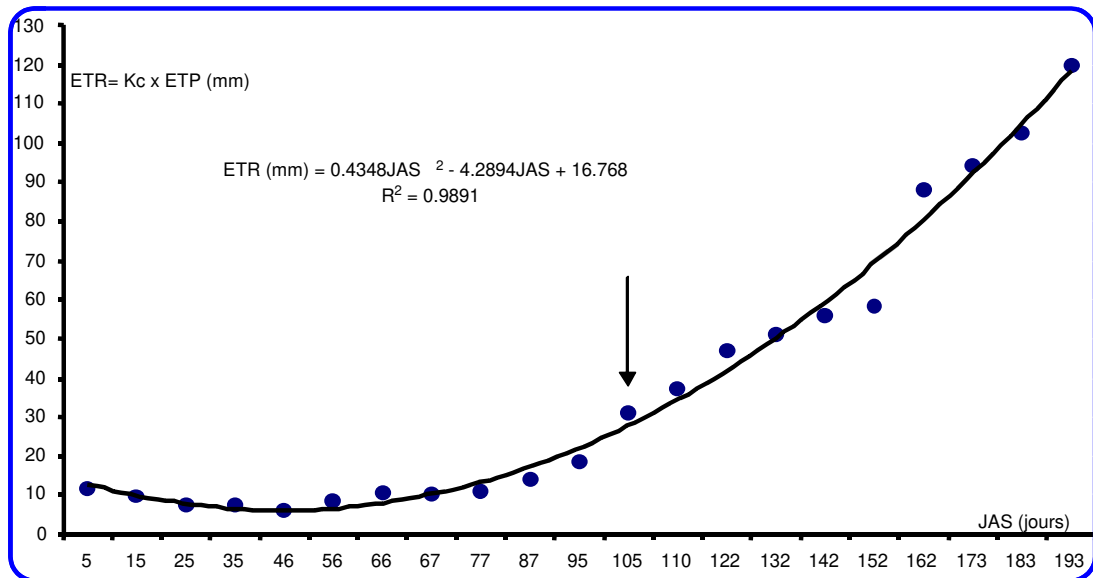


Figure -3- Evolution de l'ETR de la culture du blé dur sur les hauts plateaux

Le déficit en valeur de l'évapotranspiration réelle représente la quantité d'eau réellement évaporée par la plante, elle dépend du niveau de l'évapotranspiration potentielle, de l'humidité du sol et de la régulation stomatique (Tuzet et Perrier, 1998). Dans la présente étude, les valeurs du coefficient cultural (K_c) retenues sont 0,5 pour la phase "initiale", 1.2 pour la phase "stade 2-3 nœuds", 1.5 pour la phase gonflement – épiaison + 15 jours et 0,5 la période de remplissage (Doorenbos et Pruit, 1979; Hamadi et Charfi, 2003). La valeur maximale du K_c est atteinte à l'épiaison.

Tableau -3- Valeurs décennales moyennes des précipitations, de l'ETP, l'ETR et du déficit (P-ETR) au cours du cycle de la culture du blé pour la période 1981-2003

Mois	Décade	P	ETP	kc	ETPxkc	P-ETR
O	1	15	46	0,5	23	-8
O	2	10	40	0,5	20	-9
O	3	11	35	0,5	18	-7
N	1	14	28	0,5	14	0
N	2	9	23	0,5	11	-2
N	3	12	20	0,5	10	2
D	1	16	15	0,5	8	9
D	2	13	15	0,5	8	5
D	3	17	13	0,5	6	11
J	1	15	12	0,7	8	6
J	2	12	15	0,7	11	1
J	3	11	14	0,7	10	1
F	1	14	16	0,7	11	3
F	2	13	20	0,7	14	-1
F	3	6	27	0,7	19	-12
M	1	11	26	1,2	31	-20
M	2	12	31	1,2	37	-25
M	3	10	36	1,2	43	-34
A	1	11	43	1,2	51	-40
A	2	9	46	1,2	56	-47
A	3	15	49	1,2	58	-43
M	1	14	59	1,5	88	-74
M	2	14	63	1,5	94	-80
M	3	17	68	1,5	103	-85
Cycle	Oct-mai	302	760	20	752	-450

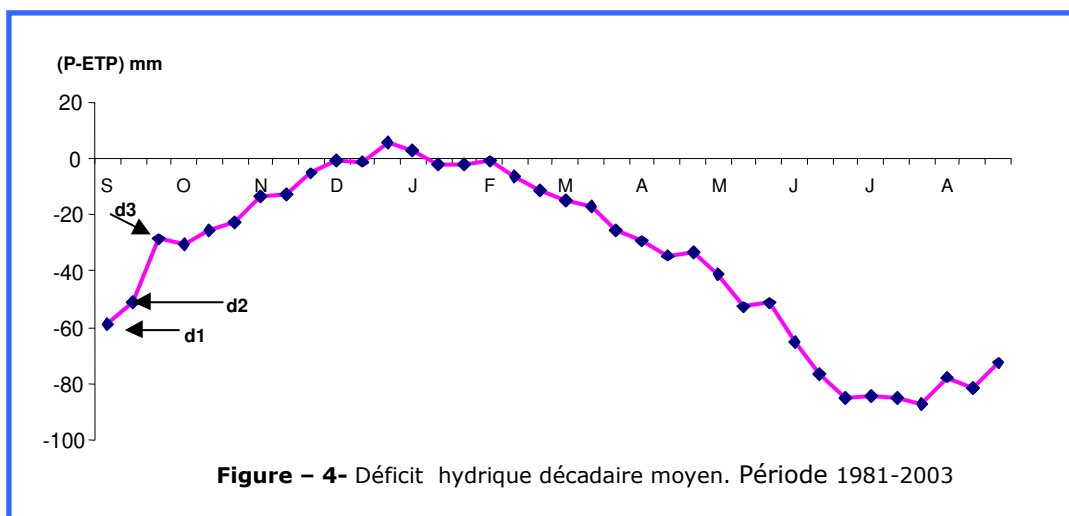
Les résultats de la présente étude indiquent que les besoins en eau les plus élevés sont observés dès la 1^{ère} décennie de mai. A la 3^{ème} décennie de mai, le cumul des besoins est de 666 mm. De la 1^{ère} décennie d'avril à la 3^{ème} de mai, les besoins sont 450 mm (Tableau 3). Ollier et Poirée (1981) mentionnent que les besoins du blé d'Afrique du Nord s'élèvent à 900 mm. Eliard (1974) rapporte par contre que les besoins en eau du blé sont de 450 mm et que la période critique se situe à 15 jours avant et 10 jours après l'épiaison. Chennafi (1996) note que les besoins en eau de la culture du blé dur dans les conditions des hauts plateaux sont de 608 mm; alors que Baldy (1974) mentionne les valeurs de 450 à 600

mm. Les résultats de la présente étude montrent que la culture du blé dur est exigeante en eau. La moyenne décadaire aux stades tallage et 2 noeuds est de 55 mm (avril). La consommation s'élève à 103 mm au stade épiaison- floraison (Tableau 3). Chez les céréales Clément et Galand (1981) indiquent que la consommation en eau après l'épiaison représente la moitié de la quantité nécessaire au cours du cycle complet.

Les conséquences sur le rendement sont variables selon le degré et la durée du manque d'eau et des capacités d'ajustement de la plante stressée (Baldy, 1974). Les conditions climatiques des hauts plateaux sont très limitantes de point de vue eau. En plus le pouvoir évaporant de l'air est très élevé, et a pour conséquence selon Jouve (1984) de réduire de l'efficacité d'utilisation de l'eau. Chennafi *et al.*, (2005) montrent en effet que l'efficacité d'utilisation de l'eau varie de 3,2 à 14 kg mm⁻¹ ha⁻¹ selon les conditions climatiques, la variété et surtout le stade végétatif de l'apport d'eau. Pereira *et al.*, (1998) mentionnent que la notion de besoins en eau est à la base de la gestion des apports en eau d'irrigation. La détermination des besoins en eau permet de mieux gérer l'apport de quantités limitées d'eau pour améliorer le potentiel de production de la céréale en milieu semi-aride.

La complexité de l'environnement semi-aride des hauts plateaux, avec ses caractéristiques de sols, de climat et de la gestion actuelle de ce potentiel naturel, nécessite une attention particulière. L'élément principal est comment raisonner une éventuelle stratégie de mise en place de la culture de céréale et celle du blé dur en particulier. La confrontation du déficit climatique et des besoins en eau de la culture à travers la présente étude, relève deux aspects: (1) un déficit climatique aigu présent quelque soit l'année, sur au moins une phase végétative et qui garde le potentiel de pénaliser la production, (2) la culture du blé dur est très exigeante en eau, surtout au cours de la période de croissance, alors que l'eau est rare en cette période. Ces éléments nécessitent une gestion particulière de la culture. Le choix d'un cycle de culture relativement plus court permet d'échapper à une forte demande climatique en eau associée à une faible productivité de l'eau. A cet effet, un cycle qui s'étale de la troisième décennie de novembre à la fin du mois de mai est un bon compromis pour la gestion des quantités d'eau limitées.

L'approche du déficit hydrique décadaire indique que seule la période hivernale qui s'étend de la première décade de décembre à la seconde du mois de février recharge le profil du sol en humidité (Figure 4). Le reste du cycle de la plante est soumis à un déficit hydrique, plus ou moins intense. Le stock en eau du sol, des premiers horizons accessibles aux racines, baisse pratiquement à partir de la première décade de mars. Le déficit hydrique décadaire agricole (D_a) représente les besoins en eau d'irrigation (IWR) de la culture. Les besoins en eau d'irrigation (IWR) représentent la hauteur d'eau nette à apporter à la culture pour satisfaire ses besoins spécifiques (Pereira *et al.*, 1998). D_a est estimé selon par la formule: $D_a = kc ETP - P$. (4)



La période des semis, dans la région des hauts plateaux, est marquée par un stock d'eau du sol négligeable. Cette période est en effet précédée par une longue période sèche au bilan climatique négatif. Le semis précoce est favorisé parce qu'il permet à la culture d'éviter la sécheresse de fin de cycle, caractéristique des milieux semi-arides. Les valeurs décadaires des besoins en eau d'irrigation sont données au tableau 3. De la troisième décade de novembre à celle du mois de mai, le cumul des besoins d'irrigation (équation 4) sont de 423,0 mm (Tableau 3). En situation de confort, la culture doit puiser dans le réservoir sol ayant une humidité au dessus du point de flétrissement. Pour un enracinement de 35 cm, au stade 2 noeuds, ceci est l'équivalent d'une dose de

614 m³ ha⁻¹. Au stade épiaison, la profondeur d'enracinement est de 45 cm, la dose à apporter est 79 mm et dans les conditions limites d'humidité (point de danger), elle est de 50,6 mm.

2-3- 3- Relations entre le rendement en grains du blé dur, le déficit hydrique et le cumul pluviométrique saisonniers de la période 1981-2003

L'étude conjointe du déficit hydrique et besoins en eau d'irrigation de la culture du blé en milieu semi-aride méritent d'être reliée avec l'analyse du rendement grain obtenu au cours des différentes campagnes étudiées. L'effet du déficit hydrique et du cumul pluviométrique saisonniers sur la production en grains a été mesuré par l'analyse de la régression progressive. Cette méthode permet d'ajuster le rendement en grains, qui est la variable expliquée en fonction du déficit et de la pluie saisonniers, paramètres explicatifs caractérisant le contexte climatique des 23 campagnes agricoles étudiées. L'analyse relève l'équation de régression multiple suivante:

$$\mathbf{RDT = - 0,0156 D_1 - 0,0057 D_c + 0,0706 P_3 - 0,0223 P_c + 14,69}$$
$$\mathbf{(R^2\text{multiple} = 41,1\%)} \quad (5)$$

avec:

RDT= Rendement en grain (q ha⁻¹),

D₁= déficit hydrique automnale (mm),

D_c= déficit hydrique du cycle (mm),

P₃ = pluviométrie printanière (mm) et

P_c= pluie du cycle (mm).

La valeur du coefficient de détermination (R²) indique que 41,1% de la variabilité du rendement est expliquée par la variation du déficit hydrique et de la pluviométrie saisonniers. La contribution de ces variables est significative au seuil de 5% (Tableau 4). La part de la variation du rendement en grains, expliquée par le facteur hydrique, trouvée dans la présente étude, est proche de celle rapportée par Barakat et Handoufe (1998) qui mentionnent la valeur de 35,0%. Les 59% de la variabilité restante trouvent leur explication dans la variation d'autres paramètres environnementaux dont notamment la variation de

la température, celles de la nature du sol et du matériel végétal utilisé et leur interaction avec le facteur eau.

Tableau -4- Régression multiple du rendement en grain du blé dur sur la pluviométrie et le déficit hydrique saisonniers de la période 1981-2003

Paramètres	b	Et	constante	R ² _{mult}
D ₁	-0,01560	± 0,0180	14,69	0,4113
D _c	-0,00572	± 0,0073		
P ₃	0,07063	± 0,0266		
P _c	-0,02235	± 0,0180		

(D₁, D_c)= déficit (automnale, cycle), (p₃, p_c)= pluie (printanière, cycle)

L'introduction des variables relatives au déficit hydrique automnal et celui du cycle de la culture, en premier lieu, indique que le manque d'eau est le facteur le plus limitant de la production du blé dur obtenue au cours des 23 campagnes agricoles étudiées. Le déficit hydrique automnal a l'effet le plus important puisque pour 1 mm d'eau manquant, lors de la mise en place de la culture, le rendement en gain chute de 1,56 kg ha⁻¹ (équation 5), dans la plage des valeurs caractéristiques de la période étudiée et qui varient de - 245 à 4 mm de déficit automnal. Ceci traduit les conséquences de l'intensité de la sécheresse lors de la mise en place de la culture du blé.

Selon Zhang et *al.*, (2004) et Ilbeyi et *al.*, (2006), le déficit hydrique au semis affecte d'une manière substantielle le rendement en grain. Pour réduire de l'effet du déficit hydrique précoce, des apports d'eau limités au semis se montrent souvent efficace (Cheng et Guo, 1996; Karou et *al.*, 1998; Li Feng-Min et *al.*, 2001a). L'eau apportée au semis améliore surtout le développement racinaire et donc l'installation de la culture qui affronte mieux le froid hivernal (Li Feng-Min et *al.*, 2001b). En outre, l'analyse des résultats de la présente indiquent qu'un mm de déficit hydrique, comptabilisé sur le cycle entier de la culture, en plus du mm de déficit hydrique enregistré lors de la saison

automnale, affecte le rendement en grain de $0,57 \text{ kg ha}^{-1}$, dans la plage des valeurs caractéristiques de la période étudiée et qui varient de -754 à -60mm .

