

Optimisation de l'irrigation de complément du blé dans la région de Chlef

Présentée par :

Abdelkader BOUTHIBA

Rapporteur HAMOUDI A.S. Professeur, université de Chlef

Soutenue le 18 Décembre 2007

Devant le jury d'examen : Président AIDAOUI A. Professeur, INA El-harrach. Examineur DEBAEKE P. Directeur de recherches, INRA Toulouse. Examineur REMINI B. Professeur, université de Blida
Examineur MOUHOUCHE B. Maître de conférences, INA El-harrach.

Table des matières

Remerciements . .	7
Résumé . .	8
Abstract . .	9
ص خ ل م ا . .	10
Introduction . .	11
I- Chapitre I : Problématique, situation de la culture de blé dans le contexte national et international . .	13
I-1-Importance de la culture de blé . .	13
I-2-Evolution des superficies et des productions dans le monde . .	13
I-3-Importance de la culture de blé en Algérie et dans les pays du Maghreb . .	15
I-4-Principales zones céréalières en Algérie . .	16
I-4-1-Zone des plaines littorales et sub-littorales . .	16
I-4-2-Zone des hautes plaines telliennes (altitude comprise entre 700 et 900 m) . .	17
I-4-3-Zone des basses plaines telliennes . .	17
I-4-4-Zone agro-pastorale . .	17
I-4-5-Zone des massifs montagneux . .	17
I-5-Situation de la céréaliculture dans le périmètre du moyen Chélif . .	17
I-5-1-Variabilité des superficies et des rendements . .	17
I-5-2-Les contraintes techniques liées aux pratiques des agriculteurs . .	18
II- Chapitre II : l'Irrigation de complément . .	20
II-1-Définition . .	20
II-2- Importance de l'irrigation de complément en zones aride et semi-aride . .	20
II-3- Interaction irrigation et fertilisation azotée . .	20
II-4-Rendements en conditions pluviales . .	21
II-5-Rendements en conditions irriguées . .	22
II-6-Périodes d'intervention . .	22
II-6-1-Irrigations en début de cycle . .	23
II-6-2-Irrigations en fin de cycle . .	23
II-7-Impact sur les composantes de rendement . .	24
II-8- Réponse variétale à l'irrigation de complément . .	24
Chapitre III : Notions de sécheresse, déficit hydrique en relation avec la culture de blé . .	25
III-1-Seuil de tolérance de la culture de blé vis-à-vis du déficit hydrique . .	25
III-2- Adaptation à la sécheresse . .	25
III-2-1-Mécanismes de l'adaptation à la sécheresse . .	25
III-3- Effet du déficit hydrique sur la croissance et le développement du blé . .	26
III-3-1- La croissance végétative . .	26
III-3-2- La croissance racinaire . .	26
III-3-3-La durée des stades de croissance en relation avec le stress hydrique . .	27
III-3-4- Dates d'apparition des stades phénologiques . .	27

III-3-5- Stades critiques du blé vis-à-vis de l'eau . . .	28
III-3-6-Effet du déficit hydrique sur l'efficience de l'eau . . .	28
III-3-7-Effet du déficit hydrique sur les composantes de rendements . . .	29
III-4-Méthodes d'atténuation du déficit hydrique . . .	29
III-5-Interaction phénologie-modèle de consommation en eau . . .	29
Chapitre IV : Efficience d'utilisation de l'eau . . .	31
IV-1-Définition . . .	31
IV-2-Efficience de l'eau des pluies (régime pluvial) . . .	31
IV-3-Efficience de l'eau d'irrigation . . .	31
IV-4-Variation de l'efficience de l'eau . . .	32
IV-4-1-Quantités d'eau appliquées . . .	32
IV-4-2-Consommation en eau . . .	32
IV-5-Stratégies d'irrigation et efficience de l'eau . . .	33
IV-5-1-Efficience en condition de déficit hydrique . . .	33
IV-6-Relation efficience de l'eau et rendements . . .	33
IV-7-Rôle des techniques culturales dans l'amélioration de l'efficience de l'eau . . .	34
IV-8-Rôle de la réserve en eau du sol . . .	34
IV-9-Choix des variétés . . .	35
Chapitre V : Etude de la consommation en eau du blé . . .	36
V-1- Estimation de l'évapotranspiration potentielle . . .	36
V-2-Variation de l'évapotranspiration . . .	36
V-3-Méthodes d'estimation des besoins en eau d'irrigation . . .	36
V-3-1-Besoins en eau sur le cycle de croissance . . .	37
V-3-2- Besoins en eau par stade de croissance . . .	37
V-4-Relation évapotranspiration et rendements . . .	38
V-5-Etude du coefficient cultural . . .	38
V-5-1-Définition . . .	38
V-5-2- Variation du coefficient cultural . . .	39
V-5-3- Comparaison des Kc des variétés locales et introduites . . .	39
V-5-4- Relation coefficient cultural et indice de surface foliaire . . .	40
Chapitre VI : Matériels et méthodes . . .	42
VI-1- Localisation du site d'étude . . .	42
VI-2- Caractéristiques climatiques de la région d'étude . . .	42
VI-2-1- Pluviométrie . . .	42
VI -2-2- Déficit climatique . . .	43
VI -2-3- Températures . . .	43
VI -2-4- Durée d'insolation . . .	44
VI -2-5- Humidité relative . . .	45
VI -2-6- Vitesse du vent . . .	45
VI -3- Climatologie des quatre années d'étude . . .	46
VI -3-1- Pluviométrie (98-2001) . . .	47
VI -3-2- Températures (98-2001) . . .	49

VI -3-3- Déficit climatique (98-2001) . . .	49
VI -3-4- Vitesse du vent (98-2001) . . .	52
VI -3-5- Humidité relative (98-2001) . . .	52
VI -4- Caractéristiques pédologiques de la région . . .	53
VI -4-1- Analyse physique . . .	54
VI -4-2- Analyse chimique . . .	54
VI -5- Matériel utilisé . . .	55
VI -5-1- Matériel végétal . . .	55
VI -5-2- Matériel d'irrigation . . .	56
VI -5-3- Humidimètre à neutrons . . .	56
VI-6- Méthodes utilisées . . .	57
VI-6-1- Traitements utilisés et évaluation des doses d'irrigation . . .	58
VI -6-2- Evaluation de la réserve en eau du sol . . .	58
VI -6-3- Estimation de l'évapotranspiration . . .	59
VI -7- Qualité de l'eau d'irrigation . . .	61
VI -8- Mesures effectuées sur la plante . . .	61
VI -9- Calcul statistique . . .	61
Chapitre VII : Résultats et discussions . . .	62
VII-1- Variation globale des rendements . . .	62
VII-1-1- Effets du cultivar, de la stratégie d'irrigation et de l'année sur les rendements . . .	62
VII-1-2- Effet de l'interaction stratégie d'irrigation-cultivars sur les rendements . . .	63
VII-1-3- Variabilité annuelle des rendements . . .	63
VII-2- Modèle de formation de rendement . . .	65
VII-2-1- Variation du rendement en fonction de l'évapotranspiration . . .	65
VII-2-2- Variation du rendement en fonction de l'indice de récolte . . .	67
VII-2-3- Efficience d'utilisation de l'eau (EUE) . . .	71
VII-2-4- Variation du rendement en fonction de l'efficience de l'eau . . .	74
VII-3- Relations rendement en grains- rendement en paille . . .	76
VII-4- Les composantes de rendement . . .	77
VII-4-1- Le nombre de grains par mètre carré . . .	77
VII-4-2- Le poids moyen du grain . . .	78
VII-5- Variation de la consommation en eau selon les cultivars . . .	81
VII-5-1- La consommation totale sur le cycle de croissance . . .	82
VII-5-2- La consommation en période post-épiaison . . .	82
VII-6- Besoins en eau d'irrigation . . .	84
VII-6-1- Etude des coefficients culturaux . . .	84
VII-6-2- Variabilité annuelle . . .	86
VII-6-3- Variabilité mensuelle . . .	88
VII-7- Etude de la croissance . . .	89
VII-7- 1- Indice de surface foliaire . . .	89
VII-8- Relation indice de surface foliaire et coefficient cultural . . .	95

VII-9-Développement et durée de la surface foliaire en relation avec les rendements ..	97
Conclusion générale et recommandations . .	99
Références bibliographiques . .	103

Remerciements

La partie des remerciements est, sans doute, une partie aussi difficile que la rédaction de la thèse, car les personnes, ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce document, sont tellement nombreuses, qu'il m'est difficile (par oubli) de citer dans un temps record (échéances du 31 Décembre obligeant !) toutes ces personnes.

Je commencerai sans hésitation, par M.Philippe Debaeke, directeur de recherches à l'INRA de Toulouse (France) de m'avoir accueilli dans son laboratoire à plusieurs reprises, de me consacrer une partie de son temps malgré ses obligations professionnelles et ses préoccupations familiales sans oublier sa femme pour l'accueil qu'elle me réserve à chaque invitation à la maison. Qu'ils soient tous les deux remerciés.

Je remercie M. Saaed Abdulamir Hamoudi, professeur à l'université de Chlef, d'avoir proposé et dirigé ce travail oh ! Combien important pour lui cette notion d'irrigation de complément du blé qui reste, à son avis, la seule alternative pour stabiliser et améliorer les rendements dans les pays arabes consommateurs potentiels de céréales.

Mes remerciements les plus particuliers à M. Aidaoui Abdellah, professeur à l'INA d'Alger, d'avoir répondu favorablement et dès le premier mail quand je lui ai demandé de m'honorer pour présider ce jury. Je n'oublierai, sans doute jamais, l'accueil qu'il m'a réservé en me supportant et m'hébergeant pendant une dizaine de jours à Montpellier, quand il préparait à l'époque sa thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur Remini Boualem, professeur à l'université de Blida, d'avoir bien voulu examiner ce travail.

Je ne saurais oublier, M. Mouhouche Brahim, Maître de conférences à l'INA d'Alger, mon ex : enseignant d'irrigation, connu de tous à l'INA par son sérieux, sa gentillesse et sa ponctualité dans le travail. Qu'il soit remercié énormément.

Mes vifs remerciements à mon cousin Bouthiba Mohamed ; bibliothécaire de la faculté pour sa gentillesse et sa grande patience pendant la mise en forme de la partie bibliographique et à sa femme Abla qui s'est toujours chargée, pendant mes absences, de mes séances de TD/TP de 3^e année Ecologie & Environnement.

Je remercie mon ami et collègue, Abdelkader Dilmi Bouras, doyen de la faculté des sciences biologiques et agronomiques, qui m'a beaucoup encouragé à soutenir avant les échéances et qui m'a aidé en me déchargeant, à quelques jours de la soutenance, de certaines tâches administratives, pour me consacrer pleinement à la thèse.

Mes remerciements les plus sincères, à mes amis et collègues : Abdelkader Saadi pour son soutien moral et ses encouragements permanents pour sortir, dit-il à chaque fois, définitivement et le plus vite possible de la....., Mourad Taherti, chef de département de biologie qui m'a beaucoup aidé ces deux dernières années dans mes tâches de vice doyen de la pédagogie. Sans lui, le département aurait, sans doute, connu des situations pédagogiques peu souhaitables.

Enfin j'arrive à la personne avec qui je partage tout ...ma femme qui m'a soutenu et encouragé à terminer avant les fameuses échéances du 31/12. Je la remercie d'avoir suivi et supporté, toute seule, les enfants dans leurs cursus scolaire et universitaire, pendant mes absences fréquentes.

Que toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail (amis et collègues de travail), soient remerciées

Résumé

L'étude a porté sur quatre saisons de croissance (98-2001) présentant des climatologies plus ou moins contrastées. Les cultivars utilisés sont Vitron Waha et Chen's. Les traitements d'irrigation adoptés sont: NI (conduite pluviale), EI (Irrigation précoce, jusqu'à épiaison), LI (Irrigation tardive, à partir de l'épiaison) et enfin FI (Pleine irrigation, au cours de la saison entière).

Contrairement aux relations classiques; linéaires obtenues souvent dans les fonctions de production relatives aux différentes céréales, les relations obtenues au cours des quatre saisons de croissance (98-2001), montrent que les rendements en grains et l'indice de récolte évoluent exponentiellement avec l'évapotranspiration saisonnière. L'interaction Irrigation x Variété est significative à $P < 0.001$ en 1998, 1999 et 2001 et à $P < 0.05$ en 2000.

La plus grande performance variétale a été réalisée en 1998 sous irrigation permanente (FI) avec des rendements de l'ordre de $7500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, $6250 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $5419 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivement pour Vitron, Waha et Chen's.

L'efficacité d'utilisation de l'eau de l'irrigation est bien plus importante avec EI ($10.7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) qu'avec LI ($6.2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) indépendamment du cultivar.

L'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation est maximale en condition potentielle FI ($12.9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) car c'est la stratégie la plus appropriée

Le modèle de formation de rendement sous irrigation potentielle n'est pas extrêmement différent entre les trois cultivars mais les composantes de rendement sont différemment affectées par le déficit hydrique.

Les valeurs maximales des coefficients culturaux varient de 0.91 à 0.94 pour les quatre saisons et 1.0 (Vitron), 0.97 (Waha) et 0.89 (Chen's) pour les 3 cultivars.

S'agissant de la consommation en période post-épiaison, le suivi de l'évapotranspiration montre que l'indice de récolte est positivement corrélé à l'évapotranspiration relative post-épiaison (ET post-épiaison/ET) avec $R^2 = 0.72$, $P < 0.001$.

Pour ce qui est du choix du cultivar dans une région semi-aride telle que la région de Chlef, et dans le cas où l'eau d'irrigation est entièrement disponible, le cultivar Vitron serait un bon choix si le potentiel de la culture est réalisable.

Mots clés : Blé dur, Indice de récolte, Régions semi-arides d'Algérie, Efficience de l'eau, Coefficient cultural, Evapotranspiration.

Abstract

The response of three durum wheat cultivars (C: Chen's, V: Vitron, W: Waha) to irrigation was studied during four years in semi-arid Algeria (Chlef). The four treatments were: NI (unirrigated), EI (early irrigation, up to heading), LI (Late irrigation, from heading), FI (full irrigation, over the entire season). FI increased rainfed grain yield (1300 kg ha^{-1}) by 270 %, EI by 107 %, and LI by 67 %. The variety x irrigation interaction was significant each year.

Under irrigation, cv. Vitron was generally the most productive cultivar while in rainfed conditions cv. Waha always resulted in the highest grain yield. Grain yield increased exponentially with seasonal evapotranspiration ($r^2 = 0.741$) and harvest index ($r^2 = 0.873$). Water use efficiency for grain ranged from $4.6\text{-}5.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (NI) to $9.6\text{-}10.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (FI) as a function of cultivar and irrigation, cv. Vitron and cv. Waha (full irrigation) and cv. Waha (rainfed) being the most efficient cultivars.

The seasonal Kc values for the three cultivars were 0.64 (V), 0.62 (W) and 0.54 (C). The corresponding peak Kc values were 1.0, 0.97 and 0.89 respectively. Kc was closely related to leaf area index and specific logarithmic relationships were calculated for each cultivar.

Irrigation scheduling should be adapted to the type of cultivar in relation to its potential yield and LAI development pattern.

Keys words : Durum wheat, Harvest index, semi-arid regions of Algeria, Water use efficiency, Crop coefficient, Evapotranspiration

ص خ ل م ا

إن إسباجية ثلاثة أصناف من القمح (شانس، فسرون واحة) لسقي تم دراستها خلال أربعة مواسم (98-2001) للمناطق الشبه الجافة الجزائرية (الشلف).

المعاملات الأربعة المطبقة هي: NI (غير المسقية) EI (السقية المبكرة ولحد طور البادرة) LI (السقية المتأخرة من طور البادرة إلى النضوج) FI (السقية الكاملة على طول الموسم)

لقد لوحظ بأن المعاملة FI زادت محصول الحبوب (1300 Kg/ha) بنسبة 270٪ و بنسبة 107٪ لـ EI و 67٪ LI. إن التداخل بين السقي والأصناف كان معنويا كل عام. تحت أنظمة السقي، الصنف فنون كان الأكثر إنتاجية، بينما تحت الظروف المطرية كان الصنف واحة ذات محصول الحبوب الأعلى.

محصول الحبوب ازداد أسيا مع التبخر نزع الموسمي حيث ($R^2 = 0.741$) دليل الحصاد ($R^2 = 0.873$). إن كفاءة استعمال الماء للحبوب يتراوح من 4.6-5.3 (kg/ha/mm) للمعاملة (NI) و من 9.6-10.8 (kg/ha/mm) للمعاملة (FI) كدالة للصنف والسقي. إن الأصناف فنون والواحة (السقية الكاملة) والصنف واحة (المنطقة المطرية) كان من الأصناف الأكثر فعالية.

إن معامل المحصول لـ KC الموسمي للأصناف الثلاثة كان 0.64 (V) 0.62 (w) 0.54 (C) والقسم القصوى المقابلة لـ KC كانت 0.89 و 0.97 و 1.0 بالتتابع.

إن قيم KC كانت قريبة العلاقة بدليل مساحة الورقة والعلاقات اللوغارتمية المعينة والتي تم حسابها لكل صنف.

إن تحديد موعد السقي يجب ان يتلائم مع نوع الصنف وعلاقته بالتأخر وطريقة النمو أو التطور.

مفتاح الكلمات: أصناف القمح، معاملات السقي، التبخر النزع الموسمي، المناطق الشبه الجافة الجزائرية (الشلف)، الترابط، دليل الحصاد، كفاءة استعمال الماء.

Introduction

En Algérie, la culture de blé est essentiellement pluviale concentrée dans les régions arides et semi-arides. Outre les difficultés dues à une gestion aléatoire, au changement continu du statut des terres agricoles, à l'émergence et au développement de cultures, à faibles valeurs d'intrants, moins stratégiques, certes, mais plus lucratives que la culture des céréales et la non maîtrise des techniques de production, la céréaliculture ne cesse de subir les effets de plus en plus pervers et durables de la sécheresse.

Plus de 50 % de la superficie du pays reçoit moins de 250 mm de pluie/an. La faiblesse des précipitations est plus marquée à l'ouest et au sud du pays où l'on trouve des régions à terrains fertiles qui reçoivent moins de 200 mm d'eau/an (Baldy, 1985). De telles conditions climatiques rendent difficile l'obtention de rendements élevés et stables si des apports complémentaires ne sont pas appliqués.

En effet, lorsqu'on considère les rendements du blé à l'échelle nationale voire régionale, on est frappé par leur extrême variabilité d'une région à l'autre et par leur grande irrégularité d'une année à l'autre. La variabilité climatique conjuguée aux conditions édaphiques et aux techniques culturales expliquent les fluctuations des rendements dans les régions semi-arides d'Algérie.

La caractéristique du climat des régions arides et semi-arides d'Algérie, et en particulier celui de la région du Chélif, fait que la technique de conduite des céréales, ne peut se raisonner qu'en termes de risques. Pour cela, la description fréquentielle du climat est donc un outil indispensable de la prise de décision.

Le défi est, donc de développer des techniques de gestion pour augmenter la production culturale et optimiser la ressource et l'efficacité d'utilisation de l'eau. Ceci ne peut se concevoir que par des études sur l'adaptation, des géotypes nouvellement introduits, à la sécheresse, la tolérance ou les moyens d'esquive au déficit hydrique, de repérer les périodes de stress et de fournir un complément d'eau par irrigation (Stem et al., 1982).

Plusieurs études ont montré que l'augmentation de la production est largement dépendante de l'utilisation des variétés améliorées à haut potentiel de rendement et à un niveau élevé de tolérance à la sécheresse (Cooper et al., 1987; Anderson et Smith, 1990; Monneveux et al., 1997).

L'utilisation de variétés nouvellement introduites et des techniques culturales appropriées permet de produire plus de 60 quintaux par hectare en irrigué et plus de 20 quintaux par hectare en culture sèche (Ouattar et al., 1990).

La céréaliculture, dont la production annuelle oscille depuis l'indépendance entre 10 et 45 millions de quintaux, semble être le domaine le plus vulnérable car pratiquée sur de grandes superficies sans irrigation et avec des géotypes locaux traditionnels (Hazmoune, 2002). Ces géotypes continuent à être utilisés et maintenus en culture beaucoup plus pour leur paille haute que pour leur production en grains ; faible mais souvent stable. Cette stabilité dans les rendements en années sèches et en l'absence de diffusion et de vulgarisation des progrès techniques aux exploitations agricoles, rend ces géotypes "autochtones" désirés par rapport aux variétés introduites.

Le blé constitue une espèce de céréale particulièrement importante, occupant une place centrale par rapport aux autres espèces céréalières. La superficie totale emblavée, en Algérie, s'élève à 3 041 000 hectares dont 1 215 000 hectares occupés par le blé dur ; soit 40% de la surface totale (Statistique Agricole I, 2000).

Dans la région du moyen Chélif, la culture de blé est souvent pluviale, les rendements demeurent très faibles et ont tendance à se dégrader. Ces faibles rendements sont à attribuer à la conduite générale de la culture, aux conditions pédoclimatiques du périmètre, qui ne permettent pas d'assurer à la plante une alimentation en eau suffisante et régulière car les précipitations sont faibles par rapport aux besoins de la culture et en dehors de tout apport complémentaire, ces conditions limitent ou interdisent l'introduction de variétés à haut potentiel de production.

La superficie totale consacrée à la céréaliculture dans la région de Chlef est de 85 476 hectares, réparties comme suit : blé dur (49%), blé tendre (23.5%), orge (25%) et avoine (2.5 %). Cette répartition met bien en évidence la dominance du blé dur au détriment des autres espèces et dont 48 % des cultivars sélectionnés sont représentés par les variétés Waha, Vitron et Chen's (D.S.A de Chlef, 2006).

Afin d'augmenter significativement les rendements et de pallier aux besoins de la population locale, plusieurs essais ont été réalisés dans la région de Chlef, d'une manière aléatoire et non raisonnée par certaines exploitations agricoles relevant du secteur étatique (OAIC, CCLS, domaines pilotes ...) à l'effet d'étudier l'adaptabilité des semences introduites ainsi que leur vulgarisation auprès des agriculteurs de la région. Ces semences sont dites à "haut rendement" sans préciser toutefois les conditions climatiques et les techniques culturales associées permettant l'obtention de rendements stables et élevés.

C'est dans ce contexte que s'articule notre travail qui vise d'une part, à étudier le comportement de trois cultivars de blé dur dits à "haut potentiel de production" (Waha, Vitron et Chen's), vis-à-vis de stratégies d'irrigation. D'autre part, évaluer les pratiques optimales de gestion de l'eau ayant permis l'amélioration des rendements en grains et l'efficacité d'utilisation de l'eau en mode d'approvisionnement en eau limité dans une région semi-aride type se situant à 50 km du littoral Algérien.

Enfin, évaluer les coefficients culturaux des variétés utilisées pour différentes stratégies d'irrigation afin de les proposer comme une référence de base servant aux calculs ultérieurs des besoins en eau d'irrigation dans toute la région du Chélif et d'éviter ainsi, le recours souvent, à d'autres coefficients culturaux calculés dans des régions climatiques tout à fait différentes de notre région.

Les apports d'eau sont donnés, en début de cycle et/ou en fin de cycle, en fonction de la variation de la réserve en eau du sol sur 4 années d'études successives (1998-2001). Les variétés, valorisant mieux les apports d'eau complémentaires à travers une bonne efficacité, des rendements en grains et en matières sèches stables et acceptables moyennant des indices de récoltes élevés, seront retenues et vulgarisées auprès des agriculteurs de la région.

I- Chapitre I : Problématique, situation de la culture de blé dans le contexte national et international

I-1-Importance de la culture de blé

Le blé fait partie des trois grandes céréales avec le maïs et le riz. Il constitue avec le riz les produits les plus consommés par l'homme. Le blé est, dans la civilisation occidentale et au Moyen Orient, un composant central de l'alimentation humaine. La consommation de ce produit remonte à la plus haute antiquité. Les premières cultures apparaissent au VIII^e millénaire avant J-C, en Mésopotamie et dans les vallées du Tigre et de l'Euphrate (aujourd'hui l'Irak!), dans la région du croissant fertile.

Le blé dur (*Triticum turgidum L. Durum*) est une culture importante dans l'environnement méditerranéen, elle est traditionnellement cultivée en conditions pluviales dans les zones marginales des régions semi-arides.

Le développement de cultivars de blé à haut rendement est le but principal des programmes d'amélioration dans le monde entier et en particulier en région méditerranéenne en raison de la faible quantité de précipitations et leur distribution dans le temps et dans l'espace. La variabilité des précipitations explique pas moins de 75 % de la variation du rendement de blé (Blum et Pnuel, 1990).

La plupart des études réalisées, dans différentes régions du globe, montre que la limite inférieure de production en grains se situe à un niveau de consommation en eau compris entre 200 et 210 mm et par conséquent en deçà de cette limite, le blé ne peut produire de grains (Musick et al., 1994).

I-2-Evolution des superficies et des productions dans le monde

La production mondiale de blé pour la campagne 2005-2006 est de l'ordre de 609 millions de tonnes, soit une baisse de 15 millions de tonnes par rapport à la saison d'avant. La baisse de production mondiale conjuguée à une logique hausse de la consommation de quelque 616 millions de tonnes de blé a donné lieu à une diminution des stocks mondiaux de moins de 130 millions de tonnes (AFEC, 2005).

La majeure partie de la superficie mondiale réservée à la culture de blé est concentrée dans cinq pays de l'Asie de l'Ouest et de l'Afrique du Nord connus sous le nom de WANA (West Asia and North Africa). Ces pays sont : La Turquie, la Syrie, l'Algérie, le Maroc et la Tunisie. Cependant, compte tenu des rendements de blé dur assez faibles dans les pays en voie de développement, leur part dans la production mondiale demeure assez faible.

Au cours des deux dernières décennies, la superficie de blé dur a diminué dans la plupart des pays producteurs de blé dur excepté en Espagne, en Grèce et au Canada. Ceci est le fait de l'augmentation importante de la superficie. En Espagne, par exemple, la superficie a presque quadruplé, atteignant une moyenne de 0.407 million d'hectares au cours de la période 1987-96 contre 0.116 million d'hectares au cours de la période 1977-1986. Ce pays est maintenant devenu le principal pays producteur de blé dur de l'Union Européenne après l'Italie et la Grèce. Au cours de la même période, la superficie de blé dur a presque doublé en Grèce, alors qu'au Canada elle a augmenté de 43%.

En Arabie Saoudite, les augmentations de superficies de blé ont permis de tripler les productions. En effet, les superficies emblavées passent de 61.000 ha en 1980 avec une production de 124.000 tonnes à 744.000 ha en 1990 avec une production de 3, 46 millions de tonnes. Ce pays est arrivé à l'autosuffisance en matière de blé et dans certaines situations, il a exporté un excédent non négligeable suite à l'utilisation de certaines pratiques culturales et en particulier l'irrigation de complément et la fertilisation azotée (Ghulam et Al-Jaloud, 1995; Ghulam et al., 1996).

En Chine, il a été constaté qu'en l'espace de 18 ans (1980-1998), les rendements moyens ont passé de 35 à 65 q/ha pour le blé d'hiver (Zhang et al., 1998; Li et al., 2002). Ce qui a permis à ce pays de se maintenir au premier rang mondial en matière de production avec 86 100 250 tonnes en 2003 participant ainsi avec 16% à la production mondiale (Tableau 1).

L'utilisation de la fertilisation et en particulier azotée et les pratiques d'irrigation complémentaire sont les facteurs majeurs de ce progrès.

Tableau 1 : Production de blé dans le monde (tonnes)

Pays	Production 2003	% 2003	Production 2004	% 2004
Chine	86 100 250	16 %	91 330 265	15 %
Inde	65 129 300	12 %	72 060 000	12 %
Etats-Unis d'Amérique	63 589 820	12 %	58 881 368	10 %
Fédération de Russie	34 062 260	6 %	86 658 539	14 %
France	30 582 000	6 %	39 641 000	6 %
Australie	24 900 000	5 %	22 500 000	4 %
Canada	23 552 000	4 %	24 462 300	4 %
Allemagne	19 296 100	4 %	25 346 000	4 %
Pakistan	19 210 200	3 %	19 767 000	3 %
Turquie	19 000 000	3 %	21 000 000	3 %
Argentine	14 530 000	3 %	14 800 000	2 %
Royaume-Uni	14 288 000	3 %	15 706 000	3 %
Iran	12 900 000	2 %	14 000 000	2 %
Kazakhstan	11 518 500	2 %	n.c	n.c
Pologne	7 858 160	1 %	9 450 486	2 %
Espagne	6 290 100	1 %	7 175 000	1 %
Italie	6 243 390	1 %	8 000 000	1 %
Egypte	6 150 000	1 %	7 177 855	1 %
Brésil	5 899 800	1 %	6 035 500	1 %
Ouzbékistan	5 331 000	1 %	n.c	n.c
Autres pays	73 002 847	13 %	75 284 093	12 %

Source : (FAO, 2003).

I-3-Importance de la culture de blé en Algérie et dans les pays du Maghreb

Avec plus de 2,55 millions de tonnes importés en 2005, l'Algérie est désormais le premier importateur de blé dans le monde. La facture a atteint ainsi le montant de 510 millions de dollars US sachant que le prix de la tonne de blé dur est compris entre 180 et 210 dollars US selon les années. Pour le blé tendre, la France vend 50% de sa marchandise au client Algérien public et 50% au privé, alors que ses exportations en blé dur sont à 100% le fait du privé puisque l'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC) a signé un accord avec le Canada dans ce sens. En termes plus clairs, les deux tiers des achats de l'Algérie en blé tendre sont fournis par la France.

Nous remarquons sur le tableau 2, que durant la période 1991-2001, l'Algérie a importé plus de 66% du total importé par les pays du Maghreb avec un pic d'importation dépassant les 71% pour la période 1991-1995. Ceci est du vraisemblablement à la consommation importante de cette céréale (Belaid, 2002; Amir et al., 2004). La consommation a atteint son plus haut niveau ; 3,4 millions de tonnes en 1999, dépassant ainsi largement celle des autres pays du Maghreb. A cause des effets de la forte sécheresse enregistrée ces dernières saisons dans ces pays, la production de cette région a connu une baisse sensible de plus de 5 millions de tonnes, soit des pertes évaluées à 50%. Ce qui a engendré en toute logique, une augmentation des importations de 8 à 10 millions de tonnes.

La production du Maghreb en blé dur a elle aussi, enregistré une chute de moins de 35 millions de tonnes. Cette situation n'a pas, faut-il le souligner, épargner les autres régions du monde.

	91-95	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01
Algérie						
Production	1110	1600	500	1500	900	700
Consommation	2162	3358	3158	3400	2900	2800
Importations	1552	1758	2658	1900	2000	2100
Maroc						
Production	1255	2270	882	1500	800	500
Consommation	1452	2623	1402	2000	1270	1100
Importations	197	353	520	500	470	600
Tunisie						
Production	958	1623	700	1100	1200	800
Consommation	1163	1746	1251	1350	1600	1250
Importations	205	123	551	250	400	450
Libye						
Production	112	100	100	100	100	100
Consommation	338	347	317	250	350	350
Importations	226	247	217	150	250	250
Maghreb						
Production	3434	5593	2182	4200	3000	2100
Consommation	5615	8074	6128	7000	6120	5500
Importations	2181	2481	3948	2800	3120	3400

Tableau 2 : Productions, consommations et importations du blé dur dans les pays du Maghreb (milliers de tonnes).

Source : (CIC, 2000).

I-4-Principales zones céréalières en Algérie

Les céréales sont cultivées dans différentes zones de potentialités et occupent avec la jachère près de 7 millions d'hectares (IDGC, 1974). Ces zones ont été classées en cinq grands groupes:

I-4-1-Zone des plaines littorales et sub-littorales

Elle regroupe les terres de plaines situées dans la Mitidja, Bejaia, Constantine, Annaba et Guelma. La pluviométrie annuelle est supérieure à 600 mm. Les céréales occupent une superficie comprise entre 70 000 et 100 000 ha. Dans cette zone, les céréales représentent environ 2% de la moyenne annuelle des emblavements.

I-4-2-Zone des hautes plaines telliennes (altitude comprise entre 700 et 900 m)

Elle regroupe les terres de plaines recevant une pluviométrie comprise entre 450 et 600 mm. Cette zone concerne les régions de Sétif, Ain Beida, Tissemsilt, Tiaret, Saida et Sidi Belabbes. Les variétés locales et en particulier Mohamed Benbachir et oued zenati sont très utilisées en sec et permettent dans certaines situations climatiques favorables d'atteindre des rendements compris entre 20 et 25 q/ha.. Les superficies varient en fonction des années (entre 400 000 et 850 000 ha. La part de cette zone dans les emblavements moyens annuels est de 23%

I-4-3-Zone des basses plaines telliennes

Elle regroupe les régions de Ain Temouchent, Tlemcen, Mostaganem, Relizna et Chlef. La pluviométrie est comprise entre 350 et 450mm. Cette zone est caractérisée par des contraintes climatiques (irrégularités des précipitations, fréquence des gelées, sirocco et réchauffement rapide du sol) pénalisant la production céréalière. La superficie moyenne emblavée est comprise entre 900 000 et 1. 200.000 ha. Les rendements moyens sont compris entre 10 et 15 q/ha.

I-4-4-Zone agro-pastorale

Cette zone correspond aux étendues agro-pastorales, elle regroupe les régions arides de Sebdou, M'sila, Djelfa, Naama, Batna et Tebessa. Les aléas climatiques sont plus accentués que dans la zone précédente. La pluviométrie est comprise entre 200 et 250 mm. La superficie emblavée est de l'ordre de 480.000 ha. Dans cette zone, la céréaliculture est pratiquée d'une manière itinérante et occasionnelle.

I-4-5-Zone des massifs montagneux

Ce sont des régions montagneuses avec un relief accidenté de pente supérieure à 12%, les sols sont très érodés et les pertes d'eau sont considérables. Les céréales occupent 200 000 à 300.000 ha. Les rendements obtenus sont très faibles n'excédant guère 10q/ha.

I-5-Situation de la céréaliculture dans le périmètre du moyen Chélif

I-5-1-Variabilité des superficies et des rendements

Dans la région du moyen Chélif, la superficie réservée à la céréaliculture a connu de très grandes variations durant ces 20 dernières années. En effet, comme le montre la figure 1, en 1989, il a été réservé une superficie de 122 940 ha contre 20 714 ha seulement en 1997, soit une baisse de plus de 83%. Les raisons de cette diminution des superficies sont autres que climatiques ou culturelles mais sont dues à la période qu'a connu le pays et en particulier la région du Chélif en matière de sécurité. Cette figure illustre bien trois périodes bien

distinctes. La première de 1985-1991 ou les superficies dépassaient les 100 000 ha avec une légère variation interannuelle, la deuxième période de 1991-2000 ou les superficies ont enregistré des variations sensibles et enfin une troisième période (2001-2006) dans laquelle les superficies se sont stabilisées aux alentours de 80 0000 ha. Sur le tableau 3, sont reportées les surfaces réservées aux différentes céréales ainsi que les rendements moyens sur la période 1985-2006.

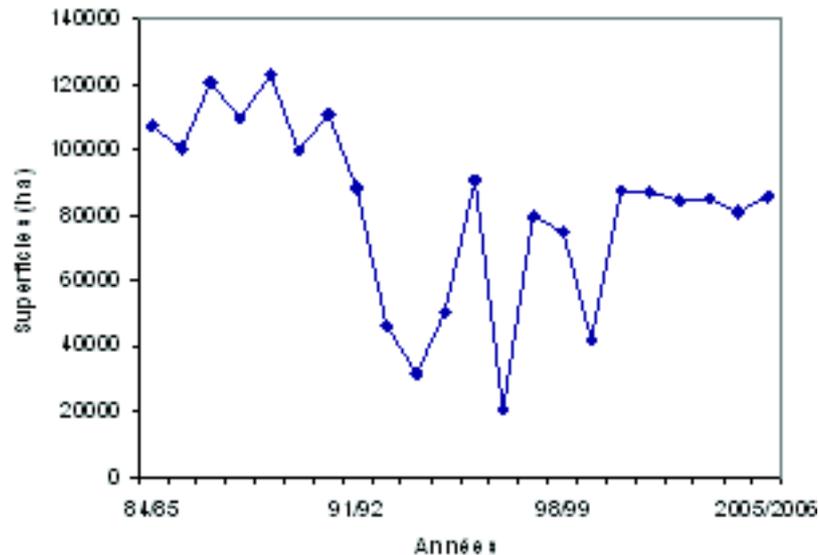


Figure 1 : Variation des superficies des céréales (Chlef 1985-2006)

Tableau 3 : Superficies, rendement et productions par produit (Chlef 1985-2006)

Cultures	Surfaces (ha)	Rendements (q/ha)	Productions (q)
Blé dur	41645	8.6	358147
Blé tendre	16363	9.4	153812
Orge	21842	9.1	198762
Avoine	2374	6.8	16143

Source : (DSA de Chlef, 2006)

Nous constatons que la culture de blé occupe environ plus de 70% de la superficie réservée aux céréales dont 51%, en moyenne, pour le blé dur.

Cependant, les rendements moyens observés demeurent faibles, avec 8.6 q/ha pour le blé dur et 9.4 q/ha pour le blé tendre.

I-5-2-Les contraintes techniques liées aux pratiques des agriculteurs

Dans la région du Chélif, la conduite de la culture de blé est le plus souvent extensive et se heurte à différentes contraintes, parmi lesquelles :

I-5-2-1- Les techniques culturales

Les techniques culturales et en particulier les dates de semis ne sont pas respectées car elles sont sous l'influence de l'humectation des sols. La plupart des agriculteurs préfèrent semer tardivement et dans certaines années, les semis sont carrément annulés par manque de pluie.

I-5-2-2- Les variétés utilisées

Ce sont en très grande majorité des variétés locales parfaitement adaptées aux conditions climatiques de la région mais ayant un très faible potentiel productif. Parmi ces variétés, nous citerons Mohamed Benbachir et Hedba3 très estimées pour leurs gros grains et leurs pailles hautes (Hazmoune, 2002). Toutefois, l'utilisation de variétés dites à haut rendement, introduites depuis quelques années et réputées pour leur potentiel de production en irrigué, n'a permis aucune amélioration dans les rendements à cause de la conduite souvent pluviale (Baldy, 1974). Dans de bonnes conditions culturales et en condition irriguée, elles ont permis d'atteindre des rendements, dans certaines parcelles, de 50 quintaux /ha.

I-5-2-3- La fertilisation et les traitements phytosanitaires

Les quantités de fumure minérale épandues annuellement sont en général faibles, comprenant un apport manuel d'un engrais binaire ou tertiaire suivi d'un épandage d'ammonitrate. Le nombre d'unités d'engrais fluctue donc, dans le meilleur des cas, entre 30 à 50 unités d'azote, 20 à 50 unités de phosphore et 0 à 30 unités de potassium en fonction de la disponibilité et surtout de l'état des engrais ; le plus souvent dépassant la date de péremption.

