

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
Ecole Nationale Supérieure Agronomique

THÈSE

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques
Département : Hydraulique Agricole
Spécialité : Hydraulique Agricole

Thème

**Besoins en eau et maîtrise de l'irrigation d'appoint
Du blé dur dans la vallée du Chélif**

Soutenue : 11 mars 2015
Présentée par : **Abdelkader MEROUCHE**

Devant le Jury, composé de :

<i>Président</i>	M ^r AIDAOUI A	Professeur ENSA El –Harrach (Alger)
<i>Directeur de Thèse</i>	M ^r MESSAHEL M	Professeur ENSH Blida
<i>Examineurs</i>	M ^r CHABACA M N	Professeur ENSA El –Harrach (Alger)
	M ^r BOUTHIBA A	Professeur Université de Chlef
	M ^r MOKABLI A	Professeur Université de Khemis-Miliana
	M ^r MILOUDI A	Maître de Conférence Université de Mascara

Année Universitaire
2014-2015

Dédicaces

Je dédie cet ouvrage

à la mémoire de ma mère,

à mon père,

à ma femme

et à mes enfants.

Remerciements

Je commence d'abord à remercier le Bon Dieu car sans lui l'achèvement de la présente étude n'a été possible. Tout projet important nécessite diverses contributions pour connaître le jour.

Je dois remercier vivement mon directeur de thèse Monsieur Messahel Mekki, professeur à l'ENSH de Blida d'avoir accepté de diriger ce travail, pour ses conseils, sa patience et ses encouragements qu'il n'a cessé de me les exprimer sur toute cette période pour l'achèvement de la présente étude.

Mes profonds remerciements vont également à Monsieur Philippe Debaeke, directeur de recherche à l'INRA de Toulouse pour son esprit scientifique et humanitaire sans frontière. Je ne pourrais en aucun cas oublier sa contribution dans la préparation de l'article de recherche.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Jean-Claude Mailhol du Cemmagref de Montpellier pour ses conseils ainsi que les logiciels de calcul qu'il m'a donnés.

Je remercie beaucoup mon Collègue Monsieur Kekouli Mokhtar pour sa contribution pratique et ses conseils dans la réalisation des expérimentations.

Je remercie tout le personnel de l'ITGC de Khemis-Miliana pour les facilités qu'ils m'ont apportées pour la réussite de ce travail.

Je remercie ma femme qui m'a donné le courage et sur laquelle je comptais beaucoup surtout durant mes séjours à l'étranger où elle prenait en charge l'entière responsabilité de la petite famille.

Je remercie infiniment Monsieur Aidaoui Abdellah, professeur à l'ENSA d'El-Harrach d'avoir accepté sans la moindre hésitation de présider le présent jury pour l'évaluation de cette thèse.

Je remercie infiniment tous les membres de Jury d'avoir accepté avec chaleur de contribuer à l'évaluation du présent travail malgré leurs lourdes charges : Monsieur Chabaca Nacer, professeur à l'ENSA d'El-Harrach, Monsieur Bouthiba Abdelkader, professeur à l'université de Chlef, Monsieur Miloudi Ali, professeur à l'université de Mascara et Monsieur Mokabli Aissa, professeur à l'université de Khemis-Miliana.

Résumé

La réponse du blé dur à l'utilisation des eaux de pluie et l'irrigation d'appoint a été étudiée durant 8 années sous les conditions semi-arides de la région du Chélif, achevée par étude de discrimination isotopique durant la neuvième année.

Deux régimes d'eau, pluvial et irrigué en relation avec les précipitations et les stades de la culture ont été appliqués sur six variétés : Bousselam (B), Chen's (C), Mohammed Ben Bachir (MBB), Mexicali (M), Vitron (V), et Waha (W). La période (2001-2009) a été caractérisée par une grande variabilité de la répartition des quantités de précipitations : de 287 mm (2001-02) à 512 mm (2008-09).

Le rendement en grain en pluvial varie de 9 q.ha⁻¹ (2004) à 28 q.ha⁻¹ (2009) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 45 q.ha⁻¹. Parmi les facteurs majeurs limitant l'efficacité de l'irrigation sont les fortes températures dues aux vents chauds durant la phase floraison et formation du grain qui causent des pertes du nombre de grain par épi.

La productivité des eaux de pluie (PEP) varie de 0.9 pour Mexicali et Vitron à 1 à 1.1 kg.m⁻³ pour Waha, Bousselam, et Chen's. Elle est seulement 0.5 kg.m⁻³ pour la variété locale Mohammed Ben Bachir. En absence de sécheresse précoce, PEP peut atteindre 1.4 kg.m⁻³ pour les variétés les plus productives.

L'irrigation d'appoint est une méthode efficace pour atteindre des gains de rendement en grain de 7 à 25 q.ha⁻¹ suivant le déficit climatique et la stratégie d'irrigation. La sensibilité des variétés à la sécheresse dépend des moments de l'apparition de cette dernière. Cependant les interactions observées entre les variétés et les stratégies d'irrigation pour le rendement en grain et ses composantes ne sont pas significatives. Les composantes du rendement les plus explicatives du rendement final en pluvial sont le nombre d'épi .m⁻² et le nombre de grain par épi. En irrigué, le nombre de grain par épi et le poids de mille grain sont les plus importants pour la détermination du rendement final.