Le cumul pluviométrique printanier a un effet significatif positif sur le rendement en grain. Pour chaque millimètre de pluie, reçu au printemps, le rendement augmente de $7,6 \text{ kg ha}^{-1}$, dans la plage des valeurs caractéristiques de la période étudiée qui varient de 30 à 213 mm . Le cumul pluviométrique du cycle de la culture a, par contre, un effet négative sur le rendement en grain, effet estimé à $-2,23 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ d'eau de pluie, dans la plage des valeurs caractéristiques de la période étudiée qui varient de 154 à 475 mm de pluie.

Baldy (1986) mentionne que la période active de la végétation débute avec l'élévation de la température de l'air et du sol, ce qui permet de valoriser l'eau stockée dans le sol et celle reçue lors de cette période printanière. Oweis et *al.*, (2000) rapportent une corrélation positive et significative entre le rendement en grain et l'évapotranspiration post- anthèse. La disponibilité de l'eau lors de la période allant de la montaison à l'épiaison, a une grande importance sur le développement et la formation du rendement en grain, suite à la grande sensibilité de ces stades au stress hydrique (Zi-Zhen et *al.*, 2004; Sezen et Yazar, 2006). Les résultats de la présente étude corroborent ceux de Pavloani et Vazquez (1984) qui trouvent une corrélation très étroite entre le rendement et les pluies de printemps. Scian (2004) évoque un coefficient de corrélation entre le rendement en grain et le cumul pluviométrique au stade épiaison de $0,67$.

Les résultats de la présente étude montrent cependant que le rendement en grain du blé dur répond peu aux cumuls pluviométriques dépassant le seuil de 368 mm (Tableau 5). Cette valeur seuil du cumul représente $77,4\%$ de la valeur maximale du cycle. Ces résultats coïncident avec ceux de Kang et *al.*, (2002) qui rapportent une valeur seuil de $88,0\%$ correspondant à un cumul pluviométrique de 460 mm . Zhang et *al.*, (1998) notent qu'en conditions pluviales, 44% de l'évapotranspiration de la culture du blé sont perdus à partir de la surface du sol. Le cumul pluviométrique négativement corrélé avec le rendement peut être aussi justifié par une forte teneur en eau dans le sol qui n'est pas utilisée d'une manière rationnelle par la culture, traduisant un excès en eau non utilisable par la plante (Kang et *al.* 2002; Kumar et khepar, 1987).

Tableau -5-Le rendement observé en fonction du déficit et pluie saisonniers et rendement attendu pour un apport d'eau de 50 mm au printemps de la période 1981/2003

Camp	D1	Dc	Dc.pr	P3	P3pr	Pc	Pc.pr	Rdt.obs	Rdt.pr	Rdt.pr - Rdt.obs
81	-107	-578	-528	62	112	215	265	8	12,0	4,0
82	-245	-432	-382	213	263	430	480	12	16,5	4,5
83	-102	-590	-540	61	111	216	266	6,7	11,9	5,2
84	-191	-422	-372	96	146	350	400	8,6	11,0	2,4
85	-101	-384	-334	187	237	475	525	6,8	16,2	9,4
86	-156	-453	-403	127	177	301	351	14	14,6	0,6
87	-21	-370	-320	73	123	314	364	7,8	13,1	5,3
88	-80	-501	-451	136	186	273	323	15,2	16,8	1,6
89	-129	-586	-536	138	188	372	422	15	13,5	-1,5
90	-164	-566	-516	193	243	282	332	10,8	18,9	8,1
91	-127	-186	-136	99	149	315	365	14,1	14,3	0,2
92	-1	-60	-10	172	222	374	424	22	20,8	-1,2
93	-39	-218	-168	96	146	305	355	13	15,5	2,5
94	-94	-431	-381	48	98	205	255	10,5	12,3	1,8
95	-88	-368	-318	109	159	272	322	12	15,5	3,5
96	-80	-244	-194	170	220	409	459	15,6	17,6	2,0
97	-217	-754	-704	62	112	154	204	11,6	10,6	-1,0
98	-101	-505	-455	162	212	368	418	23,5	16,1	-7,4
99	-168	-677	-627	32	82	201	251	6,3	8,7	2,4
0	-112	-637	-587	112	162	279	329	8,8	13,7	4,9
1	-138	-419	-369	42	92	262	312	6,5	10,0	3,5
2	-120	-436	-386	62	112	169	219	6,98	13,6	6,7
3	4	-60	-10	139	189	463	513	12	16,6	4,6
Moy	-112	-429,4	-379,4	112,7	162,7	304,5	354,5	11,6	14,3	2,7

Camp= Campagnes agricoles, (D1, Dc)= Déficit (automnale, cycle) en mm, (Rdt.obs, Rdt.pr)= Rendement (observé, prédit) en q ha⁻¹, (P3, Pc)= Pluie (printanière, cycle) mm

Une quantité importante de pluies est souvent enregistrée en des périodes du cycle où la plante n'exige pas beaucoup d'eau (cas du début du cycle). L'analyse de la répartition des quantités de pluie enregistrées au cours du cycle indique que 38.4% des pluies tombent lors de la période de mise en place de la culture et 24.6% au cours de l'hiver. 63% du total des pluies sont enregistrées en période où la végétation n'est pas active suite aux effets des basses

températures. Dans la présente étude, le rendement grain varie de 6,3 à 23,5 q ha⁻¹ pour un cumul de pluie variant de 154 à 475 mm. Le rendement en grain minimal de 6,3 q ha⁻¹ a été obtenu avec un cumul de pluie de 201 mm. En conditions méditerranéennes, Zhang et Oweis (1999) mentionnent que la valeur seuil minimale de pluie nécessaire à la formation du rendement en grain est de 156 mm.

Tenant compte du modèle de prévision du rendement en grain en fonction des paramètres climatiques étudiés, l'apport d'une quantité d'eau de 50 mm juste avant le stade épiaison améliore le cumul pluviométrique du cycle, celui du printemps et réduit du déficit hydrique global. La prévision des rendements en grain, sous un tel scénario, conduit à l'augmentation substantielle des rendements attendus (Figure 5). Zhang et *al.*, (1998) mentionnent que sous climat méditerranéen, l'irrigation de complément faite en post-anthèse augmente significativement l'utilisation de l'eau, la transpiration, la matière sèche et le rendement en grain.

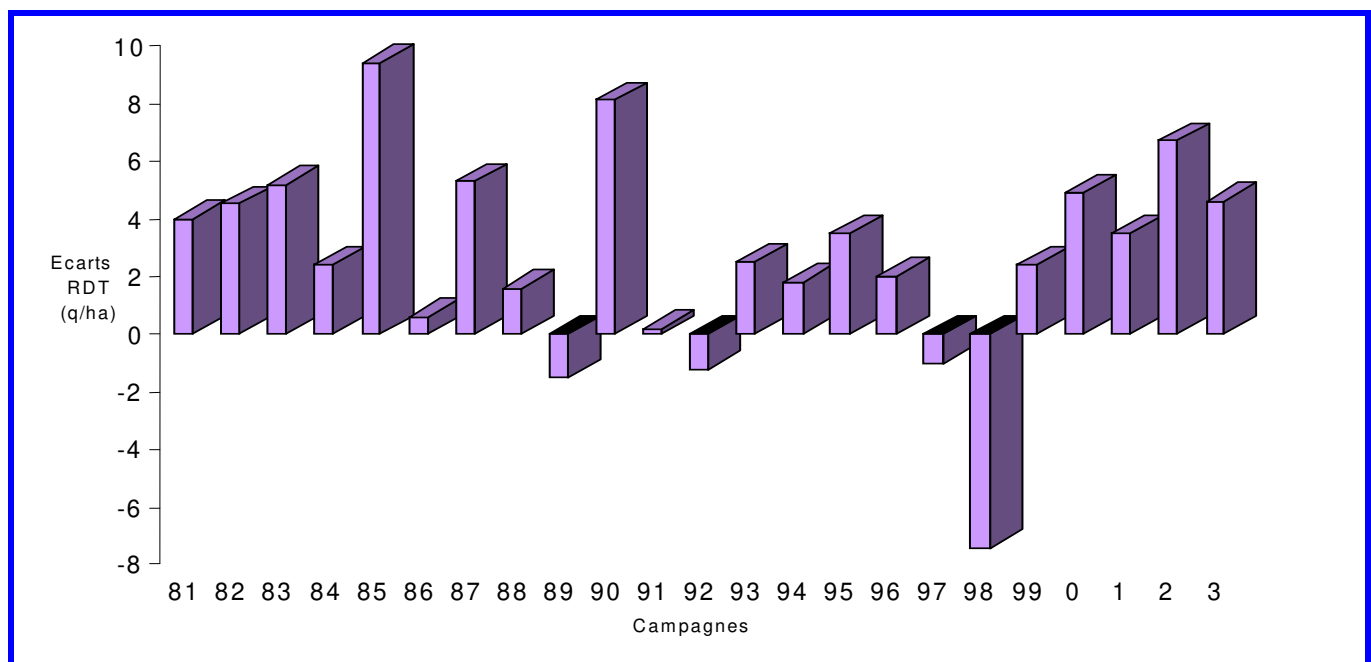


Figure-5- Ecart de rendement en grain prévisibles suite à une irrigation de Complément au printemps de 50 mm

L'efficacité d'utilisation de l'eau est dépendante non seulement de la quantité d'eau apportée mais aussi d'autres facteurs environnementaux comme la température, le matériel végétal et les techniques culturales appliquées, dont il faut tenir compte pour une meilleure gestion des apports d'eau sur la culture du blé en conditions semi-arides des hauts plateaux. Les résultats de la présente étude mettent en relief l'effet du facteur eau en interaction avec les autres paramètres environnementaux sur la production, suggérant d'asseoir une gestion d'apports d'eau limités associés à l'orientation des pratiques culturales et au choix du matériel végétal prédisposé à valoriser l'eau.

CONCLUSION

L'étude montre un déficit climatique localisé au semis et à la sortie de l'hiver. Les besoins moyens de la culture de blé dur varient de 31 à 103 mm par décennie pour les périodes mars - à fin mai. La région est confrontée à un déficit climatique sévère dès le début de mars, à partir duquel la demande en eau devient importante. La valeur moyenne décennale du déficit climatique atteint 45 mm en mars et 83 mm en mai. La valeur moyenne annuelle du déficit hydrique est de 1278,0 mm, pouvant atteindre des maxima de 1946 mm. L' ET_c de la culture du blé est de 666 mm. Les besoins d'irrigation (P-ETR) sont estimés à 450 mm en année moyenne. En année sèche, le déficit hydrique est de 566 mm. Les campagnes défavorables se caractérisent par des précipitations inférieures à 262 mm et représentent près de 50% (12 campagnes sur 23), ce qui représente près de 50% des besoins de la culture. Les variables climatiques déduites expliquent 41,1% de la variation des rendements en grain enregistrés sur le site expérimental. Ces résultats mettent en relief l'importance de la gestion de l'eau dans ce milieu. L'apport de petites quantités d'eau au cours des stades critiques contribuera à l'augmentation des rendements, en minimisant les risques de la contrainte climatique et au développement durable de l'agriculture de la région.

Références Bibliographiques.

Anonyme. (1979). Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations. *Doc. CTGREF. Groupement Aix en provence. Division irrigation*, 204 p.

Baldy C. (1974). Etude fréquentielle du climat, son influence sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. *Caisse centrale de Coop. écon. Paris*, 152 p.

Baldy C. (1984). Utilisation efficace de l'eau par la végétation en climats méditerranéens vers une utilisation plus complète des pluies, des eaux de ruissellement et des irrigations. *Bull. soc. Fr. 131. Actual. Bot.*, 2/3/4: 491-499.

Baldy C. (1986). Comportement des blés dans les climats méditerranéens. *Ecologia Mediterranea*, 12: 73 - 88.

Barakat F. & Handoufe A. (1998). Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse*, 9: 201-8.

Bonneau M. & Souchier B. (1979). *Pédologie. Constituants du sol. Ed. Masson. Paris*, 459 p.

Bootsma A., Boisvert JB., De Jong R. & Baier W. (1996). La sécheresse et l'agriculture canadienne: Une revue des moyens d'action. *Sécheresse*, 4: 277-85.

Ceballos A., Fernandez M.J. & Ugidos M.A. (2004). Analysis of rainfall trends and dry period on a pluviometric gradient representative of Mediterranean climate in the Duero Basin, Spain. *Journal of Arid Environments*, 58: 215-233.

Caughlan M.J. (1987). Monitoring drought in Australia. In: *Wilhite Da, Easterling We, Wood DA. Ed. Planning for drought. Colorado: Westview press*, 597 p.

Cheng X. & Guo A. (1996). Effects of various soil moisture on the growth and nutriments absorption of winter wheat. *Chin.J. Agric. Sc.*, 29: 67-74.

Chennafi, H. (1996). Optimisation de l'apport d'appoint d'eau sur trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à différents stades végétatifs. Cas des hautes plaines Sétifiennes. *Thèse magister, INA. Alger*, 64 p.

Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. & Saci A. (2005). Valorisation des apports d'appoint d'eau sur blé dur (*Triticum Durum* Desf.) en zone semi-aride: Effets variété et stade d'apport. In: *Proceedings: Premier Séminaire international sur l'Environnement et ses Problèmes connexes <<SIEPC 2005>>Université, Béjaia.*

Clément R., & Galand A. (1979). Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression. *Ed. Eyrolles*. Paris. 182 p

Doorenbos J. & Pruitt W.O. (1976). Les besoins en eau des cultures. *Bulletin F.A.O. d'irrigation et de drainage No 24*, 198 p.

Eliard J.L. (1974). Manuel d'agriculture générale. Bases de la production végétale. *Ed. Baillière*, Paris, 344 p.

El Jihad M. D. (2003). Les sécheresses saisonnières dans le haut bassin de l'Oum-Er-Rbia (Maroc central): Aspects et fréquences. *Sécheresse*, 14: 157-65.

Giunta F., Motzo R. & Deidda M. (1992). Effect of drought and yield components of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *Field Crop Research*, 33: 399-409.

Guyot G. (1999). Climatologie de l'environnement. Cours et exercices corrigés. *Ed. 2^{ème} DUNOD*, Paris, 525 p.

Hamadi H. & Charfi C.M. (2003). Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au nord de la Tunisie: Estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques (cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte). *Sécheresse*, 14: 257-65.

Hatfield J.L., Sauer T.J. & Prueger J.H. (2001). Managing Soils to achieve Greater Water Use Efficiency. *Agronomy Journal*, 93: 271-280.

Ilbeyi A., Ustun H., Oweis T., Pala M. & Benli B. (2006). Wheat productivity and yield in cool highland environment: Effect of early sowing with supplemental irrigation. *Agricultural water Management*, 82: 399-410.

Jouve P. (1984). Relation entre déficit hydrique et rendement des céréales en milieu aride. *Agronomie Tropicale*, 39: 308-315.

Kang S., Zhang L., Liang Y., Hu X., Cai H. & Gu B. (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 55: 203-216.