Quant aux traitements phytosanitaires, ils sont peu nombreux et comprennent (à l'exception du traitement anti-moineau) qu'une seule pulvérisation éventuelle de 2-4-D à dose faible réalisé au moment du tallage.

I-5-2-4- Les irrigations

La plupart des exploitations visitées continuent à conduire la culture de blé en sec. Il a été constaté que même les fermes pilotes, se trouvant à l'intérieur du périmètre d'irrigation, disposant d'équipements performants, tels que les enrouleurs, canons d'irrigation, pivots... etc. ainsi que de grandes potentialités en matière de ressource hydrique, persistent à pratiquer la culture pluviale ; le matériel étant utilisé pour d'autres cultures plus spéculatives. Par conséquent, les rendements demeurent faibles et ont tendance à se dégrader au fil des années. De "timides" opérations d'irrigation de complément se pratiquent, de temps à autre, dans des parcelles appartenant à des agriculteurs du secteur privé, disposant de point d'eau. Le plus souvent une à deux irrigations sont données au cours de la période Mars-Avril.

En plus des contraintes citées plus haut, viennent s'ajouter les conditions pédoclimatiques du périmètre qui ne permettent pas d'assurer à la culture une alimentation en eau suffisante et régulière dans les périodes de grande sensibilité en eau du fait de la mauvaise distribution des précipitations à l'intérieur du cycle de croissance.

II- Chapitre II : l'Irrigation de complément

II-1-Définition

L'irrigation de complément peut être définie comme étant l'application d'une quantité limitée d'eau aux cultures quand les précipitations ne fournissent pas suffisamment d'eau pour la croissance des plantes afin d'augmenter et de stabiliser les rendements. C'est une intervention temporaire, selon les disponibilités en eau, pour augmenter l'évapotranspiration (Nallet, 1990; Thevenet, 1990; Oweis et al., 1998 ; Oweis et al., 1999).

II-2- Importance de l'irrigation de complément en zones aride et semi-aride

La valorisation des eaux de pluie par des irrigations de complément, en zones semi-aride, est souvent intéressante; le rendement moyen peut passer du simple au triple à condition d'utiliser des variétés adaptées (Merabet et Bouthiba, 2004).

Dans les conditions arides du Texas (USA), la conduite en irrigué du blé a permis d'atteindre des rendements moyens compris entre 30 et 80 quintaux/ha pour une efficience d'eau respective de l'ordre de 5 à 12 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ (Eck, 1988; Musick et al.,1994;Howell et al.,1995).

En Syrie, des expérimentations, menées sur des parcelles pilotes à ICARDA, sur blé irrigué au cours de 8 années d'étude ont permis d'obtenir un gain de rendement de 36.5 à 40 quintaux/ha par rapport au régime pluvial (Oweis et al.,2004). Des améliorations similaires ont été rapportées, sur plusieurs années en Jordanie, Tunisie, Irak et Maroc (Perrier et Salkini, 1991).

II-3- Interaction irrigation et fertilisation azotée

Parmi les pratiques agronomiques, l'application de la fertilisation azotée et l'irrigation de complément sont reconnues comme moyens pour augmenter le rendement et l'efficience de l'eau de la culture de blé dans les régions arides (Cooper et al. 1987; Anderson et Smith, 1990; Oweis et al. 1998, 1999 ; Siddique et al. 2001 ; Pandey et al., 2001a,b).

Une étude menée par Barraclough et al. (1989) sur l'interaction de la fertilisation azotée et l'irrigation sur le rendement et les composantes de rendement du blé, a montré que les valeurs moyennes de rendement, sont très variables et oscillent entre 38 et 97 quintaux/ha. Les plus hauts rendements sont obtenus avec un niveau eau-azote élevé (Tableau 4).

Tableau 4 : Influence de l'interaction irrigation-fertilisation sur le rendement et les composantes de rendement.

Composantes de rendement	+N+I	+N-I	-N+I	-N-I
Nombre d'épis/m ²	469	394	335	306
Nombre de grains/épi	38.6	38.7	22.9	23.2
Nombre de grains/m ²	18198	15226	7679	7111
Poids du grain (mg)	45.5	44.2	47.4	45.0
Rendement en grains (q/ha)	97	79	43	38
Poids total sec (g/m ²)	1767	1544	810	793
Poids sec du grain (g/m ²)	828	673	364	320
Poids sec de la paille (g/m ²)	939	871	446	473

Source : Barraclough et al., 1989

+N+I : Fertilisation et irrigation

+N-I : Fertilisation sans irrigation

-N+I : Irrigation sans fertilisation azotée

-N-I : Témoin conduit sans irrigation et sans fertilisation azotée

Une conduite sans irrigation et avec fertilisation azotée, engendre une baisse de rendement de l'ordre de 18% par rapport au rendement potentiel. Par contre, l'écart enregistré, entre une conduite irriguée sans fertilisation azotée et une conduite irriguée avec fertilisation, est plus important et représente plus de 55% .

Les différences de rendement en grains sont dues principalement au nombre de grains/m² plutôt que du poids des grains.

Par ailleurs, Tavakkoli et Oweis (2004) considèrent que l'application de 1/3 de l'irrigation potentielle avec seulement 60 kg d'azote par hectare peut quadrupler les rendements par rapport aux conditions pluviales. Une telle augmentation de rendement est en accord avec les résultats obtenus par Stewart et Musick (1982) et ceux de Oweis et al. (1999).

Pandey et al. (2001a,b) rapportent que le rendement en biomasse peut atteindre un rendement de l'ordre de 100 quintaux/ha dans des conditions d'irrigation et de fertilisation adéquates.

II-4-Rendements en conditions pluviales

La réponse du rendement en grains aux différentes situations climatiques est variable selon les quantités de précipitations annuelles recueillies et leurs modèles de distribution au cours du cycle de croissance. En général, les meilleurs rendements sont attribués plutôt à la bonne distribution des précipitations selon les stades de grande sensibilité en eau qu'aux quantités cumulées sur toute l'année.

En conduite pluviale, les écarts entre la consommation en eau maximale (ETM) et la consommation réelle (ETR) sont très élevés et les manques équivalent toujours à plus de 60% des pluies enregistrées au cours du cycle végétatif de la culture. Par conséquent l'indice de satisfaction des besoins en eau (ETR/ETM) en condition pluviale varie de 42 à 45% selon les variétés et les années (Merabet et Bouthiba, 2006).

Selon des études réalisées dans les hautes plaines du Texas Xue et al. (2003) et en Arabie Saoudite Ghulam et Al-Jaloud (1995), des rendements de l'ordre de 32 q/ha ont été obtenus sur blé en conduite pluviale.

Jones et Pophan (1997) ont obtenu des rendements beaucoup plus faibles de l'ordre de 12 à 16 q/ha. Cette disparité dans les rendements, montre le caractère aléatoire du climat et en particulier la variabilité pluviométrique interannuelle.

II-5-Rendements en conditions irriguées

Dans les conditions d'irrigation, les rendements sont très variables d'un environnement climatique à un autre, d'une variété à une autre et d'une stratégie d'irrigation à une autre. La valorisation des irrigations de complément est meilleure en années sèches qu'en années pluvieuses (Bouthiba, 1996; Sharma et al.,2004)..

En effet, Oweis (1997) rapporte que pour une année sèche, totalisant une précipitation de 234mm, le rendement est passé de 7.4 quintaux/ha à 38.3 quintaux/ha en utilisant 183 mm d'irrigation complémentaire. En contrepartie, en année humide, pour un total de précipitation de 504mm, le rendement passe de 50.4 q/ha à 64.4 q/ha avec un complément d'irrigation de l'ordre de 75mm.

Avec des niveaux d'irrigation compris entre 172 mm et 272 mm, Mugabe et Nyakatawa (2000) obtiennent des rendements respectifs de l'ordre de 42 à 55.4 q/ha..

En condition irriguée, Royo et al. (2004), ont obtenu un gain de rendement de l'ordre de 55% par rapport au régime pluvial.

Notons enfin, que plusieurs facteurs sont à l'origine de l'augmentation des rendements en conditions irriguées. Parmi ces facteurs il y a les conditions climatiques, la date de semis ou les gains peuvent atteindre 25 q/ha (Bouzerzour et Oudina, 1990), la fréquence d'irrigation combinée à des stratégies d'irrigation tout au long du cycle de croissance ou les gains de rendement peuvent atteindre 30 à 35 q/ha par rapport au régime pluvial (Ghuman et Maurya, 1986).

II-6-Périodes d'intervention

Selon qu'il s'agisse d'apport d'eau en début de cycle ou en fin de cycle de la culture, les variétés de blé répondent de manière différente, d'une année à une autre et d'un environnement à un autre.

Le nombre et le moment d'irrigation ont un effet très significatif sur l'élaboration du rendement. En effet, Xue et al. (2003), obtiennent un gain de rendement compris entre 41 et 46% avec une seule irrigation donnée au stade tallage, avec une augmentation de l'évapotranspiration de 20% par rapport à la conduite pluviale. Par contre, l'application de deux irrigations au cours du cycle de croissance a des conséquences différentes sur le rendement en grains et la consommation en eau selon les périodes d'intervention. Au moment de l'épiaison et du remplissage du grain, l'augmentation du rendement est de 67% avec une augmentation de 32% de l'évapotranspiration, alors que l'irrigation au stade

montaison et au stade anthèse, le rendement est augmenté de 85% avec une augmentation de l'évapotranspiration de 46% par rapport au régime pluvial.

Quant au traitement ayant reçu 3 irrigations (montaison, épiaison et anthèse), les augmentations sont de l'ordre de 165% pour l'évapotranspiration et 209% pour le rendement en grains par rapport au traitement pluvial.

II-6-1-Irrigations en début de cycle

Les irrigations en début de cycle permettent une levée précoce et une couverture rapide du sol, diminuant ainsi l'évaporation du sol et augmentant l'efficacité d'utilisation de l'eau (Rezgui et al., 2005).

De bonnes conditions d'alimentation hydrique de la phase 3 nœuds à l'épiaison, permettront au blé de compenser la baisse du peuplement épi par une fertilité des épis supérieures, tout particulièrement pour les variétés à forte fertilité des épis (Bouthier et al., 2000).

Oweis et al. (2001), rapportent une augmentation substantielle dans les rendements de blé en Turquie avec seulement 50 mm d'eau d'irrigation au semis. L'irrigation au cours de ce stade fait passer le rendement du blé, en Iran, du simple au double (Tavakkoli et al., 2000 ; Tavakkoli et Oweis., 2004).

Par contre, au sud de l'Italie, dans des conditions particulièrement sèche entre octobre et décembre, Caliandro et Boari (1996) rapportent un gain moyen de rendement de l'ordre de 132% (de 20.3 à 47.1 q/ha) si l'irrigation est donnée immédiatement après le semis.

D'autres auteurs insistent sur l'irrigation du blé avant le semis pour améliorer la recharge en eau du sol (SWS) car le rendement en grains est significativement amélioré (El-mourid, 1988 ; Oweis et Hachum, 2003 ; Zhang et al., 2004) avec des gains de rendement de l'ordre de 12 q/ha.

II-6-2-Irrigations en fin de cycle

L'irrigation complémentaire en fin de cycle est devenue une nécessité en climats aride et semi-aride car la sécheresse affectant ces régions est souvent régulière et quasi permanente à partir du mois d'avril avec le début de l'augmentation de la demande évaporative et le déficit en eau du sol, ce qui se traduit par une pénalisation des rendements de blé (Duivenbooden et al. , 1999).

Une étude menée dans la région du moyen Chéouli, sur quelques cultivars de blé (locaux et introduits) en irrigué, a montré qu'une quantité d'irrigation de 100 mm fractionnée au cours de l'épiaison et de la floraison a permis d'améliorer sensiblement l'indice de satisfaction des besoins en eau des cultivars utilisés ou une moyenne de 68% a été enregistrée (Merabet et Bouthiba, 2006).

Selon Rharrabi et al.(2003), les conditions climatiques durant la période de remplissage du grain semblent être crucialement importantes pour la détermination de la qualité du grain en environnement méditerranéen. Le rendement en grains est positivement corrélé avec l'utilisation de l'eau en post-floraison avec un coefficient de corrélation de 0.59 (Siddique et al., 2001).

II-7-Impact sur les composantes de rendement

Tous les résultats obtenus à travers des environnements donnés admettent que les composantes essentielles de rendement sont tributaires des conditions d'alimentation en eau à des périodes de croissance données. En d'autres termes, le nombre de grains par mètre carré se "décide" très tôt, en début de cycle, soit avant épiaison, par contre, le poids du grain se "décide" en période post-épiaison.

Ghouar (2006) a montré que le nombre élevé de grains, produit par unité de surface, engendré par les irrigations précoces a, en contrepartie, entraîné par effet de compensation, une réduction du poids individuel moyen des grains. Ces résultats précisent que l'augmentation du nombre de grains par mètre carré, suite à des irrigations précoces, induit une réduction du poids de 1000 grains. Le nombre de grains moyen par épi varie de 10.7 grains/épi pour le traitement pluvial à 20.2 grains par épi pour le traitement ayant reçu 90 mm d'eau. L'interaction eau x azote affecte différemment le nombre de grains par épi. Le nombre d'épi par mètre carré répond positivement aux apports d'eau et la fertilisation azotée.

II-8- Réponse variétale à l'irrigation de complément

Certaines variétés nouvelles dites à haut rendement peuvent fournir des rendements élevés seulement si on élimine le déficit hydrique et d'autres facteurs telles que la fertilité du sol, l'aération, la salinité...etc.

En effet, les variétés locales comme Mohamed Benbachir et oued Zenati qui ont une résistance remarquable à la sécheresse, ont souvent un potentiel de rendement faible, l'irrigation de complément n'a pas beaucoup d'effet sur leur rendement. Inversement des cultivars, comme Vitron, Chen's et à un degré moindre Waha, sélectionnés pour être conduits à l'irrigation souffriront considérablement d'un épisode de sécheresse et ne peuvent donc pas bien valoriser les apports d'eau en régime pluvial et en particulier les deux premiers cultivars.

Chapitre III : Notions de sécheresse, déficit hydrique en relation avec la culture de blé

III-1-Seuil de tolérance de la culture de blé vis-à-vis du déficit hydrique

On a souvent tendance à identifier la sécheresse au déficit ou au stress hydrique.

La sécheresse a rapport à un aspect climatique et le stress hydrique a un aspect plutôt physiologique (Ouedraogo, 1992).

Généralement, Le blé dur n'est pas une plante à grande résistance au déficit hydrique et ne peut survivre durant une longue période sèche. Cependant, il peut lutter contre une période sèche par des modifications morphologiques et physiologiques (Monneveux, 1989).

Selon Alderfasi et Nielsen (2001), l'indice de stress hydrique de la culture (CWSI) peut constituer une bonne indication de la consommation en eau des végétaux et par conséquent un moyen sûr de programmation des irrigations sur blé.

Sarr et al. (1999) ont trouvé une réduction de l'eau disponible dans le sol de 40% environ et une valeur de l'indice de stress hydrique (CWSI) de l'ordre de 0.27 correspondant à un début de déficit hydrique modéré chez le maïs, avec des valeurs de taux de satisfaction des besoins en eau inférieures à 75% environ. Ces valeurs peuvent être retenues comme indice seuil pour déclencher précocement l'irrigation.

III-2- Adaptation à la sécheresse

III-2-1-Mécanismes de l'adaptation à la sécheresse

L'étude de l'adaptation des plantes à la sécheresse est au carrefour de la physiologie, de l'agronomie et de la génétique. Elle illustre l'intérêt des approches pluridisciplinaires et de la modélisation pour aborder des phénomènes complexes.

La résistance à la sécheresse a été associée à plusieurs caractéristiques d'ordre phénologique, morphologique, physiologique et biochimique reflétant différents types d'adaptation (Hayak et al., 2000).

Cependant, la sélection pour un mécanisme donné, même bien corrélé avec le rendement, n'aboutit pas automatiquement à l'amélioration de ce dernier. Ceci a été démontré avec l'indice de récolte. Certains auteurs rapportent que les variétés de céréales doivent être caractérisées par une stratégie regroupant en même temps, un ensemble de mécanismes d'adaptation.

III-3- Effet du déficit hydrique sur la croissance et le développement du blé

III-3-1- La croissance végétative

Dans les régions arides et semi-arides, les céréales d'hiver sont souvent soumises ou exposées à des intensités variables d'une sécheresse terminale quasi régulière qui a des répercussions sur la croissance et le développement végétatif (Ghulam et Al-Jaloud, 1995 ; Kang et al., 2002; Sadras, 2002).

En effet, Le déficit hydrique affecte plusieurs processus de la plante ; le développement des organes est ralenti et leur taux de croissance est diminué, ce qui engendre un faible tallage, des feuilles réduites diminuant ainsi la surface foliaire (Legg et al., 1979) et provoquant une diminution du rythme de croissance et une réduction de 40% de la biomasse finale (Villegas et al., 2001). Ceci se traduit par une diminution de la production totale des assimilés et l'utilisation de l'eau par l'effet conjugué de la réduction du LAI (moins de surfaces évaporantes et photosynthétiques) et du déficit hydrique diminuant ainsi la production de matière sèche durant la saison végétative et reproductrice et diminue par conséquent les rendements (Tanner et Sinclair, 1983; Elhafid et al., 1998).

III-3-1-1- L'indice de surface foliaire

L'indice de surface foliaire ou Leaf Area Index (LAI) est défini comme étant la surface totale des feuilles par unité de surface au sol ($\text{cm}^2.\text{cm}^{-2}$). C'est un nombre sans dimension qui évolue au cours de la vie de la plante. Il est employé pour définir la surface effective pour la perte d'eau d'une culture et la surface au sol qui est dans l'ombre.

Les variations de l'indice de surface foliaire au cours du cycle de croissance de la culture du blé sont tributaires de la consommation en eau de la culture dans les différentes périodes de croissance.

En effet, des valeurs de l'ordre de 3.54, 3.02, 2.55 et 1.81 $\text{cm}^2.\text{cm}^{-2}$, ont été obtenues respectivement pour des traitements bien irrigués, moyennement irrigués, faiblement irrigués et non irrigués (Wenlong et al., 2004).

Cependant, sous des conditions de sécheresse, un indice de surface foliaire plus petit et une réduction de la durée du cycle sont recherchés pour diminuer la transpiration de l'eau des cultures (Shepherd et al., 1986; Cooper et al., 1987; Latiri-Souki et al., 1998).

La variation du LAI du blé dur décrit la croissance extérieure et montre l'état générale de la culture (Li et al., 2001, Li et Lin, 1999 , Zizhen et Hong, 1998a).

La réduction du LAI, suite à un déficit hydrique, peut réduire l'évaporation du sol et par conséquent elle permet une amélioration de l'efficacité de l'eau et des rendements (Ritchie, 1983).

III-3-2- La croissance racinaire

Le déficit hydrique inhibe plus la croissance du système racinaire que celle des organes aériens (Benlaribi et al., 1990; Khaldoun et al., 1990).

Des travaux, sur les modèles d'utilisation de l'eau en relation avec l'extraction racinaire, ont montré que durant les périodes de déficit hydrique, la capacité d'extraction de l'eau

du sol dépend de la distribution et de la profondeur du système racinaire. Le nombre de racines primaires, le volume racinaire, la matière sèche racinaire et la longueur des racines primaires varient en fonction du génotype (Johnson et Davis, 1980 ; Mac Intyre et al., 1995, Daaloul et al., 2006)

En situation de déficit hydrique, le blé met en place un système racinaire très développé, ce qui se répercute sur les produits de la photosynthèse qui seront détournés de la production de grains (Baldy, 1973; Rekika et al., 1998). Ce phénomène affecte considérablement les rendements.

Meyer et Alston (1978) ont montré que la réponse du rendement de la culture de blé dépend de la configuration du système racinaire et de la disponibilité en eau.

Bouaziz (1987) rapporte que chaque fois que la croissance d'une racine est bloquée par suite d'un stress hydrique ou suite à un milieu défavorable, ceci peut provoquer une accélération de la croissance de l'autre partie du système racinaire défavorable.

III-3-3-La durée des stades de croissance en relation avec le stress hydrique

Le stress hydrique affecte le rythme de croissance et la phénologie du blé, dans différentes situations, dépend du temps, de la durée et de l'intensité du stress (Van Anded et Jager, 1981; Bamouh et Bouaziz, 1986; Travasso, 1990; Simane et al., 1993).

La plupart des travaux indique que le déficit hydrique accélère le développement (Moule, 1980 ; Steiner et al., 1985).

En condition de déficit hydrique, la durée des stades phénologiques dépend également des conditions environnementales et des variétés utilisées. Ainsi, il a été observé que la durée du cycle allant du semis à l'anthèse se raccourcit au fur et à mesure qu'augmente le déficit hydrique.

Garcia Del moral et al. (2003) rapportent qu'en conditions pluviales du sud de l'Espagne, la durée de la période végétative s'est raccourcie de 9 jours par rapport aux conditions irriguées.

Pour des parcelles de blé conduites en sec, Magrin (1990) constate que la floraison est atteinte 4 jours avant les parcelles placées sous confort hydrique.

Selon Mouret et al. (1991), pour une même date de semis, la variété Waha fleurit 15 jours avant la variété Oued Zenati.

Cependant, Dakkaki et al. (1996) rapportent qu'en région aride du Maroc, il semble qu'une longue période de croissance et une épiaison précoce améliorent le rendement du blé dur.

L'effet positif de rallonger la période végétative et la période de remplissage du grain sur le rendement en grains a été également décrite par (Royo et al., 2000; Villegas et al., 2001).

Néanmoins, une plus longue période de remplissage devrait augmenter le rendement en grains, à condition que les étapes postérieures du remplissage de grain ne se produisent pas sous l'effet d'une sécheresse terminale (Gebeyehou et al., 1982).

III-3-4- Dates d'apparition des stades phénologiques

Sur des lieux différents, en Tunisie, M'hamdi (1990) a obtenu des dates similaires, à celles obtenues à Chlef avec la variété Waha, concernant l'apparition des différents stades phénologiques. Ces dates oscillent légèrement autour des dates moyennes présentées dans le tableau 5.

D'après le tableau ci-dessous, la durée de la saison végétative est de l'ordre de 200 jours. Ce chiffre se situe dans la fourchette de 180 à 200 jours proposée par Doorenbos et Pruitt, 1997) pour le blé d'hiver cultivé dans les régions semi-arides à arides.

Tableau 5 : Dates moyennes des stades végétatifs du blé cultivé en Tunisie.

Stades végétatifs	Date
Semis	20 novembre
Levée	5 décembre
Début tallage	10 décembre
Début montaison	10 février
Début épiaison	15 mars
Début floraison	20 mars
Grain laiteux	15 avril
Grain pâteux	15 mai
Grain mur	10 juin

Source :(M'hamdi,1990)

III-3-5- Stades critiques du blé vis-à-vis de l'eau

Simane (1993) rapporte que le stade le plus sensible au déficit hydrique est l'élongation ou montaison jusqu'à l'épiaison en passant par la floraison et le remplissage du grain.

Dans la littérature, il a été reporté que la plupart des stades critiques ou sensibles du blé vis-à-vis du stress hydrique sont l'épiaison et la floraison ou le stade remplissage du grain (Fisher,1973; Sandhu et al.,1996).

La période tallage constitue une phase critique vis-à-vis de l'eau, car elle représente l'un des principaux facteurs déterminant le rendement en grains chez les céréales et un manque d'eau durant cette phase provoque l'arrêt de la croissance des bourgeons axillaires et réduit donc le nombre et la taille des talles (Stark et Longley, 1986 ; Blum et Pnuel, 1990; Davidson et Chevalier, 1990).

Les travaux de Garcia Del Moral et al. (2003) montrent que la période végétative est la plus affectée par le déficit hydrique que la période de remplissage de grains. La réduction est de l'ordre 84% du rendement. Ceci montre l'importance de cette phase dans le rendement.

III-3-6-Effet du déficit hydrique sur l'efficacité de l'eau

Le rendement en grains et l'efficacité de l'eau de la culture de blé pluvial sont principalement limités par le déficit hydrique durant la croissance printanière à travers le remplissage du grain, due principalement à la haute demande évaporative et une variation saisonnière des précipitations (Musick et Dusek, 1980a ; Smith et Harris, 1981 ; Campbell et al., 1993b)

Par ailleurs, la réduction de la quantité et de la fréquence des irrigations peut améliorer l'efficacité de l'irrigation (Ritchie,1983) et peut constituer une voie certaine pour réduire

l'utilisation de l'eau en plaçant la culture de blé sous stress hydrique durant les stades de croissance précoce, bien que la production totale des cultures est généralement sévèrement restreinte. Il a été montré qu'un certain degré de déficit hydrique de sol est recommandé durant ces stades ou la culture de blé n'est pas sensible au stress hydrique, afin d'améliorer l'efficacité de l'eau (Zhang et al., 1998; Zhang et Oweis, 1999 ; Zhai et al., 2001).

III-3-7-Effet du déficit hydrique sur les composantes de rendements

L'affectation des composantes de rendement est fonction de la période et du degré de sévérité du déficit hydrique.

En condition pluviale, Garcia Del Moral et al. (2003) rapportent que la sécheresse peut causer des réductions de rendement en grains estimées à 43 voire 50% selon qu'il s'agisse respectivement de conditions sèche ou humides. Le nombre de grains par mètre carré est la composante de rendement la plus sensible aux effets de sécheresse et a été réduite de 34 et 37% en conditions pluviales. Le nombre de grains par épi a connu, également, une réduction de 22% sous des conditions de sécheresse. Le poids du grain est la composante unique du rendement qui a été modérément peu sensible aux variations du régime d'humidité et semble être relativement stable aux deux régimes de températures appliquées.

III-4-Méthodes d'atténuation du déficit hydrique

Trouver des solutions permettant d'atténuer les effets du stress hydrique est donc l'un des principaux objectifs de la recherche agronomique. Les préconisations agricoles convergent vers une meilleure conservation et utilisation de l'eau pour, et par, la plante.

Par ailleurs, l'épiaison précoce de certaines variétés (waha par exemple), est avantageuse pour esquiver les contraintes de sécheresse et hautes températures de fin de cycle (Mekhlouf et al., 2006).

Le choix des dates et densités de semis et l'adoption de variétés plus adaptées peuvent constituer une voie prometteuse de réduire les effets du déficit hydrique en zones aride et semi-aride.

Selon Dardanelli et al. 2004, le semis précoce permet de satisfaire 72% des besoins en eau des céréales. Le taux de satisfaction chute considérablement à 46% pour le semis tardif. En terme de fréquence, le semis tardif expose les cultures à des déficits néfastes pour le rendement deux années sur trois. Le semis de saison reste soumis à ces mêmes risques une année sur deux. L'avancement des semis atténue ces risques et ramène leur probabilité à une année sur cinq.

Dans le cas où la ressource en eau est suffisamment disponible, l'irrigation reste le seul moyen adéquat pour pallier au déficit hydrique afin d'améliorer et de stabiliser les rendements.

III-5-Interaction phénologie-modèle de consommation en eau

Selon Siddique et al. (2001), l'interaction entre la phénologie, le modèle de consommation de l'eau et l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) est un indicateur clés de l'adaptation des cultures dans des environnements limités d'eau.

En effet, le rendement en grains est tributaire de la quantité d'eau transpirée, de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'indice de récolte (Passioura, 1977).

Ce dernier, considère le rendement des céréales comme la relation suivante :

$$Y = W \times WUE \times HI$$

Dans laquelle :

Y: est le rendement en grains ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

W: est la quantité d'eau transpirée par la culture (mm)

WUE : efficacité d'utilisation de l'eau par la culture ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)

HI : Indice de récolte.

Cette formule a été intensivement employée à l'effet d'évaluer l'adaptation et le rendement en grains d'une gamme de cultures et plus spécialement les céréales ayant un environnement limité en eau.

Chapitre IV : Efficience d'utilisation de l'eau

IV-1-Définition

L'efficience d'utilisation de l'eau (EUE) ou water use efficiency (WUE), en terme Anglo-saxon, est définie comme étant le ratio entre la production de matière sèche et l'eau consommée pour produire cette biomasse. Elle peut se calculer à plusieurs échelles de temps et de niveaux d'analyse.

IV-2-Efficience de l'eau des pluies (régime pluvial)

En régime pluvial, les conditions climatiques de l'année jouent un rôle important dans l'efficience d'utilisation de l'eau. Cette dernière varie d'une année à une autre, selon la plupart des recherches effectuées en zones aride et semi-aride.

En effet, Ghulam et Al-Jaloud (1995), ont obtenu, des valeurs moyennes d'efficience de l'ordre de 1.22 et 2.67 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Des valeurs moyennes de l'ordre de 7.3 à 9.3 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ont été obtenues par Kang et al., (2002) en conditions pluviales.

Zhang et al.,(1998) rapportent que les traitements n'ayant reçu aucune irrigation ont enregistré des valeurs moyennes comprises entre 9.3 et 10.4 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$.

Oweis (1997) rapporte que l'efficience de l'eau en conditions pluviales, atteint 0.33 kg/m^3 avec une moyenne annuelle de 300mm de précipitations. Cette valeur d'efficience atteint 3 kg/m^3 , quand les précipitations ont été complétées par 0.5 m^3 d'irrigation complémentaire.

IV-3-Efficience de l'eau d'irrigation

L'irrigation améliore notablement l'efficience de l'eau. Les travaux de Zi-Zhen Li et al. (2004) montrent qu'une dose de 90 mm appliquée à différents stades de croissance peut effectivement augmenter l'efficience de l'eau et le rendement.

Kang et al. (2002) ont obtenu des valeurs comprises entre 7.7 et 14.6 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}$ en condition irriguée.

Majumdar et Mandal (1984) obtiennent des valeurs moyennes d'efficience de l'ordre de 12.9 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, 14.2 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ et 14.04 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ pour un blé irrigué respectivement deux, trois et quatre fois durant la période de croissance.

Wenlong et al. (2004) rapportent qu'en terme de rendement en grains, l'efficience de l'eau augmente avec l'augmentation de l'eau appliquée. La moyenne de l'efficience de l'eau obtenue dans cette étude est comprise entre 4.4 et 6.4 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ pour des traitements d'irrigation variés.

IV-4-Variation de l'efficience de l'eau

Selon Ouattar et al. (1990), les niveaux d'efficience, obtenus chez des agriculteurs Marocains, sont très variables en condition d'irrigation. Ces auteurs ont montré que l'efficience de l'eau peut varier de 3.9 à 16.7 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ en condition irriguée.

Les éléments explicatifs de cette variabilité sont liés à la fois à la défaillance des techniques d'irrigation mais aussi et surtout à la non maîtrise des autres techniques de la conduite culturale, notamment la fertilisation azotée, le désherbage et le contrôle des maladies cryptogamiques.

Par ailleurs, Rezgui et al. (2005) rapportent que l'efficience de l'eau varie entre une moyenne interannuelle de 5.7 kg de grains/ m^3 d'eau obtenue en zone semi-aride marginale à 11.9 kg/m^3 de grains en zone sub-humide avec un coefficient de variation compris entre 14 et 26%.

L'analyse des scénarios de l'irrigation complémentaire montre que le maximum de gain sous des conditions de ressources en eau limitée ou pour un rendement escompté de 40-50 quintaux à l'hectare est recommandé pour une utilisation des ressources en eau soutenable et une efficience d'utilisation de l'eau élevée (Zhang et al., 2001).

IV-4-1-Quantités d'eau appliquées

Des valeurs moyennes d'efficience, passant du simple (7 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$) au double (14.6 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$), pour le blé irrigué, ont été obtenues dans différentes régions de Chine (Zhang et al., 2004 ; Kang et al., 2002).

Des travaux réalisés à ICARDA, dans des démonstration de parcelles de terrain, sur des champs de fermiers, ont montré qu'avec un apport d'eau complémentaire de 1 m^3/ha , le rendement moyen du blé atteint 2 à 3 kg/ha de plus que sous un régime pluvial. En d'autres termes, l'efficience de l'eau peut atteindre des valeurs de 2 à 3 kg par mètre cube d'eau utilisé. Cette valeur de l'efficience de l'eau rivalise favorablement avec l'efficience globale de l'irrigation permanente, qui est de l'ordre de 1 kg/m^3 (Oweis et Hachum, 2003).

IV-4-2-Consommation en eau

En condition pluviale, les quantités d'eau consommées par le blé varient d'une région à une autre, entre 100 et 462 mm (Rezgui et al., 2005). Cependant, une culture de blé bien irriguée consomme environ 500 mm par an. Les apports naturels (précipitations) peuvent concourir à raison de 50 à 75%, soit 250 à 350 mm. Le reste doit être apporté sous forme d'irrigation

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Bouffiras (1990) au Maroc et Kribaa et al. (2001) en Algérie. Ces derniers rapportent des valeurs d'efficience variant de 3.9 et 16 $\text{kg.mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ suite à une meilleure utilisation des eaux de pluie et des apports d'irrigation.

Des valeurs d'efficience relativement élevées ont été obtenues suite à des quantités d'eau plus faibles, ce qui dénote qu'une bonne distribution des précipitations au cours du cycle de croissance contribuant, ainsi à l'amélioration de l'efficience d'utilisation de l'eau.

La relation obtenue par Zhang et Oweis (1999) indique que pour chaque 10mm d'augmentation dans l'évapotranspiration saisonnière, correspond une augmentation de rendement en grains de 160 kg pour le blé tendre et 116 kg de blé dur.

IV-5-Stratégies d'irrigation et efficience de l'eau

IV-5-1-Efficience en condition de déficit hydrique

Hatfield et al. (2001) suggèrent qu'il est possible d'augmenter l'efficience de l'eau des plantes de 25-40% à travers la gestion de l'eau à la parcelle.

En effet, des résultats obtenus à travers des environnements arides et semi-arides divers, montrent qu'il est important d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau par la réduction de l'évaporation du sol et l'augmentation du rendement en grains (Shan,1994; Howell, 2001; Kang et al., 2003;Zhang et al., 2004).

La réduction de la quantité et de la fréquence des irrigation peut améliorer l'efficience d'irrigation (Wang et al., 2001) et constitue une voie effective de réduction de l'utilisation de l'eau en situant la culture de blé sous stress hydrique dans un stade de croissance précoce. Il a été démontré, également, qu'un certain degré de déficit hydrique du sol est recommandé durant ces stades ou la culture de blé est peu sensible au déficit hydrique (Zhang et al., 2001).

En Tunisie, il a été affirmé que l'application de l'eau est plus efficiente lorsque le déficit hydrique du sol est compris entre 60 et 90% de la RU pour un rendement escompté de 40 à 60 quintaux/ha. Il est donc recommandé de rechercher le rendement optimal dans cette plage de réserve hydrique (Rezgui et al., 2005).

La teneur en eau du sol au semis est très importante pour l'établissement de la culture et la formation du grain. L'approvisionnement limité en eau, peut aboutir à une bonne efficience de l'eau sans pour autant décroître le rendement en grain en région semi-aride (Ziaei et Sepaskhah, 2003).

IV-6-Relation efficience de l'eau et rendements

Les relations entre l'efficience de l'eau et les rendements de blé (grains et matière sèche), que ce soit en régime pluvial ou en régime irrigué, ont été abordés par plusieurs chercheurs dans différentes régions du globe et en particulier dans les régions arides et semi-arides. Différentes relations ont été obtenues selon les situations climatiques.

Zhang et Oweis (1999) ont obtenu des relations polynomiales, sur blé dur et blé tendre, entre l'efficacité de l'eau et le rendement en grains avec des coefficients de détermination respectifs de l'ordre de 0.76 et 0.85.

En effet, ces auteurs ont conclu que l'efficacité de l'eau pour le blé tendre passe de $6.8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour un rendement en grains inférieur 3 tonnes/ha à $10.8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour un rendement en grains supérieur à 3 tonnes /ha dans un site expérimental du nord de la Syrie

Pour le blé dur l'efficacité de l'eau est passé de $7.4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour un rendement en grains inférieur 3 tonnes/ha à $11.9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour un rendement en grains supérieur à 3 tonnes /ha. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Siddique et al. (1990) et Zhang et al. (1998).

IV-7-Rôle des techniques culturales dans l'amélioration de l'efficacité de l'eau

Selon Fahong et al.(2004), La gestion adéquate de l'irrigation peut augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau et réduit par conséquent les coûts (Norwood et Dumler, 2002).

En effet, pour une même conduite d'irrigation, des différences d'efficacité de l'ordre de 36.6% ont été observées entre des cultivars de blé différents.

Selon Li et al. (2001), une dose d'irrigation de 30mm avant semis associée à la fertilisation azotée améliore l'efficacité de l'eau et les rendements de blé de printemps. En matière de grains, l'efficacité de l'eau passe de $12.7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour un traitement ayant reçu une dose de 30 mm avant semis sans fertilisation azotée à $14.5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour un traitement ayant reçu 30 mm avant semis avec fertilisation azotée.

Pour la matière sèche, des valeurs moyennes, en irrigué, de l'ordre de $36 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ et $44.1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$, ont été obtenues par (Ehadaie 1995).

Zi-Zhen Li et al. (2004) ont obtenu une augmentation moyenne de l'efficacité de l'eau de l'ordre de 71.7% pour des traitements irrigués et fertilisés par rapport aux traitements sans irrigation et sans fertilisation.

IV-8-Rôle de la réserve en eau du sol

Dans les régions semi-arides, le stock de l'eau dans le sol à la période de semis a un effet extrêmement important sur le rendement en grains et l'efficacité de l'eau en régime pluvial. Il y a une corrélation linéaire entre le stock de l'eau du sol au semis (SWS : Soil Water Storage) et le rendement en grains.

Généralement, la programmation de l'irrigation est basée sur le pourcentage de la réduction ou l'épuisement de la réserve en eau du sol dans la zone racinaire. Cette réserve

en eau est prise comme la différence entre le stock d'eau dans la zone racinaire à la capacité au champ et le point de flétrissement permanent.

Pour obtenir une efficacité satisfaisante de l'irrigation, il est nécessaire d'utiliser au maximum la contribution de la réserve en eau du sol avant de la déclencher.

Selon Li et al. (2001), il est crucial, pour les blés irrigués et conduits en sec, d'augmenter les stocks d'eau à l'aide d'irrigation au semis, car ils permettent d'avoir une bonne levée, un système racinaire profond et une amélioration de l'utilisation de l'eau pour le blé d'hiver.

Par ailleurs, la différenciation entre traitements utilisés, en matière de rendements et d'efficience, n'est significative qu'à partir du 50^e jour après semis sur la couche 0-50 cm (Wenlong Li et al., 2004) et au-delà du 50^e jours après semis sur la couche 30-60 cm (Zi-Zhen Li et al., 2004).

La réduction de l'eau disponible à partir de l'initiation florale jusqu'à la fin du remplissage se produit dans le profil 0-140cm. L'eau disponible au dessous de 140 cm s'épuise plus lentement (Xue et al., 2003).

IV-9-Choix des variétés

Le choix des cultivars appropriés est aussi important que les quantités d'eau d'irrigation et de fertilisation azotée. Que ce soit en condition irriguée ou en condition pluviale, les variétés précoces enregistrent les meilleures efficacités de l'eau ainsi que les meilleurs rendements en grains et en paille (Timsina et al., 2001).