Des corrélations et des modèles de relations significatifs ont été obtenus entre les isotopes stables, principalement le carbone grain et les autres indices morpho-physiologiques ainsi que le rendement et ses composantes. Cela confirme bien que les isotopes sont des indicateurs du stress hydrique et sont donc conseillés comme critère pour l'étude de la tolérance des variétés à la sécheresse.

Mots-clés : Blé dur, irrigation d'appoint, sécheresse, variétés, semi-aride, composantes du rendement, isotopes, indices de végétation.

Abstract

The response of durum wheat yield to available water from precipitation and irrigation was studied during 8 years under semi-arid conditions of region chéllif, finished by a study on the isotopic discrimination during the ninth year.

Two water regimes, rainfed and irrigated according to precipitation and growth stage, were applied to 6 cultivars: Bousselam (B), Chen's (C), Mohammed Ben Bachir (MBB), Mexicali (M), Vitron (V), and Waha (W). The 2001-2009 period was characterized by a wide variability of rainfall distribution and amount: from 287 mm (2001-02) to 515 mm (2008-09).

Rainfed yield ranged from 0.9 (2004) to 2.8 t.ha⁻¹ (2009) while irrigation resulted in a maximal production of 4.5 t.ha⁻¹ (2009). One major limitation to irrigation performance was sirocco wind at flowering stage with severe damage on the number of grains per spike.

Crop water productivity (CWP) from precipitation ranged from 1 to 1.1 kg.m⁻³ for Waha, Bousselam and Chen's to 0.9 for Mexicali and Vitron while CWP was only 0.5 for the local variety. CWP may range from 1.4 kg.m⁻³ without early drought for the most productive cultivars to 0.37 kg.m⁻³ for MBB with late drought.

Supplemental irrigation is an efficient method to increase grain yield by 7 to 2.5 q.ha⁻¹ depending on climatic deficit and irrigation strategy. The differential sensitivity of cultivars to drought was depending on the timing of drought. However, no significant interaction between variety and irrigation strategy was observed for yield and its components.

The most explanatory components of final yield under rainfed management were the number of spikes.m⁻² and the number of grains per spike while under irrigated management the number of grains per spike and the thousand grain weight were more important for yield determination.

Correlations and significant models of relations were obtained between the stable isotopes, mainly the carbon grain and other morpho-physiological index so the yield and its component. It confirms that the isotopes are indicators of water stress and thus are advised as study criteria varieties tolerance to drought.

Key Words: Durum Wheat, supplemental irrigation, Drough, Varieties, semi-arid, yield component, isotopes, vegetation index.

ملخص

إستجابة القمح الصلب لإستعمال مياه الأمطار و مياه الصقي التكميلي تمت دراستها خلال 08 سنوات تحت ظروف مناخيا شبه جافة ثم انهيت بدراسة الإستعمال التفاضلي النظائر من الكربون و النيتروجين خلال السنة التاسعة

مستويان من الماء : تحت المطر و مسقي بعلاقة مع التساقطات و مراحل النبات تم تحقيقها على ستة أصناف من القمح : بوسلام، شن أس، محمد بن بشير، مكسيكال، فيترون و واحة . الفترة "2009-2001" تميزت بتغيرات كبيرة بكميات التساقط للأمطار من 287ملم "2002-2001" الى 512ملم من "2009-2008"

المردود تحت المطر تراوح من 9 ق/ط "2004" الى 28 ق/ط "2009" اين الري سمح باتوصل الى مردود 45 ق/ط

من بين العوامل القاهرة المحددة لمردودية الري التكميلي هي درجات الحرارة العالية الناتجة عن الرياح الساخنة خلال مرحلة الإزهار وتكوين البذرة و المسببة لضياع عدد الحبات لكل سنبله .

انتاجية مياه الامطار تتراوح من 0.9 لدى مكسكال و فيترون الى 1 و 1.1 كلغ /م³ لدى واحة ، بوسلام وشن اس . في غياب الجفاف المبكر انتاجية مياه الأمطار يمكن ان تصل الى 1.4 كلغ/م³ لدى الأصناف أكثر انتاجية . الري التكميلي هو طريقة فعالا للحصول على ربح في المردود من 7 الى 25ق/ط حسب العجز المناخي و استراتيجية الري . ان حساسية الأصناف للجفاف تتوقف على الفترة التي ظهر فيها هذا الأخير

بينما التفاعلات المتوصل اليها بين الأصناف و استراتيجية الري و مركباته لم تكن دالة

إن مركبات المردود الأكثر تفسير تحت الأمطار هو عدد السنابل في المتر المربع و عدد الحبات في كل سنبله . أما تحت السقي عدد الحبات في كل سنبله و وزن الف حبة هو الأكثر أهمية لتحديد الإنتاج النهائي

ارتباطات و نماذج علاقات دالة تم التحصل عليها بين النظائر، اساسا الكربون و باقي المؤشرات المرفو فيزيولوجية و المردود و مركباته . هذا يؤكد جيدا ان النظائر من الكربون والنيتروجين عبارة عن مؤشرات لتلصدمات الناتجة عن العجز المائي يمكن النصح بيها لدراسة قابلية الأصناف للجفاف .