Karou M., Haffid R., Smith D & Samir k. (1998). Roots and shoot growth water use and water use efficiency of spring durum wheat under early-season drought. *Agronomy*, 18: 181-186.

Klein J.D., Mufradi I., Cohen S., Hebbe Y. Asido S., Dolgin B. & Bonfil D.J. (2002). Establishment of wheat seedlings after early sowing and germination in an arid Mediterranean environment. *Agronomy Journal*, 94: 585-563.

Kribaa M., hallaire V., Curmi P. & Lahmar R. (2001). Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil & Tillage Research*, 60: 43-53.

Kumar R. & Khepar S. (1980). Decision models for optimal cropping patterns in irrigations based on crop water production functions. *Agricultural Water Management*, 3: 65-76.

Li Feng M., Yan X., Li F.R. & Guo A.H. (2001a). Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semi-arid environment. *Agricultural water Management*, 47: 25-35.

Li Feng M., Song QH, Li HS, & Li FR. (2001b). Effects of pre-sowing irrigation and phosphorus application on water use and yield of spring wheat under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 49: 173-183.

Lopez-Bellido J.R., Lopez Bellido L.L., Benitez-Vega B. & Lopez-Bellido F.J. (2007). Tillage system, preceding crop, and nitrogen fertilizer in wheat crop. *Agron. J.*, 99: 66-72.

Marie A., Cockborne D. & Bruckler L. (1995). Estimation des bilans hydrique et azoté: le cas d'une petite région agricole maraîchère méditerranéenne (Gard). *Sécheresse*, 6: 189-200.

Mendas A., Trache M.A. & Talbi O. (2003). Contribution des systèmes d'information géographique à la planification de l'irrigation. Application au périmètre de Zriga (Ouest Algérien). *Sécheresse*, 14: 115-20.

Merabet B. & Boutiha A. (2005). L'irrigation de complément du blé dur. Influence de la nature du matériel végétal et de la variabilité climatique interannuelle dans une plaine semi-aride d'Algérie. *Science et Technologie C.*, 23: 72-79.

Ollier C. & Poirée M. (1981). Irrigation, les réseaux d'irrigation théorie, technique et économie des arrosages. 5^{ème}. Ed. Erolles. Paris, 503 p.

Oweis T., Zhang H. & Pala M. (2000). Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agron. J.*, 92: 231-238.

Pala M. Harris H. C., Ryan J., Makboul R. & Dorm S. (2003). Tillage Systems and management in a Mediterranean-type environment in relation to crop yield and soil moisture. *Experimental Agriculture*, 36: 223-242.

Pavloani J. & Vazquez R. (1984). Necesidades teoricas de agua de los cereales de invierno y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones como base para el balanxe hidrico. *An. Edafol Agrobiol*, 43: 1545-1556.

Pereira L.S., Smith M. & Allen R. Les méthodes pratiques de calcul des besoins en eau. In: Tiercelin J.R. (1998). *Traité d'irrigation*, 206-231. Ed. Lavoisier. Paris, 1011 p.

Perrier E.R & Salkini A.B. (1991). Supplemental irrigation in the Near-east and North Africa. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands*, 611 p.

Scian B. (2004). Environmental variables for modeling wheat yields in the southwest pampa region of Argentina. *International Journal of Biometeorology*, 48: 206 – 212.

Sezen M. et Yazar A. (2006). Wheat yield response to line-source sprinkler irrigation in the arid Southeast Anatolia region of Turkey. *Agricultural Water Management*, 81: 59-76.

Stewart B A. (1989). Conjunctive use of rainfall and Irrigation in semi-arid regions. In: *Proceedings of an International Workshop on Soil, Crop, and Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone*. ICRITSAT, Indian p: 107-115.

Tavakkoli A. & Oweis T. (2004). The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. *Agricultural Water Management*, 65: 225-236.

Tewolde H. Fernandez C.J. & Erickson C.A. (2006). Wheat cultivars adapted to post-heading high temperature stress. *J. Agronomy & Crop Science*, 192: 111-120.

Tiercelin J.R. (1998). *Traité d'irrigation*. Ed. Lavoisier. Paris. 1011 p.

Turner N. (2004). Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. *J. of Exp. Botany*, 55: 2413-2425.

Tuzet A. & Perrier A. Les besoins en eau des cultures. In: Tiercelin J.R. (1998). *Traité d'irrigation*, 147-161. Ed. Lavoisier. Paris, 1011 p.

Yacoubi M. & El Mourid M. (1998). Typologie de la sécheresse et recherche d'indicateurs d'alerte en climat semi-aride marocain. *Sécheresse*, 4: 269-76.

Zhang H., Oweis T., Garabet S. & Pala M. (1998). Water use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rain-fed conditions and supplemental irrigation in a mediterranean-environment. *Plant and soil*, 201: 295-305

Zhang H. & Oweis T. (1999). Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 38: 195-211

Zhang Y., Kendy E., Qiang Y., Changming L., Yanjun S. & Hongyong S. (2004). Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 64: 107-122.

Zi-Zhen Li, Wei-De li & Wen-Long Li. (2004). Dry-period irrigation and fertilizer application affect water use and yield of spring wheat in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 65: 133-143.

Chapitre III

Amélioration des performances de rendement en grains du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous irrigation déficitaire régulée en zone semi-aride

CHAPITRE III- AMELIORATION DES PERFORMANCES DE RENDEMENT EN GRAINS DU BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.) SOUS IRRIGATION DEFICITAIRE REGULEE EN ZONE SEMI-ARIDE

Résumé

L'étude a été menée au cours de trois campagnes consécutives 2000/01 à 2002/03 sur le site de la Station Expérimentale Agricole de l'Institut Technique des Grandes Cultures de Sétif. L'objectif visé est d'étudier les performances de rendement en grains de la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous irrigation déficitaire régulée. La variété Waha, conduite en pots de végétation, a été soumise à cinq régimes hydriques différents en fonction de la capacité au champ du pot: ^{100}PCC , $^{3/4}PCC$, $^{1/2}PCC$, $^{3/4}PCCE$ et le témoin pluvial. Les résultats montrent que l'irrigation limitée régulée améliore d'une manière significative le rendement en grains et les composantes du rendement. L'augmentation du rendement en grains des différents traitements: Conduite à l'optimum, $^{3/4}PCC$, $^{3/4}PCCE$ et $^{1/2}PCC$ est respectivement de 113%, 75,5%, 57,8% et 44,8% relativement aux performances du pluvial. La moyenne de rendement en grains du traitement conduit à l'optimum est de 31,9 q ha⁻¹. Les résultats indiquent que dans le cas de la pratique de l'irrigation déficitaire régulée couvrant seulement 50% des besoins de la culture, la perte de rendement en grains par rapport au rendement de la conduite optimale varie de 47,0 à 88,8% du rendement de la conduite pluviale. L'irrigation déficitaire régulée améliore donc la performance de la culture relativement à la conduite pluviale.

Mots clés- Blé dur- Irrigation déficitaire régulée - performances de rendement en grains- régimes hydriques- pots de végétation.

3-1- INTRODUCTION

L'agriculture pluviale des environnements semi-arides est dépendante de la variabilité climatique qui se traduit par la faiblesse et l'instabilité des rendements des céréales en général et celle du blé dur en particulier. Ceballos *et al.*, (2004) mentionnent que la région méditerranéenne est caractérisée par une grande variabilité de la pluviométrie associée à l'avènement de périodes sèches très prononcées qui restent indépendantes du total annuel des précipitations enregistrées. Selon Tavakkoli et Oweis (2004) la région du sud de la méditerranée connaît un important déficit en production des céréales, spécialement le blé dur, par suite de l'irrégularité intra et interannées des précipitations.

En parallèle les besoins en produits alimentaires s'accroissent avec la croissance démographique. Ainsi selon Bédrani (2001) la demande alimentaire des pays du Maghreb a fortement augmenté au cours des quarante dernières années induisant un déficit chronique de la balance alimentaire depuis le début des années soixante dix. La recherche de moyens qui permettent d'améliorer le rendement en grains du blé dur représente une urgence et une nécessité pour donner à la production une relative stabilité et ainsi réduire la tension engendrée par la demande de ces produits de base.

Cette recherche est plus ardue dans l'étage bioclimatique semi-aride où cette spéculation occupe de larges étendus et où l'aléa climatique cause le plus de dégâts. Les études de la réponse de la culture du blé dur à la variation de l'humidité du sol indiquent une réduction du rendement en grains, sous l'effet du déficit hydrique, variant de 26 à 100%, démontrant clairement que l'eau reste le

facteur du milieu le plus limitant de la production des céréales (Kayyal et al., 1993; Giunta et al., 1992; Ehdiaie, 1995; Chennafi et al., 2005).

La céréaliculture irriguée peut et doit relever le défi de réduire de l'écart entre l'offre et la demande. Elle représente l'élément majeur sur lequel s'appuie l'agriculture d'une manière générale, particulièrement dans les régions soumises à des contraintes climatiques chroniques qui ne permettent pas d'assurer une production optimale. Dans le tiers monde l'agriculture irriguée représente 85% des cultures soumises à l'irrigation dans le monde; l'Asie à elle seule domine avec 70% du total mondial (Verdier, 1995; Araus, 2004). En Algérie, les cultures irriguées consomment les 60% des quantités d'eau destinées au secteur, elles ne représentent que 10% de la surface cultivée, mais contribuent cependant pour une valeur relative de 40% à la production agricole totale (Cheverry et Robert, 1998; Lasram et al., 2001).

L'Algérie est classée parmi les pays où l'eau est rare et les prévisions laissent apparaître que cette ressource vitale diminuera de 50% d'ici les années 2025 (Cheverry et Robert, 1998). En effet, les changements climatiques induisent une augmentation générale de la température de 3 °C dans le bassin méditerranéen avec une diminution de la pluviométrie pour les pays du sud en moyenne 1 mm/jour associée à une augmentation moyenne notable de l'évapotranspiration potentielle de 200 mm/an. Sous ces conditions, d'ici 2050 on prévoit seulement 2 à 3 récoltes de céréales possibles, en conditions pluviales, toutes les 5 campagnes agricoles dans le bassin méditerranéen (Le houérou, 1995).

L'irrigation des céréales est consommatrice de grosses quantités d'eau, d'où l'intérêt de la recherche d'une meilleure gestion de l'eau par la mise en place d'un système efficace surtout en milieu semi-aride. Cette gestion permet d'une part d'améliorer et de stabiliser les rendements et d'autre part de préserver les ressources hydriques. De nombreuses études conduites sur le thème de l'agriculture irriguée révèlent que la gestion de cette ressource naturelle est indispensable. En effet, la rareté de l'eau dans ces régions et son manque relatif à des moments propices à son utilisation, sont les points clés de cette gestion.

Chennafi et *al.*, (2006) montrent que la zone semi-aride des hauts plateaux Sétifiens se caractérise par un déficit climatique très marqué, particulièrement au début de la campagne, et qui s'accroît fortement à partir de la première décennie de mars. La recharge hydrique du profil au cours de l'hiver, moment où près de 70% du cumul des précipitations sont reçues, associée à l'utilisation de quantités limitées d'eau améliorent significativement la production grain ainsi que l'efficacité d'utilisation de l'eau ajoutée.

En effet dans des milieux similaires, la gestion de la ressource en eau a pris différentes variantes comme l'irrigation supplémentaire, l'irrigation de complément, l'irrigation d'appoint, l'irrigation limitée, l'irrigation déficitaire, l'irrigation minimale, et l'irrigation régulée (Stewart, 1989; Perrier, 1988, Oweis, 1997; Oweis et *al.*, 2000; Tavakkoli et Oweis, 2004, Zhang et *al.*, 2006).

L'irrigation déficitaire est définie par l'apport de petites quantités d'eau fréquentes mais limitées. Ces notions traduisent l'apport de quantités d'eau inférieures aux besoins de la plante. Ils doivent être faits à des moments où la

plante risque de subir l'effet d'un déficit hydrique avec des conséquences importantes sur la production. L'irrigation déficitaire est une stratégie de lutte contre les aléas climatiques néfastes en milieu semi-aride et aride.

Oweis (1997) préconise l'introduction du système d'irrigation déficitaire pour les céréales d'hiver qui potentiellement stabilise et augmente la production en améliorant l'efficacité d'utilisation de l'eau. Li ZZ et *al.*, (2004) mentionnent que l'irrigation en période sèche représente une gestion significative de l'eau. Ainsi selon Tavakkoli et Oweis (2004) dans les régions où l'eau est limitée, l'apport de petites quantités d'eau d'irrigation permet de gérer la contrainte climatique en faisant face au déficit saisonnier et produire un rendement économiquement satisfaisant.

La pratique de l'irrigation limitée nécessite une attention toute particulière en milieu semi-aride où elle représente une stratégie fondamentale de lutte contre la sécheresse qui sévit dans cette zone. Xue Q et *al.*, (2003) ainsi que Li ZZ et *al.*, (2004) montrent qu'il est possible d'optimiser l'utilisation de l'eau du sol par les cultures pluviales pour augmenter le rendement en grains et l'efficacité d'utilisation de l'eau. Li WL et *al.*, (2004) utilisent le terme d'irrigation régulée, pour définir des variantes d'apports de quantités inférieures aux besoins de la plante mais qui sont répartis dans le temps en fonction des besoins de la culture.

Tavakkoli et Oweis (2004) introduisent sur blé en zone semi-aride l'irrigation de supplément en apportant de petites quantités d'eau en supplément du cumul pluviométrique. Perrier (1988) introduit l'usage de l'irrigation d'appoint

faite à des stades qui valorisent au mieux l'eau apportée, sachant que le déficit hydrique à certains stades végétatifs n'est pas pénalisant de la production.

Le résultat attendu de la pratique de l'irrigation limitée sur la culture du blé, en conditions semi-arides, est l'augmentation de la production et l'économie de l'eau. Dans ce cadre, le type de sol, la nature du climat, la culture à irriguer et l'itinéraire technique appliqué jouent un rôle important dans la valorisation de l'eau apportée. Zhang *et al.*, (2006) mentionnent que l'irrigation déficitaire régulée sur blé permet d'économiser jusqu'à 50% des besoins de la plante cultivée sans avoir des effets dépressifs sur le niveau de rendement en grains escompté.

Dans de telles situations l'efficacité de l'eau apportée est augmentée de 25 à 40% (Jerry *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2006). La technique de l'irrigation déficitaire est définie comme étant l'application systématique et délibérée d'une dose d'irrigation inférieure à la demande de la culture (Koon, 1997, Oweis, 1998). Elle est considérée comme une forme d'irrigation d'appoint d'avenir dans les environnements caractérisés par une forte variabilité climatique, de nature imprévisible et où l'eau est peu abondante (Tardieu, 1989).