Garcia del Moral et al., (2003) rapportent que parmi les variétés sélectionnées par ICARDA-CIMMYT, la variété waha présente les meilleures efficacités de l'eau et les meilleurs rendements, essentiellement du au nombre de grains par mètre carré et le nombre de grains par épi.

Toutes les pratiques de gestion peuvent influencer ainsi l'efficience de l'eau en cas d'irrigation de complément. Un choix approprié des variétés de blé, dans des conditions de climat donné peut améliorer les niveaux de rendement et par conséquent l'utilisation de l'irrigation de complément.

Chapitre V : Etude de la consommation en eau du blé

V-1- Estimation de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle est souvent estimée ou calculée à travers un ensemble de méthodes physiques et empiriques basées sur des données climatiques et météorologiques (Penman-Monteith, Thorntwaite, Blaney-Criddle...) ou des mesures expérimentales sur lysimètres, évaporomètres de Piche, bacs d'évaporation...).

Selon plusieurs études réalisées à travers des environnements arides et semi-arides, La méthode de Penman-Monteith qui intègre la température, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse du vent, reflèterait probablement mieux que les autre méthodes, l'impact du climat sur le volume d'eau que la culture perd par évapotranspiration.

Selon l'emplacement du bac, la méthode de l'évaporation en bac peut être mise en second rang, encore que cette méthode soit peut être meilleure quand le bac d'évaporation jouit d'un excellent emplacement, d'un entretien régulier et que les vents sont faibles (Doorenbos et Pruitt, 1997).

D'ailleurs une bonne corrélation a été obtenue entre l'évaporation bac class A et l'ETP Penman-Monteith, sur trois années de mesures, par Meyer et al. (1999)

$$ET_0 = 0.72 (\pm 1.03) + 0.83 (\pm 0.01) E_{\text{bac}} \quad n = 1081, R^2 = 0.89$$

Cependant, du fait que l'ETP est plutôt une caractéristique du climat, elle peut être calculée à partir de paramètres climatiques.

V-2-Variation de l'évapotranspiration

Globalement, l'ETP suit les variations saisonnières et journalières du rayonnement solaire et de la température. En zone semi-aride méditerranéenne, les valeurs moyennes journalières de l'ETP se situent entre un peu moins de 1mm/jour en hiver et jusqu'à 8 à 10 mm/jour en été. En outre, le régime d'évaporation est relativement plus stable d'une année à l'autre que le régime pluviométrique. Il s'en suit donc que les besoins en eau des cultures sont assez prévisibles d'une année à l'autre.

V-3-Méthodes d'estimation des besoins en eau d'irrigation

La prédiction de la consommation en eau et des coefficients culturaux comme fonction de la période de croissance est très importante pour la détermination de l'utilisation de l'eau par les plantes et la programmation des irrigations à un niveau régional (Allen et al., 1998).

Dans un contexte climatique donné, la consommation maximale d'une culture parfaitement alimentée en eau est appelée ETM (évapotranspiration maximale). Certaines méthodes utilisées par les bio-climatologues comme la méthode aérodynamiques permettent de mesurer l'évapotranspiration réelle (ETR) d'un couvert végétal (Perrier et Salkini, 1991; Itier et al., 1994; Cargnel et al., 1996).

Ces méthodes sont cependant lourdes et coûteuses à mettre en œuvre au même titre que la méthode des cases lysimétriques donnant accès à tous les termes du bilan hydrique.

Différentes approches basées sur le bilan d'énergie existent pour estimer la consommation maximale d'une culture (Prihar et Sandhu, 1987; Itier et Brunet, 1996 ; Alves et al., 1996).

Cependant, celle demeurant la plus utilisée en raison de sa simplicité et du degré de précision qu'elle permet d'obtenir, repose sur l'utilisation de la formule classique $ETM = Kc \text{ ETP}$.

Les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration (ET) du blé d'hiver utilisent souvent les concepts de l'évapotranspiration de référence (ET_0) et le coefficient cultural (Kc). Ce dernier est usuellement relié au nombre de jours après la plantation ou à la somme de degré-jours pendant la croissance (GDD :Growth Degree Days) (Evelt et al., 1993).

V-3-1-Besoins en eau sur le cycle de croissance

L'évapotranspiration totale du blé d'hiver varie selon les climats, les variétés (précoces ou tardives) et la longueur du cycle végétatif.

En conditions pluviales, les quantités d'eau consommées dans une zone semi-aride de Tunisie, varient entre 100 et 462 mm. Celles qui sont à l'origine d'une production en grains sont généralement supérieures à 240 mm. Par contre, en conditions d'irrigation, la consommation est comprise entre 250 et 616 mm (Rezgui et al., 2005).

Selon les quantités d'eau d'irrigation appliquées, des valeurs d'évapotranspiration comprises entre 340 et 818 mm ont été obtenues dans des conditions semi-arides (Cooper et al., 1987).

La moyenne saisonnière de l'évapotranspiration de la culture de blé est de 444 mm avec une évapotranspiration de référence ET_0 égale à 484 mm. La transpiration chez le blé constitue à peu près 67% de l'évapotranspiration et de ce fait l'évaporation du sol participe avec 33% seulement (Kang et al., 2003).

V-3-2- Besoins en eau par stade de croissance

La consommation en eau du blé d'hiver durant les stades de croissance dépasse largement les précipitations, cette consommation est comprise entre 50mm en année sèche et 150mm en année humide, par conséquent l'irrigation complémentaire constitue un meilleur outil d'augmentation des rendements (Li et al., 2002).

Selon Kang et al. (2003), le maximum de d'évapotranspiration journalière et la transpiration T_p s'et produit entre 190 et 210 jours après semis pour un blé semé début

octobre et récolté début juin en Chine. Le maximum d'évapotranspiration se situe aux environs de 4.5 mm/jour.

Il peut atteindre des pics allant de 7.5 à 8.5 mm/jour dans des conditions de sécheresse accrue, pour atteindre en fin de cycle des valeurs de l'ordre 3 à 2.5 mm/jour (Monteny, 1970 ; Mekcliche, 1976).

Des travaux effectués sur blé dur Variété Karim, ont permis d'évaluer la consommation en eau du blé par stade de croissance sur plusieurs sites en Tunisie. Ainsi, il a été une consommation de 177 mm du semis à l'épiaison, 150 mm au stade intermédiaire et 81 mm au stade final avec une consommation totale de 409 mm.

Selon Bouthier et al. (2000), la consommation en eau par stade croissance se répartit comme suit :

Epi 1 cm-2 nœuds 15%

2 nœuds- épiaison 35%

Epiaison- Grain laiteux 30%

Grain laiteux- maturité 20%

De la montaison à la floraison, les besoins en eau de la culture sont considérables ; la consommation est accrue et peut atteindre une valeur de 180 mm au cours de cette période qui peut durer 3 mois (Mars-Mai). Le mois d'Avril est crucial car de lui dépend le développement reproductif de la culture (Baldy, 1985).

V-4-Relation évapotranspiration et rendements

Selon Zhang et Oweis (1999), les rendements des cultures augmentent linéairement avec l'augmentation de l'évapotranspiration (ET). Un gain de 160 kg pour le blé tendre et 116 kg pour le blé dur, a été observé, par augmentation de 10mm de l'ET au dessus d'un niveau de 200 mm. Avec un besoin minimum de 203 mm pour un rendement en grains initial, ce besoin en eau minimum est similaire à la valeur virtuelle de l'ET estimée à partir de la relation rendement-évapotranspiration.

Par contre Wang et al. (2001), rapportent que l'évapotranspiration (ET) est corrélée au rendement en grains sous forme de fonction parabolique avec un maximum de rendement en grains à partir d'une consommation en eau optimale comprise entre 447 et 482 mm pour le blé d'hiver.

Par ailleurs Zhang et al. (1998) rapportent qu'en régime d'irrigation, la relation qui lie le rendement à l'application des apports d'eau est curviligne, contrairement à la relation transpiration- rendement ou évapotranspiration-rendement est quant à elle linéaire.

V-5-Etude du coefficient cultural

V-5-1-Définition

Par définition, ce coefficient traduit le rapport entre l'évapotranspiration de la culture à un stade donné (ETM) et l'évapotranspiration de référence (ET₀ ou ETP). Les valeurs publiées de Kc sont souvent données par culture, tout en tenant compte des diverses phases de croissance. Le choix de l'ET₀ conditionne énormément la valeur du coefficient cultural.

Sur le tableau 6, sont reportées les valeurs des coefficients culturaux, pour le blé d'hiver, obtenues dans deux endroits différents (Chine et Tunisie).

Nous remarquons, d'une part que l'évolution du Kc ne suit pas la même allure dans deux environnements différents et d'autre part, des différences très significatives de l'ordre de 131% pour la même période. Ceci est dû à la référence (ET₀) utilisée dans les deux endroits ; ET₀ Bac d'évaporation en Tunisie et Formule de Penman en Chine (Changming Liu et al., 2002). De ce fait, il est très utile de préciser la référence choisie dans le calcul du coefficient cultural.

V-5-2- Variation du coefficient cultural

La valeur du coefficient cultural est faible en début de végétation. De la levée au tallage, elle peut prendre des valeurs comprises entre 0.3 et 0.5 (Doorenbos et Kassam, 1987 ; Vilain, 1987). Elle augmente au fur et à mesure que la culture se développe ; au stade floraison, elle peut atteindre 1.2. Elle décroît par la suite pour prendre des valeurs comprises entre 0.2 et 0.3 en fin de cycle.

D'un point de vue théorique, la valeur maximale du Kc avoisine l'unité. Cependant, la littérature et bon nombre d'études ayant trait à la consommation des cultures attestent des valeurs souvent supérieures à 1. Ces valeurs ont une relation directe avec la consommation en eau de la culture à un stade de croissance donné. Les valeurs maximales généralement proposées pour le blé varient entre 1.1 et 1.2 (Doorenbos et Pruitt, 1984)

Tableau 6 : Valeurs mensuelles des coefficients culturaux obtenus en Tunisie (Kc₁, référence ET₀ gazon) et en Chine (Kc₂, référence ET₀ Penman)

Mois	Kc ₁	Kc ₂	Différence (%)
Novembre (20-30)	0.50	0.82	+64
Décembre	0.60	0.86	+43
Janvier	0.74	0.43	-72
Février	0.88	0.38	-131
Mars	1.02	0.57	-79
Avril	0.99	1.23	+24
Mai	0.72	1.42	+97
Juin (1-10)	0.48	0.72	+50

V-5-3- Comparaison des Kc des variétés locales et introduites

La valeur du coefficient cultural est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, sa durée de cycle et son taux de croissance. La fréquence des pluies ou de l'irrigation en début du cycle de la culture affecte aussi le Kc.

Par ailleurs, les travaux, menés sur trois campagnes consécutives dans la région du Chéiff par Merabet et Bouthiba (2004), sur des variétés locales et des variétés introduites,

montrent que durant les premiers stades de développement de la culture (levée-montaison), le Kc des variétés introduites, en l'occurrence Waha, est supérieur à celui des variétés locales. Par la suite, entre la montaison et l'épiaison, la tendance s'inverse et c'est autour des valeurs de Kc des variétés locales qui deviennent supérieures à celles des variétés introduites dites à haut rendement. Ceci peut être attribué au caractère précoce des variétés introduites et du caractère tardif des variétés locales. Les valeurs maximales de Kc toutes variétés confondues sont comprises entre 1.02 et 1.06, elles ont été observées au stade floraison. Ces valeurs sont comparables à celles proposées par Doorenbos Kassam (1987). Les mêmes tendances ont été observées par Al-Kaisi et al. (1997).

Des valeurs maximales de l'ordre 1.33 ont été obtenues, au mois d'Avril, à la floraison pour le blé, par Kang et al. (2003).

V-5-4- Relation coefficient cultural et indice de surface foliaire

Le coefficient cultural Kc évolue au cours du cycle avec l'indice foliaire. Ce dernier est tributaire des conditions environnementales (thermiques essentiellement pour une culture bien fertilisée).

L'apparition de certains modèles de cultures comme CERES (Ritchie et al., 1986), STICS (Brisson et al., 1998), a permis de simuler l'évolution du LAI et par la même occasion celle du Kc.

Il convient de savoir que la consommation maximale pour une culture de blé est atteinte dès que le LAI dépasse la valeur de 3.5 (Maihlol, 2001).

Bandyopadhyay et Mallick (2003) rapportent que durant les premiers stades de croissance (du semis jusqu'à la 3^e semaine après semis), Kc est compris entre 0.2 et 0.47 avec un LAI < 1.

Alors que durant le développement végétatif (4-8 semaines après semis), le Kc prend des valeurs comprises entre 0.61 et 1.

Entre 9-14 semaines après semis, la moyenne du coefficient cultural est de 1.08 avec une valeur maximale de 1.19 à la 12^e semaine après semis pour un LAI > 3.

En définitive, dans la plupart des cas, concluent ces auteurs, quand l'indice de surface foliaire LAI > 3, le coefficient cultural du Kc > 1.

Différentes relations, ont été obtenues, entre l'indice de surface foliaire et le coefficient cultural, parmi lesquelles:

$$Y = 0.166x + 0.6509 \text{ avec } R^2 = 0.9074. \text{ Bandyopadhyay et Mallick (2003)}$$

Selon Wright (1982), la variation du Kc peut être représentée comme une fonction de jours après semis ou de jours de l'année. Elle est donnée par la relation suivante :

$$Kc = -2.10^{-12} DAS^5 - 5.10^{-9} DAS^4 + 2.10^{-6} DAS^3 - 0.0003DAS^2 + 0.0168DAS + 0.2923.$$

$$R^2 = 0.9604, P < 0.001, n = 25$$

Cependant Kang et al. (2003) aboutissent à la relation suivante :

$$Kc = \frac{0.40 + 0.8466LAI}{LAI + 0.7887}$$

$R^2 = 0.8612$ $P < 0.001$, $n = 25$

Chapitre VI : Matériels et méthodes

VI-1- Localisation du site d'étude

Le périmètre du moyen Chélif se trouve dans la wilaya de Chlef et se compose de deux plaines nettement séparées par la zone de colline et le seuil de Oum Drou.

Il s'étend sur une longueur (Est-Ouest) de 60 km environ et une largeur (Nord-Sud) de 10 km environ.

La région du moyen Chélif occupe la partie centrale du bassin versant de l'oued Chélif dont la superficie totale est de 44000 km² avec un apport annuel à l'embouchure de 1.1 milliard de m³/an. La pluviométrie annuelle sur la période 1970-2006 est de l'ordre de 370 mm.

Les essais ont été menés à la station expérimentale de la Coopérative des Céréales et Légumes Secs (CCLS) de Ouled Fares, située à 15 km au Nord-Ouest de la commune de Chlef. Le site d'étude se trouve dans la plaine du Chélif, limité au Nord par la commune de Bouzghaia, au Sud-Est par la commune de Chlef, au sud par la commune de Chettia et à l'Ouest par la commune de Hrenfa. Le site expérimental se trouve sur la rive droite de l'oued wahrane; affluent principal de l'oued Chélif à une distance de 10 mètres (Figure 2).

Les coordonnées sont :

Latitude 36°12'N

Longitude 01°20'E

Altitude 102 m

VI-2- Caractéristiques climatiques de la région d'étude

La région du Chélif est caractérisée par un climat semi-aride, présentant deux saisons très marquées avec des températures moyennes d'été de l'ordre de 30°C et des températures moyennes d'hiver de 10°C. Les deux saisons de transition étant relativement brèves. En été, on note des températures similaires à celles observées dans les oasis sahariennes.

VI-2-1- Pluviométrie

La moyenne des précipitations enregistrée sur une période de 36 ans (1970-2006) est de l'ordre de 370 mm. Le mois de Novembre est considéré comme le mois le plus pluvieux avec une moyenne de 52.2 mm.

La quantité de pluie mensuelle enregistrée à la station de Chlef est comprise entre 23 mm au mois de Septembre et 52.2 mm au mois de Novembre (figure 3).

Cependant, il est important de noter que 75% du total de la pluviométrie est enregistré au cours de la période Novembre-Avril dont 51% se situe dans la période végétative.



Figure 2 : Localisation de la région d'étude dans le périmètre d'irrigation de Chlef.

(Novembre-Février) et seulement 32% des précipitations tombent au cours de la période (Mars-Juin) coïncidant avec la période épiaison-maturation. Le total cumulé sur la période Juin-Aout se situe aux environs de 10 mm sur 36 ans.

L'analyse des données pluviométriques sur la période 1985-2006 montre que la campagne 95/96 est la plus pluvieuse avec un total de 534 mm et celle de 99/2000 est la plus sèche avec un total de 222.6 mm.

VI -2-2- Déficit climatique

La figure 4 montre l'évolution de l'évapotranspiration potentielle. Cette dernière a été calculée à l'aide de la méthode du bac d'évaporation Class "A. Cette méthode a été ajustée à la formule de Penman-Monteith sur une période de 20 ans, calculée à la station météorologique de Chlef. Cette figure montre globalement que cette ETP est souvent supérieure à la somme des précipitations mensuelles. De ce fait, le déficit climatique P-ETP est négatif 11 mois sur 12.

Il apparaît clairement que le déficit climatique affecte en moyenne 5 mois le cycle de croissance du blé dans la région du Chélif, avec des intensités différentes d'année en année. Il est plus accentué en fin de cycle avec des valeurs qui peuvent atteindre 185 et 190 mm respectivement pour les mois de Mai et Juin de la campagne 99/2000.

Durant les périodes Avril-Mai, les déficits climatiques des campagnes 98/99, 99/2000 et 2000/2001 sont compris entre 80 et 184 mm.

VI -2-3- Températures

Comme pour les précipitations, la région du Chélif est caractérisée par un régime thermique annuel variable et irrégulier. L'évolution des températures sur la période 1970-2006 (figure

5), montre que cette région présente une saison sèche étalée sur une période de plus de huit mois, avec des étés secs et chauds, des températures moyennes maximales supérieures à 35°C avec des pics pouvant atteindre 45°C. Les hivers sont froids et humides s'étalant sur une courte période, les températures moyennes minimales sont de l'ordre de 5°C avec des pics de -1°C enregistrés pour certaines années.

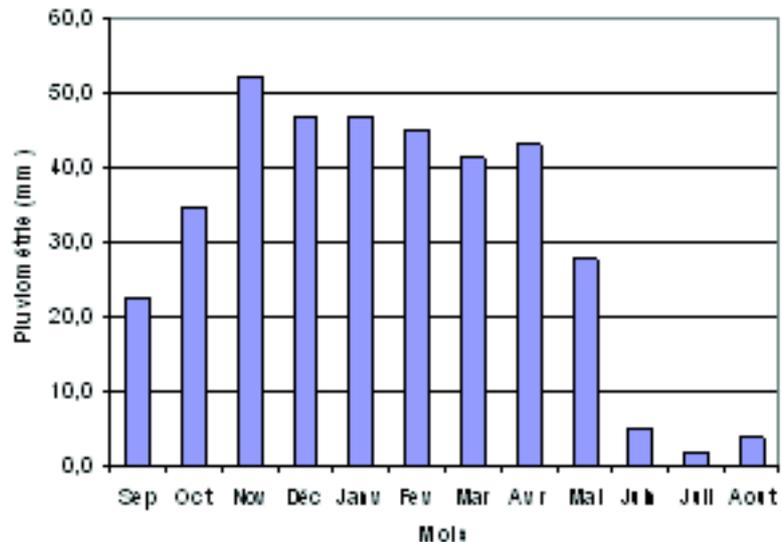


Figure 3 : Pluviométrie mensuelle moyenne à Chlef (1970-2006).

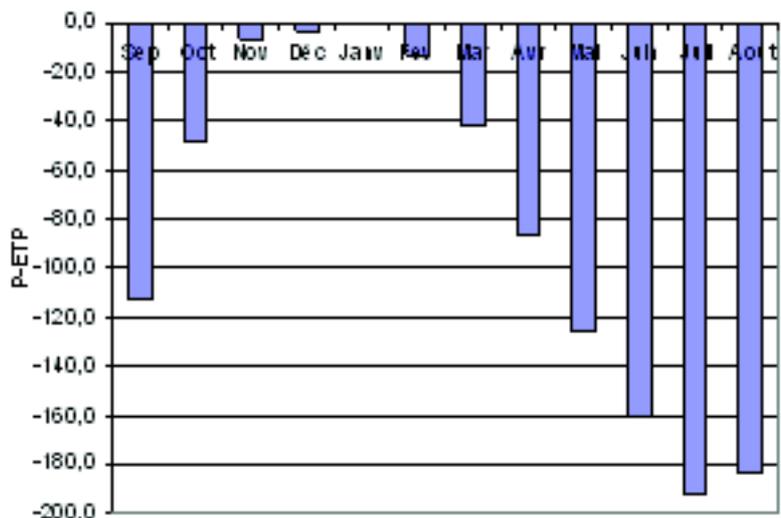


Figure 4 : Déficit climatique moyen mensuel à Chlef (1970-2006)

VI -2-4- Durée d'insolation

La figure 6 montre que les valeurs de la durée d'insolation évoluent d'une manière inversement proportionnelle à celles de l'humidité relative. En effet, la durée d'insolation passe par une valeur minimale, de 160 heures, enregistrée au mois de Janvier, puis elle augmente pour atteindre une valeur moyenne maximale de 370 heures enregistrée au mois de Juillet.

Rappelons que les valeurs de la durée d'insolation sont exploitées pour calculer la radiation solaire (RG); utilisée dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP_{Penman-Monteith}) à l'aide de la formule suivante :

$$RG = RG_0 \left(0.29 \cos \varphi + 0.52 \frac{n}{N} \right)$$

Dans la quelle :

RG : Radiation solaire (MJ.m⁻²).

RG₀ : Rayonnement solaire extra-terrestre (tabulé en fonction de la période de l'année et de la latitude).

Φ : Latitude du lieu

n : Insolation moyenne (heures) ; mesurée à l'aide de l'héliographe

N : Insolation théorique ou durée astronomique du jour (tabulée en fonction de la période de l'année et de la latitude).

VI -2-5- Humidité relative

La figure 7 montre l'évolution de l'humidité relative sur une période de 36 ans. Les valeurs maximales de l'humidité relative sont enregistrées aux mois de Décembre-Janvier avec des valeurs proches de 80%. Par la suite l'humidité relative diminue jusqu'à atteindre une valeur moyenne de 45% enregistrée au cours de la période (Juin-Aout) accentuant ainsi les valeurs de l'évapotranspiration.

VI -2-6- Vitesse du vent

Les vents dominants dans la région de Chlef sont des vents d'ouest faibles à modérés. Durant la période estivale.

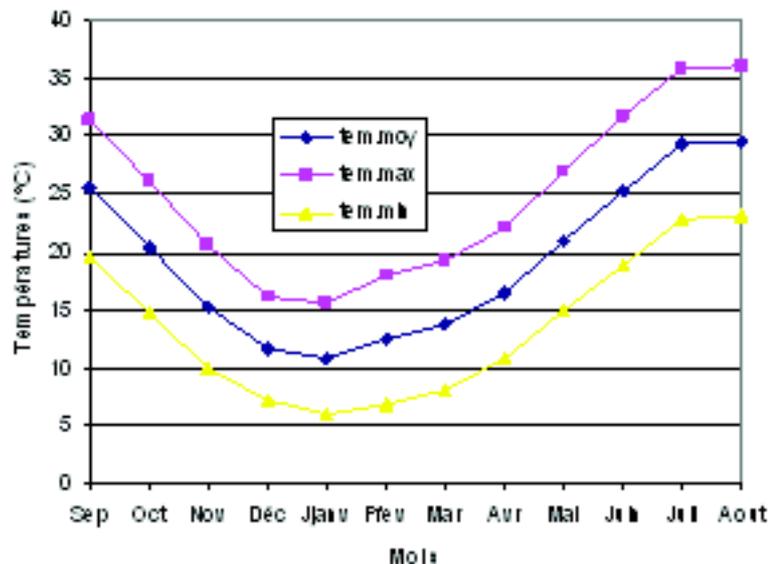


Figure 5 : Températures moyennes mensuelles à Chlef (1970-2006)

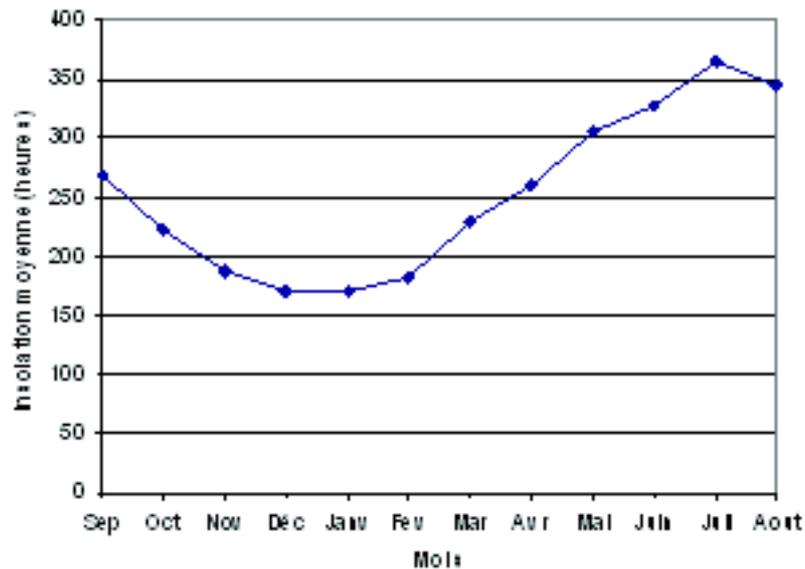


Figure 6 : *Insolation moyenne mensuelle à Chlef (1970-2006)*

Sur la figure 8, nous remarquons qu'en début de cycle, la vitesse moyenne du vent est proche de 2 m/s. A partir de la fin Février, la vitesse augmente pour atteindre une valeur moyenne de 2.9 m/s enregistrée au mois de Juin. Ces vitesses de vent combinées aux fortes températures, en fin de cycle augmentent davantage le déficit de saturation de l'air et par conséquent, les valeurs de l'évapotranspiration potentielle.

Il est à noter que durant cette période, la région du Chélif connaît un vent sec et chaud : le sirocco, qui peut durer plusieurs jours. La région de chlef enregistre en moyenne 30 jours par an de sirocco.

VI -3- Climatologie des quatre années d'étude

L'étude a été menée à la station expérimentale de la CCLS (Daira de ouled Fares, Wilaya de Chlef) sur 4 campagnes de mesures (98-2001). Les données climatiques, de cette période, proviennent d'une station météorologique, que nous avons installée, en 1989, en collaboration avec les services de l'ANRH (Agence Nationale des ressources hydriques). Cette station est située à 1 km du site d'étude. Elle nous permet de mesurer la pluviométrie, les températures maximale et minimale, la vitesse du vent, la durée d'insolation et l'humidité relative. Les valeurs de l'évaporation bac proviennent des mesures faites directement sur bac d'évaporation class "A" que nous avons installé, protégé contre les oiseaux à l'aide de grillage et entretenu régulièrement afin d'éviter d'éventuels erreurs d'expérimentation.

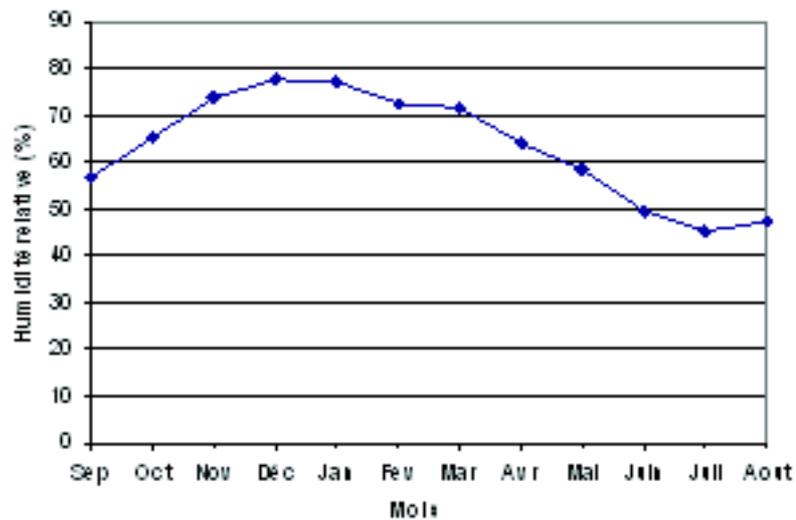


Figure 7 : Humidité relative moyenne mensuelle à Chlef (1970-2006)



Figure 8 : Vitesse du vent moyenne mensuelle à Chlef (1970-2006)

VI -3-1- Pluviométrie (98-2001)

Les données pluviométriques enregistrées au cours des quatre années d'étude (98-2001) montrent qu'une année sur deux les précipitations ont dépassé la moyenne enregistrée sur 36 ans (371.1 mm).

En effet, les années 97/98 2000/2001 ont enregistré des valeurs respectives de l'ordre de 430.8 et 398.8 mm. Ces deux années comme le montre la figure 9, sont caractérisées par une bonne distribution des précipitations au cours du cycle de croissance.

La pluviométrie au cours de la saison de croissance de chaque campagne est de l'ordre de 365, 266, 185 et 253 mm enregistrée respectivement en 97/98, 98/99, 99/2000 et 2000/2001.

Nous remarquons également que la valeur de 50 mm qui correspond approximativement à la valeur de la réserve facilement utilisable (RFU) est atteinte une fois sur 12 (Novembre) et presque un mois sur deux une valeur de 40 mm est atteinte ou dépassée.

D'autre part, la campagne 99/2000 a connu un régime de pluie caractérisé par une distribution irrégulière et des quantités relativement faibles par rapport à la moyenne des précipitations enregistrée durant la période 1970-2006.

En effet, la pluviométrie enregistrée durant la période Janvier-Mai, est très faible voire nulle, en particulier pour le mois de Février et le cumul sur six mois (Janvier-Juin) n'a pas dépassé les 40 mm (figure 10). Il en est de même pour la campagne 98/99 ou la valeur cumulée des précipitations a atteint un palier à partir du mois d'Avril avec un cumul d'Avril à Août presque insignifiant, de l'ordre de 4.5 mm.

Du point de vue distribution des pluies au cours du cycle, nous remarquons une variabilité mensuelle importante ainsi que des années climatiques très contrastées.

Cependant, les années 97/98 2000/2001 ont connu des débuts de campagnes relativement pluvieux avec un cumul de l'ordre de 250 mm enregistré au mois de Décembre. Soit, respectivement, 58 et 68% du total enregistré durant ces deux campagnes. Par conséquent, l'eau disponible pour la plante est nettement suffisante pour démarrer le cycle de croissance.

Quant à l'année 98/99, le début du cycle était plutôt sec avec un cumul légèrement supérieur à 50 mm enregistré au mois de Décembre.

Par ailleurs, cette campagne a connu par la suite, un cumul de précipitations très significatif de l'ordre de 300 mm enregistré au mois de Mars, soit plus de 98% du total de la campagne.

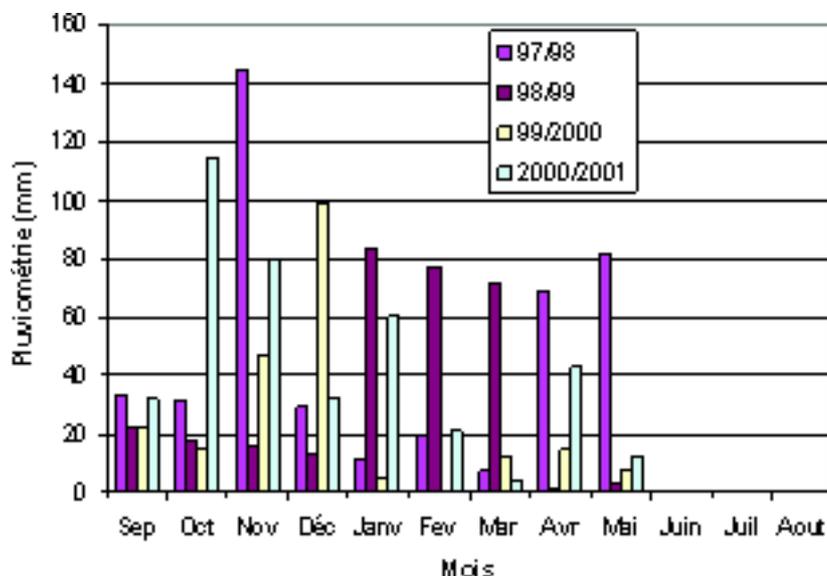


Figure 9 : Pluviométries des quatre années d'étude

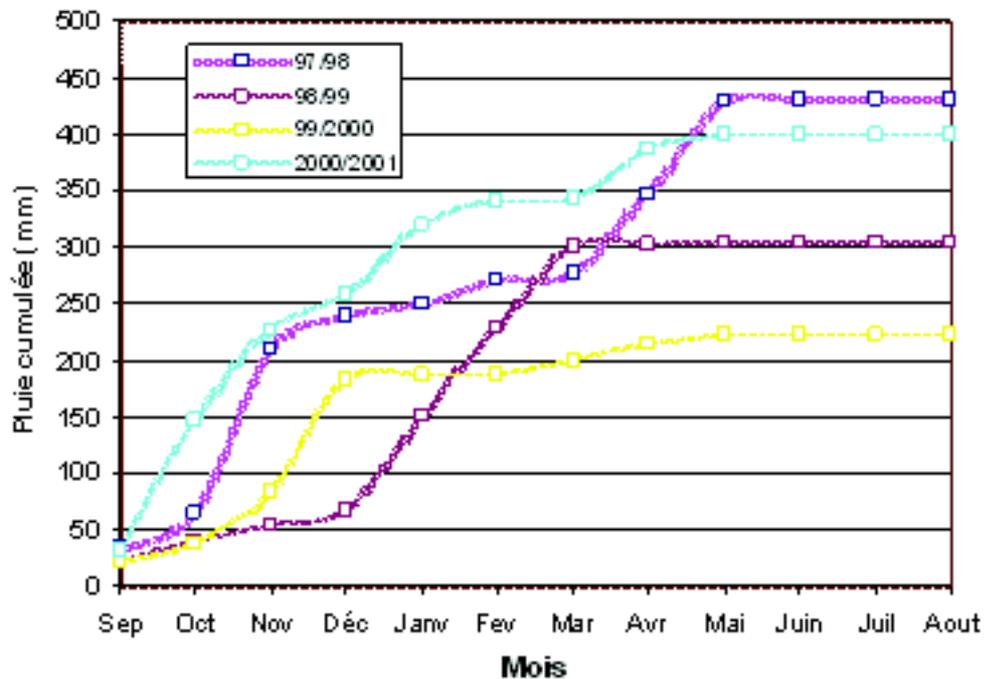


Figure 10 : Pluie cumulée des quatre années d'étude

VI -3-2- Températures (98-2001)

Le régime thermique annuel est variable et irrégulier. En effet, des amplitudes thermiques dépassant les 28°C peuvent être observées à l'échelle mensuelle comme c'est le cas du mois d'Octobre 97 où les températures maximale et minimale ont atteint respectivement 34,6° et 6,5°C.

Cette amplitude atteint une valeur de 21,3°C pour le mois d'Octobre de la même année.

L'examen des figures 11 et 12 permet de dire que la campagne 97/98, enregistre des températures maximales, en début de campagne, plus élevées que les autres campagnes avec des différences interannuelles pouvant atteindre 54% pour le mois d'Octobre 97/98 et 99/2000.

Notons enfin que les températures maximales enregistrées durant la campagne 97/98, dépassent celles enregistrées durant la période 1970-2006 et en particulier en début de cycle.

Cependant, nous remarquons une baisse sensible des températures maximales à partir du mois d'Avril par rapport aux autres campagnes.

S'agissant des températures minimales, il est à noter que le phénomène s'inverse. C'est plutôt les températures minimales enregistrées, pour la campagne 97/98, qui deviennent plus faibles par rapport aux autres campagnes ainsi qu'à la période 1970-2006.

VI -3-3- Déficit climatique (98-2001)

Contrairement à la période 1970-2006, où le déficit climatique était négatif 11 mois sur 12, les quatre années d'étude présentent des périodes où le déficit climatique est nettement positif. L'intensité et la durée diffèrent d'une année à une autre.

La variation du déficit climatique au cours des quatre années d'étude est fonction surtout de la quantité de pluie enregistrée à chaque campagne car les valeurs de l'évapotranspiration calculés ou mesurées à la station de Chlef diffèrent très peu d'année en année.

La figure 13 montre le déficit climatique (P-ETP) au cours des quatre années d'étude. La première constatation que nous pouvons faire est que le déficit climatique est beaucoup plus prononcé en fin de cycle qu'en début de cycle. Il débute à partir du mois de Février pour les campagnes 97/98, 98/99 et 99/2000. Les intensités et les durées sont presque similaires pour les deux dernières campagnes avec des valeurs moyennes de -38 mm en Février et -175 mm pour les mois de Mai et Juin avec néanmoins un "avantage climatique" pour la campagne 2000/2001 ou ses trois premiers mois enregistrent des valeurs nettement positives (Novembre-Janvier).

Cependant, la campagne 97/98 présente les meilleures distributions pluviométriques au cours du cycle de croissance, bien que les déficits climatiques soient nombreux mais d'une faible intensité.

Donc, nous pouvons dire que le déficit climatique dans la région du Chéiff est quasi systématique, chaque année avec des valeurs moyennes comprises entre -3 et 90 mm en Mars et -160 à -190 mm en Juin.