كلمات المفتاح : القمح الصلب , الري التكميلي، الجفاف، الأصناف ،شبه جاف ،مركبات المردود ،نظائر مؤشرات نباتية

Liste des abréviations

CEI	Communauté des États indépendants
RG	Rendement en grain
GA	Green area (surface verte)
GGA	Greener area (surface active)
CWSI	Crop Water Stress Index
Tc	canopy temperature (température du couvert végétal)
B	Bousselam
C	Chen's
M	Mexicali
MBB	Mohammed Ben Bachir
W	Waha
S	Siméto
NDIV	Normalized Difference Végétation Index (Indice de végétation)
VCI	Indice de condition de la végétation,
Mt	Millions de ton
ITGC	Institut Technique des Grandes Cultures

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
<i>Chapitre 1</i>	
Importance socio-économique du blé dur	4
1.1 Importance alimentaire	4
1.2 Place économique	4
1.3 Production du blé dur	5
1.3.1 Dans le monde	5
1.3.2 En Algérie et vallée du Chélif	6
1.4 Zones de production	7
1.5 Variétés utilisées en Algérie	7
<i>Chapitre 2</i>	
La culture du blé dur	8
2.1 Origine géographique	8
2.2 Botanique du blé dur	8
2.3 Description morphologique	9
2.3.1 Grain	9
2.3.2 Partie aérienne	10
2.3.3 Partie souterraine	11
2.4 Phases de croissance de la culture du blé dur	12
2.4.1 Introduction	12
2.4.2 Germination	12
2.4.3 Levée	13
2.4.4 Tallage	13
2.4.5 Montaison	13
2.4.6 Epiaison	13
2.4.7 Maturation	13
2.5 Exigences agronomiques	14
2.5.1 Exigences édaphiques	14
2.5.2 Exigences en eau	14
2.5.3 Température	15
2.5.4 Lumière	16
2.5.5 Fertilisation	16
2.6 Principaux maladies du blé	17
2.7 Qualité du grain de blé	19
<i>Chapitre 3</i>	
Besoins en eau, sécheresse et irrigation d'appoint de la culture du blé dur	
3.1 Eau et production végétale	20
3.1.1 Rôle de l'eau dans la plante	20
3.1.2 Estimation des besoins en eau des cultures	21
3.1.2.1 Introduction	21

3.1.2.2 Méthode directe	21
3.1.2.3 Méthode indirecte	21
3.1.3 Efficience agronomique de l'eau	22
3.2 Sécheresse en agriculture	23
3.2.1 Définition	23
3.2.2 Tolérance des plantes à la sécheresse	23
3.2.3 Stress thermique chez le blé dur	25
3.2.4 Stress hydrique chez le blé dur	26
3.2.4.1 Concept du stress hydrique	26
3.2.4.2 Indicateurs morpho-physiologiques du stress hydrique	27
3.2.4.2.1 Méthodologie	27
3.2.4.2.2 Paramètres liés à la croissance de la plante	28
3.2.4.2.3 Paramètres liés à l'état hydrique de la plante	29
3.2.4.2.4 Isotopes stables	30
3.3 Irrigation d'appoint du blé dur	30
3.4 Pilotage de l'irrigation	32
3.4.1 Définition	32
3.4.2 But du pilotage de l'irrigation	32
3.4.3 Méthodes de pilotage	33
3.4.3.1 Pilotage par tensiométrie	33
3.4.3.2 Pilotage par mesure de la température de surface	33
3.4.3.3 Pilotage par mesure du potentiel foliaire	33

Chapitre 4

Matériels et Méthodes	34
<hr/>	
4.1 Présentation de la région d'étude	34
4.1.1 Sols et superficies	34
4.1.2 Ressources en eau et irrigation	35
4.2 Caractéristiques du site expérimental	36
4.2.1 Situation géographique du site	36
4.2.2 Caractéristiques climatiques	36
4.2.2.1 Etage bioclimatique	36
4.2.2.2 Période sèches et humides	39
4.2.3 Caractéristiques du sol	40
4.3 Dispositifs expérimentaux	41
4.4 Matériel végétal	44
4.5 Conduite de la culture	44
4.6 Irrigation	45
4.7 Bilan hydrique	47
4.8. Mesures sur la plante	47
4.8.1 Paramètres de production	47
4.8.2 Paramètres morpho physiologiques	48
4.9 Indicateurs d'efficience de l'eau	48
4.10 Critères de qualité technologique	49
4.10.1 Teneur d'azote total du grain	49
4.10.2 Teneur en protéine du grain	49
4.11 Analyses statistiques	49