L'autre alternative pour améliorer la production et l'efficacité de l'eau est l'utilisation de variétés de céréales qui possèdent les caractéristiques d'adaptation aux conditions climatiques de la région. Ces cultivars doivent être aptes à répondre à l'amélioration des conditions de production et notamment aux apports d'eau à des stades végétatifs critiques, par une amélioration du rendement économique. Le choix du génotype est donc une composante essentielle de la stratégie de gestion des apports d'eau.

Cette plasticité des cultivars est le plus souvent liée au développement du système racinaire qui joue dans ce cadre un rôle important dans l'adaptation au manque d'eau (Hurd, 1968; Ahmedi, 1983). Sous climat méditerranéen, l'amélioration génétique du système racinaire, représente une opportunité pour adapter les variétés à la contrainte hydrique (Durand, 1981; Vincent et Darleguy 1982; Motzo *et al.*, 1993). L'eau du sol, susceptible d'être mise à la disposition de la plante, dépend de la profondeur maximum atteinte par les racines qui peut dépasser selon Maertens (1988) la profondeur de 1,50m.

Ainsi donc la gestion de la culture et de l'inter-culture sont aussi des composantes de la gestion de l'eau dans les milieux où ce facteur de production est limitant comme c'est le cas sous climat méditerranéen (Husson, 1963; Tewolde, 2006). C'est dans ce contexte que s'insère la présente étude dont l'objectif est d'évaluer la réponse de deux variétés typiques de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à l'irrigation déficitaire régulée.

3-2- MATERIELS ET METHODES

3-2-1- Expérimentation en pots de végétation

L'étude a été réalisée au niveau de la station expérimentale de l'Institut Technique des Grandes cultures de Sétif au cours des campagnes 2000/01, 2001/02 et 2002/2003. Le site est situé à une altitude de 1080 m, à la latitude 36°9' N et à la longitude 5° 21'E. L'essai est mené dans des pots de végétation de 30 cm de diamètre et 35 cm de profondeur, contenant 20 kg de terre séchée prise du site expérimental. Quinze graines pré germées de blé dur ont été transplantées par pot au cours de la seconde moitié du mois de Novembre. La densité de semis réalisée représente un peuplement de 212 plants m⁻².

L'expérimentation est conduite dans un dispositif en blocs complètement randomisé avec trois répétitions. Le pot constitue la parcelle élémentaire. Cinq régimes d'irrigation déficitaire régulée ont été étudiés:

¹⁰⁰PCC = 100% de la capacité au champ du pot tout le long du cycle,

^{3/4} PCC = 75% de la capacité au champ du pot tout le long du cycle,

^{1/2}PCC = 50% de la capacité au champ du pot tout le long du cycle,

^{3/4}PCCE = 75% de la capacité au champ du pot jusqu'au stade épiaison et

Pluvial = Témoin en conduite pluviale tout le long du cycle.

La variété Waha a été testée au cours de trois campagnes, 2000/01 à 2002/03 et la variété MBB l'a été uniquement au cours de la campagne 2002/03. Une cage en plastique a été utilisée pour isoler les pots irrigués des événements pluvieux. L'humidité des différents traitements est contrôlée régulièrement selon la méthode gravimétrique. La méthode suivie consiste à déterminer au préalable la capacité de rétention du sol utilisée dont l'humidité au point de flétrissement est prise comme étant égale à 12% (Kribaa *et al.*, 2001).

La détermination de la capacité au champ (CC) est basée sur l'utilisation de quatre boîtes d'aluminium, tarées, contenant du sol qui a été saturé d'eau et préalablement drainé. Le poids frais (PF) des boîtes métalliques est déterminé puis ces dernières sont mises dans une étuve dont la température est portée à 105°C. Les boîtes séjournent pendant 48 h, durée au bout de laquelle on détermine le poids sec (PS) des boîtes contenant le sol. La capacité au champ

(CC) du sol est déduite selon la formule suivante, attribuée à Wright *et al.* (1999):

$$\text{CC (\%)} = 100 [(PF - PS) / PS - Tare] \quad (1)$$

Où:

CC= Capacité de rétention,

PF= Poids frais de l'échantillon de terre après drainage,

PS= Poids sec de l'échantillon étuvé à 105°C.

La capacité au champ de l'échantillon de sol utilisé, évaluée par cette méthode (équation 1) est égale à 25%. Les analyses physico-chimiques du sol indiquent que le sol, en question, a une texture argilo limoneuse. Le calcaire total est de 40% et le pH est de 8,2. Le taux de la matière organique est de 1,35%. Les pots sont pesés régulièrement deux fois par semaine et l'eau évapotranspirée est remplacée par des apports d'eau plate.

Les notations ont porté sur la détermination du rendement en grains, la hauteur du chaume, la biomasse aérienne accumulée à maturité, le nombre d'épis, le poids de 1000 grains, les quantités d'eau consommées et l'efficacité d'utilisation de l'eau. Les moyennes des caractères mesurés sont comparées par l'analyse de la variance. Les comparaisons les plus pertinentes ont été testées par la méthode des contrastes.

3-2-2- Expérimentation en tubes de PVC

En parallèle à l'expérimentation en pots de végétation, une autre expérimentation complémentaire a été conduite pour suivre l'évolution du système racinaire de la variété Waha, utilisant des tubes en PVC d'une longueur de 1,20 m et de 10 cm de diamètre. Les tubes sont ouverts dans le sens de leur longueur pour faciliter l'extraction des racines selon différents horizons, puis assemblés avec des anneaux, en trois endroits espacés le long du tube, avant leur mise en terre. Quatre graines ont été semées par tube au mois de novembre.

L'humidité du sol au semis était de 22%. Les tubes sont irrigués régulièrement tout le long du cycle végétatif. Les prélèvements des racines ont été effectués à quatre dates différentes au cours du cycle de développement de la plante, correspondants aux stades végétatifs suivants: 3 nœuds, épiaison, épiaison plus 20 jours, et à maturité. Les prélèvements effectués portent sur 3 profondeurs différentes 0-30, 30-60 et 60-100 cm par tube et sur les trois répétitions.

Les échantillons de sol portant les racines, prélevés par horizon, sont placés dans des bassines en plastique contenant un mélange d'eau et de savon Ariel où elles séjournent pendant 24 heures pour faciliter la séparation des racines de la terre. Les racines, mises dans un tamis à maillage fin, sont isolées par un lavage avec un jet d'eau. On détermine sur chaque échantillon racinaire le poids frais, le volume par déplacement de l'eau dans une éprouvette de 100 ml et le poids sec, après séchage dans une étuve pendant 24 heures à une température de 60°C.

3-3- RESULTATS ET DISCUSSION

3-3-1- Réponse de la variété Waha à l'irrigation déficitaire régulée

Cette étude a été entreprise avec l'objectif de connaître quelle serait la différence de rendement en grains entre une conduite à l'optimum et celle sous irrigation déficitaire régulée? L'analyse de la variance de données générées par l'expérience indique un effet principal irrigation et année significatif alors que l'interaction ne l'est pas dans la plus part des cas. L'analyse des contrastes montre des différences significatives entre les différents traitements de l'irrigation déficitaire régulée (Tableau 1).

Tableau -1- Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance des caractères mesurés

Sources	ddl	RDT ^{ae}	NE ^{ae}	PMG	HI	HT	BIO ^{ae}	PLL ^{ae}	TEU	EUE
Campagne (C)	2	56.4*	8.9*	3.40*	280.5*	1350*	82.9*	3.3	1462*	69.34*
Irrigation (I)	4	45.4*	49.9*	34.5*	24.5	2103*	466.3*	217.9*	82002*	8.67*
I vs Pluvial	1	114.7*	155.7*	137.1*	61.6*	6267*	1117.8*	512.7*	131414*	9.50*
Optimum vs réduite	1	58.3*	36.9*	0.12	6.5	1164*	581.7*	271.6*	118565*	2.07
¾PCC vs ½PCC+¾PCCE	1	10.5*	2.9*	0.13	6.3	270*	121.7*	60.7*	77683*	18.03*
½PCC vs ¾PCCE	1	2.2	3.9	0.03	23.4	709*	43.9*	26.4*	345	5.09*
I x C	8	2.7	0.6	4.3	79.6*	18.9	6.8	9.9	3520*	1.28*
Résiduelle	42	0.9	0.2	10.8	20.5	20.5	4.53	4.18	863.4	1.04

^{ae}x10³, RDT= Rendement en grains (g m⁻²), NE= nombre d'épis (m⁻²), PMG =poids de 1000 grains (g), HI = indice de récolte (%), HT = hauteur du chaume (cm), PLL= Rendement en paille (g m⁻²), BIO = Biomasse aérienne accumulée (g m⁻²), TEU = total eau utilisée (mm), EUE = Efficacité utilisation eau (kg ha⁻¹ mm⁻¹). * effet significatif au seuil de 5%

Les trois campagnes accumulèrent 264.0, 168.7 et 517.5 mm de pluie du mois d'octobre au mois de juin inclus. La distribution de la pluviométrie est donnée en figure 1. L'essentiel de la pluviométrie est enregistré au cours des mois de l'hiver avec cependant une très forte variation entre campagnes. Le traitement conduit à l'optimum utilise 390.5, 392.5 et 380.0 mm respectivement au cours des campagnes 2001, 2002 et 2003. Prenant les rendements en grains de la conduite pluviale comme indice 100, les rendements en grains obtenus

sous irrigation à l'optimum, $\frac{3}{4}$ PCC, $\frac{3}{4}$ PCCE et $\frac{1}{2}$ PCC augmentent, en moyennes des trois campagnes, de 113%, 75.5%, 57.8% et 44.8% respectivement (Tableau 2).

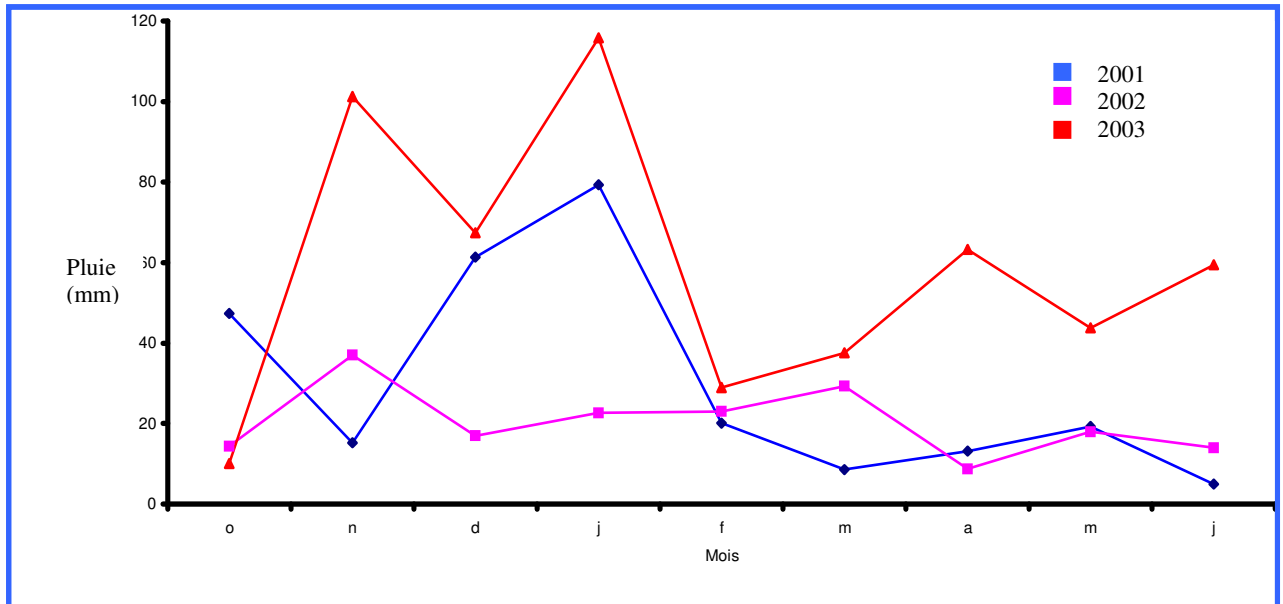


Figure -1- Distribution de la pluviométrie mensuelle des trois campagnes 2000/01 à 2002/03

Ces résultats montrent que l'apport de l'eau, de manière régulée en fonction des besoins de la plante, engendre une importante augmentation du rendement en grains. Le gain de rendement en grains est positivement corrélé avec la biomasse aérienne ($r= 0.831$, $P<0.05$, $n= 15$), le rendement en paille ($r= 0.699$, $P<0.05$), le nombre d'épis ($r= 0.701$, $P<0.05$), l'eau consommée ($r= 0.600$, $P<0.05$), l'indice de récolte ($r= 0.450$, $P<0.05$), la hauteur de la plante ($r= 0.507$, $P<0.05$) et avec l'efficacité d'utilisation de l'eau ($r= 0.547$, $P<0.05$).

Ces liaisons sont une indication que l'irrigation régulée affecte en plus du rendement en grains, d'autres caractères de l'architecture de la plante dont la

biomasse aérienne accumulée, le nombre d'épis m⁻², la hauteur du chaume, la paille produite et l'efficacité d'utilisation de l'eau (Figure 2).

Tableau –2- Valeurs moyennes des variables mesurées

Effet	Traitements	RDT	NE	PMG	HI	HT	BIO	PLL	TEU	EUE	
Campagne	2001	196.8	273.4	39.7	30,0	83.9	647.9	451.5	266.9	7.4	
	2002	218.0	237.6	40.6	33,0	81.8	660.1	442.1	253.5	8.6	
	2003	297.5	275.2	40.2	38.9	70.5	765,0	467.5	265.0	11.2	
Irrigation	Opt	319.6	335.6	40.9	33.39	89.3	949.9	630.3	387.7	8.2	
	Effect princ	3/4CC	263.3	284.3	41.0	33.65	81.8	777.9	514.8	286.7	9.2
	3/4CCE	236.8	277.9	40.9	33.55	81.4	697.3	460.7	251.7	9.4	
	1/2CC	217.5	252.3	40.9	35.52	70.5	611.8	394.3	198.3	10.9	
	Pluvial	150.0	160.2	37.6	36.56	55.2	418.0	268.6	184.6	8.1	
I x C interaction	2001	Opt	257.8	355.3	38.9	28.51	100.8	906.0	648.3	390.5	6.6
	3/4CC	228.8	278.8	41.9	32.39	89.5	706.3	477.6	295.0	7.7	
	3/4CCE	176.3	300.0	41.1	27.17	89.8	648.3	472.0	250.0	7.0	
	1/2CC	200.0	265.5	40.8	31.38	76.0	637.5	437.0	210.0	9.5	
	Pluvial	121.3	167.5	36.0	35.66	63.8	341.3	222.5	188.8	6.5	
2002	Opt	287.5	303.8	41.9	31.13	80.0	923.8	636.3	392.5	7.3	
	3/4CC	240.0	269.3	40.5	31.04	73.0	772.5	532.5	280.0	8.6	
	3/4CCH	215.0	252.5	41.5	31.85	73.0	677.5	462.5	248.8	8.6	
	1/2CC	195.0	216.3	41.4	34.79	63.0	560.3	365.3	190.0	10.2	
	Pluvial	152.5	146.5	37.6	41.74	48.8	366.5	214.0	156.3	9.7	
2003	Opt	413.8	348.5	41.9	40.54	87.0	1020.0	606.3	380.0	10.8	
	3/4CC	321.3	305.0	40.8	37.53	82.8	855.0	533.8	285.0	11.3	
	3/4CCE	318.8	281.3	40.3	41.62	81.3	766.3	447.5	256.5	15.1	
	1/2CC	257.5	275.0	40.4	40.40	72.5	637.5	380.0	195.0	13.2	
	Pluvial	176.3	166.8	37.8	32.29	53.0	546.3	370.0	208.8	8.4	

Ppds5% **49.0** **28.8** **2.7** **3.7** **3.7** **54.9** **52.7** **23.9** **0.8**

RDT= Rendement en grains (g m⁻²), NE= nombre d'épis (m⁻²), PMG =poids de 1000 grains (g), HI = indice de récolte (%), HT = hauteur du chaume (cm), PLL= Rendement en paille (g m⁻²), BIO = Biomasse aérienne accumulée (g m⁻²), TEU = total eau utilisée (mm), EUE = Efficacité utilisation eau (kg ha⁻¹ mm⁻¹).