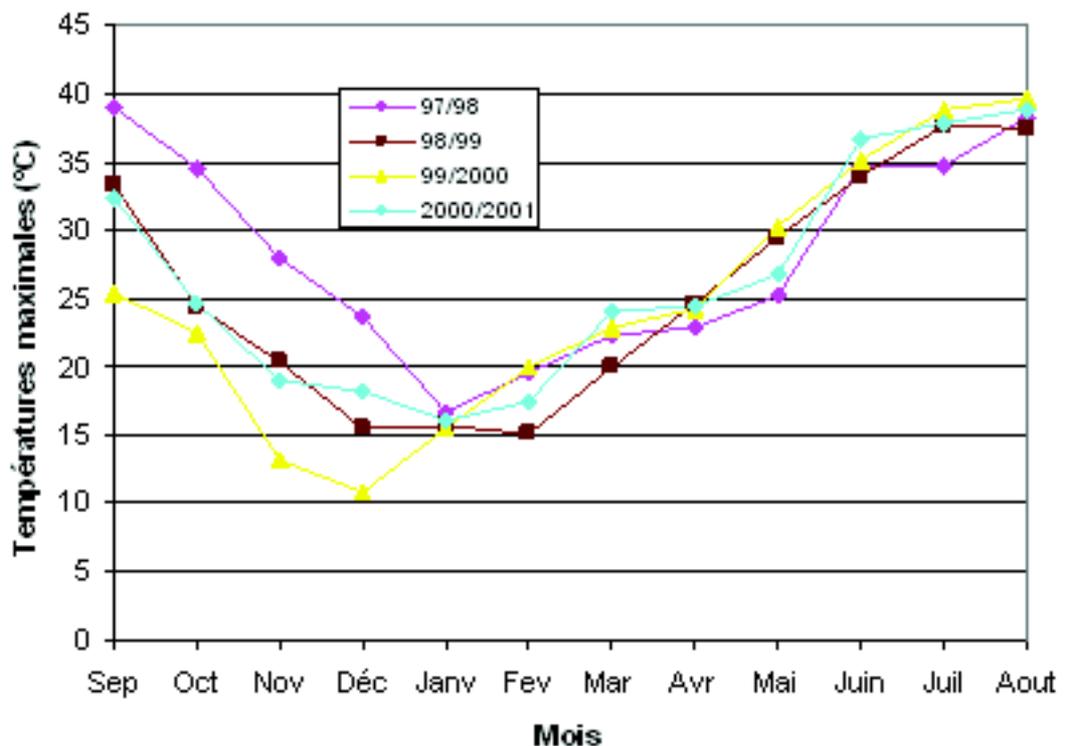


Figure 11 : Températures maximales des quatre années d'étude

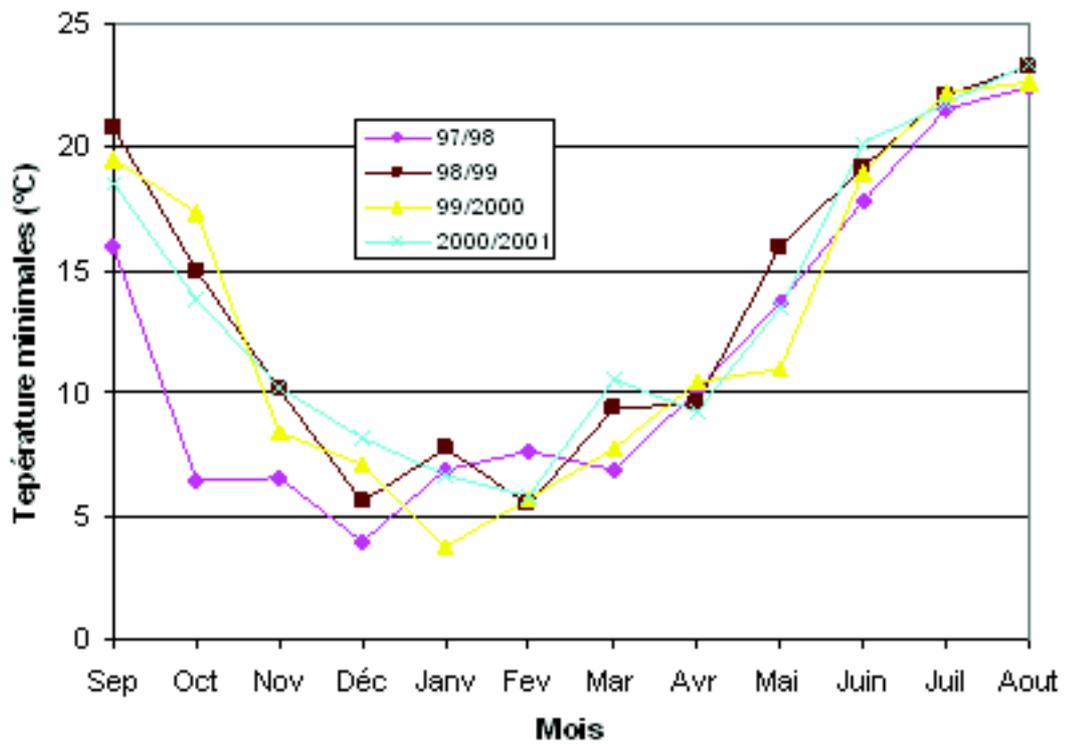


Figure12 : Températures minimales des quatre années d'étude

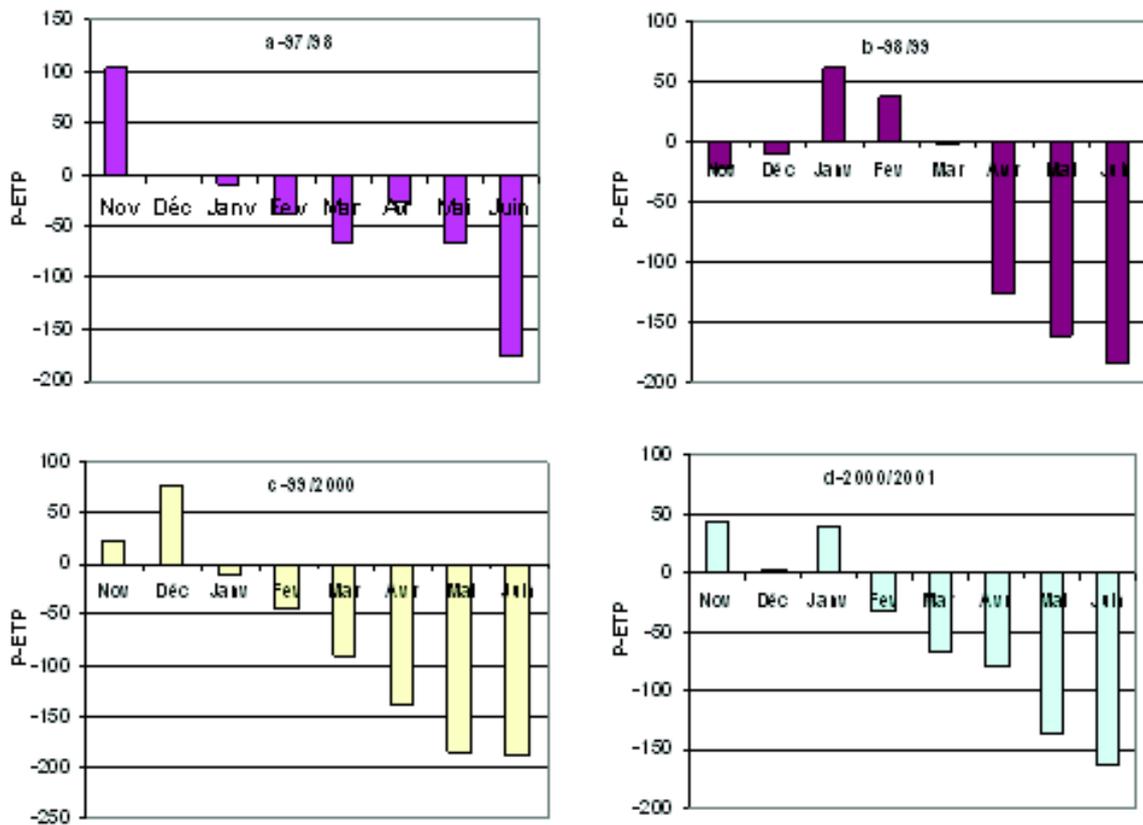


Figure 13 : Déficit climatique a) 97/98, b) 98/99, c) 99/2000, d) 2000/2001

VI -3-4- Vitesse du vent (98-2001)

Rappelons que la vitesse du vent joue un rôle important dans le pouvoir évaporant de l'air et par conséquent sur l'augmentation de l'évapotranspiration.

Contrairement aux autres paramètres climatiques, les valeurs de la vitesse du vent portées sur la figure 14, montrent une variabilité importante de ce paramètre au cours des quatre années d'étude.

Des valeurs minimales de l'ordre de 2 m/s sont enregistrées sur plusieurs périodes du cycle de croissance. Le maximum est enregistré au mois d'Avril avec des valeurs moyennes de 4 m/s durant les campagnes 97/98 et 99/2000.

VI -3-5- Humidité relative (98-2001)

Sur la figure 15 nous remarquons que l'évolution de l'humidité relative au cours des quatre années d'étude est presque similaire.

L'humidité relative est comprise entre 51 et 57% au mois de Septembre avec un maximum compris entre 73 et 83% enregistré au mois de Décembre et un minimum compris entre 33 et 50% enregistré au mois de Juin. Les années humide et sèche sont respectivement 97/98 et 99/2000.

VI -3-6- Durée d'insolation (98-2001):

L'évolution de la durée d'insolation au cours des quatre années d'étude est plus ou moins variable selon les mois.

En effet, l'année 99/2000 accuse une différence de l'ordre de 58% par rapport à la campagne 97/98 au mois de Septembre. Par la suite, la campagne 99/2000 enregistre des valeurs nettement supérieures aux autres campagnes entre la période Janvier-Mars. Le maximum d'insolation a été enregistré au mois de juillet avec une valeur moyenne maximale de 370 heures pour la campagne 97/98 (figure 16).

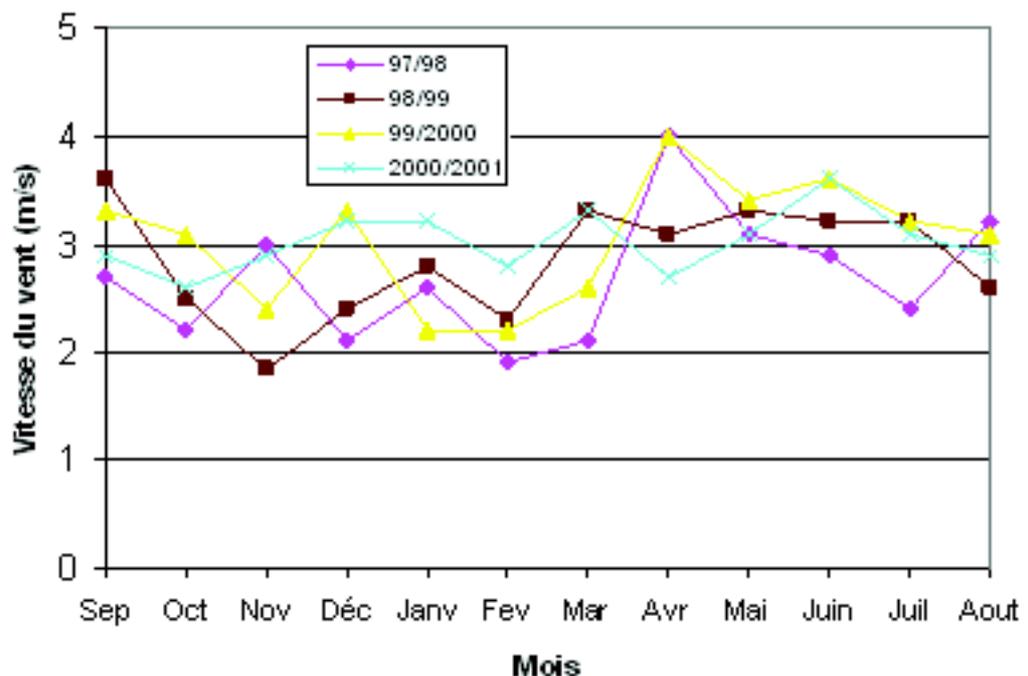


Figure 14 : Vitesse du vent des quatre années d'étude

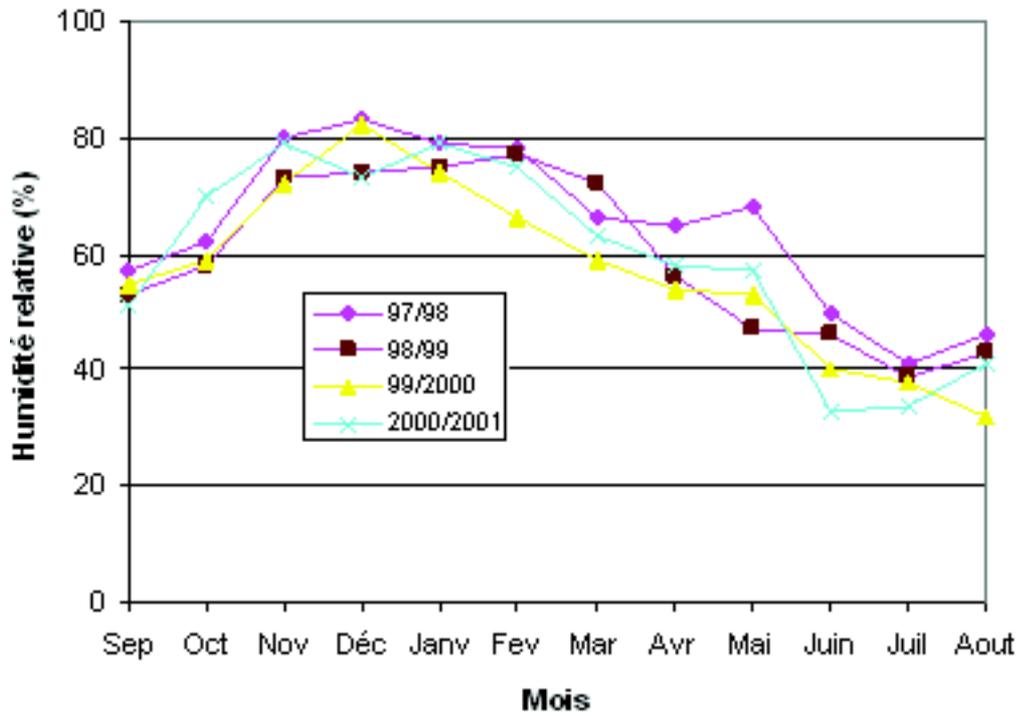


Figure 15 : Humidité relative des quatre années d'étude

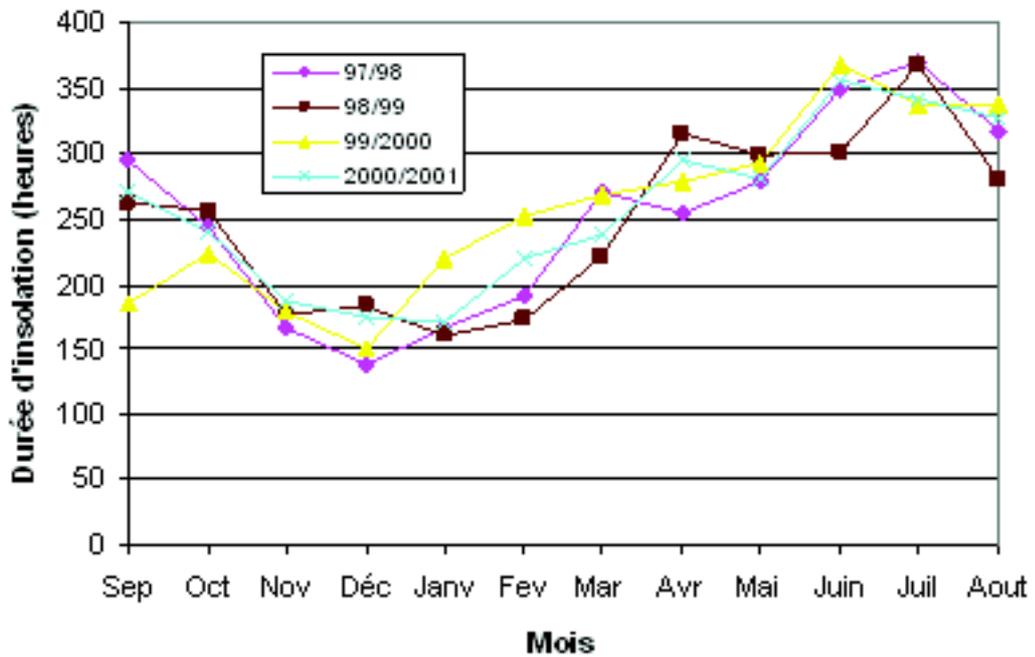


Figure 16 : Durée d'insolation des quatre années d'étude

VI -4- Caractéristiques pédologiques de la région

D'une manière générale, la région du chéiff présente une assez grande homogénéité topographique, à aptitude culturale importante. Les sols de la plaine sont formés par des alluvions récents profonds calcaires à prédominance d'argile.

VI -4-1- Analyse physique

Rappelons que toutes les études du sol (physique et chimique) ont été réalisées dans le cadre de la préparation des mémoires de magistère. La texture du sol a été déterminée par la méthode internationale utilisant la pipette de Robinson basée sur la loi de Stokes et avec décarbonatation de l'eau oxygénée.

Sur le tableau 7, nous avons reporté les valeurs de la texture du sol ainsi que celles de la densité apparente sur un profil de 120 cm de profondeur.

Paramètres	Profondeur du sol (cm)			
	0-20	20-55	55-90	90-120
argile (%)	32.7	35.6	33.1	33.2
Limon fin (%)	10.8	12.3	15.8	15.7
Limon grossier (%)	30.5	25.2	23.2	22.8
Sable fin(%)	16.8	17.7	18.4	18.9
Sable grossier (%)	9.2	9.2	9.5	9.4
Densité apparente (g.cm ⁻³)	1.35	1.36	1.34	1.33
pH	8.5	8.3	8.2	8
HPF _{2.7} (%)	33	32	28	28
HPF _{4.2} (%)	18	19	16	16

Tableau 7 : Caractéristiques physiques du sol (site expérimental Ouled Fares)

En se référant au triangle textural (triangle des textures de l'US conservation soil service), nous pouvons dire que notre sol est de texture limono-argileux.

La densité apparente du sol a été mesurée à l'aide de cylindres ayant un diamètre de 8 cm et une longueur de 5 cm. Les mesures ont été réalisées sur le même profil ayant servi à la mesure de la texture du sol. Nous remarquons une légère diminution de la densité apparente en profondeur qui est due à la fraction de sable présente en profondeur et qui rend le sol plus ou moins poreux, avec une valeur moyenne de l'ordre de 1.34.

VI -4-2- Analyse chimique

L'analyse chimique consiste à mesurer certains paramètres qui nous renseignent sur l'état chimique du sol.

L'analyse du tableau 8 montre que le pH du sol est alcalin, ceci est du probablement à la présence d'une forte teneur en calcaire, de l'ordre de 28.6 % environ.

La couche superficielle du sol est riche en matière organique, avec une nette diminution en profondeur passant de 4.4 % en surface à 1.7 % en profondeur. La richesse relative du premier horizon en matière organique est du vraisemblablement au sol laissé en jachère depuis plusieurs années.

Le rapport C/N est de l'ordre de 12.2 % en moyenne, avec une valeur de 16.9 % en couche superficielle puis une diminution rapide en profondeur jusqu'à atteindre une

valeur moyenne de 8.7 %. Cette diminution explique la bonne décomposition de la matière organique qui se traduit par la présence d'un taux de calcaire important ainsi qu'une assez rapide minéralisation de la matière organique.

Paramètres	Profondeur du sol (cm)			Moyenne
	0-20	20 - 55	55 - 90	
Azote total (%)	0.15	0.11	0.11	0.12
Calcaire total (%)	38.0	25.1	22.5	28.5
Carbone (%)	2.5	1.3	1.0	1.6
M.O (%)	4.6	2.7	1.7	3.0
C/N	16.9	11.0	8.7	12.2
CE (mmhos/cm)	3.8	3.0	1.9	2.9

Tableau 8 : Caractéristiques chimiques (site expérimental ouled Fares)

VI -5- Matériel utilisé

VI -5-1- Matériel végétal

Durant les quatre campagnes de mesure, nous avons utilisé trois variétés de blé dur (*Triticum turgidum* variété Durum), les cultivars utilisées sont waha, vitron et Chen's.

VI -5-1- 1- Variété Waha

C'est une sélection CIMMYT-ICARDA-El Khroub en 1987. Ses caractéristiques la situent parmi les variétés à paille courte et demi-pleine, avec un cycle végétatif précoce, elle est résistante aux maladies telles que la fusariose, la rouille, la septoriose, elle s'adapte mieux aux régions arides et semi-arides.

La période de semis est comprise entre la mi-novembre et la mi-décembre, elle d'une productivité assez bonne et d'une bonne qualité semoulière (IDGC, 1974).

VI -5-1- 2- Variété Vitron

Elle est originaire d'Espagne, caractérisée par une paille haute à moyenne avec un cycle végétatif demi-précoce et un tallage moyen. Elle s'adapte aux régions aride et semi-aride. Elle est moyennement sensible à la rouille et peu sensible à l'helinthosporiose. La période de semis est comprise entre la fin novembre et la mi-décembre, elle est d'une bonne productivité et d'une bonne qualité semoulière.

VI -5-1- 3- Variété Chen's

C'est une sélection CIMMYT-ITGC en 1990. Ses caractéristiques morphologiques et phénologiques sont semblables à la variété Waha (Benbelkacem et Kellou, 2004), elle s'adapte aux zones semi-aride, aride et saharienne. Variété à paille courte avec un cycle végétatif précoce. Elle est résistante aux maladies cryptogamiques et à la verse.

Le semis est compris entre la mi-novembre et la mi-décembre, elle est d'une bonne productivité.

Les cultivars de blé ont été semés à l'aide d'un semoir de précision les 20 novembre 1997, 25 novembre 1998, 22 novembre 1999 et 24 novembre 2000 à une densité de semis de 120 kg/ha correspondant à 300 graines/m² ; dose considérée comme optimale par rapport aux pratiques courantes de la région.

Les résultats obtenus par Hemmat et Taki (2001), montrent que des doses de semis, de 100, 120 et 160 kg.ha⁻¹ ont enregistré des rendements respectifs de l'ordre de 6643, 6971 et 6673 kg.ha⁻¹.

L'espacement entre les lignes est de 20 cm avec une profondeur de semis de 5 cm. Les récoltes ont été réalisées au cours des dates suivantes : 7 juin 1998, 12 juin 1999, 10 juin 2000, et 14 juin 2001.

Une fertilisation constituée d'azote, phosphore et potassium (NPK) a appliquée à des doses respectives de 120, 60 et 60 kg/ha. La fertilisation azotée a été fractionnée. Une dose de 40 kg/ha a été appliquée à la période pré-semis et une autre de 80 kg à la montaison.

VI -5-2- Matériel d'irrigation

Nous avons utilisé un système d'irrigation par aspersion avec une canalisation mobile alimentée par un bassin de 100 m³, sous moyenne pression de service de 3 bars. L'installation est équipée d'un compteur placé à l'amont de la parcelle. Afin d'éviter l'évaporation de l'eau, les irrigations ont été appliquées de nuit à partir du début Mai jusqu'à la maturité des grains. Ce système d'irrigation est parfaitement maîtrisé par les agriculteurs de la région, il est supposé apporter une pluviométrie homogène. L'installation du système d'irrigation dans la parcelle à irriguer a été faite de telle sorte qu'il n'y ait pas de débordement vers les parcelles non irriguées.

VI -5-3- Humidimètre à neutrons

Parmi les méthodes de mesure de la teneur en eau du sol, la méthode d'humidimétrie neutronique est à l'heure actuelle la plus utilisée. L'appareil permet d'obtenir rapidement un grand nombre de mesures d'humidité volumique à l'intérieur d'une sphère d'influence d'environ 30 à 50 cm de diamètre.

Les résultats montrent que la mesure de la variation, du stock d'eau par la sonde à neutrons, paraît globalement satisfaisante. C'est une méthode rapide, non destructive et ayant des points de mesure fixes au cours du temps, ce qui réduit les erreurs d'échantillonnage.

L'inconvénient majeur de la méthode neutronique réside dans les résultats erronés obtenus pour les premières tranches du sol (0 - 20 cm).

Le modèle d'humidimètre à neutrons que nous avons utilisé est la sonde "hydroprobe" modèle 503, Campbell Pacific Nuclear Corp. Campbell CA.

Avant chaque utilisation, nous procédons à un comptage dans l'eau (standard), afin de déterminer le comptage réel par seconde de l'appareil, fonction surtout de la sensibilité de chaque appareil.

VI -5-3-1- Etalonnage préalable

Pour établir une relation liant la teneur en eau volumique du sol H_V au taux de comptage neutronique N , il faut procéder à l'étalonnage de la sonde.

Cet étalonnage est obligatoire et spécifique pour chaque site étudié, la réponse de la sonde étant influencée par la composition chimique et la densité du sol.

VI -5-3-2- Méthodes d'étalonnage préalable

Nous avons utilisé la méthode la plus courante correspondant à une relation linéaire du type :

$$H_V (\%) = a \times N_{\text{Corr}} + b$$

Le but de cet étalonnage est de calculer les coefficients a et b en comparant les comptages N_{Corr} aux valeurs d'humidités mesurées sur des prélèvements.

Dans le second membre, a et b sont des constantes liées au sol étudié.

N_{Corr} est le comptage neutronique corrigé du point de vue eau.

$$N_{\text{Corr}} = (N_s/N_w) \times 100$$

N_s : Taux de comptage dans le sol

N_w : Taux de comptage dans le milieu de référence (eau).

L'avantage d'utiliser ce $N_{\text{Corrigé}}$ est dans le but d'éliminer les erreurs dues aux dérives du système et faciliter le changement d'instruments.

Quant à l'humidité volumique H_V elle est obtenue par relation suivante :

$$H_V (\%) = H_p \times M_{V_S}/M_{V_W}$$

M_{V_S} est la masse volumique du sol sec. Ne disposant pas de sonde gammamétrique, cette valeur a été déterminée par prélèvement, dans une fosse d'échantillons non remaniés avec des cylindres de 250 cm^3 .

M_{V_W} est la masse volumique de l'eau à la température considérée (1 g/cm^3).

VI -5-3-3- Résultats de l'étalonnage préalable

Nous avons utilisé les résultats de l'étalonnage, effectués dans le cadre d'un travail de magistère, réalisé en 1996 (figure 18)

Afin d'écarter toute erreur éventuelle émanant de la variabilité spatiale du terrain, nous avons procédé à l'étalonnage de l'appareil sur plusieurs tranches de sol et à des endroits aléatoires de la parcelle d'étude.

Un tube d'accès à la sonde à neutrons a été installé dans chacune des 36 parcelles élémentaires, au début de la première campagne. Le suivi a été fait chaque semaine à un pas de 20 cm jusqu'à une profondeur de 170 cm.

VI-6- Méthodes utilisées

VI-6-1- Traitements utilisés et évaluation des doses d'irrigation

Le dispositif expérimental adopté durant les quatre années d'étude est représenté sur la figure 17. Les traitements utilisés sont:

NI : Traitement non irrigué (régime pluvial)

EI : Irrigations précoces, de la levée jusqu'à épiaison.

LI : Irrigations tardives, de l'épiaison à la maturité physiologique.

FI : Irrigation permanente, de la levée à la maturité physiologique.

Afin d'assurer une levée uniforme, une dose d'irrigation de 30 mm a été donnée à tous les traitements, y compris NI, juste après le semis.

VI -6-2- Evaluation de la réserve en eau du sol

L'irrigation est déclenchée quand les 2/3 de la réserve en eau du sol (ASWC) sur la tranche 0-45 cm est épuisée car la plupart de l'extraction de l'eau du sol se produit dans cette tranche de sol. Les irrigations sont fractionnées en deux ou trois tranches afin d'éviter qu'une pluie inopinée survienne et sature le sol.

L'évaluation des quantités d'eau à apporter aux différents traitements est basée sur la réserve en eau du sol. Cette dernière est calculée en suivant l'état hydrique du sol. L'irrigation est déclenchée quand il y a épuisement de 2/3 de la réserve du sol. Cette dernière est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$RU = p \times Da (H_{cc} - H_{pF_{4.2}}).$$

$$RFU = 2/3 RU .$$

Dans notre cas la profondeur d'enracinement adoptée est 45 cm = 4.5 dm.

$$RFU = 52 \text{ mm}.$$

La programmation des irrigations, résultant de cette décision, est résumée dans le tableau 9.

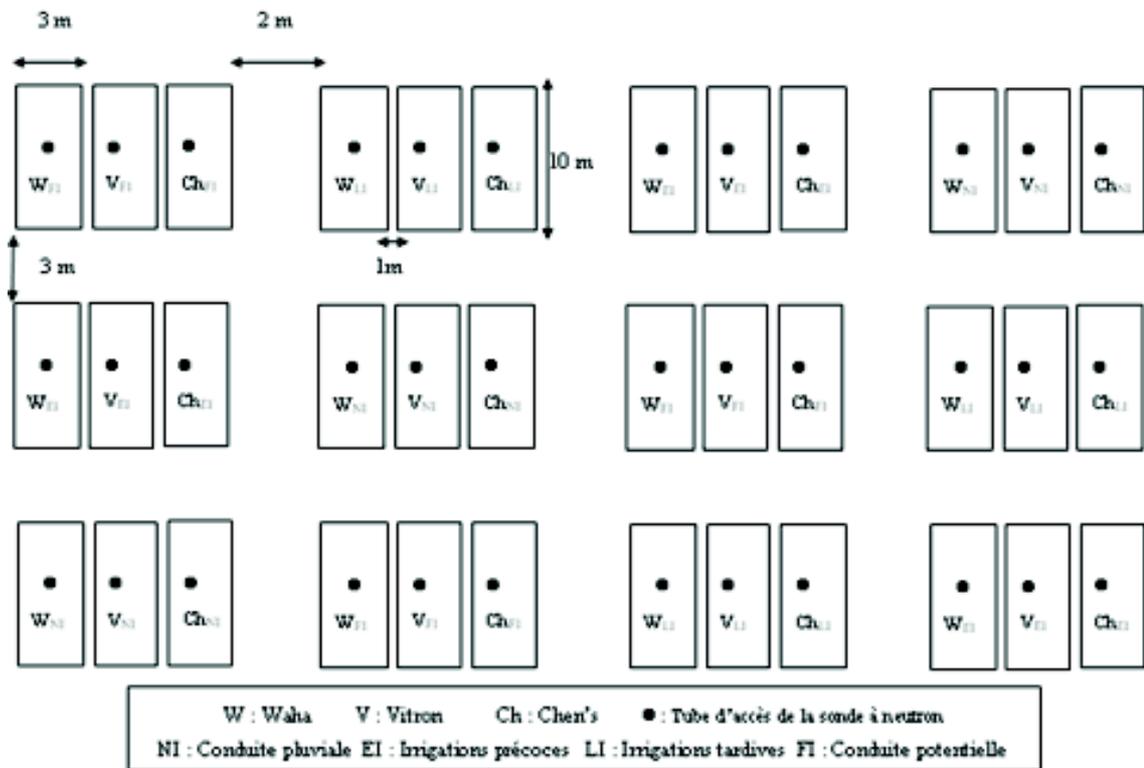


Figure 17 : Dispositif expérimental adopté durant les quatre années d'étude (98-2001)

Années	Quantité totale (mm)			Irrigation en début de cycle (Pré-épiaison)	Irrigation en fin de cycle (Post-épiaison)
	EI	LI	FI		
1998	104	136	240	04/01(32) 08/02(20) 20/03(52)	10/04(32) 30/04(20) 13/05(52) 23/05(32)
1999	72	156	228	01/12(32) 28/12(20) 15/02(20)	01/04(32) 15/04(20) 25/04(20) 30/04(32) 15/05(32) 23/05(20)
2000	154	168	322	03/01(32) 30/01(20) 18/02(52) 28/02(20) 20/03(30)	02/04(32) 12/04(20) 24/04(32) 06/05(52) 18/05(32)
2001	188	104	292	03/12(20) 27/12(32) 01/02(52) 20/02(52) 10/03(32)	09/04(32) 30/04(20) 10/05(32) 25/05(20)

Tableau 9 : Quantité d'eau appliquée (mm) et programme d'irrigation au cours des quatre saisons de croissance

VI -6-3- Estimation de l'évapotranspiration

VI -6-3-1- Evapotranspiration de la culture (ET)

L'évapotranspiration saisonnière de la culture (ET) est déterminée à l'aide de l'équation du bilan hydrique :

$$ET = P + I \pm R - D \pm \Delta s$$

Dans laquelle :

P : Précipitations (mm) de la saison de croissance.

I : Irrigations (mm)

R : Ruissellement (mm)

D : Drainage (mm)

Δs : Variation du stock d'eau dans le sol.

Le ruissellement et le drainage sont négligés tout au long de cette étude.

Par ailleurs, il faut noter que dans les éléments du bilan hydrique, souvent le flux d'eau en deçà de la zone racinaire est négligé dans la plupart des calculs sur l'évaluation de l'évapotranspiration car difficile à mesurer et ne contribue pas à l'alimentation de la plante, on le désigne souvent par le terme drainage. L'estimation du drainage sous la zone racinaire est une opération délicate nécessitant la mise en place de tensiomètres, pour connaître les gradients de charge.

VI -6-3-2- Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle ou évapotranspiration de référence utilisée dans cette étude repose sur la mesure de l'évaporation bac Class "A".

Le bac Class "A", a été installé, protégé à l'aide d'un grillage et entretenu régulièrement afin d'éviter des erreurs de mesure d'évaporation.

Selon l'emplacement du bac, la méthode de l'évaporation en bac peut être mise en second rang (Stanhill ,2002), après celle de Penman, pour des mesures décadaires des besoins d'irrigation, encore que cette méthode soit peut être meilleure quand le bac d'évaporation jouit d'un excellent emplacement, d'un entretien régulier et que les vents sont faibles (Doorenbos et Pruitt, 1997).

D'ailleurs une bonne corrélation a été obtenue, en Australie dans des conditions semi-arides, entre l'évaporation bac class A et l'ETP Penman-Monteith (Dodds et al.,2005). Sur trois années de mesures, Meyer et al. (1999) ont obtenu la relation suivante :

$$ET_0 = 0.72 (\pm 1.03) + 0.83 (\pm 0.01) E_{\text{bac}} \quad n = 1081, R^2 = 0.89$$

La relation simplifiée est du type :

$$ET_0 = 0.93 E_{\text{bac}} \text{ "A"}$$

Dans notre cas $ET_0 = E_{\text{bac}} \cdot K_b$

E_{bac} : Evaporation du bac (mm) mesurée quotidiennement.

K_b : Coefficient du bac, compris entre 0.85 et 0.90 selon les conditions météorologique de la période de mesure.

VI -7- Qualité de l'eau d'irrigation

L'eau d'irrigation provient d'un forage appartenant la station CCLS. L'eau est pompée vers un réservoir de 100 m³ situé à une hauteur de 32 m par rapport à la parcelle expérimentale. Selon les résultats d'analyse faite au laboratoire de l'ANRH, la qualité de l'eau d'irrigation est caractérisée par un SAR (Sodium Adsorption Ratio) de 2.55 et une CE (conductivité électrique) de 1.22 ds.m⁻¹.

Selon Bauder et al. (2006), cette eau peut être utilisée pour l'irrigation sans aucun risque de stress salin.

VI -8- Mesures effectuées sur la plante

A chaque mesure, dix plants sont prélevés d'une manière aléatoire à partir d'une surface de 1 m²

Le suivi de la plante s a été fait du 20^e jour après semis jusqu'au 180^e jour après semis. Ceci concerne surtout les mesures de biomasse et de l'indice de surface foliaire (LAI). Ce dernier est mesuré à l'aide d'un planimètre de modèle "Placom Digital Planimeter KP-90N" sur les 36 parcelles élémentaires.

L'indice de récolte, la biomasse et le rendement sont mesurés à partir d'un échantillon de 1 m² prélevés du centre d'une parcelle élémentaire de 30 m².

Les échantillons sont séchés à l'aide d'une étuve à 75°C pendant 48 h, puis pesés et ajustés à 14% d'humidité pour évaluer le rendement en grains.

Les efficacités de l'eau ; matière sèche (EUE_{MS}) et grains (EUE_{GR}) sont calculées en divisant les rendements (matière sèche, grains) par l'évapotranspiration (ET).

Les coefficients culturaux, pour chaque année et chaque variété, ont été calculés mensuellement par la relation.

$$Kc = ET/ET0.$$

VI -9- Calcul statistique

L'analyse de la variance a été calculée pour toutes les données au cours des quatre campagnes d'étude en utilisant Statistix 7.0 software (Analytical Software, Tallahassee, FL, USA).

Les niveaux de signification des traitements d'irrigation, de l'interaction traitement x année et traitement x variété sont déterminés à un niveau de probabilité de 0.05 et les moyennes ont été comparées entre elles par le test de LSD (Least significant difference) pour un niveau de signification $P < 0.05$.

Chapitre VII : Résultats et discussions

VII-1- Variation globale des rendements

VII-1-1- Effets du cultivar, de la stratégie d'irrigation et de l'année sur les rendements

Les principaux effets du cultivar de blé, de la saison de croissance et de la stratégie d'irrigation sur les rendements en grains sont comparés sur la figure 19. Des effets significatifs à $P < 0.05$ ont été observés pour chacun des 3 facteurs. Les valeurs moyennes de rendement en grains varient entre 3500 kg.ha^{-1} en 1998 à 2200 kg.ha^{-1} en 2000. Le potentiel de production des 3 cultivars s'est exprimé au cours de l'année 1998 avec des rendements de l'ordre 3757 , 3672 et 3035 kg.ha^{-1} respectivement pour Vitron, Waha et Chen's. Les précipitations enregistrées au cours des quatre saisons de croissance (de Novembre à Juin) présentent des quantités et des distributions contrastées ayant engendrées une variation dans les rendements de l'ordre de 96 %. Les faibles rendements qu'a connu la campagne 99/2000 sont en partie associés aux faibles quantités de précipitations ainsi qu'à leur distribution à l'intérieur du cycle de croissance dans lequel, il a été enregistré 38 mm seulement sur une période de six mois (Janvier-Juin). Les stratégies d'irrigation adoptées ont permis des augmentations de rendements, par rapport à la conduite pluviale, de l'ordre de 270, 107 et 67% respectivement pour FI (conduite en potentiel), EI (irrigation précoce) et LI (irrigation tardive). Parmi ces variétés, il apparaît que la variété Vitron est la plus productive avec une moyenne de 2950 kg.ha^{-1} , suivie de Waha avec une moyenne de 2825 kg.ha^{-1} et enfin Chen's avec une moyenne de 2430 kg.ha^{-1} .

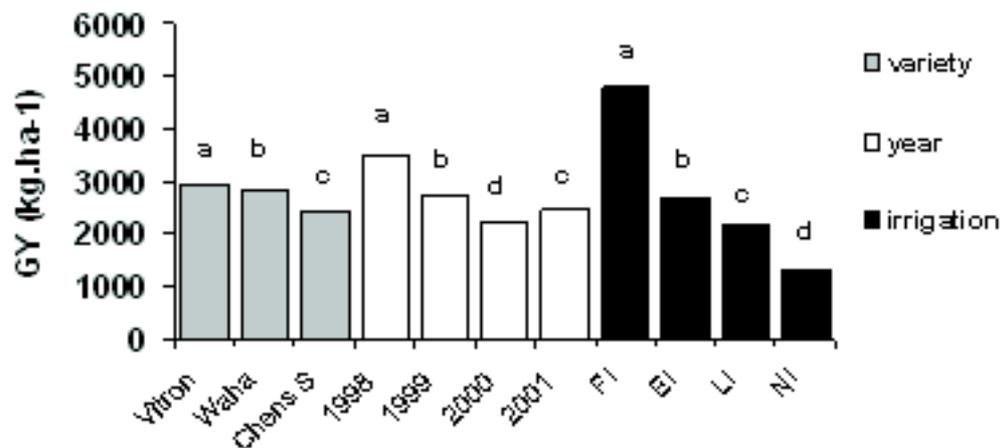


Figure 19 : Effets moyens du cultivar, de l'année et de la stratégie d'irrigation sur le rendement en grains

VII-1-2-Effet de l'interaction stratégie d'irrigation-cultivars sur les rendements

L'interaction Irrigation x Cultivar est significative à $P < 0.001$ en 1998, 1999 et 2001 et à $P < 0.05$ en 2000. Sous irrigation, la variété Vitron a enregistré sensiblement les plus hauts rendements par rapport aux deux autres dans 8 des 12 situations irriguées.