Chapitre 5

Résultats et discussion	50
5.1. Intensité et répartition annuelle de la contrainte hydrique	50
5.2 Evaluation des besoins et consommations en eau du blé dur	52
5.2.1 Besoins en eau maximums	52
5.2.2 Consommations en eau en pluvial	53
5.2.3 Consommations en eau en irrigué	54
5.2.4 Besoins et consommation en eau en pluvial et irrigué	55
5.2.5 Répartition des taux de consommation en eau sur les phases de la culture	56
5.2.6 Taux de satisfaction des besoins en eau de la culture	57
5.3 Effet de la dose d'irrigation sur le taux de satisfaction	58
5.4 Réponse pluriannuelle du blé dur en pluvial et irrigué	58
5.4.1 Gamme de réponse globale du rendement et ses composantes	58
5.4.2 Réponses variétales pluriannuelles comparatives	61
5.4.2.1. Réponse variétale en conditions pluviales	61
5.4.2.2 Réponse variétale en conditions irriguées	62
5.5. Réponse à l'irrigation d'appoint selon les années et les stratégies	63
5.6 Réponse globale du blé dur à l'eau consommée	65
5.7 Comportement des variétés en pluvial et en irrigué	66
5.7.1 Variations interannuelles des composantes du rendement	66
5.7.2. Diagnostic de l'élaboration du rendement en pluvial	67
5.7.3 Productivité de l'eau chez différentes variétés	69
5.8 Production de paille sèche	71
5.8.1 Production de paille sèche en pluvial	71
5.8.2 Production de paille sèche en irrigué	71
5.9 Synthèse de la réponse du blé dur à l'irrigation d'appoint	72
5.10 Indicateurs morpho physiologiques de production du blé dur	74
5.10.1 Période de sénescence de la feuille étendard	74
5.10.1.1 Sénescence de la feuille étendard en pluvial	74
5.10.1.2 Sénescence de la feuille étendard en irrigué	75
5.10.2 Discrimination isotopique	76
5.10.2.1 Corrélations entre isotopes et paramètres morpho-physiologiques	76
5.10.2.2 Corrélations entre isotopes et consommation en eau, efficacité de l'eau, rendement et ses composantes.	76
5.10.2.3 Réponse isotopique variétal à l'eau	77
5.10.2.4 Modèles de relations linéaires des isotopes du blé dur	78
5.10.2.4.1 Modèles de relations des isotopes avec les variables morpho- physiologiques du blé dur	78
5.10.2.4.2 Modèles de relations des isotopes avec la consommation en eau et production du blé dur	78
5.11 Critères de qualité	80
5.11.1 Teneur d'azote du grain	80
5.11.2 Teneur en protéine du grain	80
CONCLUSION GENERALE	82

Liste des figures

- Figure 1** Coupe longitudinale du grain du blé dur
- Figure 2** Diagramme d'Emberger
- Figure 3** Diagramme Ombrothermique de Gausсен (1990-2003)
- Figure 4** Dispositif expérimental en blocs aléatoires complets (2006)
- Figure 5** Dispositif expérimental Split-Plot (2009)
- Figure 6** Dispositif expérimental Split-Plot (2014)
- Figure 7** Evolution de la réserve en eau du sol disponible pour la plante au cours des 8 années d'étude : simulations issues du bilan hydrique simplifié
- Figure 8** Répartition des besoins en eau maximum sur les phases de la culture
- Figure 9** Variations des besoins en eaux maximums et consommations en eau du blé dur sous climat semi-aride.
- Figure 10** Répartition des taux de consommation en eau sur les phases de la culture
- Figure 11** Effet de la dose globale d'irrigation sur le taux de satisfaction moyen des besoins en eau du blé dur
- Figure 12** Relation entre le rendement en grain en pluvial et en irrigué suivant les variétés et les saisons de croissance
- Figure 13** Relation entre le rendement en grain et la consommation en eau de la culture
- Figure 14** Parcours annuel d'élaboration du rendement en pluvial ; Les composantes de rendement sont exprimées relativement aux valeurs de références de 2009.
- Figure 15** Evolution de la sénescence de la feuille étendard en pluvial
- Figure 16** Evolution de la sénescence de la feuille étendard en irrigué

Liste des tableaux

- Tableau 1** Précipitation (P) en mm et évapotranspiration potentielle de Penman moyenne mensuelle (ETP) en mm pour la période (1990-2008) et les 8 saisons expérimentales (2001- 2009)
- Tableau 2** Température et pluviométrie mensuelles moyennes, période (1990-2003)
- Tableau 3** Caractéristiques physico-chimiques du terrain 2
- Tableau 4** Principales caractéristiques physico-chimique du terrain 1
- Tableau 5** Principaux éléments de la conduite culturale et doses d'irrigation (mm) des expérimentations de 2001 à 2009
- Tableau 6** Principaux éléments de la conduite culturale et doses d'irrigation (mm) de l'expérimentation de 2014.
- Tableau 7** Coefficients culturaux
- Tableau 8** Besoins en eau maximum (ETM) en mm du blé dur
- Tableau 9** Evapotranspiration réelle (ETR) en mm du blé dur en pluvial
- Tableau 10** Evapotranspiration réelle (ETR) en mm du blé dur en irrigué
- Tableau 11** Répartition des taux(%) de satisfaction des besoins en eau(ETR/ETM) cumulées en pluvial
- Tableau 12** Répartition des taux (%) de satisfaction des besoins en eau (ETR/ETM) cumulées en irrigué
- Tableau 13** Réponses du rendement et ses composantes à l'irrigation en fonction des variétés et des années entre (2001-2006).
- Tableau 14** Corrélations entre rendement en grain et composantes du rendement
- Tableau 15 :** Coefficients de signification à ($P < 0.05$) de la régression stepwise linéaire entre le rendement en grain et ses composantes
- Tableau 16** Réponse du rendement en grain (q/ha) des variétés en pluvial durant trois saisons agricoles
- Tableau 17** Indices de récolte (IR) en conditions pluviales durant trois saisons agricoles
- Tableau 18** Réponse du rendement en grain (q/ha) des variétés en conditions irriguées durant trois saisons agricoles
- Tableau 19** Indices de récoltes (IR) en conditions irriguée durant trois saisons agricoles