Ces résultats corroborant ceux de Giunta et *al.*,(1992) qui montrent que l'augmentation du rendement en grains est linéairement lié à la biomasse aérienne et que l'irrigation déficitaire régulée comparée à l'irrigation complète, induit une réduction des composantes du rendement en grains. Hang et Miller (1983) notent eux aussi une nette diminution de la biomasse aérienne accumulée, du taux de la croissance relative, des épis produits par m² et de la hauteur du chaume sous irrigation déficitaire relativement à l'irrigation conduite à l'optimum.

La comparaison des moyennes du rendement en grains obtenus sous irrigation montre que le rendement obtenu sous conduite optimale n'est pas significativement différent du rendement en grains du traitement $\frac{3}{4}$ PCCC, deux campagnes sur trois. Pratiquer une irrigation déficitaire qui assure uniquement 50% des besoins en eau de la culture du blé dur, induit une réduction significative du rendement en grains.

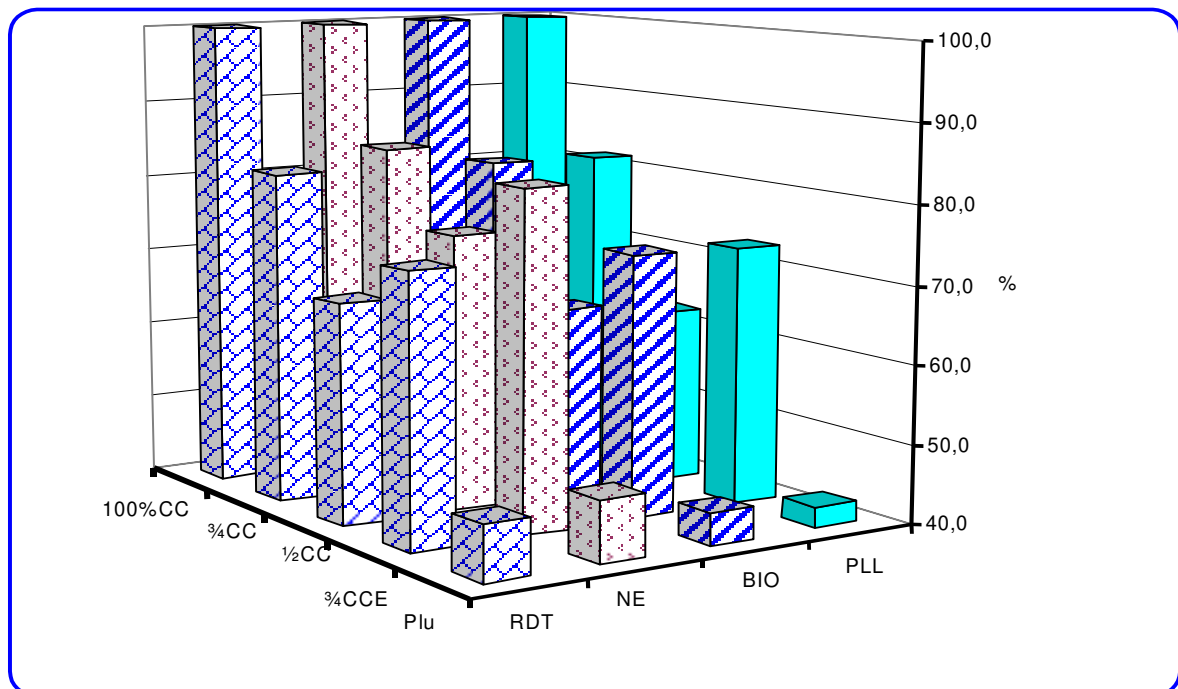


Figure-2- Réponses du rendement en grains, du nombre d'épis, de la biomasse aérienne et du rendement paille du blé dur Waha à l'irrigation déficitaire régulée

Le rendement en grains obtenu sous irrigation optimale est, en effet, significativement supérieur à celui de la modalité $\frac{1}{2}$ PCC. Cependant le rendement de la modalité $\frac{1}{2}$ PCC est significativement supérieur au rendement en grains de la conduite pluviale (Table 2). En adoptant la stratégie de l'irrigation déficitaire régulée qui assure uniquement 50% des besoins, la baisse de rendement en grains par rapport au rendement de la conduite optimale varie de 47,7 à 88,7% du rendement en grains de la conduite pluviale.

Le gain de rendement en grains induit par la stratégie de l'irrigation déficitaire régulée qui assure uniquement 50% des besoins varie de 27,8 à 64,9% du rendement en grains de la conduite pluviale. La quantité d'eau utilisée par le traitement 1/2CC durant le cycle végétatif de la culture est 198,3 mm, valeur moyenne comparable à ce qui est rapporté dans la littérature du domaine. Selon Musick *et al.*, (1994), le rendement en grains du blé nécessite une évapotranspiration minimale de 206 mm; alors que Zhang et Oweis (1999) rapportent la valeur moyenne de 156 mm pour la zone céréale en zone méditerranéenne.

Les résultats de la présente expérimentation conduite en pots de végétation corroborant les conclusions rapportées par Chennafi *et al.*, (2005), tirées d'une expérimentation de longue durée en plein champ. Ces résultats indiquent que l'irrigation déficitaire augmente l'espérance du rendement en grains attendu mais que le rendement obtenu varie d'une campagne à l'autre.

L'augmentation du rendement en grains sous conduite de l'irrigation déficitaire régulée est associée à l'augmentation de la matière sèche totale, de la hauteur, des composantes du rendement, notamment le nombre d'épi m⁻². Ces augmentations génèrent aussi une augmentation de la paille produite. La paille des céréales a une large utilisation comme aliment du bétail au cours de l'hiver, et dont la valeur économique varie de 40 à 100% le prix du grain selon les années (Annichiarico *et al.*, 2005).

Les résultats de la présente étude corroborant ceux de Oweis et Hacum (2001) et de Ilbeyi *et al.*, (2006) qui montrent que l'irrigation déficitaire régulée ne réduit pas fortement le rendement en grains relativement au rendement de la conduite optimale. Ces résultats diffèrent, cependant de ceux de Zhang *et al.*, (2006) qui observent une augmentation du rendement en grains sous irrigation déficitaire régulée relativement à la conduite optimale.

Jamieson *et al.*, (1995) mentionnent que l'irrigation à l'optimum est moins efficiente comparativement à l'irrigation déficitaire régulée, parce que l'irrigation à l'optimum laisse, généralement, beaucoup d'humidité dans le profil du sol, non utilisée par la plante, en fin de cycle. Ces différences dans les résultats obtenus émergent suite aux différences de sol, climat et géotypes utilisés dans la conduite des différentes études.

Dans un souci de réduire des effets du déficit hydrique et de la variabilité climatique notamment la distribution irrégulière de la pluviométrie, il est important de combiner les propriétés génétiques de variétés avec une gestion appropriée des pratiques culturales.

Parmi les propriétés génotypiques on a la précocité d'épiaison, la vigueur de croissance qui minimise l'évaporation du sol, une faible tendance à la croissance luxuriante, la plasticité de croissance qui autorise un développement en fonction des événements pluvieux ou apports d'eau, et la capacité de récupération une fois le milieu redevient favorable.

Parmi les pratiques culturales on a le semis précoce, le désherbage et la pratique de l'irrigation déficitaire régulée lors des stades végétatifs qui se réalisent à des moments où la fréquence du déficit hydrique est élevée. En effet l'irrigation déficitaire régulée est un moyen puissant pour réduire des effets de la

contrainte hydrique, d'améliorer et de stabiliser la production (Kanwar et Swindale, 1982; Deumier, 1990).

3-3-2- Développement du système racinaire

L'analyse de variance révèle un effet significatif du poids de la matière sèche racinaire, mais l'effet du volume racinaire n'est pas significatif (Tableau 3). Les résultats montrent que c'est à l'épiaison que la plus grande masse racinaire est atteinte (Tableau 4). Motzo *et al.*, (1993) mentionnent que la variation génotypique de la matière sèche accumulée par le système racinaire, en fonction des différents stades végétatifs du blé dur sous climat méditerranéen, est importante. Le poids maximal est atteint entre les stades montaison et épiaison selon les génotypes.

Tableau -3- Carré moyen de l'analyse de variance du poids et du volume racinaires des différents horizons, en fonction des stades de développement de la variété de blé dur Waha (2000/01)

Variation	ddl	Poids sec	Volume	
Total	23	0,17	0,70	
Stade végétatif		3	0,19*	0,39ns
Horizon	2	0,82 **	2,43*	
Stade x Horizon	6	0,20*	1,00ns	
Résiduelle	11	0,04	0,36	

ns, *, ** = Effets non significatif, significatif au seuil de 5 et 1% respectivement

Baldy (1986) mentionne que la précocité de l'épiaison associée à un développement rapide du système racinaire sont des caractéristiques désirables sous environnements contraignants.

Le volume maximale racinaire 4,75 ml est accumulé en phase épiaison. Les résultats traduisent l'importance (masse et volume) du système racinaire dans la vie et l'évolution des stades de développement de la plante (Tableau 4). L'analyse des résultats montre que quelque soit le stade végétatif, la masse racinaire est plus présente dans la profondeur 0-30 cm, ainsi que le volume. Le poids et le volume racinaires présents dans l'horizon 0-30 cm, représentent 50% du total. Les valeurs moyennes les plus élevées sont atteintes au stade épiaison.

Selon Panda *et al.*,(2003), le blé extrait l'humidité du sol surtout à une profondeur de 0-45 cm. Les résultats de la présente étude montrent que 87,6% de la masse racinaire sont localisés dans la profondeur de 0-60cm dont 78,5% dans l'horizon de 0-30 cm. La variété waha développe donc le maximum de son système racinaire dans la tranche 0-60 cm du sol. Le suivi de l'humidité du sol doit être donc concentré sur cet horizon de surface, pour les besoins de programmation de l'irrigation et de l'économie d'eau.

Tableau -4- Evolution du système racinaire en fonction des stades végétatifs

	Profondeur	3 Nœuds	Epiaison	E + 20 jours	
Maturité					
Poids	30	0,64	1,6	0,7	0,52
sec	60	0,55	0,4	0,3	0,19
(g)	100	0,10	0,2	0,2	0,50
	Total	1,29	2,3	1,3	1,21
Ppds5%		0,20	0,65	0,19	0,26
Volume					
(ml)	30	2,00	3,2	2,0	1,40
	60	2,00	1,2	1,4	1,15
	100	0,10	1,2	1,3	1,60
	Total	4,10	4,7	4,8	4,15
Ppds5%		0,28	0,22	0,30	0,24

Qiang Zuo *et al.*,(2004) la densité racinaire chez le blé est un paramètre important pour étudier les mouvements de l'eau et des nutriments dans le système et étudier l'interaction de la poussée sol-atmosphère. La mesure de la

densité du chevelu racinaire chez le blé est cependant difficile à déterminer avec une précision. Elle varie en fonction du type de sol, de l'environnement, et du génotype (Qiang Zuo *et al.*, 2004).

Zi-Zhen Li *et al.*,(2004) rapportent que la biomasse racinaire du blé cultivé sous climat semi-aride est de 1,73 g dans l'horizon des 20 premiers cm de la surface du sol. Cet horizon contient la plus grande masse racinaire, qui chute à une valeur moyenne de 0,16 g dans l'horizon compris entre 60 et 120 cm de profondeur. Ces résultats sont conformes à ceux de la présente étude qui montre que la variété Waha développe une masse racinaire de 0,29 g dans l'horizon des 60 à 100 cm de profondeur.

Zi-Zhen Li *et al.*,(2004) notent une réduction de la masse racinaire entre les stades épiaison et maturité, passant de 1,72g à 1,44 g dans les 20 cm de surface. Ces résultats concordent avec ceux trouvés dans la présente étude. En effet à l'épiaison la moyenne de la biomasse racinaire est de 1,61g, suivi de la phase de remplissage du grain avec 0,74g, à la profondeur 0-30 cm.

Li Feng *et al.*,(2001a) montrent que la réponse différentielle de trois génotypes de blé à l'irrigation s'explique par des différences de croissance du système racinaire à la mi-saison, qui conduit à des utilisations différentes de l'humidité du sol disponible. Pour Cruizat (1974) les racines subissent les variations les plus importantes lorsque la plante flétrit. La réduction de leur diamètre a des conséquences très importantes pour l'alimentation hydrique de la plante. Ce qui provoque donc une augmentation de la résistance par suite de la diminution contact sol-racines.

L'interaction stade x profondeur n'est pas statistiquement significative pour le volume racinaire. C'est le stade épiaison qui ressort avec une valeur supérieure. La profondeur 0-30 cm représente à elle seule 59,3% du volume total. Cependant, c'est à la même profondeur et au stade épiaison que s'observe la plus forte valeur du volume avec 3,25 ml (68,4%). La répartition géométrique des racines jouent un rôle important dans le prélèvement de l'eau du sol dont l'humidité dépend des propriétés hydrodynamiques du sol lui même (Maertens, 1988).

Les états structuraux du sol entraînent des variations morphologiques et des différences dans la distribution spatiale des racines d'une même espèce (Sebillotte, 1988). Selon Li Feng *et al.*, (2001b) les racines et leur distribution jouent un rôle important dans l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau.

L'analyse de variance révèle un effet significatif de l'évolution du nombre de tiges, de la hauteur de la plante et de la biomasse aérienne, en fonction de l'évolution des stades végétatifs (Tableau 5). En effet, au cours du développement des stades végétatifs de la plante se concrétise la formation des composantes morphologiques qui caractérisent la plante.