Par contre, en conditions pluviales, la variété Waha est toujours plus productive, avec un rendement supplémentaire de 18-42 kg.ha⁻¹ respectivement par rapport à Vitron et à Chen's. Les stratégies d'irrigation en condition de déficit hydrique (EI et LI) n'ont eu aucun effet significatif à $P < 0.001$ en 1999 et à $P < 0.05$ en 2000 sur le cultivar Chen's (Tableau 10)

VII-1-3-Variabilité annuelle des rendements

VII-1-3-1-Année 1998 : L'année "record" des rendements

La plus grande performance variétale a été réalisée en 1998 sous irrigation permanente (FI) ou les rendements potentiels ont atteint des valeurs moyennes de l'ordre de 7500 kg.ha⁻¹, 6250 kg.ha⁻¹ et 5419 kg.ha⁻¹ respectivement pour Vitron, Waha et Chen's. Il en est de même pour les irrigations précoces ou l'effet variétal est significatif à $P < 0.001$. Sur les quatre stratégies d'irrigation utilisées en 1998, le cultivar Waha a enregistré les meilleures performances 9 situations sur 12. Cet ordre étant le cas le plus fréquent ou nous remarquons que les rendements occasionnés par les irrigations précoces sont significativement supérieurs à ceux produits par les irrigations tardives.

Enfin, la condition pluviale (NI) de l'année 1998 représente la meilleure situation en terme de rendement par rapport aux autres années avec un rendement moyen de l'ordre de 2102 Kg.ha⁻¹. Ce meilleur résultat enregistré en 1998 est attribué à trois composantes relatives à la disponibilité en eau pour la plante ; en l'occurrence un stock d'eau du sol plus élevé après jachère, un modèle idéal de précipitation et enfin une plus grande quantité de précipitation annuelle enregistrée au cours de cette campagne.

La comparaison des stratégies d'irrigation en fonction des cultivars n'a pas de grandes conséquences sur les différences dans le classement des rendements. En effet, dans la plupart des cas, l'ordre suivant a été obtenu :

$$FI > EI > LI > NI.$$

VII-1-3-2-Les années 1999 et 2001: Des performances de rendements acceptables

L'examen du tableau 10, montre que les différences de rendement en grains entre les irrigations précoces et les irrigations tardives ne sont pas significativement différentes pour les cultivars Vitron et Chen's en 1999 et Chen's en 2000, alors que pour la variété Waha, en 1999, le rendement en grains enregistré, en irrigation tardive, est plus important par rapport à l'irrigation précoce avec une différence de rendement de 231 Kg.ha⁻¹.

Les gains de rendements occasionnés par les irrigations potentielles par rapport aux conditions pluviales sont comprises entre 2915 (en 2001) et 3963 Kg.ha⁻¹ (en 199) avec des gains maximum très acceptables de l'ordre de 5259 Kg.ha⁻¹ enregistrés par le cultivar

Vitron en 1999. Ce dernier cultivar, faut-il le rappeler enregistre les meilleures performances en condition potentielles et les plus faibles performances (relativement par rapport à Waha) en conditions pluviales.

	Années											
	1998			1999			2000			2001		
Irrigation	V	W	C	V	W	C	V	W	C	V	W	C
FI	7502 a	6247 b	5419 c	6347 a	5130 b	4057 c	3863 a	3268 b	3283 b	4143 b	4373 a	3895 c
EI	3577 e	3916 d	3351 f	2568 d	2189 f	2106 g	2697 c	2509 d	1967 f	2484 d	2348 ef	2438 de
LI	2208 h	2423 g	1797 i	2607 d	2420 e	2043 g	2123 e	2173 e	1942 f	2250 f	2037 g	1958 g
NI	1741 i	2102 h	1573 j	1088 i	1511 h	1047 i	917 h	1094 g	797 h	1059 j	1420 h	1187 i
Variété x Irrigation		***			***			*			***	

Tableau 10 : Analyse de l'interaction variété x traitement d'irrigation sur le rendement en grains ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) pour les 4 saisons de croissance

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significatives à $P < 0.05$.

VII-1-3-3-L'épisode de sécheresse de l'année 2000 et ses conséquences sur les rendements

Comme nous l'avons vu au chapitre VI, relatif aux caractéristiques climatiques des quatre saisons de croissance, la campagne 2000 a été caractérisée par une sécheresse tout au long de la saison de croissance. Avec des précipitations pratiquement nulles en Février et un cumul de précipitation presque insignifiant ; de l'ordre de 39 mm sur la période s'étalant du mois de Janvier au mois de Juin. Cette situation climatique a constitué un frein à l'expression des potentialités de production des trois cultivars de blé. Ainsi, un rendement moyen de l'ordre de $9.4 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ a été enregistré en conditions pluviales avec un minimum de l'ordre de $797 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ enregistré par le cultivar Chen's. Il est à noter, qu'au cours de cette campagne d'étude, les différences de rendements obtenues entre les cultivars, ne sont pas significatives entre, d'une part, Vitron et Waha en condition de déficit hydrique (LI) et d'autre part Waha et chen's en condition d'alimentation en eau satisfaisante (FI). En condition de déficit hydrique sévère, aucune différence significative à $P < 0.001$ n'a été enregistré entre Vitron et Chen's.

VII-2-Modèle de formation de rendement

Pour les céréales, le rendement en grains est souvent décomposé en 3 composantes dans des conditions d'alimentation en eau limitées : Evapotranspiration (ET), efficacité d'utilisation de l'eau pour la biomasse totale aérienne (EUE_{MS}) et l'indice de récolte (IR).

Quand nous réussissons à dissocier et à décomposer l'évapotranspiration (ET) entre l'évaporation (E) et la transpiration (T), les composantes correspondantes sont la transpiration (T), l'efficacité de transpiration (ET_r) et l'indice de récolte (IR) (Passioura, 1977).

Dans notre étude, cette partition n'a pas été possible compte tenu de la difficulté de dissocier l'évaporation de la transpiration et par conséquent le modèle de formation de rendement suivant a été adopté dans notre étude.

$$GY = ET \times EUE_{MS} \times IR.$$

Dans lequel :

GY : Rendement en grains ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

ET : Evapotranspiration (mm)

EUE_{MS} : Efficacité de l'eau pour la matière sèche ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)

IR : Indice de récolte.

VII-2-1-Variation du rendement en fonction de l'évapotranspiration

Comme il a été mentionné plus haut, la variété Vitron s'est montrée plus productive par rapport aux autres variétés avec un rendement moyen, sur les années d'études et pour toutes stratégies d'irrigation confondues, de l'ordre de $2950 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ avec un minimum de rendement de $2400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ enregistré au cours de la campagne 1999/2000.

D'une manière générale, le rendement en grains augmente exponentiellement avec l'évapotranspiration (ET) mesurée de la levée à la maturité ($R^2 = 0.74$) (figure 20).

Les trois cultivars présentent la même évolution (R^2 compris entre 0.62 et 0.81) pour des évapotranspirations comprises entre 200 et 300 mm. Cependant, La variété Waha se démarque des deux autres variétés pour des consommations en eau supérieures à 300 mm alors que Chen's et Vitron évoluent d'une manière presque similaire (figure 21).

L'évolution des rendements en grains, selon les cultivars, les stratégies d'irrigation et les périodes de croissance, est représentée sur les figures 22, 23 et 24.

En définitive, il apparaît clairement que le cultivar Vitron a enregistré les meilleures performances en condition potentielle (FI) au cours de la campagne 1997/1998. Les plus faibles rendements ont été enregistrés par le cultivar Chen's en condition pluviale (NI) au cours de la campagne 1999/2000.

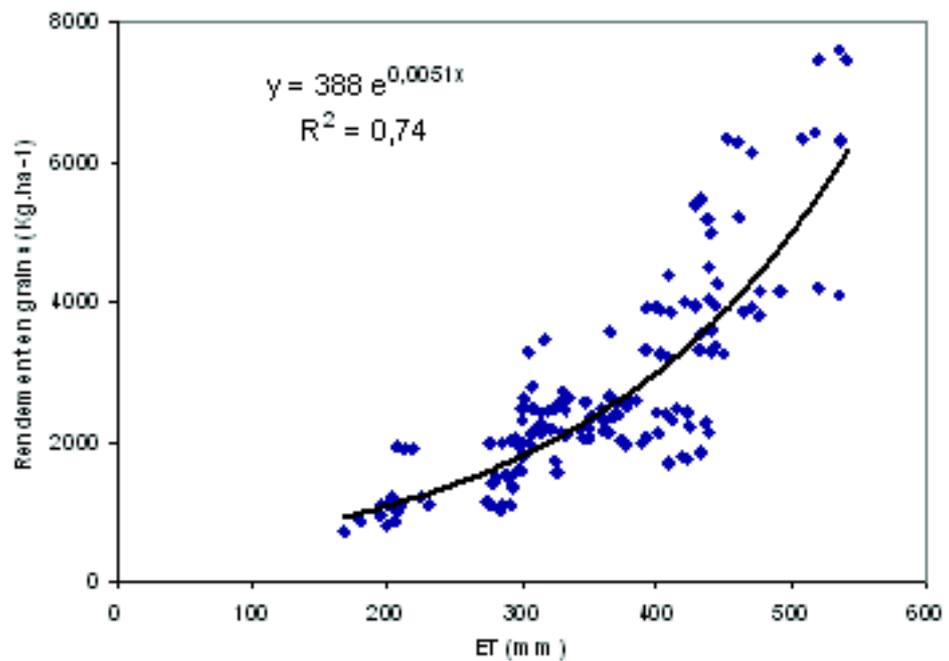


Figure 20 : Evolution globale du rendement en grains en fonction de l'évapotranspiration saisonnière

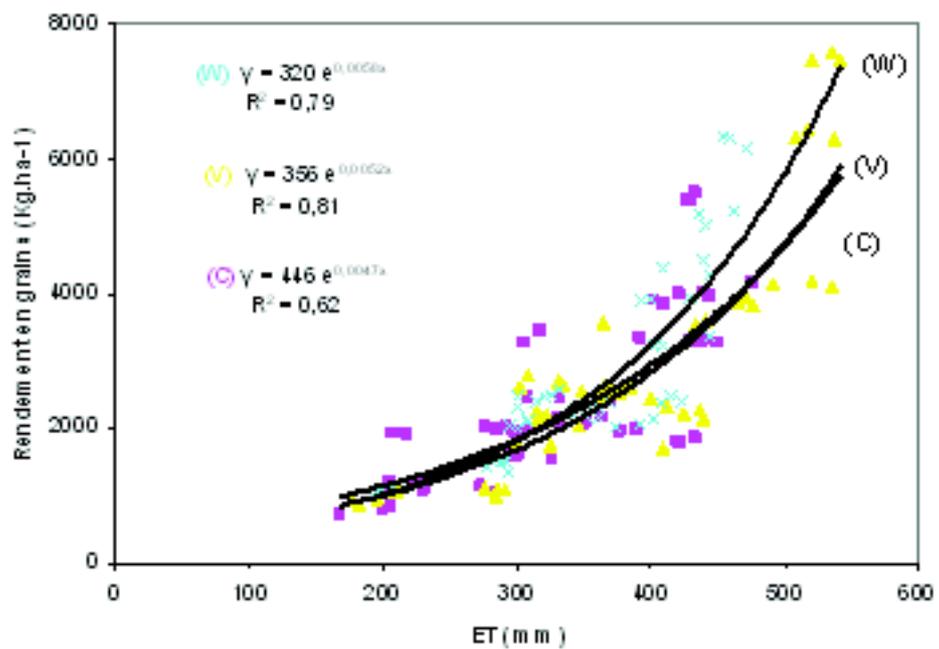


Figure 21 : Evolution variétale du rendement en grains en fonction de l'évapotranspiration saisonnière

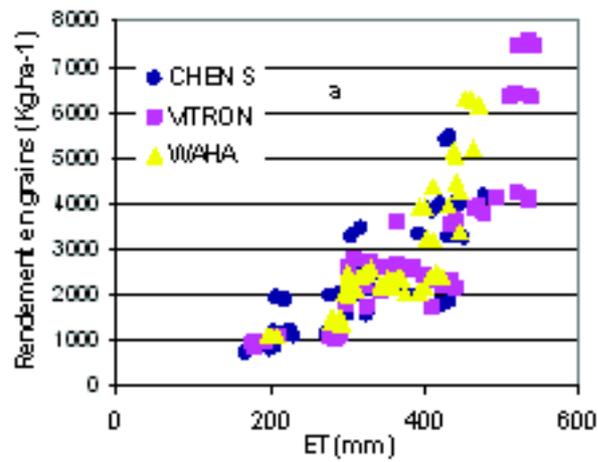


Figure 22 : Variabilité des rendements selon les cultivars

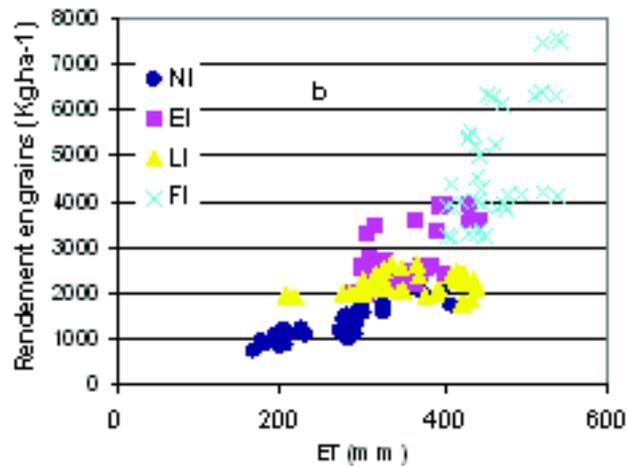


Figure 23 : Variabilité des rendements selon les stratégies d'irrigation

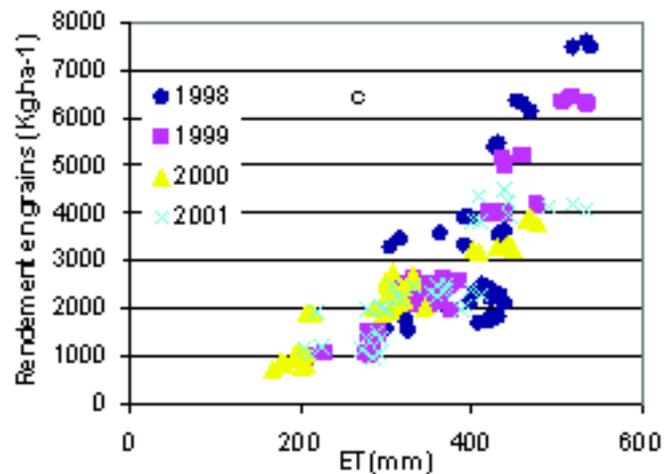


Figure 24 : Variabilité annuelle des rendements en grains

VII-2-2-Variation du rendement en fonction de l'indice de récolte

D'une manière générale, le rendement en grains des trois cultivars de blé, a augmenté exponentiellement avec l'indice de récolte ($R^2 = 0.87$, $P < 0.001$), au cours des quatre saisons de croissance. L'indice de récolte varie de 0.21 en condition pluviale pour Chen's en 2000 à 0.46 en condition potentielle pour Vitron en 1998 (figure 25).

Sous une gestion pluviale, l'indice de récolte n'a pas excédé 0.35 tandis que sous les conditions d'alimentation en eau satisfaisantes, cet indice dépasse toujours 0.40 et dans toutes les situations. En condition pluviale, les meilleures performances ont été réalisées par la variété Waha, dans laquelle l'effet variété est très significatif. La valeur maximale est de l'ordre de 0.34 réalisée en 1998. Par contre en régime potentiel, c'est plutôt Vitron qui enregistre les meilleures performances par rapport à Waha et Chen's avec des valeurs moyennes respectives de 0.44, 0.43 et 0.41.

Les relations obtenues, entre le rendement en grains et l'indice de récolte au cours des 4 saisons de croissance et pour les différentes stratégies d'irrigation, sont de la forme exponentielle avec des coefficients de détermination compris entre 0.81 (irrigations précoces) et 0.90 (irrigations tardives) à $P < 0.001$ (figures 26a,b,c,d).

Sur le plan variétal, les meilleures performances, en termes de rendements et d'efficacités, obtenues par Vitron en condition potentielle s'expliquent du maximum, d'utilisation de l'eau, réalisé par cette variété ainsi que de son indice de récolte.

VII-2-2-1-Indice de récolte en relation avec la consommation en eau:

Les relations obtenues entre la consommation en eau, des trois cultivars de blé, et l'indice de récolte (figures 27a,b,c) sont de forme linéaires (R^2 compris entre 0.6 pour Chen's et 0.78 pour Vitron).

En conditions d'irrigation déficitaire (EI et LI), les variétés Vitron et Waha ont des valeurs similaires d'indice de récolte.

En termes d'accroissement d'indice de récolte, les régimes d'irrigation potentiel, irrigation précoce et irrigation tardive ont permis des augmentations respectives de l'ordre de 48, 23 et 10% par rapport au régime pluvial.

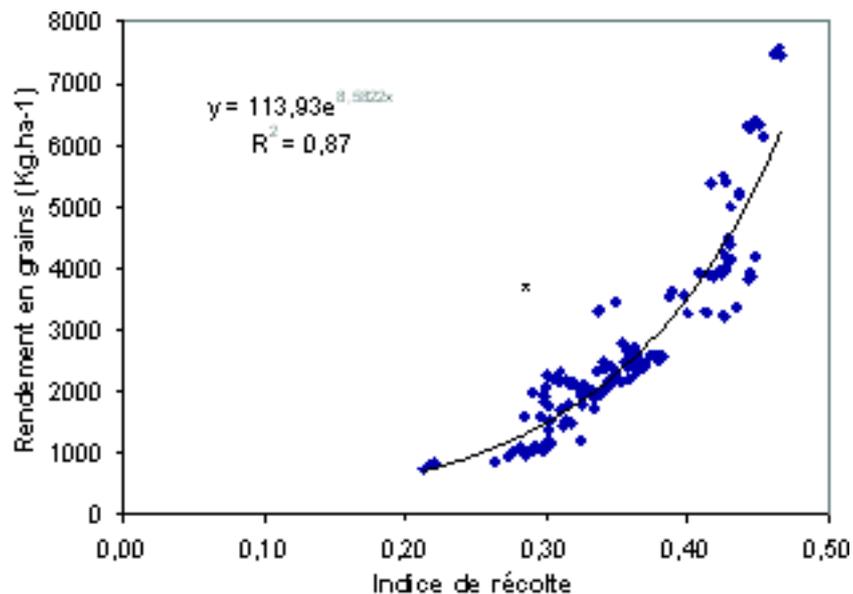


Figure 25 : Evolution du rendement en grains en fonction de l'indice de récolte

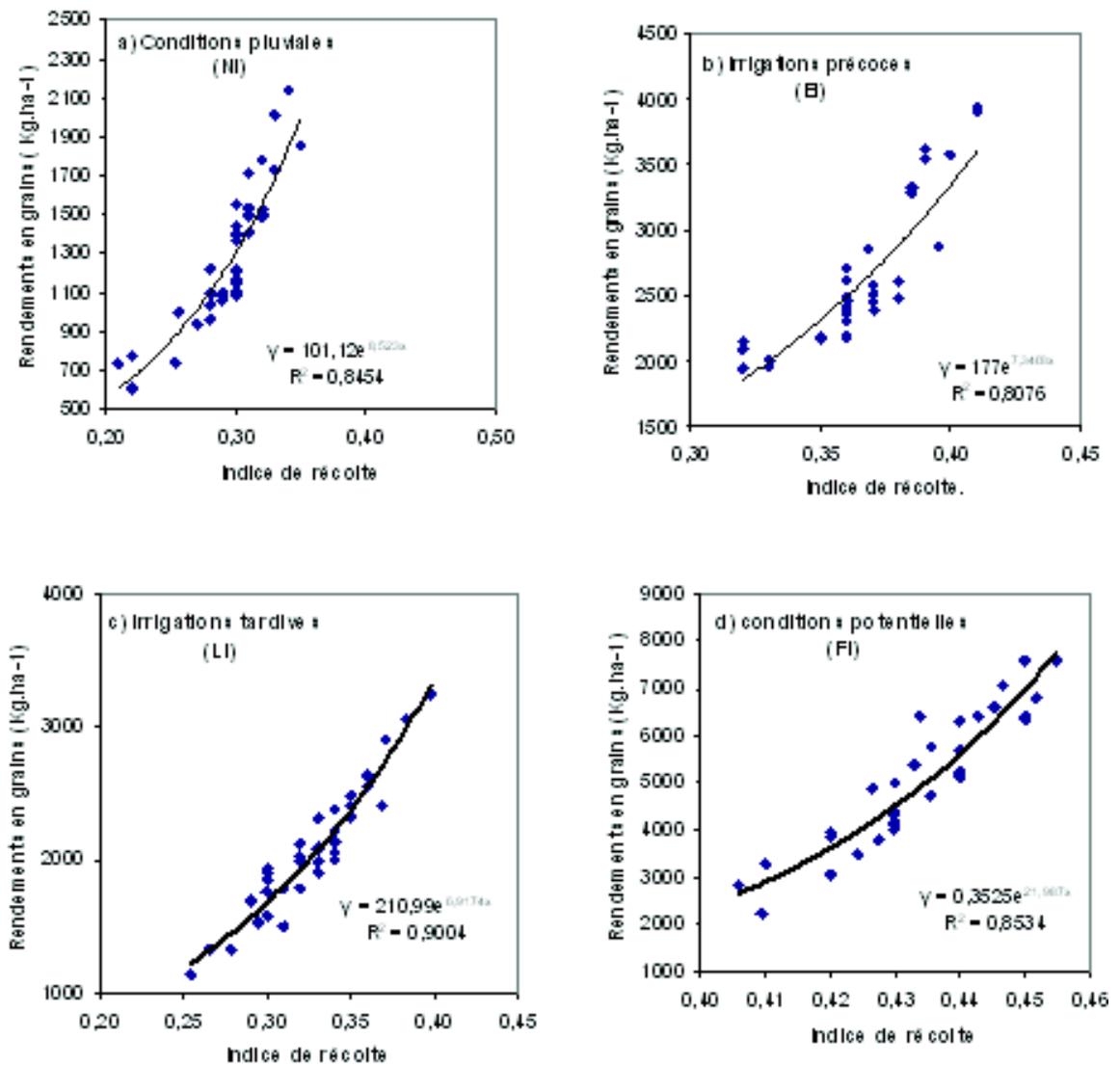


Figure 26 : Relation indice de récolte et rendements en grains

conditions pluviales, b) Irrigations précoces, c) Irrigation tardives, d) conditions potentielles.

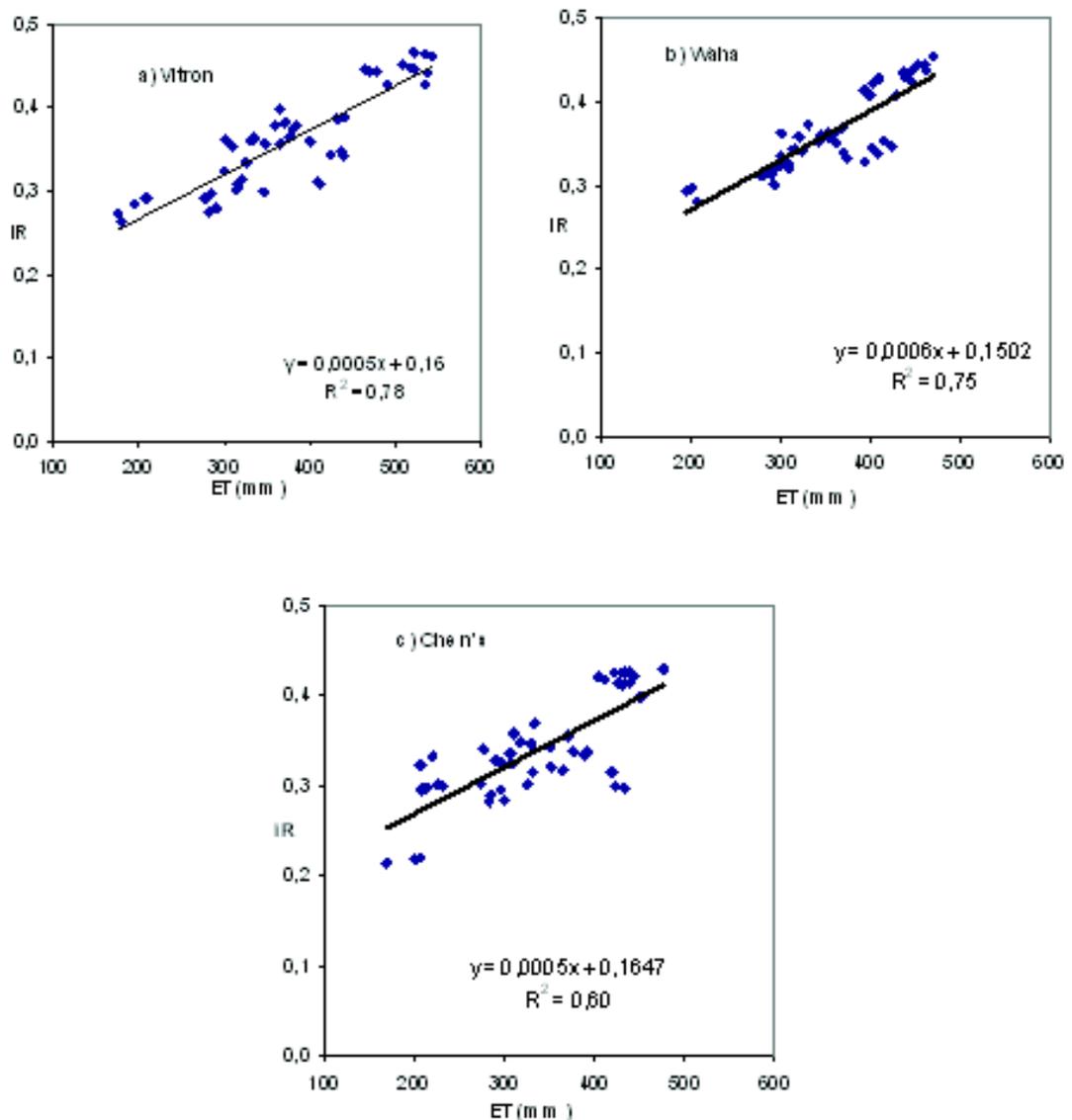


Figure 27 : Relation entre l'évapotranspiration saisonnière et l'indice de récolte
a) vitron, b) waha, c) chen's.

Conclusion

En condition d'irrigation déficitaire (EI, LI), les variétés Vitron et Waha ont des valeurs similaires d'évapotranspiration (ET), d'indice de récolte (IR).

En conditions pluviales, la variété Waha constitue le meilleur cultivar en raison de ses valeurs significatives d'évapotranspiration (ET) et d'indice de récolte (IR).

Selon la stratégie d'irrigation, la variété Vitron a utilisé 18 mm en conditions pluviales (NI), 38 mm en irrigation tardive (LI), 40 mm en irrigation précoce (EI) et 77 mm en conditions potentielles (FI) et par conséquent plus d'eau que la variété Chen's. Ce cultivar était toujours moins consommateur d'eau et par conséquent ayant la plus faible valeur d'indice de récolte. Cependant, l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE_{MS}) est généralement plus importante et plus stable entre traitements d'irrigation pour la variété Chen's.

L'épuisement de l'eau du sol est maximal en condition pluviale. Par contre, en irrigation permanente, il a été enregistré un stock d'eau de l'ordre de 53 mm à la récolte.

Parmi ces cultivars, Chen's était moins efficace en extrayant l'eau à partir du sol, Vitron étant le plus puissant (+ 25 mm).

VII-2-3-Efficience d'utilisation de l'eau (EUE)

L'efficience de l'utilisation de l'eau est définie comme étant le rapport entre le rendement en grains ou en matière sèche et la quantité d'eau utilisée sur le cycle de croissance. La quantité d'eau appliquée est le total des apports représentés par les précipitations, l'irrigation et la variation de la teneur en eau du sol.

VII-2-3-1-Efficience de l'eau pour la matière sèche (EUE_{MS})

Les valeurs moyennes, des efficacités de l'eau, relatives aux matières sèches (EUE_{MS}) sont résumées dans le tableau 11.

Au cours des 4 saisons de croissance, EUE_{MS} est comprise entre 14.3-19.2 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ pour les traitements conduits en régime pluvial et 18.2-30.4 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ pour les traitements conduits en condition potentielle en fonction du régime hydrique et du cultivar avec un maximum de 30.4 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ pour vitron en 1998.

En terme de stratégies d'irrigation, des différences significatives ont été observées entre d'une part la variété waha et d'autre part les variétés vitron et chen's en condition potentielle, alors qu'en irrigation déficitaire, (EI, LI), ainsi qu'en régime pluvial, aucun effet significatif à P < 0.001 n'est observé entre les 3 variétés. En d'autre terme, l'efficience de l'eau pour la matière sèche est similaire pour les 3 cultivars.

Notons enfin, qu'en moyenne, sur les 4 années d'étude, les irrigations précoces ont enregistré les meilleures performances en matière d'efficience pour la matière sèche pour les 3 variétés avec une différence moyenne de 11% par rapport aux irrigations tardives. Les irrigations permanentes ont permis un gain d'efficience de l'ordre de 44% par rapport au régime pluvial, alors que les irrigations précoces ont augmenté l'efficience de l'eau de 27% par rapport au régime pluvial.

Irrigation	Années											
	1998			1999			2000			2001		
	V	W	C	V	W	C	V	W	C	V	W	C
FI	30.4 a	30.3 a	29.8 b	27.3 a	26.4 b	21.3 c	18.5 a	18.3 a	18.2 a	18.5 b	23.8 a	22.1 a
EI	22.3 d	23.4 cd	29.4 c	18.0 ef	17.7 fg	19.0 g	11.9 b	11.8 b	10.2 c	17.6 bc	17.8 bc	19.9 b
LI	14.8 ef	16.8 e	13.8 f	20.8 d	21.2 de	17.0 gh	11.1 b	11.7 b	11.5 b	19.1 b	19.0 b	19.7 b
NI	15.6 ef	16.2 e	17.5 ef	14.4 i	16.7 h	15.1 i	10.1 c	10.8 c	10.2 c	14.3 e	15.9 de	16.3 d
Variétés x Irrigation		**			**			***			**	

Tableau 11 : Analyse de l'interaction variété x traitement d'irrigation sur l'efficacité de l'eau EUE_{MS} ($Kg.ha^{-1}.mm^{-1}$) au cours des 4 saisons de croissance

* Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significatives $P < 0.05$.

VII-2-3-2- Efficacité de l'eau pour les grains (EUE_{GR})

Bien que les plus fortes valeurs d'évapotranspiration sont obtenues avec la variété vitron sous irrigation potentielle (FI), ceci n'a pas eu beaucoup d'impact sur les valeurs maximales de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour les grains (EUE_{GR}). En moyenne, les irrigations potentielles, ont produit les meilleures efficacités avec une valeur moyenne de $10.3 kg.ha^{-1}.mm^{-1}$ pour toutes variétés confondues, suivies des irrigations précoces (EI) avec une valeur moyenne de $7.5 kg.ha^{-1}.mm^{-1}$ et enfin les irrigations tardives avec une valeur de $6.4 kg.ha^{-1}.mm^{-1}$ avec un ordre de classement suivant :

FI > EI > LI > NI.

L'interaction stratégie d'irrigation-variété, montre que la variété waha a enregistré les valeurs les plus élevées et en particulier en régime pluvial ou la supériorité de cette variété touche environ les 4 campagnes d'étude.

Par ailleurs, les irrigations permanentes ont permis un gain moyen d'efficacité de l'ordre de 110% par rapport au régime pluvial avec un maximum de 130% enregistré par la variété vitron, alors que les irrigations précoces ont augmenté l'efficacité de 53% par rapport au régime pluvial avec un maximum de 65% enregistré par vitron.

Cependant, les résultats ont montré qu'en irrigation potentielle, les variétés waha et vitron ont eu des efficacités pour les grains identiques présentant des différences significatives avec ceux obtenus par Chen's alors qu'en régime pluvial, les valeurs obtenues

par waha présentent des différences significatives par rapport à celles obtenues par Chen's et Vitron.

Enfin, aucun effet significatif n'est enregistré entre les 3 cultivars en régime d'irrigation déficitaire (EI, LI) (tableau 12).

Conclusion

Au cours des 4 années d'étude, la moyenne de l'efficience de l'eau pour les grains est comprise entre $4.6-5.3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ en régime pluvial. Des valeurs similaires ont été obtenues par Tavakkoli et Oweis (2004) pour le même traitement conduit en sec. Des valeurs de l'ordre de $9.6-10.8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ont été obtenues en condition potentielle en fonction du régime hydrique et du cultivar. La valeur maximale de EUE_{GR} est de $14.3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ enregistrée par vitron en 1998 en condition potentielle.

A travers ces résultats, nous pouvons dire que les variétés vitron et waha sont les meilleurs cultivars en condition potentielle (FI) et la variété waha est la meilleure en condition pluviale (NI).

La différence entre NI et LI pour EUE_{GR} n'est pas significative. Ceci est probablement dû aux périodes antérieures à l'épiaison, qui ont connu des épisodes de sécheresse durant les premiers stades de croissance et en particulier au cours de la montaison et début épiaison, qui ont affecté d'une manière très sensibles EUE_{GR} . Ces variétés sont à considérer comme les meilleures situations d'efficience d'utilisation de l'eau pour la production de grains. En irrigation précoce et tardive, les 3 cultivars ont enregistré des valeurs semblables.

Les résultats obtenus au cours de ces essais, montrent également que la variété vitron valorise mieux le m^3 d'eau par rapport à waha et chen's, en cas de disponibilité de l'eau, dans les conditions climatiques de la région de Chlef. Mais en cas de sécheresse, c'est plutôt la variété waha qui résiste le mieux au déficit hydrique et enregistre les meilleurs rendements en grains et en matière sèche.

Par conséquent, pour des rendements compris entre 1300 et 2700 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ correspondent des EUE_{GR} respectives de 4.7 et 7.6 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ et pour des rendements supérieurs à 2700 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et inférieurs à 4800 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ correspondent des EUE_{GR} comprises entre 7.6 et 10.3 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$.

Irrigation	Années											
	1998			1999			2000			2001		
	V	W	C	V	W	C	V	W	C	V	W	C
FI	14.1 a	13.5 ab	12.6 b	12.2 a	11.5 b	9.1 c	8.2 ab	7.8 abc	7.5 bcd	8.0 b	9.6 a	9.3 a
EI	8.7 d	9.6 cd	10.0 c	6.7 ef	6.3 fg	6.0 g	8.6 a	7.9 abc	6.6 de	6.6 cd	6.5 cd	7.2 bc
LI	5.1 ef	5.8 e	4.2 f	7.5 d	7.2 de	5.8 gh	6.5 e	7.1 cde	8.4 ab	6.6 cd	6.8 d	6.6 cd
NI	5.0 ef	5.5 e	5.1 ef	4.2 i	5.3 h	4.4 i	5.0 fg	5.4 f	4.2 g	4.1 f	4.9 ef	5.0 e
Variétés x Irrigation		**			**			***			**	

Tableau 12 : Analyse de l'interaction variété x traitement d'irrigation sur l'efficacité de l'eau EUEGR ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) au cours des 4 saisons de croissance

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significatives $P < 0.05$.

VII-2-4-Variation du rendement en fonction de l'efficacité de l'eau

Le rendement en grains et l'efficacité d'utilisation de l'eau ne sont pas étroitement liés pour toutes les stratégies d'irrigation. Par contre, de bonnes corrélations entre le rendement en grains et l'efficacité d'utilisation de l'eau en condition pluviale et en condition potentielle, prises séparément, ont été obtenues avec respectivement $R^2 = 0.68$ et $R^2 = 0.74$ à $P < 0.001$ (figures 28a,b).

En irrigation déficitaire, ou limitante, l'augmentation de la production de la biomasse végétale pourrait limiter la disponibilité en eau du sol pendant le remplissage des grains et plus particulièrement pour la variété Chen's.

Par ailleurs, il est important de signaler que parmi les 4 années d'étude, seule l'année 98/99 présentent de bonnes corrélations entre l'efficacité de l'eau pour la matière sèche et l'évapotranspiration (ET) avec $R^2 = 0.70$ à $P < 0.001$ (figure 29). Il en est de même pour l'efficacité de l'eau pour les grains avec $R^2 = 0.75$ à $P < 0.001$ (figure 30).