- Tableau 20** Réponse des composantes de rendement à l'irrigation en fonction des variétés et les années: 2007, 2008, 2009
- Tableau 21** Indicateurs de la productivité de l'eau en grain ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) en fonction de la variété, irrigation et année : 2007, 2008 et 2009
- Tableau 22** Classement des variétés en fonction de la productivité
- Tableau 23** Réponse du rendement en paille (q/ha) des variétés en pluvial durant trois saisons agricoles
- Tableau 24** Réponse du rendement en paille (q/ha) des variétés en irrigué durant trois saisons agricoles
- Tableau 24** Corrélations des isotopes stables suivant Pearson avec paramètres morpho-physiologiques
- Tableau 25** Corrélations des isotopes stables suivant Pearson avec la consommation en eau, l'efficience, matière sèche totale, rendement et ses composantes
- Tableau 26** Réponse isotopique des variétés à l'eau
- Tableau 27** Modèles de stepwise linéaire des isotopes et variables morpho physiologiques
- Tableau 28** Modèles de relations entre isotopes et consommations en eau
- Tableau 29** Azote total en (%) de la matière sèche du grain
- Tableau 30** Protéine en (%) de la matière sèche du grain

INTRODUCTION GENERALE

En Algérie, la superficie totale du territoire national est de 238 millions d'hectares. 42 millions à vocation agricole dont 8.4 millions d'hectares sont utiles. La production céréalière en Algérie ne couvre plus les besoins de la population depuis 1970 (Smadhi et Zella, 2009), le blé dur étant la principale céréale à paille cultivée sur 47 % de la sole céréalière (Haddouche et Mekliche, 2008). De ce fait, le pays importe près de 1.8 Mt de blé dur par an, cette céréale constituant une denrée de base, consommée sous forme de pain et de couscous. Bien que la sole céréalière oscille autour de 3 millions d'hectares (Faostat , 2014), 60 % de cette surface est située en climat semi-aride, là où les potentialités de production restent faibles et le mode de culture extensif. Dans ces zones où la pluviométrie annuelle est inférieure en moyenne à 450 mm, le rendement du blé dur oscille entre 7 et 10 q/ha et la variabilité inter-annuelle y est forte en raison d'une répartition des précipitations de plus en plus erratique (Feliachi et al., 2001; Smadhi et Zella, 2009 ; Sahnoune et al., 2013).

Pour combler le déficit productif, il faudrait multiplier par 4 la production nationale, soit en augmentant la superficie céréalière de 3 à 11,5 millions d'hectares, soit en élevant le rendement moyen à 27,5 q/ha, ce qui met en exergue l'ampleur des progrès à accomplir et souligne la dépendance céréalière durable de l'Algérie vis-à-vis des importations (Smadhi et Zella, 2009).

Il est bien établi que la sécheresse est le facteur limitant majeur du rendement du blé d'hiver en région Méditerranéenne, les pertes variant de 10 à 80 % selon les années (Nachit et al., 1998). Dans cet environnement, la contrainte hydrique peut survenir à tout moment du cycle cultural (Baldy, 1993). Une fois l'eau du sol présente à la plantation en novembre est épuisée, la quantité de pluie reçue au printemps déterminera le niveau de rendement en absence d'irrigation de complément (Channafi et al., 2006). Cependant, en Afrique du Nord, une des caractéristiques du climat est l'incertitude des précipitations dans les tous premiers stades végétatifs du blé d'hiver (El Hafid et al., 1998). La date d'apparition de la contrainte hydrique et sa durée d'action ont des conséquences variables sur l'élaboration de la production finale (Mogensen et al., 1985 ; Debaeke et al., 1996). Ainsi, si la sécheresse survient durant les deux semaines précédant l'épiaison, elle peut réduire le nombre de grains par épillet (Fisher, 1973) alors que le manque d'eau en fin de cycle réduit le poids du grain (Kobata et al., 1992). Le nombre d'épis par m² sera réduit par une sécheresse s'installant dès le tallage du blé (Assem et al., 2006).

Zhang et Oweis (1999) ont bien montré que la consommation en eau totale du blé sur la saison de croissance ne suffit pas à expliquer les niveaux de rendement obtenus mais que ceux-ci dépendent également de la distribution de cette consommation au cours du cycle.

La tolérance à la sécheresse est un phénomène complexe, faisant intervenir, face à la pression erratique des contraintes environnementales, de nombreux mécanismes interagissant entre eux et possédant un déterminisme génétique complexe (Belhassen et al., 1995). Devant la raréfaction des ressources en eau accentuée par le changement climatique, la recherche de variétés cultivées plus adaptées à la sécheresse devient un enjeu essentiel pour faire face à l'accroissement de la population mondiale (Richards et al., 2002). L'amélioration de la tolérance à la sécheresse des céréales d'hiver est la cible principale pour les sélectionneurs de la zone Méditerranéenne (Hafsi et al., 2001).

Un nombre assez restreint de variétés de blé dur sont cultivées en Algérie qu'elles proviennent de populations locales ou d'une introduction assez récente (Benbelkacem et Kellou, 2001). Les génotypes locaux sont caractérisés par un potentiel de rendement bas mais assez stable. A l'inverse, les génotypes d'introduction permettent d'atteindre un haut potentiel de production mais uniquement en conditions hydriques et thermiques favorables. C'est pourquoi, pour valoriser ce potentiel et stabiliser la production, l'irrigation du blé dur a été proposée en complément du choix variétal (Bouthiba et al., 2008).

La réponse du blé dur à l'irrigation de complément a fait l'objet de nombreuses études en Afrique du Nord et au Moyen Orient (e.g. Oweis et al., 1999 ; Bouthiba et al., 2008 ; Karam et al., 2009). Cependant, très peu d'études comparent le comportement différencié d'une gamme de génotypes. Or, on peut penser que des interactions entre disponibilité en eau et comportement des génotypes peuvent se manifester en fonction du niveau de tolérance à la sécheresse d'une variété et de son mode d'élaboration du rendement.