Tableau -5- Carrés moyens de l'analyse de la variance de la biomasse aérienne, du nombre de tiges et de la hauteur en fonction des stades de développement de la variété Waha. (2000/01)

Variation	ddl	TIGES	BIO	HT
Total	7	8,05	0,17	279,07
Stade	3	18,04**	0,19**	601,50*
Résiduelle	3	0,71	0,04	36,17

*, ** = Effets significatif au seuil de 5 et 1%, , Tiges= Nombre de tiges, BIO= Biomasse aérienne (g) et HT = Hauteur de la plante

Les résultats montrent que chaque composante évolue en fonction du stade végétatif. Le stade 3 nœuds se caractérise par la plus forte valeur du nombre de tiges (Tableau 6). Cependant, le nombre de tiges, la hauteur de la plante et la biomasse aérienne évoluent régulièrement pour atteindre le maximum à la maturité (Tableau 6).

Tableau – 6- Evolution du système aérien de la variété Waha en fonction des stades végétatifs (2000/01)

	3 Nœuds	Epiaison	E + 20 jours	Maturité	
Ppds5%					
TIGE	11,,00	11,,00	07,75	07,75	0,94
HT	15,00	45,50	51,,00	52,50	6,76
BIO	02,40	05,25	08,85	15,43	0,26

Les résultats de la présente étude rejoignent l'idée de Pagès et *al.*, (1998) qui considèrent que la plante s'adapte à des déficits hydriques en affectant une plus grande partie de sa biomasse à la production racinaire. Baldy (1986) relève que l'évapotranspiration d'un couvert végétal dépend du potentiel d'extraction de l'eau par les racines. Ainsi, les résultats de la présente étude sur le système racinaire du cultivar waha traduit que le cultivar produit un maximum de masse racinaire sur une profondeur moyenne de 30 cm au stade épiaison pour élaborer une masse aérienne maximale au stade épiaison. En effet, cette phase est élaborée en période où la demande en eau de la culture est assez importante, variant de 88 à 103 mm par décade.

Conclusion

L'irrigation déficitaire régulée contribue à l'amélioration de la performance du rendement en grains et aux composantes du rendement. En moyenne des trois campagnes 2000/2001, 2001/2002 et 2002/2003, les rendements en grains relatifs obtenus sous irrigation régulée sont de 113%, 75.5%, 57.8% et 44.8% respectivement pour les conduites à l'optimum, $\frac{3}{4}$ PCC, $\frac{3}{4}$ PCCE et $\frac{1}{2}$ PCC. Le gain de rendement de l'irrigation régulée assurant 50% des besoins de la plante varie de 27,8 à 64,8% du rendement en grains de la conduite pluviale. L'efficacité moyenne d'utilisation de l'eau varie de 6,6 à 15,1 kg ha⁻¹mm⁻¹ selon les campagnes et le niveau de l'apport d'eau régulée. La productivité de l'eau diminue en fonction de l'augmentation des quantités d'eau apportées. Les apports d'eau limités mais régulés contribuent à augmenter la production pluviale de la culture du blé dur en milieu semi-aride.

Cependant, il est indispensable d'appuyer l'amélioration de l'efficacité de l'eau par l'introduction de variétés efficaces vis à vis de l'eau, disposants de caractéristiques d'adaptation. Le système racinaire représente un élément important de valorisation de l'eau. Ainsi, l'étude sur le système racinaire du cultivar Waha indique d'une part, que la masse racinaire maximale est relevée au stade épiaison. D'autre part, c'est au niveau de l'horizon 0-30 cm du profil cultural que 78,5% de la masse racinaire est localisée.

En plus, en milieu semi-aride, l'optimisation de l'eau est aussi liée à la gestion des pratiques culturales, des apports d'eau et à l'adoption de variétés mieux valorisantes de l'eau. Ainsi les génotypes précoces à l'épiaison sont mieux

pourvus pour lutter contre la contrainte hydrique qui devient aiguë en fin de cycle. Le semis précoce, la gestion de jachère et celui de la culture aident à améliorer la productivité de l'eau apportée. Néanmoins, l'irrigation déficitaire régulée est un moyen efficace pour minimiser l'effet de la contrainte hydrique, d'améliorer et de stabiliser la production pluviale. Ainsi, ces éléments contribuent à améliorer le potentiel de production de la céréale irriguée et son développement durable en conditions semi-arides.

Références Bibliographiques

Ahmedi N. (1983). Variabilité génétique et hérédité des mécanismes de tolérance à la sécheresse chez *Oryza Sativa* L. Développement racinaire. *Agron Trop.*, 38: 118-122

Annichiarico P., Abdellaoui Z., Melouki M. & Zerargui H. (2005). Grain yield, straw yield and economic values of tall semi dwarf durum wheat cultivars in Algeria. *Journal of Agricultural sciences*, 143:57-64.

Araus J.L. (2004). The problems of sustainable water use in the mediterranean and research requierements for agriculture. *Ann. Appl. Biol.*, 144: 259-272.

Baldy C. (1986). Agrométéorologie et développement des régions arides et semi-arides. *Ed. INRF., Paris*, 114 p.

Bédrani S. (2001). Stratégie et politiques agricoles des pays du Maghreb central. *C.R. Agric.*, 87: 179-188.

Ceballos A., Fernandez M. J. & Ugidos M.A. (2004). Analysis of rainfall trends and dry period on a pluviometric gradient representative of Mediterranean climate in the Duero Basin, Spain. *Journal of Arid Environments*, 58: 215-233.

Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. & Saci A. (2005). La réponse de la culture de blé dur (*Triticum Durum* Desf.) variété waha à l'irrigation déficitaire en zone semi-aride. *In: Proceedings du 2^{ème} Congrès Méditerranéen <<WATMED>>*, Marrakech, p: 54-59.

Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. & Chenafi A. (2006). Approche d'évaluation du déficit climatique pour la pratique d'une irrigation déficitaire sur blé dur en milieu semi-aride des hautes plaines orientale d'Algérie. *In: Proceedings du 3^{ème} Congrès Méditerranéen « WATMED »*, Tripoli (Liban), p: 11-117.

Cheverry Cl. & Robert M. (1998). La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau: Une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée? *Eau et gestion des sols*, 4: 27-226.

Cruziat P. (1974). Détermination des pertes en eau subies par les différents organes d'une plante soumise au dessèchement. *Ann. agron.*, 25: 539-554.

Deumier J. (1990). Blé tendre et blé dur: Intervenir de fin Avril au stade grain laiteux. *Cultivar*, 267: 1-70.

Durant J.H. (1981). Les sols irrigables, étude pédologique. *Ed. Agence de Coop. Cul. et Tech. Presse Universitaire de France, Paris, 339 p.*

Ehdaie B. (1995). Variation in Water-Use Efficiency and Its Components in Wheat: Pot and Field Experiments. *Crop Sci.*, 35: 1617-1626.

Giunta F. Motzo R. & Deidda M. (1992). Effect of drought and yield components of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *Field crop Research*, 33: 399-409.

Hang A. N. & Miller D. E. (1983). Wheat development as affected by deficit and high frequency sprinkler irrigation. *Agron. J.*, 75: 234-239.

Hurd E.A. (1968). Growth of roots of seven varieties of spring wheat at high and low moisture levels. *Agron. J.*, 60: 201-205.

Huson J.F. (1963). Le contrôle de l'efficacité des irrigations. Application au maïs. *B.T.I.*, 178: 147-148.

Ilbeyi A., Ustun H., Oweis T., Pala M. & Benli B. (2006). Wheat productivity and yield in cool highland environment: Effect of early sowing with supplemental irrigation. *Agricultural water Management*, 82: 399-410.

Jamieson, P.D., Francis G.S., Wilson D.R. & Martin R.J. (1995). Effects of water deficits on evapotranspiration from barley. *Agric. Meteorology*, 76: 41-58.

Jerry L. H., Thomas J. S. & Prueger J.H. (2001). Management Soils to achieve Greater Water Use Efficiency. *Agronomy Journal*, 93: 271-280.

Kanwaar L. J. & Swindale V.L. (1982). Managing soil resources to meet challenges to mankind. *Transactions of the 12th International Congress of Soil Science*, p: 1-32.

Kayyal H., Hamze A., Jarrah M. & Nachit M.M. (1993). Durum wheat production and quality in syria. In: *Seminar on Durum Wheat Quality in the Mediterranean Region. CIHAM, Options Méditerranéennes*. Zaragoza (Spain): 17-19 Nov: 127-132

Koon D.A. (1997). L'irrigation déficitaire: une stratégie d'avenir. *Prosi magazine* 343. Travaux de recherche au MSIRI.

Kribaa M., hallaire V., Curmi P. & Lahmar R. (2001). Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil & Tillage Research*, 60: 43-53.

Lasram M. & Ben Mechlia N. (2001). Les cultures irriguées dans les pays du Maghreb: Valorisation optimale des ressources et problèmes de marché. *C.R. Acad. Agric.*, 87: 161-117.

Le Houérou. (1995). Vegetation and land use in the Mediterranean basin by the year 2025: a prospective study in climatic change in the Mediterranean. Volume 1. *Unep*.

Li Feng M., Yan X., Li FR. & Guo AH. (2001a). Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semi-arid environment. *Agricultural water Management*, 47: 25-35.

Li Feng M., Song QH., Li H.S. & Li FR. (2001b). Effects of pre-sowing irrigation and phosphorus application on water use and yield of spring wheat under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 49: 173-183.

Li WL, Li ZZ & Li WD. (2004). Effect of niche-fitness at different water supply and fertilization on yield of spring wheat in farmland of semi-arid areas. *Agricultural Water Management*, 67: 1-13

Li ZZ, Li WD & Li WI. (2004). Dry-Period irrigation and fertilizer application affect water use and yield of spring wheat in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 65: 133-143.

Maertens C. (1988). Intérêt de l'endoscopie pour l'étude de l'influence de l'enracinement d'un couvert végétal sur l'utilisation de l'eau du sol. *In: Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère*, 213- 224. Ed. Calvet. *INRAF.*, Paris, 362 p.

Motzo R., Giovanna A. & Deidda M. (1993). Genotypic variation in durum wheat root systems at different stages of development in Mediterranean environment. *Euphytica*, 66: 197-206.

Musick J.T., Jones O.R., Stewart B.A. & Dusek D.A. (1994). Water-yield relationships for irrigated and dryland wheat in the US Southern Plains. *Agon. J.*, 86: 980-986.

Oweis T. (1997). Supplement Irrigation: Highly water-efficient practice. *ICARDA, Aleppo, Syria*, 16p.

Oweis T., Pala M. & Ryan J. (1998). Stabilizing rainfed wheat yield with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediterranean climate. *Agron. J.*, 90: 672-681.

Oweis T., Zhang H., Pala M. (2000). Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agron. J.*, 92: 231-238.

Oweis T. & Hacum A. (2001). Reducing supplemental irrigation demand by extending sowing dates. *Agricultural Water Management*, 50: 109- 123.

Pagès L., Doussan C., Vercambre G., Brukler L & Habib R. Relations sol-plante et absorption hydrique. In: Tiercelin J.R. (1998). *Traité d'irrigation*, 88-111. Ed. Lavoisier. Paris, 1011 p.

Panda R.K., Behera S.K. & Kashyap P.S. (2003). Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions. *Agricultural Water management*, 63: 37-56.

Perrier E R. (1988). Opportunities for the production using rainfall normally lost of cropping for temporal or spatial seasons. INCRISAT. *Drought research priorities for the dryland tropics*, 113-129. Ed. Bidinger et Johansen. Patancheru.

Qiang Zuo, Fen Jie, Renduo Zhang & Lei Meng. (2004). A generalized function of wheat's root length density distributions. *Vadose Zone Journal*, 3: 271-277.

Sebillotte M. (1988). Les transferts d'eau- système racinaire. *In: Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère*, 172-211. Ed. Calvet. INRAE., Paris, 362 p.

Stewart B.A. (1989). Limited-Irrigation/ Dryland Farming System for Efficient water Management in Semi-Arid Environments. *In: Proceedings of an IBSRAM Inaugural Workshop on Management of Vertisols for improved agricultural production*. ICRISAT, India p:101-112.

Tavakkoli A.R. & Oweis T. (2004). The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. *Agricultural Water Management*, 65:225-236.

Tewolde H. Fernandez C.J. & Erickson C.A. (2006). Wheat cultivars adapted to post-heading high temperature stress. *J. Agronomy & Crop Science*, 192: 111-120.

Verdier J. (1995). L'avenir de l'irrigation dans le monde et place de l'école française d'irrigation. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 81(7):1-200.

Vincent P. & Darleguy S. (1982). Biologie. Géologie. Ed., Vuibert, Paris, 272 p.

Wright K.J., Seavers G.P., Peters N.C. & Marshall M.A. (1999). Influence of soil moisture on the competitive ability and seed dormancy of *sinapis arvestis* in spring wheat. *Black well sc.*, 39: 307-317.

Xue Q., Zhu Z., Musick JT., Stewart B.A & Dusek D.A. (2003). Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. *Plant and soil*, 257:151-161.

Zhang H.& Oweis T. (1999). Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 38: 195-211.

Zhang B., Li F.M., Huang G., Cheng Z.Y. & Zhang Y. (2006). Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agricultural water Management*, 76: 28-42.

Zi-Zhen Li, Wei-De Li & Wen-Long Li. (2004). Dry-period irrigation and fertilizer application affect water use and yield of spring wheat in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 65: 133-143.

Synthèse

Synthèse

La céréaliculture pluviale, dans les étages bioclimatiques arides et semi-arides, est soumise au déficit hydrique permanent. La contrainte hydrique est le principal facteur limitant la production, causant des réductions de rendement allant jusqu'au sinistre total. La sortie de l'hiver représente la période de début de l'avènement du manque d'eau. Le déficit hydrique terminal est une caractéristique des environnements méditerranéens à faible pluviométrie. La culture, dans ce cas, croît et se développe sur un sol dont l'humidité, reconstituée au cours de l'hiver, décroît progressivement dans le temps pour devenir insignifiante en début d'été (Cooper et Gregory, 1987).

Le déficit hydrique, selon son intensité, affecte les cultures mises en place, dont la croissance devient active dès que la température commence à s'élever au printemps. Les sols ne sont pas assez profonds pour emmagasiner la quantité d'eau couvrant les besoins de la culture tout le long de son cycle. Sous ces conditions, il s'avère le plus souvent utile de recourir aux apports d'eau limités, et en des périodes critiques, pour maintenir le rendement de la culture à des seuils acceptables.

L'agriculture est considérée comme le plus gros consommateur d'eau; et ses besoins sont de plus en plus importants vu la nécessité d'augmenter les productions. Les changements qui interviennent sous l'aspect climatique, laissent présager une réduction de la ressource eau des régions arides et semi-arides (Kirda et Kander, 1999; Araus, 2004). L'agriculture irriguée doit, donc, relever le défi d'augmenter les rendements en utilisant moins d'eau.