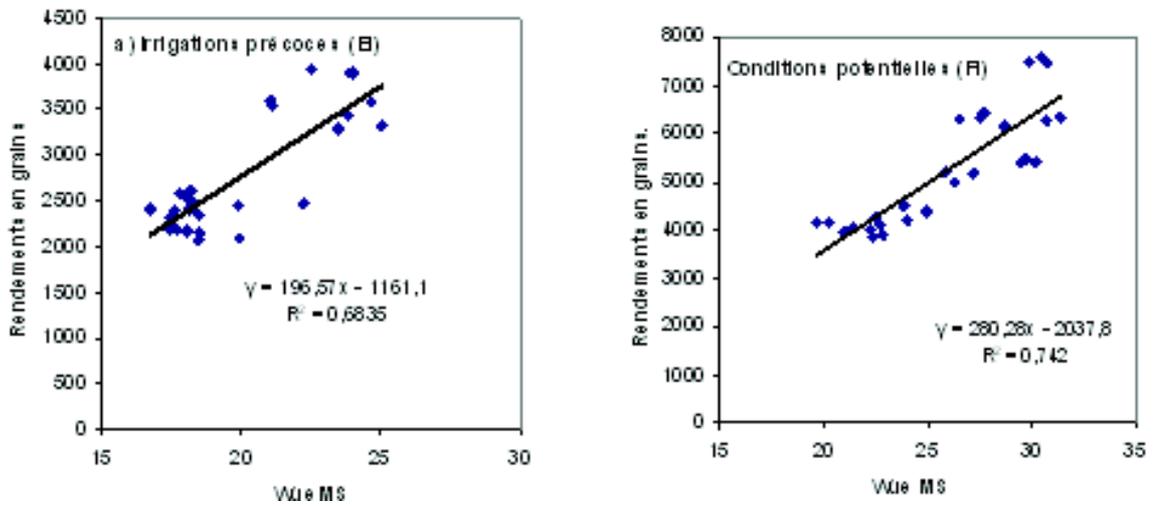


Figure 28 : Relation efficacité de l'eau (matière sèche) et rendement en grains a) irrigations précoces b) conditions potentielles

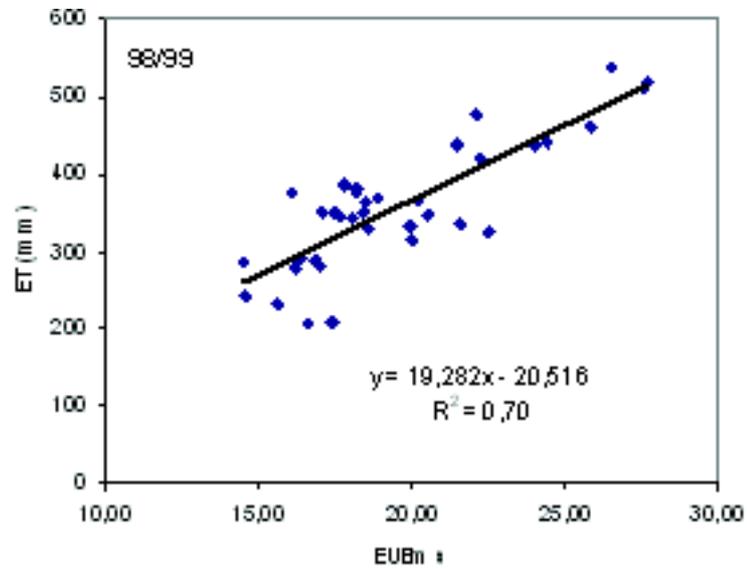


Figure 29 : Relation efficacité de l'eau (matière sèche) et consommation en eau

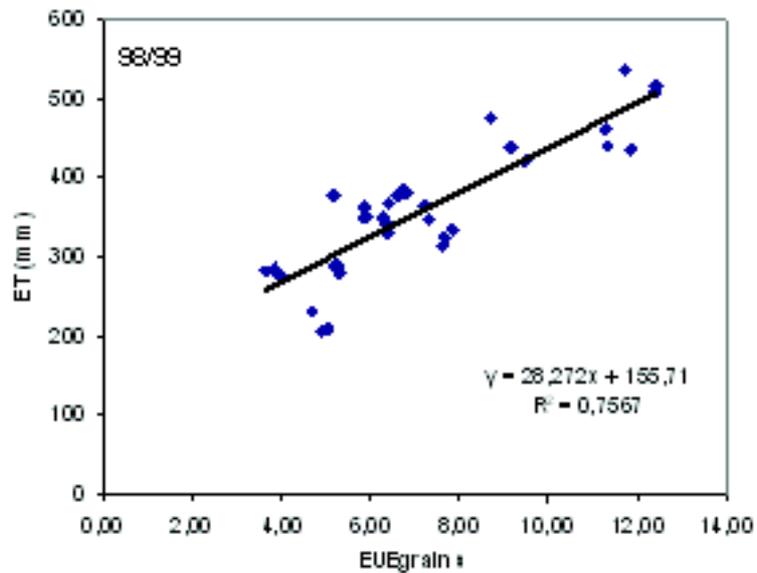


Figure 30 : Relation efficacité de l'eau (grains) et consommation en eau

VII-3- Relations rendement en grains-rendement en paille

Comme le rendement en grains et le rendement en paille sont étroitement liés (R^2 compris entre 0.85 et 0.95, $P < 0.001$), sur l'ensemble des trois cultivars (figures 31,32,33). Nous pouvons dire que les conclusions précédentes sont valables pour les rendements en paille. Les meilleurs rendements sont produits au cours de l'année 1998 et les plus faibles en 2000. Sur le plan variétal, Waha enregistre les meilleurs rendements 3 années sur 4. Ce cultivar peut constituer un moyen de compensation efficace pour les agriculteurs au cas les rendements en grains n'atteignent pas le niveau souhaitable car la paille constitue un produit d'alimentation important pour le bétail en Algérie.

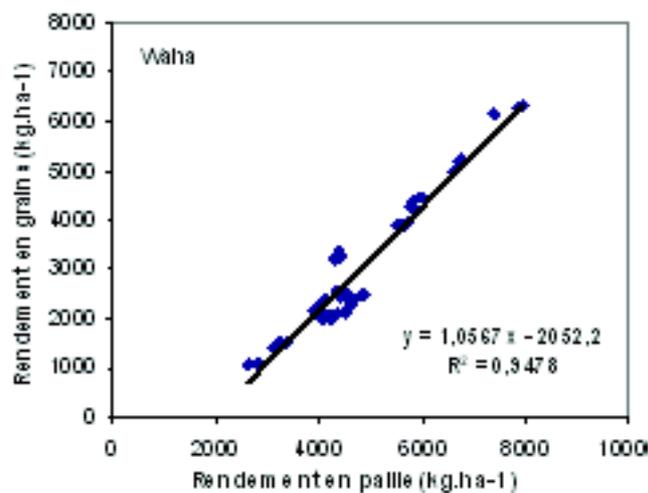


Figure 31 : Relation grains-paille (waha)

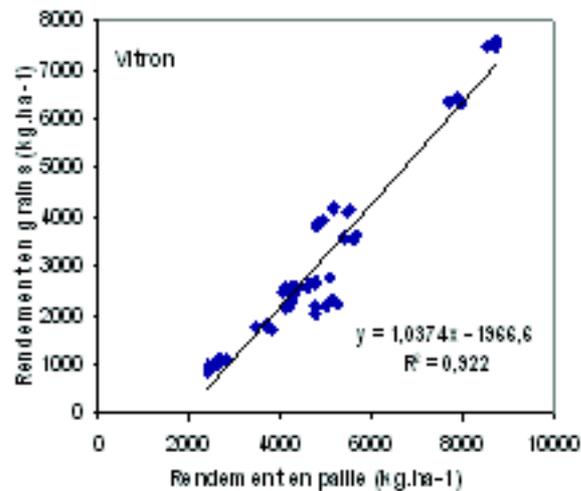


Figure 32 : Relation grains-paille (Vitron)

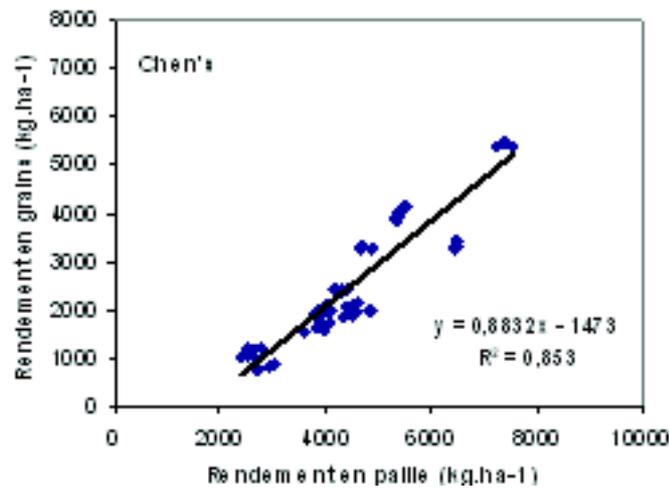


Figure 33 : Relation grains-paille (Chen's)

VII-4- Les composantes de rendement

VII-4-1-Le nombre de grains par mètre carré

Les deux composantes de rendement en grains; le nombre de grains (NG) et le poids individuel du grain (PG), sont positivement reliés au rendement en grains.

Globalement, les valeurs les plus élevées du nombre de grains par mètre carré sont observées dans les traitements conduits en potentiel (F1) avec une valeur moyenne de l'ordre de 10160 et les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les traitements conduits en conditions pluviales avec une valeur moyenne de 3707.

La variété Waha a enregistré le plus grand nombre de grains avec une valeur moyenne de 7045. Le gain moyen occasionné par les irrigations permanentes par rapport aux conditions pluviales est de l'ordre de 174%. Le plus grand gain a été réalisé par

Vitron avec 208% d'augmentation suivie de Chen's avec 185% et enfin Waha avec 139% d'augmentation.

Etant donné que cette composante explique plus de 90% les variations de rendement en grains (figures 34a,b,c), l'ordre de classement en matière de stratégies d'irrigation, est similaire au rendement avec :

FI > EI > LI > NI.

Par contre, sur le plan variétal l'ordre suivant est obtenu :

Waha > Vitron > Chen 's.

En terme de variation annuelle, nous pouvons dire que l'année 98 a enregistré les meilleurs résultats de nombre de grains quel que soit le cultivar. Par contre, l'année 2000 a enregistré les plus faibles résultats et en particulier pour Chen's et Waha..

Ces résultats confirment les remarques, faites dans le chapitre climatique, relative à aux caractéristiques de cette année sur le plan quantité de précipitations recueillie ainsi que la distribution à l'intérieur du cycle de croissance.

L'année 2000 a été caractérisée par une distribution irrégulière des précipitations avec un cumul relativement faible et en particulier dans la période (Février-Avril).

Les relations, obtenues entre le nombre de grains par mètre carré et le rendement en grains sont étroitement liées à $P < 0.001$, (R^2 compris entre 0.93 et 0.95) que ce soit sur le plan variétal ou sur le plan annuel.

En irrigation précoce, le nombre de grains par mètre carré est sensiblement plus important que pour les irrigations tardives avec une moyenne de 7194 en EI contre 5696 en LI.

Les réponses variétales des deux composantes de rendement vis-à-vis des stratégies d'irrigation sont comparées aux valeurs relatives correspondantes aux conditions potentielles (figures 35a,b). Le poids individuel du grain est réduit négativement par la limitation de l'eau que le nombre de grain. Des différences sensibles ont été observées entre les cultivars en réponse aux stratégies d'irrigation. Le nombre de grain de Vitron a été maintenu à un niveau élevé avec l'irrigation tardive.

En conditions pluviales, le nombre de grain de Waha a été moins pénalisé que les deux autres cultivars. En ce qui concerne le poids du grain, Chen's est le cultivar le plus stable sur la gamme des stratégies d'irrigation, la variété Vitron étant légèrement plus susceptible que la variété Waha.

VII-4-2-Le poids moyen du grain

Les stratégies d'irrigation adoptées ont eu un effet très significatif à $P < 0.001$ sur le poids moyen du grain. Les valeurs les plus élevées sont obtenues avec les traitements conduits en potentiel avec une valeur moyenne de 45 mg et les plus faibles valeurs sont enregistrées par les traitements conduits en conditions pluviales avec une valeur moyenne de 34.6 mg.

L'examen des figures 36a,b,c montre que le rendement est expliqué à 62% en moyenne

Contrairement à la précédente composante, les irrigations tardives, dans ce cas, ont enregistré des poids de grains plus élevés que les irrigations précoces avec des valeurs respectives de l'ordre de 39.8 (LI) et 34.6 (EI).

Il est important de signaler que le poids moyen du grain n'est pas sensiblement différent entre les trois cultivars.

Les irrigations permanentes ont permis un gain moyen de poids de l'ordre de 30% par rapport à la conduite pluviale. Tandis que les irrigations précoces et tardives ont enregistré un gain moyen respectif de l'ordre de 8 et 15% par rapport aux traitements conduits sans irrigation.

En terme de stratégies d'irrigation l'ordre de classement obtenu dans ce cas est :

FI > LI > EI > NI.

Du point de vue variétale, il n'y a pas eu de différences significatives et sur le plan annuel, l'ordre de classement est le suivant:

98 > 2001 > 99 > 2000.

Sur la figure 35b, nous constatons que le poids individuel du grain est réduit négativement par les conditions de déficit hydrique que le nombre de grains. Le cultivar Chen's est le plus stable sur la gamme des stratégies d'irrigation et le cultivar Vitron étant légèrement plus susceptible que le cultivar Waha.

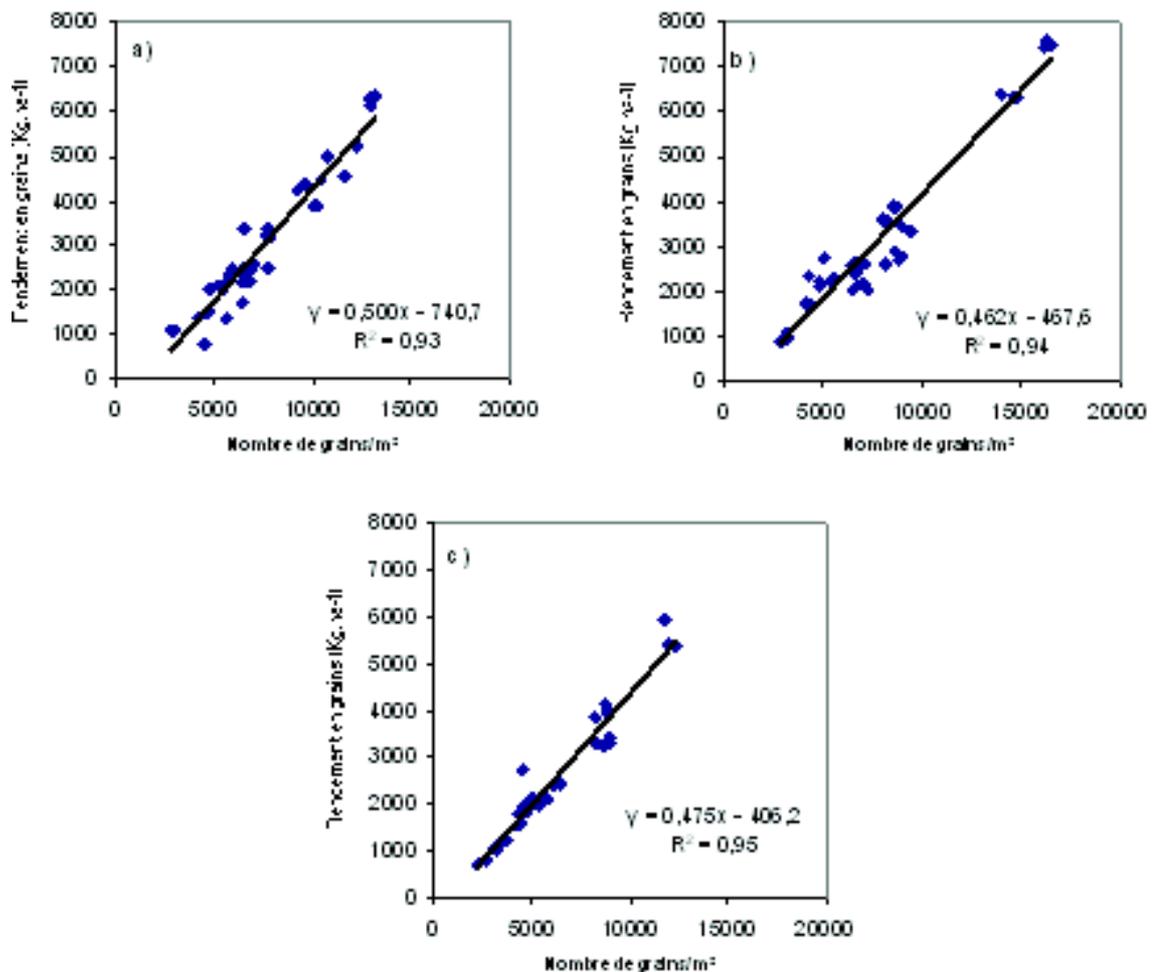


Figure 34 : Relation NG/m²- rendement en grains

a) waha, b) vitron, c) chen's.

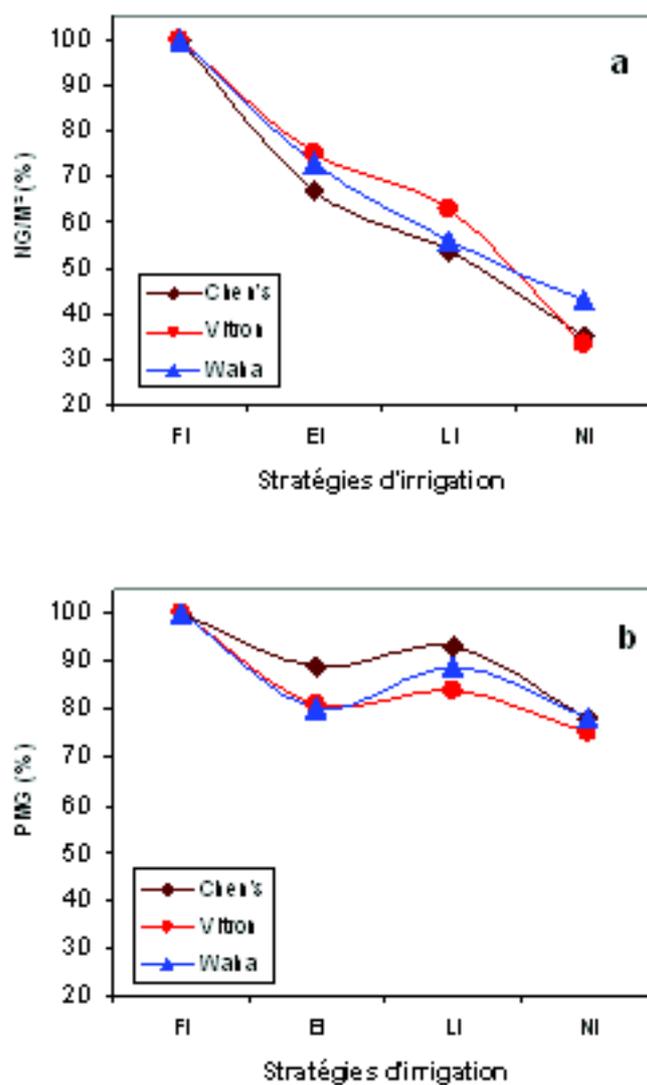


Figure 35 : Réponse variétale a. du NG/m^2 , b. du PMG aux stratégies d'irrigation. (les valeurs sont exprimées par rapport au traitement potentiel FI)

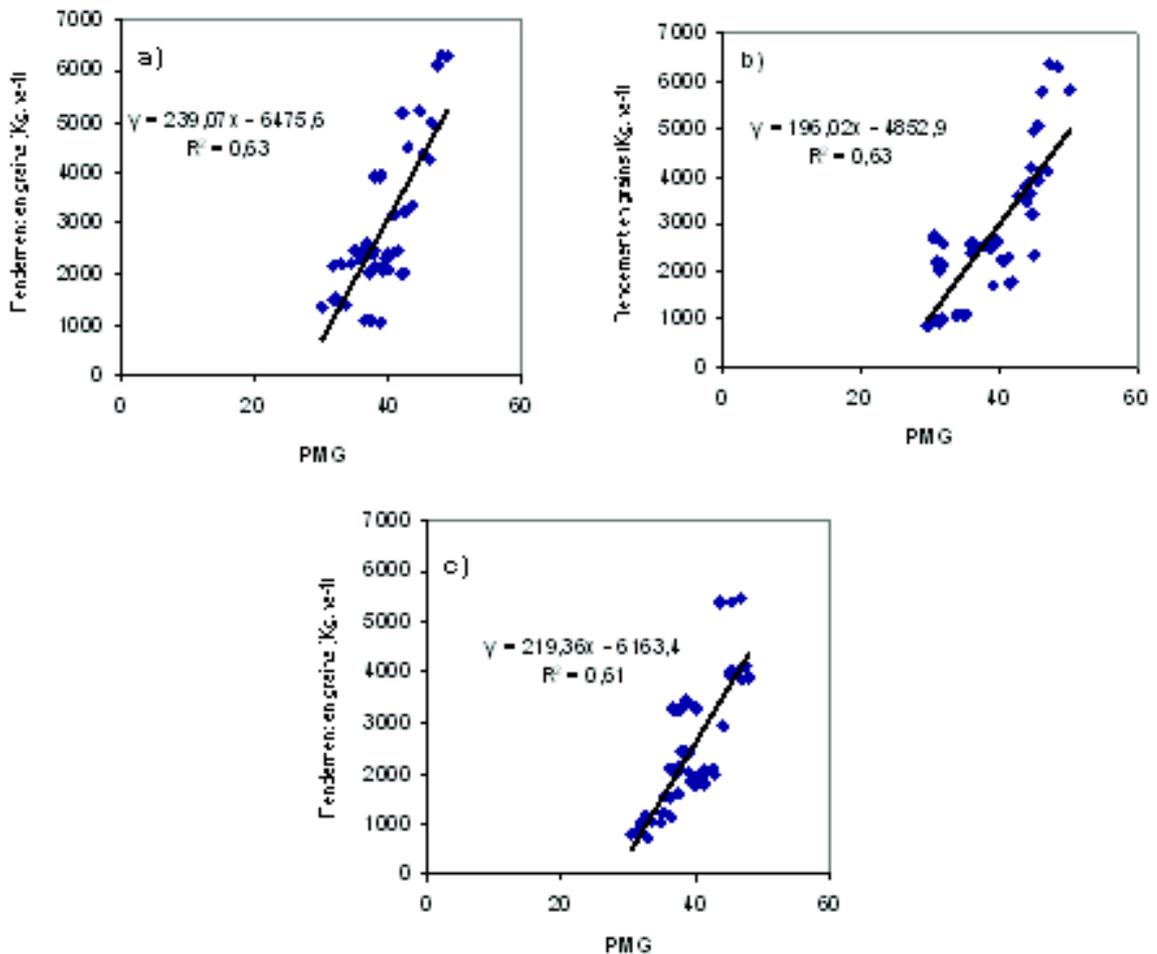


Figure 36 : Relation PMG-rendement en grains

a) waha, b) vitron, c) chen's.

VII-5-Variation de la consommation en eau selon les cultivars

La consommation en eau par variété est différente d'une saison de croissance à une autre et d'une stratégie d'irrigation à une autre. La consommation en eau moyenne est comprise entre 185 mm en condition pluviale et 533 mm en condition potentielle pour le cultivar Vitron et de 201 mm à 461 mm pour le cultivar Waha. La différence de consommation en eau n'est pas significative à $P < 0.05$ entre les 3 cultivars que ce soit en conditions pluviales ou en conditions potentielles.

En condition de déficit hydrique précoce (LI), la consommation en eau est comprise entre 235 et 433 mm. Les consommations les plus élevées sont enregistrées par le cultivar Vitron. Les mêmes remarques peuvent être faites en condition de déficit hydrique tardif (EI) et en conditions pluviales avec un avantage de consommation pour le cultivar Waha.

Comme il a été décrit précédemment, les rendements en grains évoluent exponentiellement en fonction de la consommation globale.

Nous pouvons dire à travers ces résultats que le cultivar Waha est moins pénalisé en terme de rendement, en condition de déficit hydrique, compte tenu de la même consommation en eau des 3 cultivars ou la différence de consommation en eau n'est pas significative.

Cette différence dans la consommation en eau est responsable de 74% de la variation des rendements moyens en grains.

VII-5-1-La consommation totale sur le cycle de croissance

La consommation en eau globale varie entre 533 mm ((FI) et 185 mm (NI). Les consommations en eau les plus élevées ont été enregistrées par les traitements conduits en potentiel et les plus faibles consommations sont obtenues par les traitements en conditions pluviales.

Sur le tableau 13, nous remarquons que le cultivar Vitron est plus consommateur d'eau en conditions potentielles. La différence de consommation en eau est significative entre les différents cultivars, excepté en 2000.

Par ailleurs, nous pouvons dire à travers ces résultats que la relation entre le rendement en grains et la consommation en eau est une relation qui dépend du cultivar. Les plus fortes valeurs d'évapotranspiration sont obtenues avec la variété Vitron en condition d'irrigation permanente.

VII-5-2-La consommation en période post-épiaison

Les figures 37a,b,c, montrent l'évolution de l'indice de récolte en fonction de la consommation relative en eau (consommation en période post-épiaison par rapport à la consommation totale) pour les trois cultivars. Nous remarquons est de forme logarithmique. En terme variétal, l'indice de récolte est positivement corrélé à l'évapotranspiration saisonnière ($R^2 = 0.710$, $P < 0.001$) mais plus étroitement corrélé à l'évapotranspiration relative en période post-épiaison (R^2 compris entre 0.72 et 0.86, $P < 0.001$). La valeur d'ET est comprise entre 40 et 188 mm. Le rapport d'utilisation de l'évapotranspiration saisonnière utilisé après la période épiaison est de 16 % à 37 % pour les trois cultivars. L'augmentation de ce rapport en condition d'irrigation précoce et en condition potentielle permettra d'améliorer davantage l'indice de récolte.

Les mêmes remarques peuvent être faites en ce qui concerne l'évolution globale de l'indice de récolte en fonction de la consommation relative post-épiaison au cours des 4 saisons de croissance (figure 38).

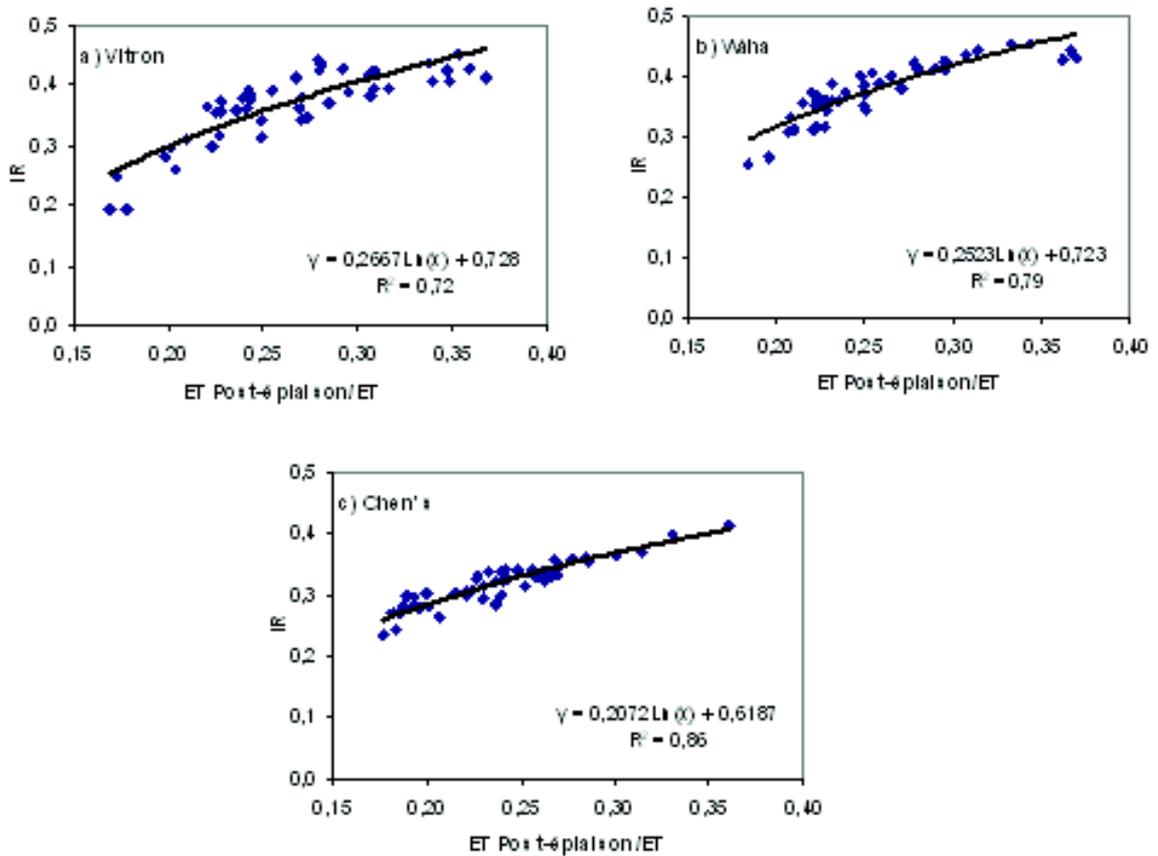


Figure 37 : Relation entre l'indice de récolte et la consommation relative post-épiaison au cours de la période (1998-2001)

a) vitron, b) waha, c) chen's.

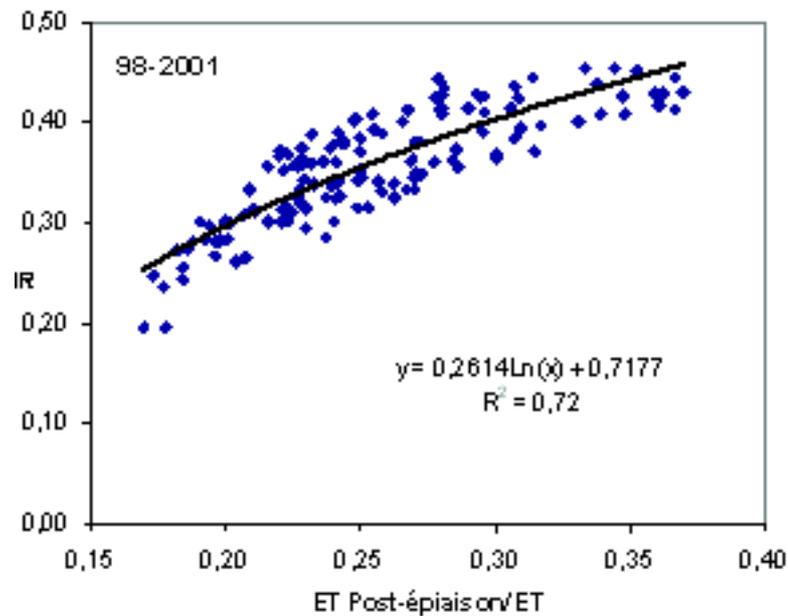


Figure 38 : Relation entre l'indice de récolte et la consommation relative post-épiaison pour les trois cultivars au cours de la période (1998-2001)

Irrigation	Années											
	1998			1999			2000			2001		
	V	W	C	V	W	C	V	W	C	V	W	C
FI	533 a	461 b	430 bc	521 a	447 b	446 b	471 a	419 b	440 ab	516 a	431 b	419 b
EI	413 cd	407 cd	338 ef	381 c	346 cd	349 cd	314 c	317 c	298 c	377 c	360 cd	338 cd
LI	433 bc	415 cd	425 bc	350 cd	336 d	352 cd	328 c	306 c	235 d	348 cd	330 de	295 ef
NI	345 ef	379 de	308 f	257 ef	287 e	240 f	185 e	201 de	191 e	262 fg	287 f	235 g
Variétés x Irrigation		*			**			**			**	

Tableau 13 : Analyse de l'interaction variété x traitement d'irrigation sur la consommation en eau ET (mm) pour les 4 saisons de croissance

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significatives à $P < 0.05$.

VII-6-Besoins en eau d'irrigation

Les besoins en eau d'irrigation ont été suivis pour les 3 cultivars au cours des 4 saisons de croissance, en considérant les consommations en eau obtenues par les traitements conduits dans les conditions potentielles comme la consommation maximale (ETM).

L'évapotranspiration de référence adoptée dans cette étude a été calculée à l'aide de l'évaporation bac class A. Les valeurs de cette dernière ont été multipliées par le coefficient du bac selon les conditions météorologiques, aux alentours du bac. Les résultats sont portés en annexe. Sur la base de ces résultats nous avons suivi mensuellement les coefficients culturaux par année et par variété.

VII-6-1-Etude des coefficients culturaux

VII-6-1-1-Evolution variétale

VII-6-1-1-1-Vitron

Sur les figures 39a, b, c nous avons résumé l'évolution des coefficients culturaux de trois cultivars au cours des 4 années d'étude. Au cours de l'installation de la culture, le coefficient cultural prend des valeurs moyennes comprises entre 0.41 et 0.44 durant les premiers mois. Le maximum est atteint au mois d'Avril avec une valeur moyenne de l'ordre de 1.0. Le

maximum a été atteint au cours de l'année 98 avec une valeur maximale de 1.10 (figure 39a). Cette période coïncide avec la période floraison. La plus faible valeur a été atteinte au mois de Juin avec une valeur moyenne de 0.30. La valeur de 0.26 a été obtenue au cours de l'année 2000.

VII-6-1-1-2-Waha

Les valeurs des coefficients culturaux enregistrées par la variété waha sont presque identiques au cours des premiers stades de développement (levée-tallage). L'effet variété au cours des quatre années d'étude n'est pas significatif à $P < 0.05$ (Tableau 14) au cours des premiers stades de croissance avec une valeur moyenne de l'ordre de 0.42. Le maximum enregistré se situe aux alentours de 0.97 sur les quatre années. L'année 2001 a enregistré une valeur maximale de 1.04 au mois d'Avril (figure 39b). La différence entre les deux variétés est significative aux alentours de la période épiaison floraison. Au-delà, aucune différence significative n'est observée.

VII-6-1-1-3-Chen's

L'évolution des valeurs du coefficient culturel de la variété Chen's est au dessous des valeurs des autres variétés et en particulier pour l'année 2001 (figure 39c). Les valeurs des coefficients culturaux ne diffèrent pas assez de celles de Chen's. Aucune différence significative à $P < 0.05$ durant les premiers stades de développement n'est observée (tableau 14). L'effet variété est significatif à partir du mois de Février jusqu'au mois d'avril. La valeur maximale enregistrée par Chen's est de 0.89 pour les 4 années avec un maximum de 0.90 obtenu en 98 et 99. La valeur moyenne enregistrée en fin de cycle est l'ordre de 0.26 avec une valeur minimale de l'ordre de 0.22 obtenue au cours de l'année 2000 (figure 39c).

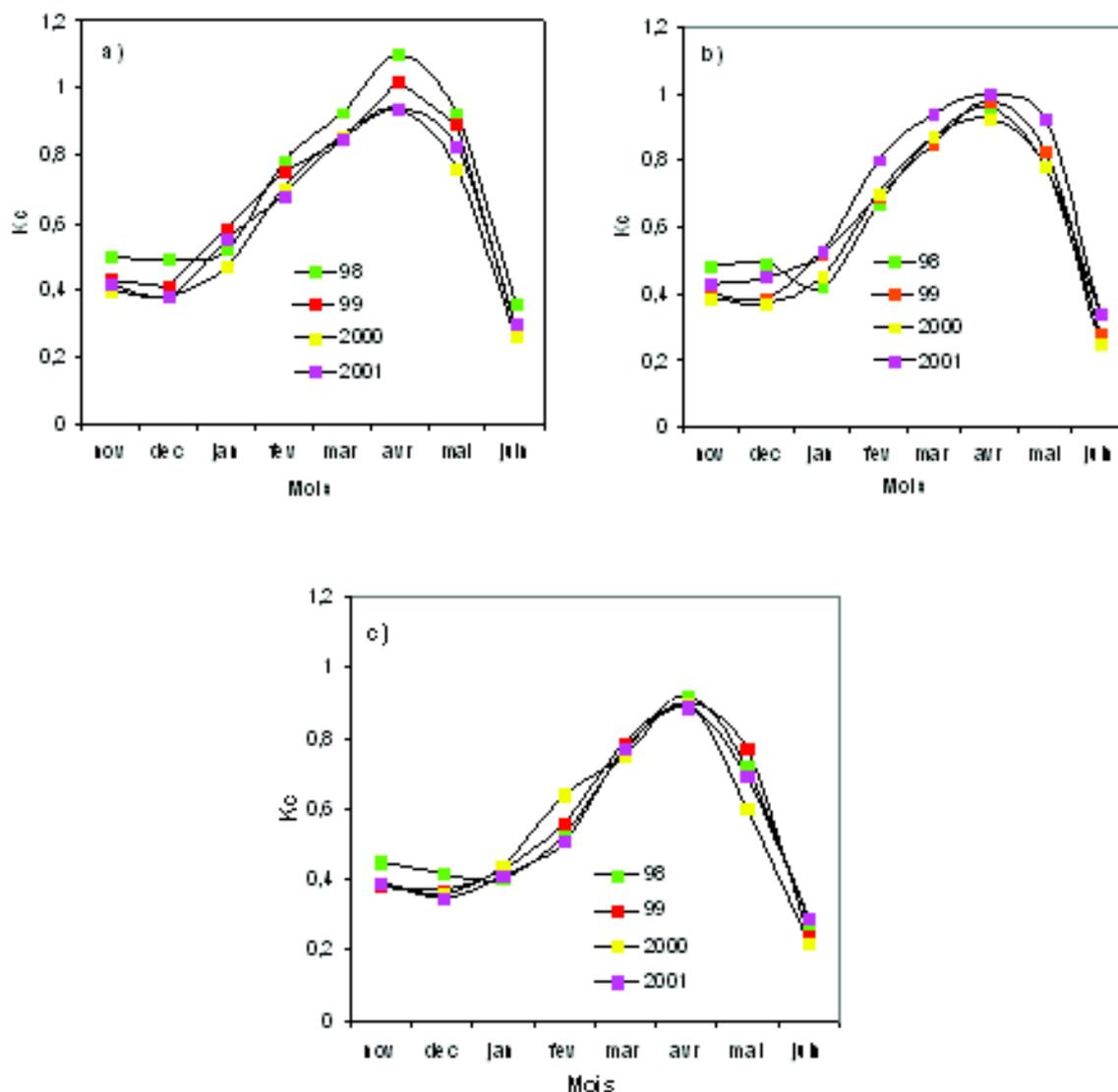


Figure 39 : Variabilité annuelle des coefficients culturaux

a) vitron, b) waha, c) chen's.

VII-6-2-Variabilité annuelle

L'évolution des coefficients culturaux des trois cultivars, suivis mensuellement au cours des 4 saisons de croissances, est montrée sur les figures 40a,b,c,d. La première remarque que nous pouvons faire à travers ces figures : quelle que soit l'année climatique, la valeur maximale du coefficient cultural est atteinte au mois d'Avril. Cette valeur varie en fonction de l'année et du cultivar. Elles est comprise entre 0.87 (Chen's en 2001) et 1.10 (Vitron en 1998). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au cours de la campagne 1997/1998 par le cultivar Vitron et les plus faibles valeurs sont enregistrées durant la campagne 1999/2000 par le cultivar Chen's.

Il est important de signaler, que dans de telles conditions, les besoins en eau d'irrigation des trois cultivars de blé, utilisés dans les conditions climatiques de la région de Chlef

et selon la méthode d'évaluation de l'évapotranspiration de référence adoptée au cours de cette étude (bac d'évaporation), sont différents. En effet, ces besoins prennent de l'importance à partir du mois de Mars ou il est préconisé des valeurs moyennes comprises entre 77% (Chen's) et 87% (Vitron) de l'ETP et 89% à 100% de l'ETP au mois d'Avril respectivement pour Chen's et Vitron.

Au cours de la campagne 1999/2000, les mêmes tendances ont été observées pour les cultivars vitron et Waha.

Actuellement, la FAO recommande la méthode de Penman-Monteith comme norme pour estimer l'évapotranspiration car elle reflète mieux les conditions réelles d'évaporation par l'intégration de paramètres physiologiques et aérodynamiques dans le calcul (Allen et al.,1998).

Cependant, d'autres méthodes météorologiques telles que la méthode d'évaporation du bac class A, qui est utilisée ici, et continue à être utilisé du fait de son coût faible, sa simplicité, son caractère pratique et la large disponibilité de données dans les stations météorologiques automatiques.

Medeiros et al. (2005) ont obtenu des évaluations fiables d'ET0 pour un intervalle d'au moins 7 jours avec le bac d'évaporation class "A".