Pour évaluer l'importance de ces interactions, une étude expérimentale pluri-annuelle a été menée en zone semi-aride, croisant une gamme de génotypes locaux et introduits et différentes contraintes hydriques variant par leur période d'intervention et leur intensité. Cette gamme de contraintes a été construite en combinant différents programmes d'irrigation et différents régimes pluviométriques plus ou moins déficitaires.

En Algérie, la dégradation du rendement du blé dur a atteint un seuil économiquement insupportable par l'état. La culture du blé dur est devenue moins rémunératrice que certaines cultures maraîchères comme la pomme de terre, la tomate et la pastèque...

La culture du blé dur, traditionnellement non irrigué risquait d'être délaissée entièrement par les producteurs. Devant la persistance de cette situation défavorable, le ministère de l'agriculture a procédé à une mesure de grande envergure de substitution de la céréaliculture par l'arboriculture fruitière dans les zones à faible potentiel de rendement. Actuellement, l'état incite les agriculteurs à élargir la production du blé par l'augmentation du prix de vente du quintal. La région du Chélif fait partie des zones céréalières de l'Algérie frappée par cette sécheresse. Des baisses de rendements considérables du blé dur y sont enregistrées, parfois les rendements sont nuls.

D'après l'office des périmètres d'irrigation et de drainage, malgré les potentialités hydriques qui prévoit l'irrigation de 1.5 millions d'hectares, les volumes mobilisables ne peuvent réaliser actuellement l'irrigation que de 500000 hectares. Donc la superficie irriguée dans l'ensemble du territoire représente 6 % de la superficie totale agricole utile. Mais on doit noter que malgré la faiblesse de cette superficie, elle contribue avec 50 % de la production agricole à l'échelle nationale.

Or, globalement, suite à l'introduction des nouvelles techniques d'irrigation, le secteur de l'agriculture consomme 70 % du total des volumes hydrique mobilisable.

L'objectif global de la présente étude est la détermination des besoins en eau du blé dur et la maîtrise de l'irrigation d'appoint du blé dur en zone semi-aride. Ceci nécessite une analyse des résultats de ces expérimentations en termes de réponse globale de la culture à l'irrigation et en termes de productivité de l'eau atteintes. Cette contribution rentre systématiquement dans un contexte de rentabilité économique régional et national. Nous envisageons d'atteindre un ensemble de recommandations seront apportées pour conseiller une meilleure optimisation de l'irrigation d'appoint en zones semi-arides.

IMPORTANCE SOCIO-ECONOMIQUE DU BLE DUR

1.1 Importance alimentaire

Selon Le meilleur et al, (2009), les céréales constituent la base de l'alimentation dans la plupart des pays méditerranéens du sud. Elles sont donc, jugées stratégiques dans la sécurité alimentaire des populations. Parmi les céréales, le blé (blé tendre pour le pain et blé dur pour la semoule) a une place considérable dans la diète alimentaire des pays d'Afrique du Nord et représente souvent plus de 50 % des apports énergétiques de la ration alimentaire.

Chaque Algérien consomme de 180 à 200 kg de céréales (blés dur et tendre) par an. Cependant selon Smadhi et Zella, (2009), elle est estimée à 250 kg. Comparativement à d'autres pays où la consommation en céréales ne dépasse pas les 50 à 60 kg par habitant.

La production céréalière a connu une faible croissance comparativement à la consommation qui a fortement augmenté sous l'effet de la croissance démographique et du soutien par l'état des prix à la consommation. L'ajustement structurel ainsi que les actions du PNDA demeurent insuffisants à l'essor de la production céréalière qui reste tributaire de précipitations annuelles (Djermoun, 2009).

L'Algérie est un pays maghrébin où la semoule de blé est habituellement utilisée pour la fabrication du couscous et diverses sortes de gâteaux secs. La semoule de blé doit répondre à un ensemble de critères de qualité qu'exigent les fabricants de pâtes. Les principaux critères de qualité sont : la couleur ; la tenue à la cuisson, leur poids spécifique et leur teneur en protéine.

1.2 Place économique

Les céréales représentent ces dernières années environ deux tiers des besoins du marché national et ne tendent pas à diminuer (6.6 millions de tonnes de blé importées en 2007 : 5.1 millions de blé tendre et 1.5 million de blé dur). Cette situation, rendue possible notamment par l'aisance financière du pays qui bénéficie d'une forte rente liée à ses exportations d'hydrocarbures (Bedrani, 2008).

Même au plus haut niveau de ses performances, à savoir en 2009 lorsque la production locale a enregistré le record historique de 6,1 MT, la filière céréalière algérienne a été loin de couvrir les besoins du marché interne qui s'élèvent à 8 MT sur la base d'une consommation moyenne de 200kg/habitant/an.

D'après les informations du centre national de l'informatique et des statistiques, l'Algérie qui avait importé en (2012) 9,79 Mt de céréales, aura importé 10,03 Mt de céréales en 2013, soit une hausse de 2,55 % confirmant la tendance haussière de ces dernières années.

De 1995 à 2005, le marché Algérien a absorbé, en moyenne annuelle 4244903 tonnes de blés dont 70.44 % de blé dur, soit 2990265 tonnes représentant une valeur de 858 millions de dollars dont 60.36 % de blé dur, soit 578 millions (Chehat, 2007).