L'eau disponible pour la transpiration de la plante et la production de la biomasse est dépendante du niveau de la ressource dans le profil cultural, de la pluviométrie et des apports supplémentaires. Elle est aussi dépendante des pratiques et des systèmes de cultures mis en place qui imposent un mode d'utilisation tout le long du cycle. Une bonne gestion de l'eau consiste à faire coïncider les disponibilités avec les besoins de la culture, tout en cherchant à augmenter l'extraction de l'eau du sol et à réduire les pertes autres que via le continuum sol- plante- atmosphère (Debaeke et Nolot, 2000).

La variation d'une année à l'autre de la distribution et des quantités de pluies reçues, conduit à de nombreux scénarios climatiques de déficit hydrique. Ceci affecte, plus ou moins, la production de la céréale. L'adoption de variétés et des pratiques culturales spécifiques est nécessaire pour minimiser les effets sur la production. Le déficit hydrique est de nature intermittente, à l'automne, il affecte la surface superficielle du sol induisant une faible installation de la culture.

Au printemps, il affecte la croissance végétative et réduit le développement de la surface foliaire et par là même la quantité de la biomasse arienne accumulée et le nombre de grains produit par m². Au cours du remplissage du grain, le déficit hydrique qui est quasi permanent, sous climat aride et semi- aride, affecte le remplissage du grain (Chennafi, 1996; Abbassenne *et al.*, 1998; Bahlouli *et al.*, 2005).

Pour un tel climat trois alternatives, en matière d'adaptation des cultivars au manque d'eau, existent. Il y a l'échappement au déficit hydrique lorsque la variété termine son cycle avant l'avènement du déficit hydrique de fin de cycle. Il y a l'évitement du déficit hydrique lorsque la variété se procure de l'eau et minimise ses pertes sous stress hydrique. Et il y a la tolérance du manque d'eau lorsque la plante continue à croître sous conditions de faible humidité du sol (Stapper et Harris, 1989).

A ces alternatives spécifiques à la variété, les pratiques culturales ajoutent les apports d'eau limités qui gèrent le déficit hydrique. Ils aident aussi la culture à faire une production élevée, en optimisant le mode d'utilisation de l'humidité du sol par réduction de l'évaporation du sol au profit de la transpiration lors des phases critiques pour la détermination du rendement économique. Debaeke et Nolot, (2000) adoptent le terme de "rationnement végétatif" pour décrire la gestion qui consiste à réduire la consommation de la plante, tôt en début de cycle, et utiliser l'eau économisée pour le remplissage du grain.

Pour mieux gérer la faiblesse et l'irrégularité de la pluviométrie, il faut chercher la meilleure combinaison des pratiques culturales et les options

variétales. Cette combinaison, dans les environnements sujets au déficit hydrique, a pour objectifs d'augmenter les disponibilités du sol en eau lors des périodes critiques par un meilleur stockage, un bon enracinement et une meilleure extraction. Elle doit limiter les pertes par évaporation directe du sol et optimiser l'utilisation de l'eau au cours du cycle de développement de la culture. La tolérance des stress hydriques modérés, la capacité de récupération après des stress intenses ainsi que la possibilité de faire des apports d'eau limités à des phases cruciales ne doivent pas être occultées.

L'augmentation de l'humidité du sol peut être obtenue par l'amélioration de la capacité de stockage pour l'eau. La pratique de la jachère nue, la jachère chimique, le travail conventionnel, le travail superficiel, le semis sans labour et le semis sous couverture végétale sont des alternatives applicables dans ce cas, en fonction l'environnement et du système de production (Cooper et Gregory, 1987; Unger *et al.*, 1991; Lopez-Bellido *et al.*, 1996; Aboudrare, 2001).

La gestion des apports d'engrais, du semis et l'adoption de variétés spécifiques permettent de contrôler l'extraction de l'humidité du sol en profondeur et la réduction de l'évaporation directe en surface (Unger, 1978; Siddique *et al.*, 1990; Turner, 2004; Tewolde *et al.*, 2006). Passioura (1976) mentionne que le rendement en grains du blé, qui compte pour son développement sur des quantités fixées et limitées d'eau, peut être augmenté substantiellement. Ceci peut être réalisé en forçant la culture d'économiser de l'eau, par le biais de la modulation de l'indice foliaire, pour la période de la post - anthèse déterminante de l'indice de récolte.

Lorsque la pluviométrie est déficiente pour couvrir les besoins minimaux de la culture, le moyen le plus intéressant pour gérer le manque d'eau et augmenter la production est de recourir à l'irrigation déficitaire d'appoint lors des stades végétatifs les plus sensibles (Caliandro et Boari, 1996; Kirda et Kander, 1999). Les rendements des cultures d'hiver peuvent être garantis par des préirrigations avant le semis, c'est à dire à l'automne et pendant la culture en fin de printemps (Baldy, 1984). Cet apport d'eau est considéré comme une technique de dry farming dans la mesure où il permet de valoriser les faibles quantités de pluies reçues et sauve ainsi la production qui serait, autrement,

nulle (Oweis *et al.*, 1999). Des rendements dépassant les 35 q ha⁻¹ sont possibles, selon Arar (1992), en Afrique du Nord, pour peu que des apports de quantités limités d'eau variant entre 50 et 200 mm, selon les saisons, soient apportés à la culture.

Les résultats de la présente étude indiquent que les hauts plateaux n'offrent pas toujours des conditions favorables à un développement potentiel de la culture du blé dur. L'eau, dans ce cadre là, est le facteur le plus limitant de la production dont le rendement en grains stagne à une valeur moyenne de 7q ha⁻¹. La formation d'un kg de matière sèche de la culture du blé dur nécessite, sous les conditions des hauts plateaux, 639 kg d'eau. Cette valeur du coefficient de transpiration montre que sous ces conditions de production, la culture du blé se montre très exigeante en eau. La demande moyenne décadaire en eau de la culture du blé entre les stades tallage et 2 noeuds n'est que de 46 mm, pour s'élever à 103 mm entre les stades gonflement et épiaison.

Les fortes températures, qui caractérisent le milieu de production, génèrent une forte capacité évaporante de l'air ambiant. L'efficacité d'utilisation de l'eau est de ce fait réduite, aboutissant à une faible productivité de l'eau dont la moyenne varie de 3,2 à 14 kg mm⁻¹ ha⁻¹. Cette variation est dépendante du scénario climatique, spécifique la campagne, de la variété et du stade végétatif subissant le stress hydrique (Chennafi *et al.*, 2005).

L'approche décadaire du bilan climatique révèle, en effet, que la région est soumise à un déficit hydrique élevé qui s'étale sur 9 mois (Chennafi *et al.*, 2006a). Seule la période hivernale permet la recharge en eau du réservoir sol. La valeur moyenne du déficit climatique correspondant au cycle de la plante est de 430,0 mm (1981-2003). Le déficit climatique varie de 60 à 754 mm en fonction des campagnes.

Pour la période allant du mois d'octobre au mois de mai, le déficit climatique prend une valeur moyenne de 430 mm. Par période végétative, le déficit climatique prend les valeurs de 112,0 mm durant la phase d'installation de la culture (octobre - décembre), 17,0 mm au cours du tallage-début montaison (janvier- février) et 300,0 mm au cours de la période de croissance active (mars-

mai). Ces résultats indiquent que la culture est exposée au manque d'eau au semis et à partir de la montaison, dès la sortie de l'hiver. C'est à partir du mois de mars que la demande en eau de la culture du blé devient importante.

Les résultats de l'étude fréquentielle indiquent que le déficit climatique moyen (50% des cas), au cours du cycle de la culture, est de 430,0 (octobre à mai) en année normale. En année défavorable, il atteint 566,0 mm. L'analyse des résultats montre que le cumul annuel des pluies reçues, en année défavorable, est inférieur à 320 mm. Il est supérieur à 432 mm en année favorable. Le déficit hydrique et la pluviométrie saisonniers expliquent 41,1% de la variabilité du rendement en grain de 23 campagnes. L'irrigation déficitaire de la céréale, en milieu semi-aride, est jugée de ce fait comme nécessaire pour maintenir la production à un seuil acceptable.

Selon Aidaoui (1994), c'est la période végétative la plus sensible au manque d'eau qui détermine la programmation des irrigations si on cherche à réduire des effets du stress et obtenir des rendements élevés. La pratique des apports d'eau limités constitue une stratégie de lutte contre les effets du déficit hydrique saisonnier, pour améliorer et stabiliser la production. Cette stratégie découle de la définition de l'irrigation déficitaire qui consiste à apporter des quantités d'eau inférieures à la demande de la plante. Ces quantités d'eau limitées sont apportées à des périodes végétatives qui valorisent l'eau.

L'analyse des résultats de l'expérimentation sur les apports d'appoint d'eau indique que l'irrigation déficitaire améliore significativement le rendement en grains et l'efficacité d'utilisation de l'eau. Les variétés améliorées Waha et Zb/Fg dont les rendements moyens sont de 32, 38 q ha⁻¹, valorisent mieux ces apports comparativement à la variété locale MBB. La moyenne du rendement en grains de cette dernière est de 23,50 q ha⁻¹. L'eau d'appoint améliore, en moyenne des deux campagnes, le rendement en grains de 8,7 q ha⁻¹ soit 41,6% du rendement en grains de la conduite pluviale. Pour les deux campagnes, le gain de rendement varie de 23,9% à 82,2% du rendement obtenu sous conduite pluviale.

L'efficacité d'utilisation de l'eau est positivement et significativement corrélée avec le rendement en grains des différents traitements chez les trois variétés de blé dur. Les coefficients de corrélation prennent les valeurs $r = 0.772^{**}$, 0.740^{**} et 0.875^{**} respectivement pour Zenati Bouteille/Flamengo, Waha et MBB. Ces valeurs indiquent que l'augmentation des rendements est liée à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. La régression des rendements en grains sur les cumuls d'eau reçus (pluie + irrigation) qui varient de 200, à 458,4 mm, donne les modèles suivants:

$$\mathbf{RDT_{ZB/FG} (q\ ha^{-1}) = 0,087(P+I) - 0,5 \quad (R^2 = 0,527)}$$

$$\mathbf{RDT_{Waha} (q\ ha^{-1}) = 0,113 (P+I) - 2,9 \quad (R^2 = 0,668)}$$

$$\mathbf{RDT_{MBB} (q\ ha^{-1}) = 0,100 (P+I) - 10,1 \quad (R^2 = 0,714)}$$

L'efficacité moyenne d'utilisation de l'eau est de 8.7, 11.3 et 10.0 kg ha⁻¹ mm⁻¹ respectivement pour ZB/Flamengo, Waha et Mohammed Ben Bachir. Waha répond mieux au cumul d'eau reçu. Tewolde et al. (2006) la performance du rendement en grain des cultivars de blé est liée à la précocité d'épiaison.

Ces résultats confirment ceux de la synthèse des données des 10 campagnes, sur la réponse de la variété Waha à l'irrigation déficitaire. La synthèse indique que le stress hydrique observé réduit, en moyenne, le rendement en grains de 58,5%. Le gain de rendement en grains dû à l'irrigation déficitaire est de 18,16 q/ha, représentant une augmentation relative de 93,4% par rapport au rendement moyen du témoin pluvial.

Le gain de rendement en grains dû à l'effet de l'irrigation déficitaire est positivement corrélé avec la pluie du mois de mai ($r = 0.58$, $P < 0,05$) et négativement corrélé avec le cumul des pluies hivernales ($r = -0.709$, $P < 0,05$). L'apport d'eau réalisé au stade épiaison est mieux valorisé par la culture que celui fait à des stades plus précoces. Ceci traduit l'importance de l'effet de l'irrigation limitée à l'épiaison. La variation de la réponse du rendement en grains selon les campagnes s'explique par les effets subis par la culture suite aux événements climatiques intervenant en amont et en aval de la date d'apport d'eau.

L'objectif de la pratique d'irrigation déficitaire régulée est de réduire des effets du degré du stress hydrique que subit la plante. Cette stratégie consiste à faire des apports d'eau limités pour maintenir l'humidité du sol constante, et la culture moins stressée (Tavakkoli et Oweis, 2004; Ilbey *et al.*, 2006). Les résultats indiquent qu'en adoptant la stratégie de l'irrigation déficitaire régulée qui assure uniquement 50% des besoins, la baisse de rendement en grains par rapport au rendement de la conduite optimale varie de 47,0 à 88,8% du rendement en grains de la conduite pluviale. Le gain de rendement en grains induit par la stratégie de l'irrigation déficitaire régulée qui assure uniquement 50% des besoins varie de 27,8 à 64,8% du rendement en grains de la conduite pluviale. La quantité d'eau utilisée par le traitement $\frac{1}{2}$ PCC durant le cycle végétatif de la culture est 198,5 mm.

Les résultats de la présente recherche concordent à montrer que les apports d'eau sur blé dur, en milieu semi-aride, contribuent effectivement à améliorer la production pluviale. La pratique de ces apports vient en complément de l'application d'un ensemble de techniques, dont certaines ont été citées ci-dessus, pour une meilleure gestion de l'eau qui est peu disponible dans la région ciblée. Cette gestion porte sur les interactions, souvent très complexe, de tout cet ensemble de facteurs.

Comme perspective, des modèles de simulation doivent être utilisés pour arriver à détecter le meilleur scénario applicable en fonction de la typologie des années comme le mentionnent Sivakumar et Glinni (2002). Ces modèles utilisent des bases de données climatiques de longues durées comme inputs pour déterminer la probabilité de réponse du rendement en grains à toute une série de combinaisons de facteurs dont l'humidité du sol au semis, les dates et densités de semis, la phénologie de la variété, la distribution de la pluie et les éventuels apports d'eau à des périodes critiques (Stapper and Harris, 1989; Fereres *et al.*, 1993; Muchow *et al.*, 1994; Aboudrare *et al.*, 2000; Chapman *et al.*, 2002; Mailhols, 2003).

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les apports d'eau limités sur la culture du blé dur améliorent d'une manière significative le rendement et ses composantes ainsi que l'efficacité d'utilisation de l'eau en environnement où l'eau est limitée (Zhang et Oweis, 1999; Tavakoli et Oweis, 2004; Turner, 2004a; Chennafi et *al.*, 2006b). Le gain de rendement est lié aux stades d'apport, la quantité d'eau apportée, la variété et la campagne. Ces apports d'eau réduisent l'effet de la contrainte hydrique. Le développement potentiel de la culture du blé dur est pénalisé par les conditions des hauts plateaux où le rendement grain stagne autour d'une valeur moyenne de 7 q ha⁻¹. Les résultats de la présente étude indiquent qu'en moyenne le déficit hydrique cause des dégâts de l'ordre de 58,5% à 94,3%. Ces résultats prédisent les effets néfastes du manque d'eau à l'égard de la plante sous le potentiel d'adaptation culturelle des hauts plateaux. Ainsi, l'insuffisance, la variabilité et l'imprévisibilité des précipitations associées à l'inadéquation des facteurs de gestion agronomique engendrent la faiblesse de la production.