Une bonne corrélation a été obtenue, en Australie dans des conditions semi-arides, entre l'évaporation bac class "A". et l'ETP Penman-Monteith, sur trois années de mesures, par Meyer et al (1999). La relation est du type :

$$ET0 = 0.72 (\pm 1.03) + 0.83 (\pm 0.01) E_{\text{bac}} \quad n = 1081, R^2 = 0.89$$

La relation simplifiée est du type :

$$ET0 = 0.93 E_{\text{bac}} \text{ "A"}$$

Nos résultats sont en accord avec les valeurs des coefficients culturaux présentées dans la littérature en utilisant la méthode de Penman-Monteith. Néanmoins, le coefficient cultural estimé avec la méthode de Penman-Monteith devrait être légèrement plus élevé que celui de la méthode du bac d'évaporation.

Généralement, dans la littérature, des valeurs de 1.05 à 1.25 ont été trouvées pour le blé avec comme référence la méthode Penman-Monteith ou l'évaporation du bac (Doorenbos et Pruitt, 1977 ; Bandyopadhyay et Mallick, 2003 Kang et al.,2003), mais Howell et al. (1995) ont rapporté des valeurs de 0.83 à 0.94 (en utilisant une culture de luzerne comme référence). Nos valeurs de kc concordent avec celles d'Al-Khaisi et al. (1997) ou l'irrigation est basée sur le déficit hydrique du sol.

En utilisant la formule de Penman-Monteith à Chlef, le coefficient cultural devrait être majoré de 5 à 15 %.

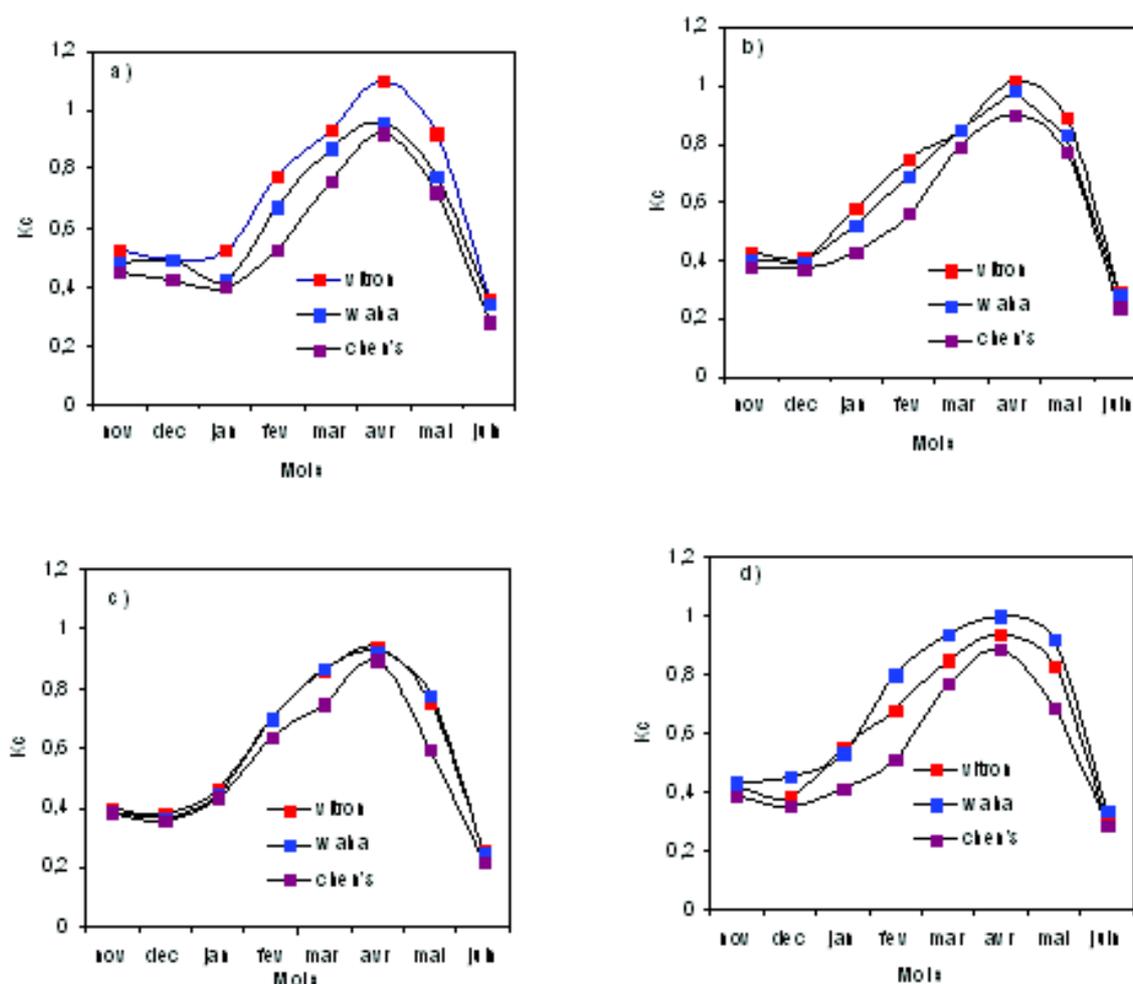


Figure 40 : Evolution variétale des coefficients culturaux

a) 1998, b) 1999, c) 2000, d) 2001.

VII-6-3-Variabilité mensuelle

En moyenne, le Kc prend des valeurs minimales comprises entre 0.39 et 0.53 au cours de l'installation de la culture en passant par des valeurs maximales pouvant dépasser l'unité au mois d'Avril et Mai (Période floraison et stade grain laiteux).

Par la suite, le coefficient cultural diminue quand le blé arrive à maturation à la fin mai et en début juin pour atteindre des valeurs moyennes comprises entre 0.22 et 0.36 selon les années

Dans la plupart des cas, le coefficient cultural déterminé à partir du traitement FI pour chaque cultivar ne diffère pas entre les cultivars en Novembre-Janvier ou en juin Par contre, des différences significatives à $P < 0.05$ ont été observées pendant la période de croissance active, quand la surface foliaire se développe rapidement.

En moyenne, le kc a pris des valeurs supérieures à l'unité pour les variétés Vitron et Waha mais pas plus de 0.9 pour la variété Chen's. La valeur moyenne saisonnière du Kc pour les 3 cultivars est de 0.64 (Vitron), 0.62 (Waha) et 0.54 (Chen's) au cours des 4 saisons

de croissance. Les valeurs maximales correspondantes sont respectivement de l'ordre de 1.0, 0.97 et 0.89.

En raison d'un développement végétatif modéré, la variété Chen's n'exigerait pas autant d'irrigation que les deux autres cultivars pour atteindre son rendement potentiel qui demeure faible.

Tableau 14 : Variation mensuelle des coefficients culturaux en fonction de la variété et de l'année (1998-2001)

	98							
Variétés	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin
Vitron	0.53a*	0.49a	0.52a	0.78a	0.93a	1.10a	0.92a	0.36a
Waha	0.48ab	0.49a	0.42b	0.67b	0.87b	0.96b	0.78b	0.34a
Chen's	0.45b	0.42a	0.40b	0.53c	0.76c	0.90c	0.68c	0.28a
	99							
Variétés	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin
Vitron	0.43a	0.41a	0.58a	0.75a	0.85a	1.02a	0.89a	0.29a
Waha	0.40a	0.39a	0.52ab	0.64b	0.85a	0.98ab	0.83ab	0.28ab
Chen's	0.39a	0.37a	0.43b	0.56c	0.79b	0.90b	0.70c	0.24b
	2000							
Variétés	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin
Vitron	0.40a	0.38a	0.47a	0.70a	0.86a	0.94a	0.76a	0.26a
Waha	0.39a	0.37a	0.45a	0.60b	0.77b	0.90b	0.78a	0.25a
Chen's	0.39a	0.36a	0.44a	0.54b	0.75b	0.89b	0.60b	0.22a
	2001							
Variétés	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin
Vitron	0.42a	0.38ab	0.55a	0.68b	0.83b	0.94b	0.83a	0.30a
Waha	0.43a	0.45a	0.53a	0.80a	0.94a	1.04a	0.92a	0.34a
Chen's	0.39a	0.35b	0.41b	0.51c	0.77c	0.87c	0.69b	0.29a

* Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significatives $P < 0.05$.

VII-7- Etude de la croissance

VII-7- 1-Indice de surface foliaire

VII-7-1-1-Variation de l'indice de surface foliaire selon les stratégies d'irrigation

L'évolution de l'indice de surface foliaire au cours des 4 saisons de croissance selon les stratégies d'irrigation est illustrée dans les figures 41a,b,c.

La variation moyenne des LAI des 3 cultivars (toute année confondue) montre qu'il n'existe aucune différence significative entre, d'une part, le régime pluvial (NI) et le régime irrigué tardivement (LI) et d'autre part le traitement irrigué précocement (EI) et l'irrigation potentielle (FI) du semis jusqu'au 120^e jour après semis ; cette date coïncide, pour les 4 saisons de croissance, à la période montaison- épiaison.

La différenciation commence à partir du 140^e jour après semis. Excepté le traitement conduit en sec (NI), tous les autres traitements voient leur LAI diminuer à partir du 140^e jour après semis. Nous constatons une diminution des valeurs des LAI pour les traitements NI et EI alors que celles du LI et FI augmentent pour atteindre des valeurs moyennes respectives de 5.2 et 3.3.

VII-7-1-2-Variation selon les cultivars

Les figures (figure de Waha) montre l'évolution de l'indice de surface foliaire selon les stratégies d'irrigation. Les mêmes remarques que précédemment, peuvent être énoncées.

Nous remarquons une évolution similaire entre les couples (EI,FI) et (NI,LI) jusqu'au 120^e jour après semis. La valeur maximale du LAI, pour waha, a été enregistrée au 140^e jour après semis avec une valeur de 5.2.

Par ailleurs, il est important de signaler que seules les valeurs de la variété waha continuent à augmenter au-delà du 100^e jour après semis, en régime pluviale pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 3.44 au 120^e jour après semis au cours de l'année 97/98. La plus faible valeur a été enregistrée en 99/2000 avec une valeur de 2.43.

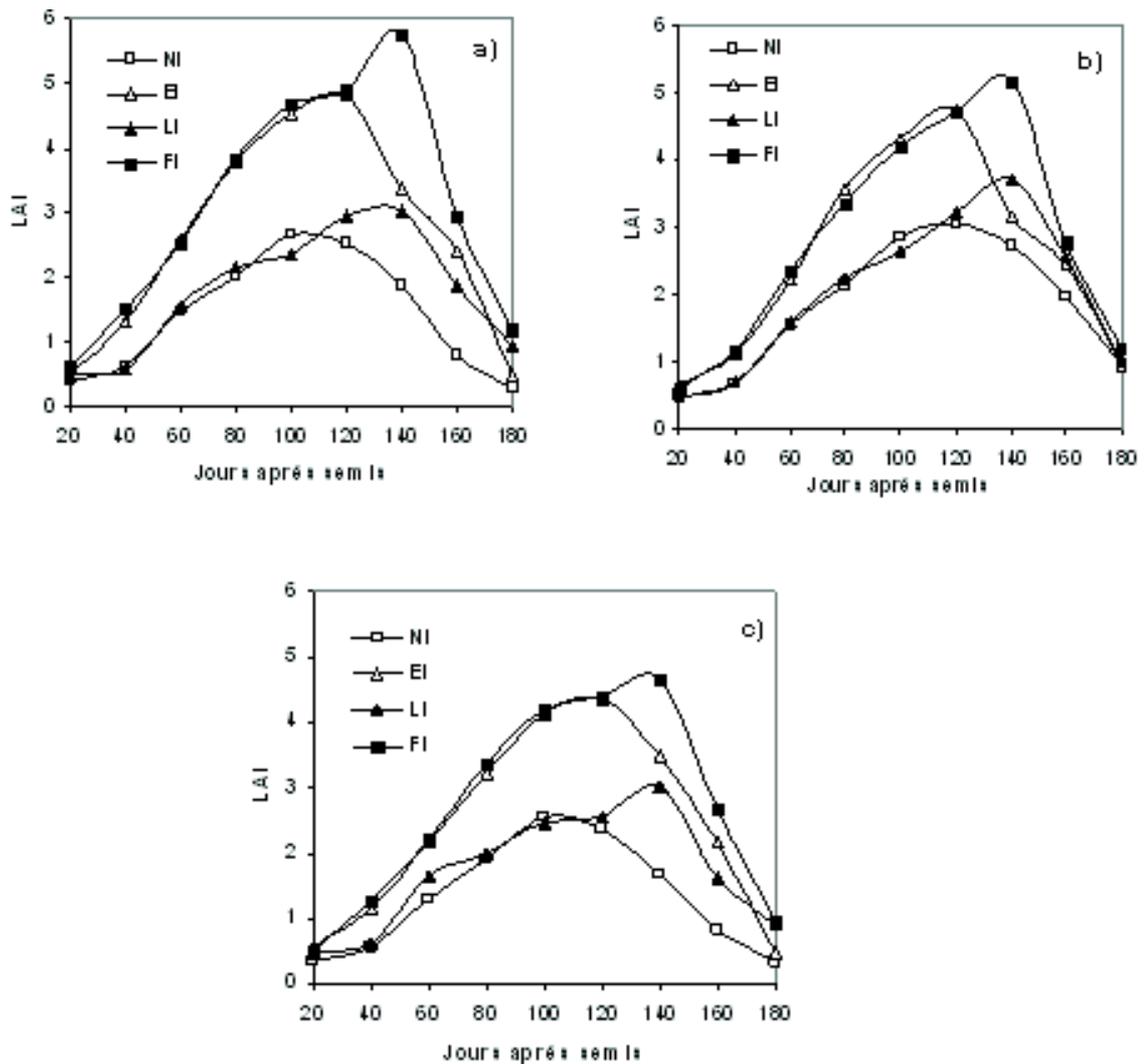


Figure 41 : Variation de l'indice de surface foliaire selon les stratégies d'irrigation
a) Vitron, b) Waha, c) Chen's.

VII-7-1-3-Variabilité annuelle

Les figures 42, 43, 44 et 45 montrent l'évolution des LAI en fonction des jours après semis, pour chaque stratégie d'irrigation.

Les variétés Vitron et Chen's ont suivi la même évolution au cours des années 98/99 et 2000/2001.

Les 3 cultivars ont enregistré des valeurs maximales d'indice de surface foliaire au 140^e jour après semis en conditions potentielles avec des valeurs de l'ordre de 5.8, 5.2, et 4.6 respectivement pour Vitron, Waha, et Chen's.

Les valeurs de LAI enregistrées pour waha, vitron et chen's en condition pluviale, ont atteint des valeurs respectives de 3.05, 2.7 et 2.5.

Ces valeurs expliquent les meilleurs rendements ainsi que les meilleures efficacités en grains obtenues par waha en condition pluviales par rapport aux autres variétés et en particulier durant l'année 97/98.

Donc, en régime pluvial, la variété waha peut maintenir son activité végétative jusqu'à épiaison et la sénescence des feuilles débute à partir du 120^e jour après semis. Cependant, dans les mêmes conditions (pluviales), la sénescence est entamée 20 jours plutôt pour Chen's et Vitron.

La comparaison des valeurs moyennes des LAI obtenues en conditions pluviales et en irrigation précoce au 120^e jour après semis montre une différence très significative. En effet, une augmentation moyenne de l'ordre de 76% est enregistrée. Le maximum de différence a été atteint par vitron avec une valeur de 91%. Ceci est justifié par les faibles valeurs de vitron obtenues en condition pluviale et des valeurs plus élevées obtenues en condition potentielle.

Par contre, la différence moyenne entre NI et LI au 140^e jour après semis n'est que de 59% avec une valeur maximale de 80% enregistré par Chen's. Nous remarquons également, que malgré l'arrêt des irrigations pour EI à partir de l'épiaison et le début des irrigations à partir de cette période pour LI, les deux valeurs respectives du LAI sont presque similaires à la période floraison avec un léger avantage pour le traitement EI de l'ordre de 2.5%. Ceci est nettement plus clair dans les figures (Vitron) et (Chen's) au 160^e jour après semis.

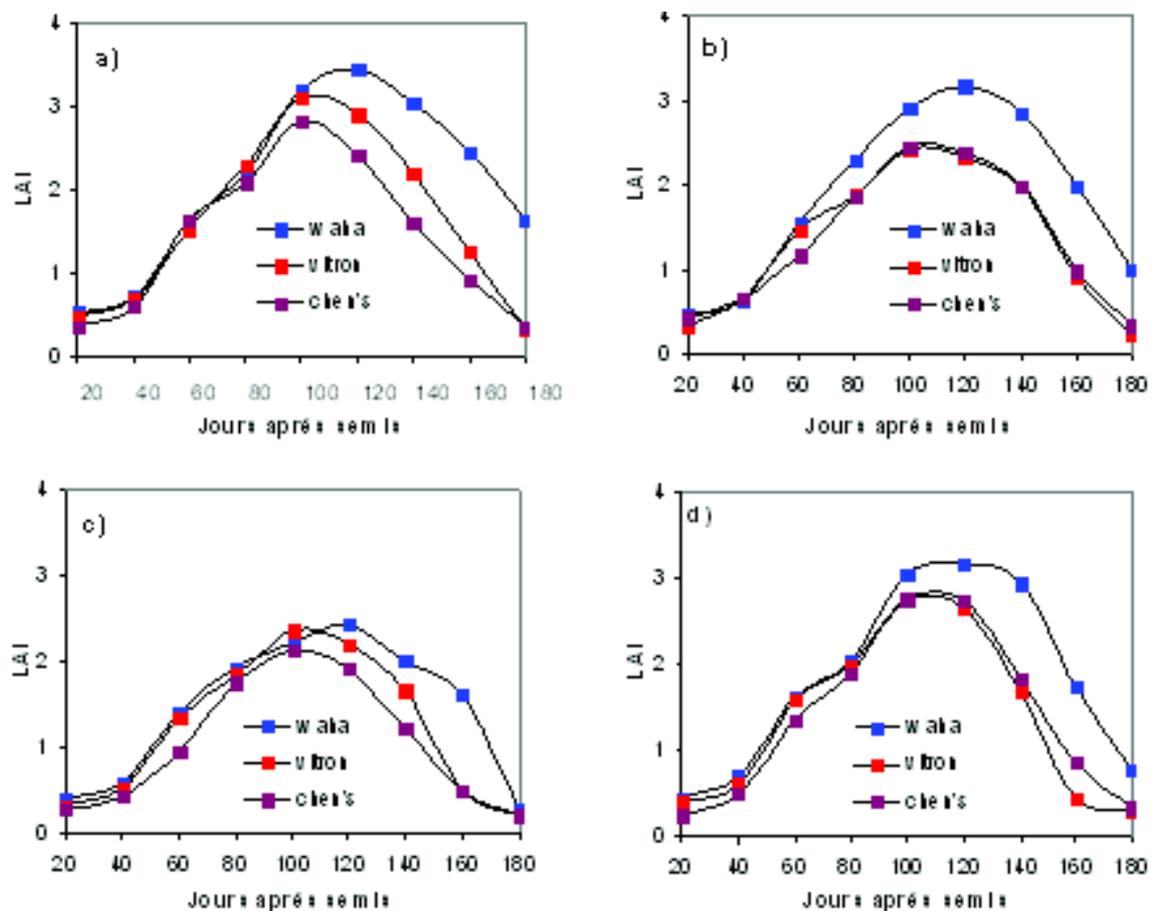


Figure 42 : Evolution des LAI en condition pluviale (NI)

a) 98, b) 99, c) 2000, d) 2001.

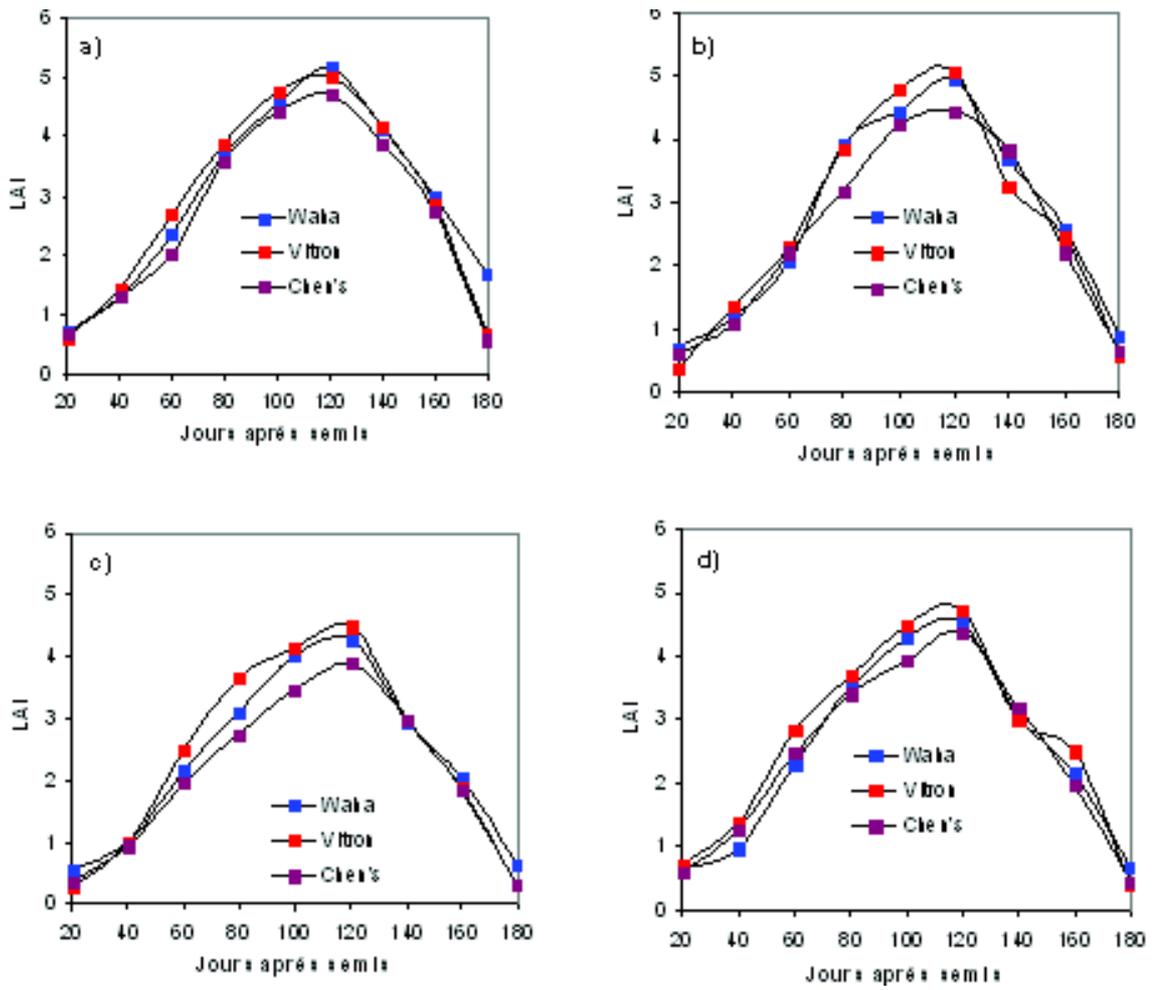


Figure 43 : Evolution des LAI en irrigation précoce (EI)

a) 98, b) 99, c) 2000, d) 2001.

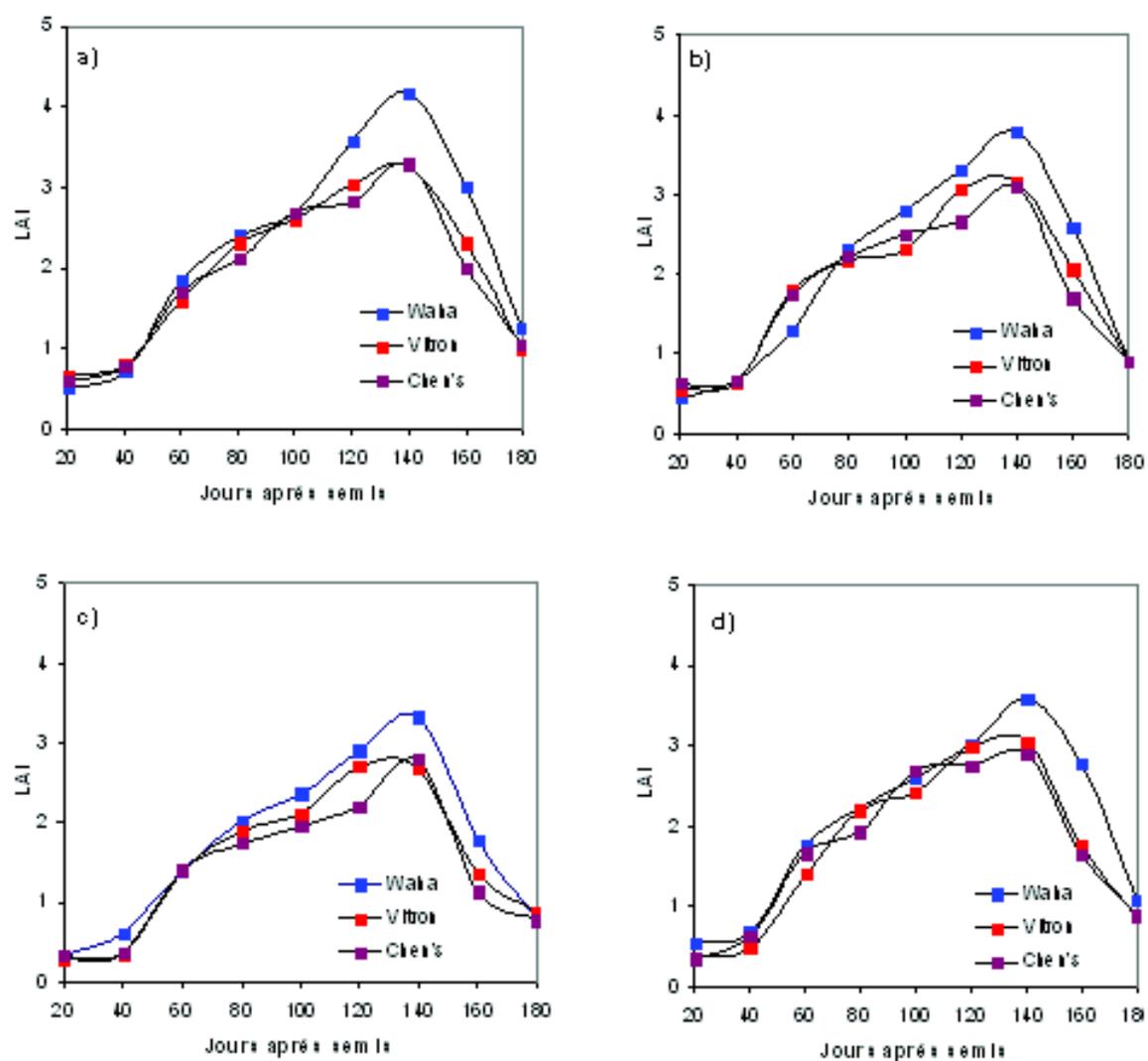


Figure 44 : Evolution des LAI en irrigation tardive (LI)

a) 98, b) 99, c) 2000, d) 2001.

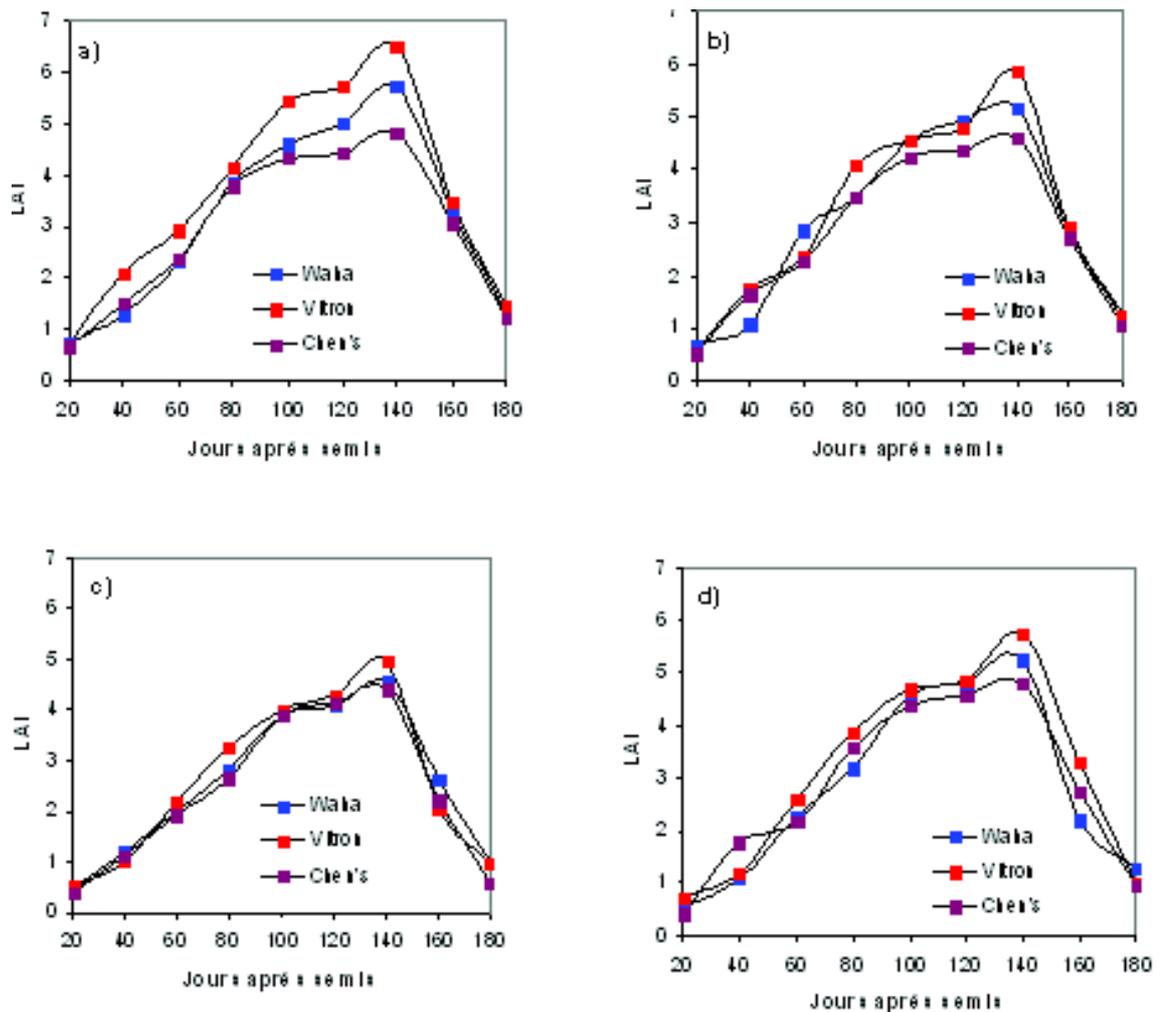


Figure 45 : Evolution des LAI en irrigation potentielle (FI)

a) 98, b) 99, c) 2000, d) 2001.

Notons qu'en termes de stratégies d'irrigation, vitron a donné les meilleures valeurs en irrigation potentielle avec une valeur maximale de 6.5 enregistrée en 97/98.

La variété waha a donné les meilleures valeurs de LAI en irrigation tardive avec une valeur maximale de 4.2 en 98.

Tandis qu'en irrigation précoce, aucune différence significative n'est observée à $P < 0.05$ entre les valeurs de Waha et Vitron.

Cependant, en condition pluviale, waha est nettement supérieure aux deux autres variétés quelle que soit l'année et dans tous les cas de figures, chen's présente les plus faibles valeurs d'indice de surface foliaire quelles que soient les stratégies d'irrigation et les années.

VII-8-Relation indice de surface foliaire et coefficient cultural

Le coefficient cultural mensuel a été suivi en fonction des valeurs du LAI (pour LAI > 1, 60-120 jours après semis). La relation est satisfaisante et obéit à une équation logarithmique pour chacun des 3 cultivars avec des valeurs de R² comprises entre 0.94 et 0.96 (Figure 46).

Pour des valeurs de LAI comprises entre 1 et 4, le coefficient cultural de la variété Chen's est plus important que celui de la variété Waha et la variété Vitron qui ont un besoin en eau élevé.

Nous remarquons également, que pour un indice de surface foliaire proche de 5, les coefficients culturaux des 3 variétés sont compris entre 0.8 et 1. Ce n'est qu'à partir de valeurs de LAI ≥ 6 que les coefficients culturaux peuvent approcher ou dépasser l'unité (cas de Vitron).

L'examen de la figure permet de montrer, également, que pour des valeurs de LAI similaires (proches de 3), le coefficient cultural peut passer du simple; 0.4 pour vitron au presque double ; 0.74 pour Chen's en passant par 0.6 pour waha.

Pour des valeurs de LAI ≥ 5, les valeurs des coefficients culturaux des variétés Chen's et Waha prennent pratiquement les mêmes valeurs.

A travers ces résultats, nous pouvons dire qu'au début du cycle de croissance ou les besoins en eau sont relativement faibles, la variété Vitron est en avance du point de vue croissance végétative par rapport aux autres variétés. A titre indicatif, pour un coefficient cultural de 0.3 ; enregistré à la période levée tallage, les LAI correspondantes ; projetés à partir de la figure ci dessous, donnent des valeurs de 1.0, 1.5 et 2.5 respectivement pour Chen's, waha et Vitron.

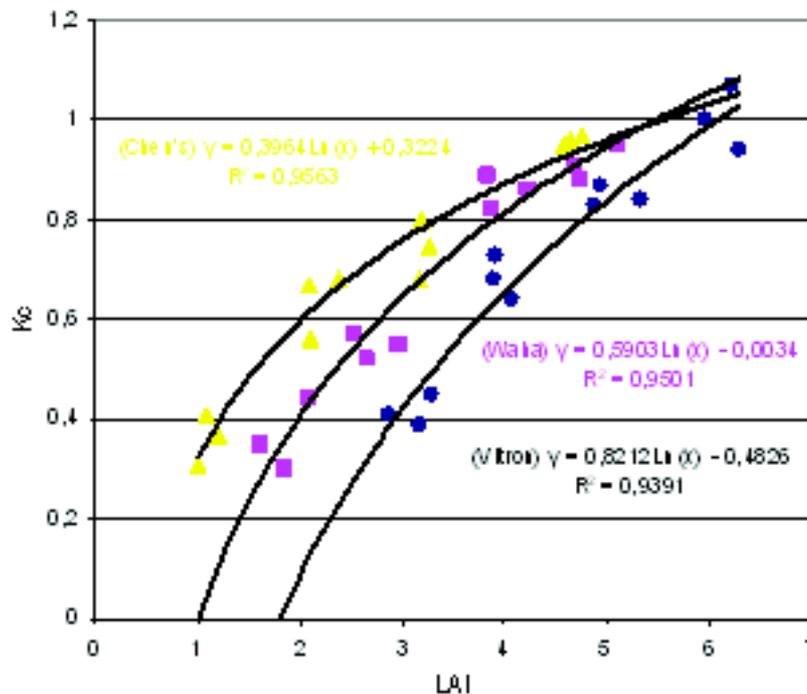


Figure 46 : Relation entre l'indice de surface foliaire (LAI) et le coefficient cultural (Kc)

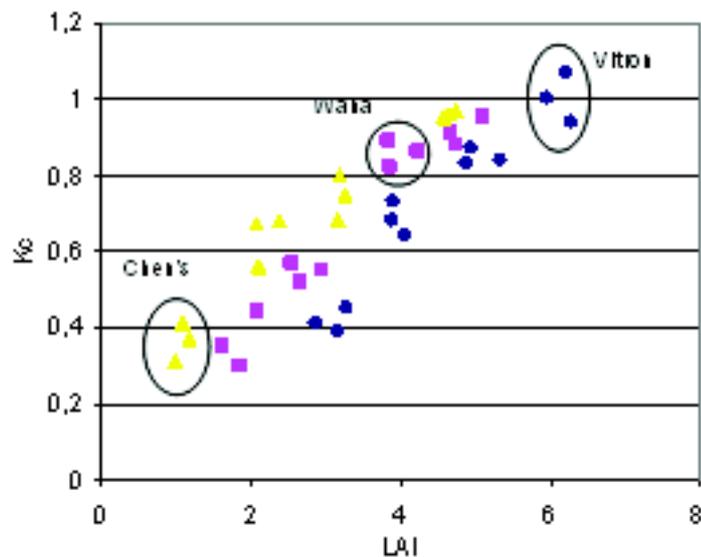


Figure 47 : Relation entre l'indice de surface foliaire (LAI) et le coefficient cultural (K_c) pour les trois variétés de blé

Ces valeurs confirment celles des rendements, en grains et en matière sèche, relativement élevés obtenues par vitron en conditions potentielles par rapport à waha et chen's.

La valeur moyenne pour les 3 cultivars (figure 47) montre que les besoins en eau moyens des 3 cultivars de blé représentent approximativement la moitié de l'évapotranspiration de référence pour des LAI = 2. Les besoins en eau moyens sont au maximum pour des LAI ≥ 5 .

VII-9-Développement et durée de la surface foliaire en relation avec les rendements

La valeur la plus élevée de l'évapotranspiration (ET) pour la variété Vitron (FI) pourrait être liée à la plus longue période de croissance végétative et à la durée de la surface foliaire (Leaf Area Duration: LAD). Quand l'irrigation est entièrement disponible pendant la phase végétative (EI, FI), l'indice de surface foliaire (LAI) est maximum pour la variété Vitron jusqu'au 120-140e jour après semis.

Le LAI est semblable entre les cultivars Vitron et Chen's à partir du 140^e jour après semis en irrigation précoce.

La variété Waha possède la caractéristique de maintenir un indice de surface verte (GAI: Green Area Index) en maintenant un LAI actif particulièrement en condition pluviale (NI) et en irrigation tardive (LI). Cette particularité avantageuse pour la variété Waha est déterminante pour l'élaboration du rendement en condition de déficit hydrique.

Le tableau 15, montre l'analyse de l'interaction stratégies d'irrigation-cultivar sur la durée de la surface foliaire (la surface en dessous de la courbe des LAI). Nous remarquons qu'en matière d'irrigation permanente, la variété Vitron présente les valeurs les plus élevées de LAD par rapport à waha et chen's alors qu'en présence de déficit hydrique modéré (LI)

ou accentué (NI), c'est plutôt waha qui enregistre les meilleures valeurs de LAD par rapport aux deux autres. En irrigation précoce, les trois variétés présentent pratiquement les mêmes valeurs de LAD ou aucune différence significative n'a été enregistrée à $P < 0.001$.

L'évapotranspiration (ET) et la durée de la surface foliaire sont étroitement liés ($R^2 = 0.785$, $P < 0.001$), mais l'augmentation du LAD en irrigation précoce résulte d'une faible utilisation de l'eau que celle utilisée en irrigation tardive.

Stratégies d'irrigation	Cultivars		
	Vitron	Waha	Chen's
FI	543a	498b	475bc
EI	465bcd	447cd	423d
LI	305f	347e	292f
NI	247g	313ef	230g

Tableau 15 : Analyse de l'interaction stratégie d'irrigation-cultivar sur la durée de la surface foliaire (LAD) au cours des 4 saisons de croissance (1998-2001)

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significatives à $P < 0.001$.