1.3 Production du blé dur

1.3.1 Dans le monde

La production mondiale en blé dur connaît des fluctuations inter-annuelles importantes. En 2002, selon les statistiques du conseil international des céréales sur la scène mondiale, la superficie consacrée annuellement à la culture du blé dur s'étend sur environ 18 millions d'hectares, ce qui donne une production annuelle moyenne approximative de 30 millions de tonnes. En 2009, année relativement favorable, la production mondiale de blé dur a atteint 40 millions de tonnes, puis a baissé vers 34 millions de tonnes en 2014.

L'Europe (hors CEI) a assuré en moyenne, au cours de la décennie 2000, 26 % de la production mondiale (la balance commerciale de l'Union européenne en blé dur est en général excédentaire depuis 1985, mais l'Italie importe). Viennent ensuite l'Amérique du Nord et centrale (24 %), le Moyen-Orient (avec en particulier la Turquie et la Syrie (18 %), puis la CEI (12%) et l'Afrique du Nord.

La production de blé dur est soumise à deux variabilités: la récolte en Afrique du Nord très irrégulière car dépendante des pluies d'hiver et de printemps, et la production en Amérique du Nord découlant de décisions de semis sur des bases économiques et agronomiques (avec peu d'alternatives en zone aride). La zone méditerranéenne dans son ensemble consomme 62 % du blé dur mondial et est la principale zone importatrice de la planète. L'Amérique du Nord et Cen-

trale est la principale zone exportatrice de la planète. Elle réalise 72 % des exportations mondiales. Le Canada est le premier exportateur de blé dur et l'Algérie est le premier importateur.

1.3.2 En Algérie et vallée du Chélif

Selon les statistiques de la Fao, en 2009 la production nationale en Algérie fut de 2953117 tonnes pour une superficie emblavée de 1848575 hectares, faisant une contribution 0.4 % dans la production mondiale.

La vallée du Chélif qui englobe les Wilayates de Ain-Defla, chleff et une grande partie de la Wilaya de Relizane prend une place importante dans la production des blés tendres et durs au niveau national. Sur la base des informations issues de la revue « statistiques agricole », cette place s'explique par des taux de production de blé dur comparés à la production national allant de 23 % en 2002, année climatiquement relativement défavorable à 11 % en 2010, année favorable. Ces taux sont plus faibles pour le blé tendre de 14.84 % en 2002 à 8.58 % en 2010. Ces fluctuations sont dues principalement aux variations inter- annuelles des conditions climatiques de la région à climat semi-aride.

La superficie moyenne emblavée du blé dur dans ces trois wilayates durant la période (2002-2010) est de 199218 hectares devant 1342425 hectares au niveau national, constituant donc un taux d'occupation moyen de 14.84 % de la superficie réservée dans le territoire national. Cependant, la superficie moyenne emblavée en blé tendre dans ces trois wilayates durant la même période n'est que de 65776 hectares devant 733380 hectares à l'échelle nationale faisant un taux moyen d'occupation de 8.37 %.

Il ressort que la production moyenne du blé dur dans ces trois wilayates durant cette période s'éleva à 2713136 quintaux en face 15837585 quintaux au niveau national, faisant un taux moyen de contribution de 17 % dans la production nationale.

Cependant la production moyenne du blé tendre dans ces trois wilayates durant la même période n'est que de 801837 quintaux en face de 8561823 quintaux à l'échelle nationale, faisant un taux moyen de contribution de 9.37 % dans la production nationale.

Zones de production

Selon (Djermoun, 2009), les augmentations moyennes affichées montrent un passage des rendements moyens des blés de 9,4 qx /ha à 13,1 qx/ha pour le blé dur au cours de la période 1991-1995 à 2001-2005 et de 9 à 13,5 qx /ha pour l'orge durant la même période. Cependant, cette augmentation est très disparate. On note trois grandes zones :

- ➔ Plaines littorales, vallées du Centre et de l'Est (400 000 ha), pluviométrie supérieur à 500 mm avec des rendements de 10 à 20 q/ ha.
- ➔ Plaines (Mléta, Mekerra , Ghriss) et vallées (Mina , Rhiou, Chéloff) intérieures , massif de Médéa et plateau de Dahra (1,5 millions d'ha , 400 mm <pluviométrie <500 mm) avec des rendements de 8 à 16 q / ha .
- ➔ Hauts plateaux de l'Ouest et de l'Est (4,5 millions ha, pluviométrie <350 mm avec des rendements de 5 à 12 q/ ha.

1.4 Variétés utilisées en Algérie

Les géotypes d'introduction nouvellement sélectionnés et caractérisés par un haut potentiel de production disparaissent plus rapidement à cause de leur inadaptation et leur sensibilité à la sécheresse. Néanmoins; l'introduction de ce matériel génétique a fait régresser les variétés locales en les marginalisant pendant les années favorables avant de disparaître à son tour après les années défavorables (Hazmoun, 2000).

Le succès de la production de céréales dépend en grande partie, du choix de la variété appropriée. C'est à dire résistante aux maladies, bien adaptée au sol et au climat, ayant un rendement élevé et une qualité du grain appréciable (Boufenar-Zaghouane et Zaghouane, 2006).