En effet, l'eau est le facteur le plus déterminant de la production des céréales dans cette région. L'estimation des besoins en eau de la culture du blé dur donne en moyenne 561 mm de mars à mai pour un déficit pluviométrique de 300,0 mm. La formation d'un kg de matière sèche dans le cas du blé dur, sous les conditions des hauts plateaux nécessite 639 kg d'eau. Les valeurs relatives aux exigences en eau, déficit pluviométrique et au coefficient de transpiration, montrent que la culture du blé est très exigeante en eau dans un milieu qui reste défavorable. La demande moyenne décadaire en eau de la culture du blé aux stades tallage et 2-3 noeuds est 46 mm (mars et avril). La consommation s'élève à 103 mm/décade au stade épiaison- floraison.

La région des hauts plateaux ne répond pas aux exigences en eau de la culture de blé dur. L'étude sur le déficit climatique souligne que le seuil de déficit pluviométrique et la hauteur pluviométrique relatifs aux trois saisons, installation de la culture (Octobre-décembre), saison intermédiaire (janvier-février) et de croissance (mars-mai) sont classées en moyenne au cours de la période 1981 à 2003 comme étant déficitaires en eau, avec et par ordre 217.1, 139.4 et 209.5 mm pour des hauteurs pluviométriques de 116.8, 75 et 112.7 mm. Le déficit

relatif moyen relevé pour les trois saisons est de 85,88% par rapport à la hauteur moyenne de pluie reçue. Ainsi, le déficit et le cumul pluviométrique saisonniers traduisent 41,1% de la variation de la production grain au cours de 23 campagnes. En revanche, l'alternative considérée durable est celle qui consiste à faire des apports d'eau limités pour améliorer la production pluviale. La culture du blé exige des apports d'eau à tous les stades végétatifs, comme l'eau est rare, un apport ou plusieurs inférieurs à la demande de la plante ont été réalisés.

Les résultats indiquent que le gain de rendement en grains dû à l'irrigation déficitaire est de 18,16 q ha⁻¹, représentant une augmentation relative de 93,4% par rapport au rendement moyen du pluvial. Cependant, le gain de rendement de l'apport tardif (épiaison) est plus conséquent. D'autre part, le gain de rendement en grains induit par l'irrigation déficitaire régulée qui assure uniquement 50% des besoins en eau de la plante varie de 27,8 à 64,8% du rendement en grains de la conduite pluviale. Néanmoins, la variation de la réponse du rendement à l'irrigation déficitaire est liée aux événements climatiques avant et suivant l'apport d'eau. D'autre part, le maintien d'un certain taux d'humidité constant dans le profil cultural a produit un rendement grain variant de 31,96 à 21,75 q ha⁻¹ avec une quantité d'eau de 387,7(optimum) à 198,3 mm (^{1/2}PCC). Ainsi, les chiffres illustrent une augmentation relative conséquente du rendement grains, à l'optimum (100% PCC), ^{3/4}PCC, ^{3/4}PCCE et ^{1/2}PCC, en moyennes des trois campagnes, de 113.07%, 75.5%, 57.8% et 44.8% respectivement.

Les résultats indiquent qu'en adoptant la stratégie de l'irrigation déficitaire régulée qui assure uniquement 50% des besoins, la baisse de rendement en grains par rapport au rendement de la conduite optimale varie de 47,0 à 88,8% du rendement en grains de la conduite pluviale. L'efficacité d'utilisation de l'eau, en moyenne, varie de 3,2 à 14 kg mm⁻¹ ha⁻¹ pour l'irrigation d'appoint et dans le cas de l'irrigation déficitaire régulée, elle est de 8,2 pour l'optimum à 10,9 kg mm⁻¹ha⁻¹ (^{1/2}PCC). En milieu méditerranéen, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture du blé par la pratique d'irrigation déficitaire régulée est de 7,7 à 9,2 kg mm⁻¹ ha⁻¹ (Oweis et al., 2000). La productivité de l'eau reste faible par suite de l'effet induit du pouvoir évaporant de l'air. Les conséquences des apports d'eau

limités sur la production sont variables selon le degré et la durée du stress hydrique ainsi que des capacités de tolérance de la plante.

L'agriculture irriguée contribue pour une part très importante à l'amélioration de la production par une optimisation de l'utilisation de l'eau. Elle doit fournir 70-75% du surplus des besoins en production grain (Araus, 2004). En revanche, une gestion effective de l'eau en milieu semi-aride représente une solution permanente du système de production. Une rigueur s'impose pour la bonne gestion des ressources en eau pour une agriculture essentiellement pluviale pour une région caractérisée par un potentiel naturel confronté à la dégradation, donc fragile et nécessite une attention particulière. L'irrigation déficitaire est un outil d'avenir pour la gestion de l'eau pour une agriculture irriguée durable. Cependant, elle doit être accompagnée d'une meilleure gouvernance des autres facteurs de production sur laquelle repose l'enjeu de l'irrigation déficitaire pour orienter l'efficacité de l'eau. La gestion agronomique qui consiste à utiliser des cultivars à épiaison précoce (Tewolde et al., 2006), à obtenir une forte production par unité d'eau disponible grâce à un système de labour, de précédent cultural, de fertilisation (Lopez-Bellido, 2007), représente un outil efficace d'appui pour une gestion des apports d'eau limités en environnement où l'eau est limitée. Les apports d'eau limités sur la céréale en milieu semi-aride sont recommandés pour améliorer le système de production pluviale. Néanmoins, elle doit être réfléchi en fonction:

- 1- du contexte agropédoclimatique qui introduit les variétés résistantes, valorisant l'eau; l'amélioration des propriétés physico-chimiques des sols pour une meilleure capacité de rétention de l'eau et un enracinement profond et accompagnés de techniques agricoles appropriées de fertilisation, respects des dates de semis et protection des végétaux.
- 2- de la conservation, la protection, l'exploitation et la gestion des ressources en eau, à l'égard de l'exploitation agricole pour rendre durable l'eau.
- 3- Une technologie appropriée en vu d'une irrigation efficace. Elle contribue à acquérir des banques de données fiables à l'échelle nationale. On recommande des champs d'essai, disposant de stations agro météorologiques automatiques, de matériels de mesures relatifs au sol, aux éléments climatiques et à la plante.

- 4- Les mesures relatives à l'aspect de la plante, comme l'indice foliaire par traitement d'image, le système racinaire, les composantes du rendement et d'autres mesures relatives à la plante, liés aux degrés de stress et l'irrigation limitée

Tous ces éléments concourent à une meilleure efficacité de la pratique des apports d'eau limités et une meilleure productivité de l'eau avec un champ plus étendu et varié de données de bases. Les modèles de simulation représentent un outil puissant de prédiction du rendement potentiel et de l'efficacité d'utilisation de l'eau pluviale dans le cas du blé pour une gamme d'environnement caractérisés par des conditions de sols, de climat et de pratiques agronomiques en vue de déterminer le risque et les options de gestion (Asseng et al., 1998; French et Schultz, 1984; Turner, 2004b). En effet, les modèles mathématiques permettent de mieux cerner l'introduction de nombreux paramètres sur une série d'expérimentations, relatives à une diversité de lieux, de variétés et de pratiques culturales, de résultats d'analyses sur la plante en fonction du cycle végétatif. Ces outils axés sur une recherche, avec beaucoup de persévérance et d'attention, contribuent à bien pratiquer l'irrigation déficitaire sous conditions semi-arides. Ces perspectives étudiées envisagent un contexte environnemental, économique et par conséquent social.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbassenne F., Bouzerzour H. & Hachemi L. (1997). Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride d'altitude. *Annales Agronomiques de l'INA (Alger)*, 18: 24- 36.

Aboudrare A. (2001). Stratégies de stockage et d'utilisation de l'eau pour le tournesol pluvial dans la région de Mekhnès. *Thèse Doctorat IAV Hassan II*, Rabat, Maroc, 175 pages.

Aboudrare A., Bouaziz A. & Debaeke P. (2000). Recherche de stratégies de conduite du tournesol dans les conditions pluviales de la région de Mekhnès. II. Simulations à l'aide du modèle EPIC- phase. *Sécheresse*, 11: 19-27.

Aidaoui A. (1994). Etude du déficit hydrique séquentiel sur les rendements: Application au cas du Sorgho-grain *Sorghom bicolor* (L) *Moench*. *Thèse de Doctorat. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts. Montpellier, France*, 117 pages.

Arar A. (1992). The role of supplementary irrigation in increasing productivity in the near east region. *In: Proceedings of the International Conference on Supplementary Irrigation and Drought Management, Valenzano-Bari, Italy, Options méditerranée CIHEAM*, 1: 1-10.

Araus L. (2004). The problems of sustainable water use in the mediterranean and research requierements for agriculture. *Ann. Appl.Biol.*, 144: 259-272.

Asseng S, Keating B.A, Fillery I.R.P., Gregory P.J., Bowden J.W, Turner N.C., Palta J.A. & Arbrecht DG. (1998). Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia. *Field Crops Research*, 57: 163-179.

Bahlouli F., Bouzerzour H., Benmouhamed A. & Hassous K. L. (2005). Selection of hight yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Journal of Agronomy*, 4: 360-365.

Baldy C. (1984). Utilisation efficace de l'eau par la végétation en climats méditerranéens vers une utilisation plus complète des pluies, des eaux de ruissellement et des irrigations. *Bull. soc. Fr. 131. Actual. Bot.*, 2/3/4: 491- 499.

Caliandro A. & Boari F. (1996). Supplementary irrigation in arid and semi-arid regions. *Mediterranean*, 7: 24-27.

Chapman S.C., Cooper M. & Hammer G.L. (2002). Using crop simulation to generate genotype by environment interaction effects for sorghum in water-limited environments. *Aust. J. Agric. Res.*, 53: 379-389.

Chennafi H. (1996). Optimisation de l'apport d'apoint d'eau sur trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à différents stades végétatifs. Cas des hautes plaines Sétifiennes. *Thèse magister, INA. Alger*. 64 p.

Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. & Saci A. (2005). La réponse de la culture de blé dur (*Triticum Durum* Desf.) variété waha à l'irrigation déficitaire en zone semi-aride *In:Proceeding du 3^{eme} Congrès Méditerranéen <<WATMED>>*, Marrakech, p: 54-59.

Chennafi H., Bouzerzour H., Aidaoui A. & Chenafi A. (2006a). Approche d'évaluation du déficit climatique pour la pratique d'une irrigation déficitaire sur blé dur en milieu semi-aride des hautes plaines orientales d'Algérie. *In:Proceedings du 3^{eme} Congrès Méditerranéen « WATMED »*, Tripoli (Liban), p: 11-117.

Chennafi H., Aidaoui A., Bouzerzour H. & Saci A. (2006b). Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5: 854-860.

Cooper P.J.M. & Gregory P.J. (1987). Soil water management in the rainfed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use Manage*,3: 57-62.

Debaeke P. & Nolot J.M. (2000). Testing crop management systems for sunflower in southwest France. *In: Proceedings of the 15th International Sunflower Conference*, INSA, Toulouse, p. 1-6.

Fereres E., Orgaz F & Villalobos F.J. (1993). Water use efficiency in sustainable agricultural systems. *In: Proceedings of the International Crop Science*, CSSA, Madison, WI, USA, p. 83-89.

French R.J. & Schultz J.E. (1984). Water use efficiency of wheat in a mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Australian Journal of Agricultural Research*, 35: 743-764.

Ilbeyi A., Ustun H., Oweis T., Pala M. & Benli B. (2006). Wheat productivity and yield in cool highland environment: Effect of early sowing with supplemental irrigation. *Agricultural water Management*, 82: 399-410.

Kirda C. & Kander R. (1999). Water, no longer a plentiful resource, should be used sparingly in irrigated agriculture. *In: Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C.,*

Nielsen, D.R. Ed., *Crop Yield Response to Deficit Irrigation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p: 1–20.

Lopez-Bellido L., Fuentes M., Castillo J.E., Lopez-Garrido F J. & Fernandez E.J. (1996). Long-term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agron. J.*, 88: 783–791.

Lopez-Bellido R., Lopez-Bellido L., Bnitez-Vega & Lopez-Bellido F. (2007). Tillage system, preeding crop, and nitrogen fertilizer in wheat crop. *Agron.J.*, 99: 66-72.

Mailhols J.C. (2001). Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison. *Thèse PhD. Univ. Montpellier II*. 296 p.

Muchow R.C., Hammer G L & Vanderlip R L. (1994). Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. II. Effects of planting date, soil water at planting, and cultivar phenology. *Field Crops Res.*, 36: 235–246.

Oweis T., Pala M. & Ryan J. (1999). Management alternatives for improved durum wheat production under supplemental irrigation in Syria. *Eur.J. Agron.*, 11: 255-266.

Oweis T, Zhang H, Pala M. (2000). Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agronomy Journal*, 92: 231–238.

Oweis T. (1997). Supplement Irrigation: Hightly water-efficient practice. *ICARDA, Alepo, Syria*, 16 p.

Passioura J.B. (1976). Physiology of grain yield in wheat growing on stored soil water. *Aus. Journal of Plant Physiology*, 3: 559–565.

Siddique K.H.M., Tennant D., Perry M W.& Belfort R. K. (1990). Water use and water use efficiency of old and modern cultivars in a Mediterranean-type environment. *Aust. T. Agri.Res.*, 45: 431-447.

Sivakumar M.V.K. & Glinni A.F. (2002). Applications of crop growth models in the semi-arid regions. *In: Ahuha L.R., Ma L., Howell T.A. Ed., Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer*. Lewis Publishers, 178–205.

Stapper M. & Harris H.C. (1989). Assessing the productivity of wheat genotypes in an Mediterranean climate using a crop-simulation model. *Field Crops Res.*, 20: 129–152.

Tavakkoli A.R. & Oweis T. (2004). The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. *Agricultural Water Management*, 65:225-236.

Tewolde H., Fernandez C.J. & Erickson A. (2006). Wheat cultivars adapted to post-heading high temperature stress. *J. Agronomy & Crop Science*, 192: 111-120.

Turner N. (2004a). Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Annals of Applied Biology*, 144: 139–174

Turner N. (2004b). Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. *J. of Exp. Botany*, 55: 2413-2425.

Unger P.W., Stewart B.A., Parr J.F. & Singh R.P. (1991). Crop residue management and tillage methods for conserving soil and water in semi-arid regions. *Soil Tillage Res.*, 20: 219–240.

Unger P.W. (1978). Straw-mulch rate effect on soil water storage and sorghum yield. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 486–491.

Zhang H.& Oweis T. (1999). Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 38: 195-211