Conclusion générale et recommandations

En matière de réponse du rendement à l'irrigation, les résultats obtenus, au cours de ces quatre années d'étude, ont montré que la réponse du rendement à l'utilisation de l'eau par la culture est de forme exponentielle, les stratégies d'irrigation adoptées ont eu des effets significatifs sur les rendements des trois cultivars utilisés.

Comme les précipitations et l'évapotranspiration varient au cours des 4 années, la quantité d'irrigation requise pour chacune des 3 stratégies varie en conséquence. Nos résultats ont indiqué des augmentations moyennes de rendement de $3500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, $1385 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $870 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivement en irrigation potentielle, irrigation précoce et irrigation tardive correspondant à des augmentations relatives de rendement en grains respectives de l'ordre de 270 %, de 107 % et de 67 %.

Plusieurs études ont montré une large réponse du blé dur à l'irrigation dans les régions semi-arides de l'Asie de l'Ouest et de l'Afrique du Nord (WANA). A titre indicatif, une étude menée sur 4 ans au nord de la Syrie a montré qu'une irrigation limitée (1/3 ETM) augmente significativement les rendements. Cependant, des rendements presque maximums sont obtenus à l'aide de 2/3 de l'irrigation permanente.

L'efficacité d'utilisation de l'eau de l'irrigation pour les grains (EUE_{GR}) est plus importante en irrigation précoce (EI) avec une moyenne de l'ordre $10.7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ par rapport à l'irrigation tardive (LI) avec une valeur moyenne de $6.2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ indépendamment du cultivar.

(EUE_{GR}) est maximale en condition potentielle ($12.9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) car c'est la stratégie la plus appropriée : Le nombre de grains, dans ces conditions, a été augmenté de 273 % et le poids du grain de 130 % par rapport à la conduite pluviale. Les deux composantes de rendement sont significativement corrélées au rendement en grains ($R^2 = 0.952$ pour le nombre de grains) et ($R^2 = 0.60$ pour le poids du grain)

Parmi les 3 cultivars, Vitron est la plus efficace ($12.0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$), suivie de Chen's ($9.0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) et Waha ($8.8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) qui ont des valeurs pratiquement semblables.

D'autre part, nos résultats ont montré que L'efficacité d'utilisation de l'eau pour la matière sèche (EUE_{MS}) diminue sous l'effet du déficit hydrique (NI). Ceci pourrait être expliqué par l'augmentation du rapport évaporation du sol (Es)/ Transpiration (T) pour le blé pluvial en relation avec la couverture du sol.

En matière de croissance, les résultats obtenus ont montré qu'aussi longtemps que le LAI est en dessous de 3, une contribution substantielle d'évaporation de sol est généralement prévue. Ce niveau de LAI est seulement réalisé au 125^e jour après semis

sous irrigation tardive mais dès le 70^e jour après semis, sous irrigation précoce et irrigation potentielle, tandis qu'en condition pluviale (NI), le LAI n'a jamais excédé 2.7.

EUE_{GR} et EUE_{MS} sont dépendants du cultivar particulièrement sous irrigation potentielle et condition pluviale.

La forme exponentielle de la relation rendement-indice de récolte est conforme entièrement aux concepts des indices de récolte minimum et maximaux qui sont souvent employés dans des modèles de simulation sous des conditions pluviales. Ces concepts assimilent la redistribution laisse un minimum IR qui est généralement près de 0.20 pour le blé (Debaeke et al., 1996) ; dans des conditions favorables, en dehors d'un stress biotique et abiotique, l'indice de récolte IR est nécessairement limité par la taille du grain et l'activité de la source photosynthétique qui ont pour conséquence des valeurs d'indice de récolte inférieures à 0.50 pour le blé dur.

Des essais de ce type doivent être menés et répétés dans le temps pour différents cultivars dans des environnements différents à l'effet de connaître les interactions Génotype x Environnement afin de mieux optimiser le choix d'une variété de blé par rapport à la disponibilité en eau. Des interactions Génotype x Environnement ont été montrées récemment pour quelques cultivars de blé en conditions pluviales en Algérie (Annicchiarico et al., 2006). A partir de nos résultats, nous avons montré des différences variétales dans la réponse du blé dur à la sécheresse et à l'irrigation de complément qui a eu comme conséquence des interactions, Irrigation-génotype, significatives pour le rendement.

Le rendement relatif (GY/GYFI), calculé pour chaque traitement afin de connaître la réponse du cultivar à l'approvisionnement en eau limité.

Selon cet indice, la variété Waha (0.32 sous le NI, 0.48 sous le LI) est évidemment le cultivar le plus tolérant à la sécheresse sur les 3 cultivars, suivi du cultivar Chen's (0.28 sous le NI, 0.46 sous le LI) et du cultivar Vitron (0.22 sous le NI, 0.42 sous le LI). Chen's est souvent moins sensible à la sécheresse quand le déficit hydrique se produit après l'épiaison (traitement EI). Ces résultats sont conformes à plusieurs études entreprises en Algérie.

En explorant un éventail d'environnements pluvial en Algérie, Annicchiarico et al. (2006) ont rapporté que Chen's et Waha sont plus productives que Vitron.

Le modèle de formation de rendement sous irrigation potentielle n'est pas extrêmement différent entre les trois cultivars mais les composantes de rendement sont différemment affectées par le déficit hydrique. Vitron est plus sensible à la sécheresse que Waha pendant la période d'élongation de la tige (diminution du nombre de grains. m^{-2} en conditions pluviales). Chen's a eu un potentiel de rendement inférieur que les deux autres génotypes mais grâce à la stabilité du poids de ses grains, il est moins affecté que Vitron sous NI. La réponse élevée de Vitron à l'irrigation tardive est due probablement à son caractère relativement tardif.

Plusieurs mécanismes physiologiques pourraient explorer la tolérance à la sécheresse du cultivar Waha. Nos résultats ont précisé un plus grand effet de la consommation en eau ET ainsi que la durée de la surface foliaire LAD que ce cultivar a associé à son meilleur entretien de rendement sous stress hydrique. A partir de la littérature, il est difficile de dire si l'augmentation de l'assimilation de l'eau est un résultat des propriétés intrinsèques pour maintenir le cultivar vert ou si cette assimilation de l'eau est liée à la profondeur d'enracinement.

La sénescence a commencé au 100^e jour après semis sans irrigation, au 120^e jour après semis avec l'irrigation précoce, au 140^e jour après semis en irrigation potentielle ou irrigation tardive. Dans ces conditions, la croissance de la surface foliaire est stabilisée au 100^e jour après semis en raison du stress précoce.

Les différences de LAD entre les génotypes sont de 42-83 m².m⁻².jour selon le régime d'irrigation, alors que les différences entre les régimes d'irrigation sont de 185-296 m².m⁻².jour selon les cultivars

Cependant, des réponses génotypiques significatives ont été observées dans notre étude. Waha a maintenu son LAI actif plus longtemps que les 2 autres génotypes quand la sécheresse s'est produite pendant la période élancement de tige.

Quand l'eau est entièrement disponible pendant cette période, Vitron a développé un LAI élevé avec des conséquences défavorables pour l'épuisement de l'eau du sol.

Le coefficient cultural varie considérablement avec la saison et le cultivar de blé. Les valeurs maximales des coefficients culturaux varient de 0.91 à 0.94 pour les quatre saisons et 1.0 (Vitron), 0.97 (Waha) et 0.89 (Chen's) pour les 3 cultivars.

Le type variétal n'est pas généralement considéré dans les recommandations en irrigation. La plupart des études sur les besoins en eau d'irrigation, selon le groupe de maturité, ont été entreprises sur la culture de maïs. A titre d'exemple, Howell et al. (1998) dans le Texas (USA), ont conclu qu'un hybride ayant une période de maturation courte, peut réduire son évapotranspiration et ses besoins saisonniers d'irrigation de 16 %.

Pour le blé, Debaeke (2004) a utilisé le modèle STICS au sud de la France et au Maroc pour simuler des conditions d'irrigation en fonction de la précocité du cultivar : les besoins annuels d'irrigation sont de l'ordre de 104, 146 et 214 mm ont été simulés pour 3 types variétaux (précoce, moyenne et maturité tardive).

Dans le cas où l'eau d'irrigation est entièrement disponible, le cultivar Vitron serait un bon choix si le potentiel de la culture est réalisable. La protection à l'aide de fongicide serait nécessaire avec cette option en raison de la sensibilité du cultivar car le microclimat de la culture irriguée favorise la diffusion de la maladie.

Dans le cas où les ressources en eau sont limitées, le cultivar Waha serait le meilleur choix à cause de son rendement qui dépasse celui des autres cultivars dans la plupart des situations avec un déficit hydrique modéré. Chen's s'est souvent avéré un cultivar stable avec des besoins en eau faibles pour les régions arides marginales mais avec des rendements potentiels faibles en conditions irriguées.

Dans des régions semi-arides méditerranéennes d'Algérie, quand la sécheresse apparaît rapidement et sévèrement, les cultivars de cycle court ne sont pas une solution adéquate intrinsèquement (Larbi et al., 2000).

Sans irrigation de complément, le choix des cultivars avec des traits intrinsèques de tolérance à la sécheresse est la seule alternative.

Parmi les cultivars de blé du même groupe de maturité, l'établissement de programme d'irrigation devrait être adapté au type de cultivar par rapport au rendement potentiel et au modèle de développement de la surface foliaire. Les modèles de simulation de culture avec des paramètres variétaux peuvent être une voie alternative de calculer les besoins d'irrigation pour des variétés données et d'aider à choisir la variété la plus

appropriée en fonction de la disponibilité de l'eau et des conditions atmosphériques dans un environnement donné

Références bibliographiques

- AFEC.2005. Association France Export Céréales. Journées Franco-Algérienne des céréales. 8 Nov. 2005 Alger.
- Alderfasi, A.A., and D.C. Nielsen.2001. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agric.Water.Manage.* 47: 69-75.
- Al-Khaisi,M.M., A.Berrada, and M.Stack.1997.Evaluation of irrigation scheduling program and spring wheat yield response in south-western. Colorado. *Agric.Water Manage.* 34:137-148.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M.Smith.1998.Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irr.and Drain. Paper n°39, Rome, Italy.
- Alves, I., A. Perrier, and L.S. Pereira.1996. Penman-Monteith equation: how good is the big leaf? *Proc. of intern. Conf. On evapotranspiration and irrigation scheduling.*3-6 Nov. 1996 San Antonio 599-605.
- Amir,Y., D.Djabri, H.Guellil, and A.Youyou.2004. Influence of environmental factors on the quality of wheat grown in Algeria. *Food Agric..and Envir.*Vol. 2 (2) 315-319.
- Anderson, W.K., and W.R. Smith. 1990. Yield advantage of two semi-dwarf compared with two tall wheat depends on sowing time. *Aust. J. Agric. Res.* 41: 811-826.
- [Annicchiarico,P](#) ., F. [Bellah,](#) and T. [Chiari](#) . 2006. Repeatable genotype x location interaction and its exploitation by conventional and GIS-based cultivar recommendation for durum wheat in Algeria. *Eur. J. Agron.* 24: 70-81.
- Baldy, C.1973. Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du blé. *Ann.Agron.* 24 (2).
- Baldy,C.1974.Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques. Leurs influences sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. *Projet céréales.*
- Baldy,C.1985.Contribution à l'étude des applications de la bioclimatologie végétale à l'agrométéorologie des zones arides et semi-arides en climat méditerranéen et tropical. *Thèse.doct.* Marseille. France.
- Bamouh, A., and A. Bouaziz, 1986. Effet du déficit hydrique en début du cycle en interaction avec le niveau d'azote sur l'élaboration du rendement du blé tendre. *RevueActes. IAV Haasan II.* Vol. 6 (2).
- Bandyopadhyay,P.K., and S.Mallick. 2003. Actual evapotranspiration and crop coefficients of wheat (*Triticum aestivum*) under varying moisture levels of humid tropical canal command area. *Agric.Water.Manage.*59: 33-47.
- Barraclough, P.R., R.E. Kuhlman, and A.H. Weir.1989. The effect of prolonged drought and nitrogen fertilizer on root and shoot growth and water uptake by winter wheat. *J. Agronomy.* 163.

- Bauder, T.A., R.M. Waskom, and J.G. Davis. 2006. Irrigation water quality criteria. CropSeries Note n° 506. Colorado State University Cooperative Extension, 4 p.
- Belaid, A. 2002. Durum production shortfalls in North Africa: Some facts. ICARDA Caravan. 16: 42–43.
- Benbelkacem, A., et K. Kellou. 2004. Evaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum Turgidum* L. var. durum) cultivées en Algérie. CIHEAM Options Méditerranéennes.
- Benlaribi M, P. Monneveux, et P. Grignac. 1990. Etude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). *Agronomie* 10:305-322.
- Blum, A., and Y. Pnuel. 1990. Physiological attributes associated with drought resistance of wheat cultivars in a Mediterranean environment. *Aust. J. Agric. Res.* 41: 799-810.
- Bouaziz, A. 1987. Etude de la croissance racinaire chez quelques variétés de blé en zone semi-aride du Maroc. Thes. Doc. IAV Hassan II.
- Boutfirass, M. 1990. Irrigation d'appoint et efficacité d'utilisation de l'eau en zones semi--arides : cas du blé tendre. Mémoire de 3^e cycle . Option Agronomie IAV Hassan II . Rabat.
- Bouthiba, A. 1996. Contribution à l'étude de l'irrigation de complément du blé dans la région du moyen Chélif. Thes. Magister. INA El-harrach. pp.140
- Bouthier, A., J.M. Deumier, and J.P. Bonnifel. 2000. Gérer les ressources en eau: Optimiser l'irrigation des céréales. *Persp. Agric.* n° 256.
- Bouzerzour H., and M. Oudina. 1990. The response of durum wheat to early sowing and supplementary irrigation in the eastern high plains of Algeria. *Rachis* 9: 22-25.
- Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeufroy, F. Ruget, B. Nicoulaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, XTayot, D. Plenet, P. Cellier, J.M. Machet, J.M. Meynard, and R. Delécolle. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterisation applied to wheat and corn. *Agronomie*. 18: 311-346.
- Caliandro, A., and F. Boari. 1996. Supplementary Irrigation in Arid and Semi arid Regions. *Medit.* 1 (96).
- Campbell, C.A., F. Selles, R.P. Zentner, and R.G. McConkey. 1993b. Available water and nitrogen effects on yield components and grain nitrogen of zero-till spring wheat. *Agron. J.* 85: 114-120.
- Cargnel, M.D., A.L. Orchansky. R.F. Brevedan, G. Luayza, and R. Palomo. 1996. Evapotranspiration measurements over a soybean crop. Proc. of intern. conf. on evapotranspiration and irrigation scheduling. 3-6 Nov 1996 San Antonio, 304-308.
- Changming, Liu., X. Zhang, and Y. Zhang. 2002. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agric. Forest. Meteor.* 111: 109-120.
- CIC. 2000. Direction de l'adaptation et de la politique des grains. *Agric. Agro.* Vol.13 n°11. Canada.

- Cooper, P.J.M., P.J. Gregory, D. Tully, and H.C. Harris.1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Exp. Agric. Farming Syst. Ser-5* 23: 113-158.
- Daaloul, A., H. Bchini, et B. Sayar.2006. Variabilité génétique de quelques paramètres du système racinaire du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous deux régimes hydriques. *129*: 25-31.
- Dakkaki, M., L. Sabour, S. El-Jaafar, et M. Amssa.1996. Effet des basses températures et du stress hydrique sur la cinétique de l'induction de la fluorescence chlorophyllienne chez le blé : III^e réunion du réseau SEWANA (South Europe, West Asia, North Africa) sur l'amélioration intégrée du blé dur, 5-7 Décembre 1996 Rabat, Maroc.
- Dardanelli, J.L., J.T. Ritchie, M. Calmon, J.M. Andriani, and D.J. Collino.2004. An empirical model for root water uptake. *Field Crop. Res.* 87: 59-71.
- Davidson, D.J., and P.M. Chevallier. 1990. Pre-anthesis tiller mortality in spring wheat. *Crop. Sc.* 30 : 832-836.
- Debaeke, P, J. Puech, et M.L.Casals.1996. Elaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. I. Etude en lysimètres. *Agronomie.* 16: 3-23.
- Debaeke, P.2004. Scenario analysis for cereal management in water limited conditions by the means of a crop simulation model (STICS) *Agron.* 24: 315-326.
- Dodds, P., W.S. Meyer, and A. Barton.2005. A review of methods to estimate irrigated reference crop evapotranspiration across Australia. Report n° 04/05, April 2005.
- Doorenbos, J., and A.H. Kassam.1987. Yield response to water, *Irrig. And Drain. Paper* 33, FAO, Rome (Italie)..
- Doorenbos, J., and W.O. Pruitt.1984. Crop water requirements. *Irrig. And Drain. Paper* 24. FAO, Rome (Italie).
- Doorenbos, J., and W.O. Pruitt.1997. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrig. And Drain. Paper* 24, FAO, Rome (Italie).
- DSA de Chlef.2006. Les cultivars de blé dans la vallée du Chélif. Performances de rendements et perspectives.
- Duivenbooden, N.V., M. Pala, C. Studer, and C.L. Biielders.1999. Efficient soil water use: The Key to sustainable crop production in the dry areas of west Asia and North and sub-Saharan Africa. In: Proceedings of the Workshops organized by the optimizing Soil Water Use Consortium. Niamey. Niger, 26-30 April 1998 and Amman. Jordan. 9-13 May 1999. International Center for Agric. Res. in the Dry Areas (ICARDA). Aleppo, Syria, p.490.
- Eck, H.V. 1988. Winter wheat response to nitrogen and irrigation. *Agron. J.* 80: 902-908.
- Ehdaie, E. 1995. Variation in water use efficiency and its components in wheat. II. Pot and field experiments. *Crop. Sc.* 35: 1617-1626.
- Elhafid R., D.H. Smith, M. Karrou, and K. Samir.1998. Physiological Responses of Spring Durum Wheat Cultivars to Early-season Drought in a Mediterranean Environment. *Ann. Bot.* 81: 363-370.

- El-Mourid, M.1988. Performance of wheat and barley cultivars under different soil moisture regimes in a semi-arid region. Ph.D. Dissertation, Iowa State University. Ames, Iowa, USA.
- Evet, S.R., T.A Howel, J.L. Steiner, and J.L. Cresap.1993. Evapotranspiration by soil water balance using TDR and neutron scattering. Management of irrigation and drainage Systems. Integrated Perspectives. Eds. R G Allen and CMU Neale. pp. 914-924. Ann. Soc.Civil Engr., New York. NY.
- Fahong, W., W. Xuqing, and K. Sayre.2004. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China. *Field.Crops.Res.*87: 35-42.
- FAO. 2003. <http://fao/wheat/algériaagec.htm>
- Fisher, R.A.1973.The effects of water stress at various stages of development in yield processes in wheat. In: Plant response to climatic factors. Proc .Symp Uppsala, Sweden. 15–20 Sept. 1970. UNESCO, Paris. pp. 169–174.
- Garcia Del moral, L.F., Y. Rharrabti, D. Villegas, and C. Royo. 2003. Evaluation of Grain Yield and its Components in Durum Wheat under Mediterranean Conditions: An Ontogenic Approach. *Agron. J* 95: 266-274.
- [Gebeyehou, G](#) , D.R. [Knott](#), and R.J. Baker.1982. Relationships among durations of vegetative and grain filling phase, yield components and grain yield in durum wheat cultivars. *Crop. Sci.* 22: 287-290.
- Ghouar, W.2006. Effet du cumul de pluie hivernale sur la réponse du cultivar Waha (Triticum Durum Desf.) à la fertilisation azotée. Thèse. Magister. Univers. Batna 121p.
- Ghulam H., and A. Al-Jaloud.1995. Effect of irrigation and nitrogen on water use efficiency of wheat in Saudi Arabia. *Agric.Water Manage.* 27: 143-153.
- Ghulam H., A. Al-Jaloud, and S. Karimulla. 1996. Effect of treated effluent irrigation and nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of wheat. *Agric.Water.Manage.*30: 175-184.
- Ghuman, B.S., and P.R. Maurya.1986. Response of wheat to irrigation in a tropical soil. *Agron. J.* 78.
- Hatfield J.L., J.S Thomas, and H.P. John. 2001. Managing soil to achieve greater water use efficiency: a review, *Agron. J.* 93: 271-280.
- Hayak, T., M. Bensalem, et E.Zidi.2000. Mécanisme ou stratégie de résistance à la sécheresse : cas du blé, de l'orge et du Triticale. *Options Méditerranéennes Zaragoza.* 40 : 287-290.
- Hazmoune, T.2002. Erosion des variétés de blé dur cultivées en Algérie, Perspectives. CIHEAM-Options Mediterraneenes.
- Hemmat, A., and O. Taki.2001.Grain yield of irrigated winter wheat as affected by stubble-tillage management and seeding rates in central Iran. *Soil & Tillage Res.* 63: 57-64.
- Howell, T.A., J.L Steiner, A.D Schneider, S.R Evett.1995. Evapotranspiration of irrigated winter wheat: Southern high plains. *Trans ASAE* 38: 745-759.

- Howell, T.A., J.A Tolk, , A.D Schneider, and S.R Evett.1998. Evapotranspiration, Yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. *Agon. J.* 90: 3-9.
- Howell, T.A.2001.Enhancing water use efficiency in irrigated Agriculture. *Agron. J.* 93: 182-189.
- IDGC.1974. Les principales caractéristiques des variétés des céréales cultivées en Algérie. MARA . Projet céréales, IDGC, Alger.
- Itier, B., Y. Brunet, R.H. McAnnemy, and J.P. Lagouarde.1994. Downwind evolution of scalar flux and surface resistance under conditions of local advection. Part II. Measurements over barley, *Agric. For Meteorol*, 71: 227-245.
- Itier, B., and Y. Brunet. 1996. Developments and present trends in evaporation research: A partial survey. *Proc. of intern. conf. on evapotranspiration and irrigation scheduling.* 3-6 Nov 1996 San Antonio, 1-20.
- Johnson, W.D., and R.G. Davis.1980. Yield-water relationships of summer fallowed wheat: A precision study in the Texas Panhandle. *USDA-ARS ARR-S-5.*
- Jones O.R., and T.W Pophan.1997. Cropping and tillage systems for dryland grain production in Southern High Plains. *Agron. J.* 89 : 222-232.
- Kang, S., Lu. Zhang, Liang Yinli, Hu Xiaotao, Cai Huanjie, and Gu. Binjie.2002. Effects of limited irrigation and yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess of China. *Agric. Water Manage.*55: 203-216.
- Kang, S., Lu Zhang, Y.Liang, and W. Dawes. 2003. Simulation of winter wheat yield and water use efficiency in the Loess Plateau of China using WAVES. *Agric. System* 78: 355-367
- Khaldoun A, Chery J, and Monneveux P.1990. Etude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez l'orge (*Hordeum vulgare L.*). *Agronomie* 10:369-379.
- Kribaa,M., S.Hallaire, and J.Curmi.2001. Effects of tillage methods of soil hydraulic conductivity and durum wheat grain yield in semi- arid area. *Soil and Tillage.* 37: 17-28.
- [Larbi, A](#) ., A. [Mekliche](#), R. [Abed](#), et M. [Badis](#) .2000. Effet du déficit hydrique sur la production de deux variétés de blé dur (*Triticum turgidum L. var. durum*) en région semi-aride. *Options Méditerranéennes, CIHEAM, Série A*, 40: 295-297.
- Latiri-Souki, K., S. Nortcliff, and D.W Lawlor.1998. Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation and water use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions. *Eur. J. of Agron.* 9 : 21-34.
- Legg, B.J., W. Day, D.W. Lawlor, and K.J Parkinson. 1979. The effects of drought on barley growth: models and measurements showing the relative importance of leaf area and photosynthetic rate. *J. Agric. Sci.* 92: 703-716.
- Li, F.M., X.Yan, Xun, F.R Li, and A.H. GUO. 2001. Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semi-arid environment. *Agric.Water. Manage.* 47: 25-35.
- Li, J.K. and B. Lin.1999. Contribution and expectation of chemical fertilizer in Chinese agricultural development. ©.In proceedings of the international Fertilizer and

- Agricultural Development. Symposium China Agricultural science and Technology Press. Beijing p-5 (in Chinese).
- Li, C., X. Zhang, and Y. Zhang. 2002. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agric. Forest. Meteor.* 111: 109-120.
- Magrin, G. 1990. Facteurs de stress agissant sur la production du blé en Argentine. Evaluation de mécanismes d'adaptation à la sécheresse. Th..doc.Ing. ENSA Montpellier France.
- Maihlol, J.C., P. Ruelle, and L. Nemeth. 2001. Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrig. Sc.* 20(3) 139-147.
- Mc Intyre, B.D., S.I Riha, and D.J Flower. 1995. Water uptake by pear millet in a semi-arid environment.. *Field Crops. Res.* 43: 67-76.
- Majumdar, D.K. et M. Mandal. 1984. Effect on irrigation based on pan evaporation and nitrogen levels on the yield and water use in wheat. *Indian J. Agric. Sci.* 54: 613-614.
- [Medeiros, G.A](#) , [F.B Arruda](#) , and [E. Sakai](#). 2005. Crop coefficient for irrigated beans derived using three reference evaporation methods. *Agric For Meteorol.* 135: 135-143
- Mekhlouf, A., H. Bouzezour, A. Benmahammed, A. Hadj Sahraoui, et N. Harkati. 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse.* 17(4) 507-513.
- Mekliche, A., 1976. Etude de la production de blé tendre (Siète Cerros) avec complément d'irrigation. Th. Ing. INA El-harrach 102p.
- Merabet B.A, et A. Bouthiba. 2004. Effet de l'irrigation de complément sur quelques variétés de blé dur dans une région semi-aride (Plaine du Cheliff) Annales INA El-Harrach (Alger). 25: 89-107.
- Merabet B.A, et A. Bouthiba. 2005. Influence de la nature du matériel végétal et de la variabilité climatique interannuelle dans une plaine semi-aride d'Algérie. *Sc. & Tech. C.* 23.
- Merabet B.A, et A. Bouthiba. 2006. Etude du comportement de la variété de blé dur améliorée Tassili conduite en sec et en irrigué vis-à-vis de la variabilité de la pluviométrie interannuelle et de l'efficacité d'utilisation de l'eau. *Ann. de l'INA*, Vol. 27 1 et 2.
- Meyer, W.S., and A.M. Alston 1978. Resistance to water flow in the seminal roots of wheat. *Journ. Exp. Bot.* Vol. 29 n°113.
- Meyer, W.S., D.J Smith, and G. Shell. 1999. Estimating reference evaporation and crop evapotranspiration from weather data and crop coefficients. CSIRO. Land and water technical report. 34/98, October 1999.
- Monneveux, P. 1989. Quelques stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver. Journées scientifiques AUPELF-UREF.
- Monneveux, P., D. This, et E. Belhassen. 1997. Amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse. L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau.. INRA Editions & AUPELF-UREF, Paris, pp.121-142.

- Monteny, B.A. 1970. Bilans hydrique et énergétique d'une culture de blé en région semi-aride . INRA. Tunis. Vol. 41.
- Moule C. 1980. Bases scientifiques et techniques de la production des principales espèces de grande culture en France. Edit. Maison Rustique. Paris.
- Mouret, J.C., A.P. Conesa, et A. Bouchier. 1991. Identification des facteurs de variabilité du rendement de blé dur en conditions hydriques limitantes dans la région de Didi Bel-Abbes (Algérie)
- Mugabe, F.T., and E.Z Nyakatawa.2000. Effect of deficit irrigation on wheat and opportunities of growing wheat on residual soil moisture in southeast Zimbabwe.Agric..Water.Manage. 46: 111-119.
- Musick, J.T., and D.A Dusek.1980a. Planting date and water deficit effects on development and yield of irrigated winter wheat. Agron. J. 72: 45-52.
- Musick, J.T., O.R Jones, B.A Stewart, and D.A Dusek.1994. Water yield relationships for irrigated and dryland wheat in the US Southern Plains. Agron. J. 86: 980-986.
- Nallet, H. 1990. Eau et agriculture. Leçons d'une sécheresse. Actes du Coll. Paris.
- Norwood C.A. and T.J. Dumler.2002. Transition to dryland agriculture: limited irrigation vs. dryland corn. Agron.J. 94: 310-320.
- Ouattar, S., T.E. Ameziane, M. Tayaa et A. Baidada.1990. Elaboration et validation d'un modèle de simulation du déficit hydrique. Applications aux études climatiques et agro-climatiques régionales. Revue APAMA, Vol. 1.
- Ouedraogo, L. 1992. Etude agronomique et physiologique de cultures de Sorgho conduits en sec et différents niveaux d'irrigation à Lavalette (Montpellier). Mem.ing. Tech.Agric. INRA Montpellier.
- Oweis,T. 1997. Supplemental irrigation: A highly efficient water Use Practice. ICARDA, Aleppo, Syria, 16 pp.
- Oweis,T., A. Salkini, H. Zhang, A. Ilbeyi, H. Ustin, Z. Dernek, O.Erdem.2001. Supplemental irrigation Potential for wheat in Central Anatolian Plateau of Turkey, ICARDA, Aleppo , Syria, v + 37 pp.
- Oweis,T., M.Pala, and J.Ryan.1998.Stabilizing Rainfed wheat yields with supplemental irrigation and Nitrogen in a Mediterranean Climate. Agron. J. 90: 672-681.
- Oweis, T., M. Pala, and J. Ryan. 1999. Management alternatives for improved durum wheat production under supplemental irrigation in Syria. Eur. J. of Agron.11: 255-266.
- Oweis,T., and A. Hachum. 2003. Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa In: Kijne, W.J., R. Barker, R. Molden, (Eds). Water productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for improvement. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 179-197.
- Oweis,T., A.Hachum, and M. Pala. 2004.Water use efficiency of winter sown chickpea under supplemental irrigation in a Mediterranean environment. Agric.Water.Manage.2004.
- Pandey, R.K., J.W Maranville. And M.M Chetima. 2001a. Tropical Wheat response to irrigation and nitrogen in Sahelian environment. II.Biomass ccumulation, nitrogen uptake and water extraction. Eur. J. of Agron. 15: 107-118.

- Pandey, R.K., J.W Maranville, and A. Admou. 2001b. Tropical Wheat response to irrigation and nitrogen in Sahelian environment. I. Grain yield, yield components and water use efficiency. *Eur.J. of Agron.* 15: 93-105.
- Passioura, J.B., 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *J. Austr.Inst. Agric.Sci.* 43: 117-120.
- Perrier, E. and A.B Salkini. (Eds) 1991. Supplemental irrigation in the Near East and North Africa. Kluwer. Acad. Publ., Dordrecht, the Netherlands.
- Prihar, S.S., et B.S. Sandhu. 1987. Irrigation of Field Crops-Principles and Practices. I.C.A.R, New Delhi, India.
- Rekika, D. M. Nachit, J.L. Araus and P. Monneveux. 1998. Effects of water deficit on photosynthetic rate and osmotic adjustment in tetraploid wheats. *Photosynthetica* 35 (1): 129-138.
- Rezgui, M., A. Zairi, E. Bizid et N. Benmechlia. 2005. Consommation et efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (*Triticum Durum* Desf.) cultivé en conditions pluviales et rigüées en Tunisie. *Cah. Agric.* Vol. 14 n°4.
- Rharrabti, Y., C. Royo, D. Villegas, N. Aparicio, and L.F. Garcia del Moral. 2003. Durum wheat quality in Mediterranean environments I. Quality expression under different zones, latitudes and water regimes across Spain. *Field Crops Res.* 80: 123-131.
- Ritchie, J.T. 1983. Efficient water use in crop production: Discussion on the generality of relations between biomass production. and evapotranspiration. In: Taylor . H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.), *Limitation to Efficient Water use in crop production.* Amer. Soc. of Agron. Madison, WI, pp. 29-43.
- Ritchie, J.T., J.R Kinity, C.A Jones, and P.T Dyke. 1986. Model inputs in: CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development. (C.A., Jones and J.R., Kinity, eds), pp. 38-48 Texas A & M University Press, College Station, Texas.
- Royo, C., M. Abaza, R. Blanco, and L.F. Garcia Del Moral. 2000. Triticale grain growth and morphometry as affected by drought stress, late sowing and simulated drought stress. *Austr. J. Plant. Physiol.* 27: 1051-1059.
- Royo, C., N. Aparicio, R. Blanco, and D. Villegas. 2004. Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 20: 419-430.
- Sadrás, V. 2002. Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. *Field Crops Res.* 77: 201-215.
- Sandhu, K.S, D.K. Benbi, and S.S Prihar. 1996. Dryland wheat yields in relation to soil organic carbon, applied nitrogen, stored water and rainfall distribution. *Fert. Res.* 44 : 9-15.
- Sarr, B.O. Diouf, M. Diouf, H. Roy-Macauley, et S. Ndjendole. 1999. Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal. *Cah. Sech.* 10 (2) 129-135.
- Shan, L. 1994. The relationship between crop water use efficiency and agricultural water use in semi-arid regions. *Plant. . Physiol. Commun* 30(1) 61-64.

- Sharma, A.K., R.K Sharma, and K. Srinivasa Babu. 2004. Effect of planting options and irrigation schedules on development of powdery mildew and yield of wheat in the North Western plains of India. *Crop prot.* 23: 249-253.
- Shepherd, K.D., P.J.M. Cooper, A.Y. Allan, and D.S.H. Drennan. 1986. Growth water use and yield of barley in Mediterranean-type environments. *J. Agric. Sci. Camb.* 108: 365-378.
- Siddique, K.H.M., D.Tennant, M.W. Perry, and R.K. Belford. 1990. Water use and water use efficiency of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean type environment. *Austr. J. Agric. Res.* 41: 431-447.
- Siddique, K.H.M., K.L Regan, D. Tennant, and B.D Thomson. 2001. Water use and water use efficiency of cool season grain legumes in low rainfall Mediterranean-type environments. *Eur. J. of Agron.* 15: 267-280.
- Simane, B., J.M Peacock, and P.C Struik. 1993. Differences in developmental plasticity and growth rate among drought resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum Turgidum* L. var. durum). *Plant. Soil* 157: 155-166.
- Smith, R.C.G., and H. Harris. 1981. Environmental resources and restraints to agricultural production in a Mediterranean type environment. *Plant. Soil.* 58: 31-57.
- Stanhill, G. 2002. Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements? *Agric For Meteorol* 112: 233-236.
- Stark, J.C., and T.S Longley. 1986. Changes in spring wheat tillering patterns in response to delayed irrigation. *Agron. J.* 78.
- Statistique Agricole I. 2000: Statistiques des approvisionnements du secteur Agricole. Ministère de l'Agriculture. Direction des statistiques agricoles. et des enquêtes économiques.
- Steiner J.L., R.C.J. Smith, W.S. Meyer, J.A Adeney. 1985. Water use, foliage temperature and yield of irrigated wheat in South-Eastern Australia. *Austr. J. Agric. Res.* 36: 1-11.
- Stem, R.D., M.D Dennet, and I.C Date. 1982. Analysing daily rainfall measurements to give agronomically useful results. II. A modelling approach. *Exp. Agr.* 18:137-153.
- Stewart, B.A., and T.R Musick. 1982. Conjunctive use of rainfall in irrigation in semi-arid regions. *Ado. Irrig.* 1: 1-24.
- Tanner, C.B., T.R Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: Research or re-search? In: Taylor, H.M, Jordan, W.R , Sinclair, T.R . (Eds). *Limitations to efficient water Use in Crop Production.* American Society of Agronomy Madison WI pp.29-43.
- Tavakkoli, A.R. V. Belson, and F. Ferri. 2000. Effects of supplemental irrigation on advanced wheat varieties on raifed condition. Final Report. Dryland Agricultural Research Institute (DARI) Maragheh, Iran.
- Tavakkoli, A.R., and T. Oweis. 2004. The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. *Agric. Water Manage.* 65 225-236.
- Thevenet, G. 1990. Quelques réflexions agronomiques autour de la sécheresse 1989. Conséquences sur les principales cultures. Actes du coll. Eau et Agriculture.

- Timsina, J., U. Singh, M. Badaruddin, C. Meisner, and M.R Amin. 2001. *Field Crops Res.* 72: 143-161.
- Travasso, M.I. 1990. Evaluation des facteurs agro-climatiques limitants le rendement du blé dans le sud de Buenos Aires, Argentine. Essai de modélisation à l'échelle régionale. Th. Doc.Univer.Paris. Centre Orsay. 96p.
- Van Andel, J., and J.C Jager. 1981. Analysis of growth and nutrition of six plant species of woodland clearings. *J. Ecol.* 69: 871-882.
- Vilain, M. 1987. La production végétale. Les composantes de la production. Edit. Baillière. 416 pp.
- Villegas, D., N. Aparicio, R. Blanco, and C. Royo.2001. Biomass accumulation and Main Stem Elongation of Durum Wheat Grown under Mediterranean Conditions. *Annals of Botany* 88: 617-627.
- Wang, H.X., L. Zhang, W.R. Dawes, and C.M. Liu. 2001. Improving water use efficiency of irrigated Crops in the North China Plain – Measurement and modelling *Agric.Water. Manage.* 48: 151-167.
- Wenlong, Li., Li.Weide , and Li. Zizhen. 2004. Irrigation and fertilizer effects on water use and yield of spring wheat in semi-arid regions. *Agric.Water.Manage.* 67(1): 35-46.
- Wenlong, Li., Li. Zizhen, and Li.Weide. 2004. Effect of niche-fitness at different water supply and fertilization on yield of spring wheat in farmland of semi-arid areas.*Agric..Water.Manage.* 67 (1): 1-13.
- Xue, Q., Z. Zhu, J.T Musick, B.A Stewart , and D.A Dusek. 2003. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. *Plant and Soil* 257: 151-161.
- Zhai, B.N., S.X. Li, and Y.T. Qi.2001. Effects of nitrogen fertilizer on winter wheat yield and its component under different status of soil moisture. *Acta. Bio. Boreal. Occident. Sin.* 21 (3) 462-467.
- [Zhang,H.P](#) ,T. [Oweis](#) , S. [Garabet](#) , and M. [Pala](#) .1998. Water-use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rain-fed conditions and supplemental irrigation in a Mediterranean-type environment. *Plant Soil* 201: 295-305.
- Zhang,H.,and Oweis, T.1999.Water- yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agric.Water.Manage.*38: 195-211.
- Zhang,Y., E. Kendy, Y. Qiang, C. Liu, Y. Shen, and H. Sun.2004. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agric.Water. Manage.* 64: 107-122.
- Ziaei, A.N., and A.R. Sepaskhah. 2003. Model for simulation of winter wheat yield under dry land and irrigated conditions. *Agric.Water. Manage.* 58: 1-17.
- Zizhen, L., and L. Hong.1998a. Research on the regulation of water and fertilizers and a crop growth model of spring wheat in farmland of semi-arid regions. *Ecol.Model.* 107: 279-287.
- Zi-Zhen, Li., Li. Wei-De, and Li. Wen-Long.2004. Dry-period irrigation and fertilizer application affect water use and yield of spring wheat in semi-arid regions. *Agric. Water. Manage.* 65: 133-143.