Les variétés de blé dur homologuées dont les semences peuvent être produites et commercialisées en Algérie sont éditées par le centre national de contrôle et de certification des semences et plants sur le bulletin des variétés 'céréales' de l'année 2009. On compte au total trente variétés à savoir ; les variétés locales : Bidi 17, Cirta, Gloire de Guemgoum R'khem, Mohamed Ben Bachir, Rahouia, Hedba 3, Taslemt et les variétés introduites : Belikh 02, Bolenga, Bousselam, Cannizo, Capeiti, Cham 3, Chen's, Ciccio, Colosseo, Crioca, Durbel, Eider, GTA dur, Kebir, Ofanto, Orjaune, Oum Rabi , Poggio, Polonicum, Sebaou , Siméto, Tassili , Vitron et Waha.

LA CULTURE DU BLE DUR

2.1 Origine géographique

Les premières cultures apparaissent au VIII millénaire av-J-C., en Mésopotamie et dans les vallées du Tigre et de l'Euphrate (aujourd'hui l'Irak), dans la région du Croissant fertile qui désigne les régions de Mésopotamie et du Levant au Proche-Orient, Moyen-Orient.

Plus sensible au froid que le blé tendre, et plus résistant à la sécheresse, sa culture s'est d'abord développée à l'époque antique dans le bassin méditerranéen, notamment en Egypte et en Grèce. On croit que le blé dur provient des territoires actuels de la Turquie, de la Syrie, de l'Iraq et de l'Iran (Fedman, 2001).

Son ancêtre est l'égilope, grande céréale à un rang de grains, diploïde à 14 chromosomes, particulièrement rustique mais peu productive ; elle se rencontre encore au Moyen-Orient.

2.2 Botanique du blé dur

Le blé dur (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) est une plante annuelle, appartenant à l'embranchement des Spermaphyte, sous embranchement des angiospermes, classe des monocotylédones, ordre des comméliniflorales, sous ordre des poales de la famille des graminées, de la tribu des Triticées, et du genre *Triticum* sp (Feillet, 2000). Les Triticées sont des herbes annuelles qui croissent spontanément dans les champs de l'Europe méridionale et dans le Levant.

Le blé dur est un blé tétraploïde, composé de deux génomes AA et BB et constitué de 28 chromosomes. Originaires du Moyen-Orient, les différentes espèces de blé (*Triticum* et *Aegilops*) ont subi au cours des siècles des transformations qui les ont fait passer de l'état de plantes sauvages à celui d'espèces cultivées.

Le blé moderne est le résultat d'une construction génétique unique : il contient le génome complet de trois espèces différentes, les chromosomes de ces espèces ne se mélangeant pas lors de la méiose. Il est le résultat d'événements de polyploïdisation intervenus à la suite de croise-

ments entre espèces : chaque génome fut entièrement conservé, ce qui explique l'augmentation de la ploïdie.

- ➔ Le premier événement est la fusion de deux espèces diploïdes présentant 7 paires de chromosomes, *Triticum urtatu* (génome AA) et une espèce d'*Aegilops* (génome BB) ; il a eu lieu il y a environ 500 000 ans et a conduit à l'apparition d'un blé tétraploïde sauvage, *Triticum turgidum* (génome AABB, 14 paires de chromosomes) qui a été domestiqué pour donner d'abord l'amidonnier puis le blé dur.
- ➔ Le second événement a eu lieu au cours de la domestication, il y a environ 9 000 ans, entre un blé tétraploïde cultivé et un *aegilops* diploïde (*Aegilops tauschii*, génome DD). Il a donné le blé tendre, *Triticum aestivum*, qui est hexaploïde (génome AABBDD, 21 paires de chromosomes).

Les blés hexaploïdes et tétraploïdes ont fait l'objet de recherches considérables fondées sur des croisements inter-spécifiques et inter-génériques (Sharma et Gill, 1983).

2.3 Description morphologique

2.3.1 Grain

Le grain de blé a la forme d'un petit œuf. Arrondi aux deux bouts, le grain de blé est bombé sur sa face dorsale et creusé sur toute sa longueur d'un sillon où passe le faisceau nourricier du grain. A l'extrémité inférieure de la face dorsale, une petite plage ridée signale l'emplacement du germe. L'extrémité la plus ronde s'orne d'une fine brosse de poils (*figure 1*).

Le grain de blé est un caryopse, c'est un fruit à péricarpe sec non déhiscent contenant une seule graine. C'est donc un akène particulier dans lequel le péricarpe du fruit et le tégument de la graine sont soudés. Le grain se compose de 3 parties principales :

- ➔ le péricarpe ou enveloppe: c'est la pellicule cellulosique qui protège le grain pendant sa formation dans l'épi, au cours de sa conservation et aussi pendant la levée, dans le sol, en limitant l'entrée des moisissures et des bactéries. Toutefois le péricarpe n'est pas étanche et permet le passage de l'air et de l'eau.

- ➔ l'endosperme ou amande: constitue presque tout l'intérieur du grain et se compose principalement de minuscules grains d'amidon. On y trouve l'essentiel des réserves énergétiques qui nourrissent la plantule au moment de la germination.
- ➔ le germe ou embryon comprend 2 parties: la plantule (future plante) et le cotylédon (réserve de nourriture très facilement assimilable, destinée à la plantule) qui contient l'essentiel des matières grasses du grain dans le cas des céréales.

Le blé dur se différencie du blé tendre par son grain à albumen vitreux et sa plus haute teneur en protéine. Le grain de blé contient en moyenne de 60 à 70 % de glucides (amidon de l'albumen), de 12 à 15 % de protide (gluten) de 1 à 2 % de lipide et de 2 à 3 % de cellulose.

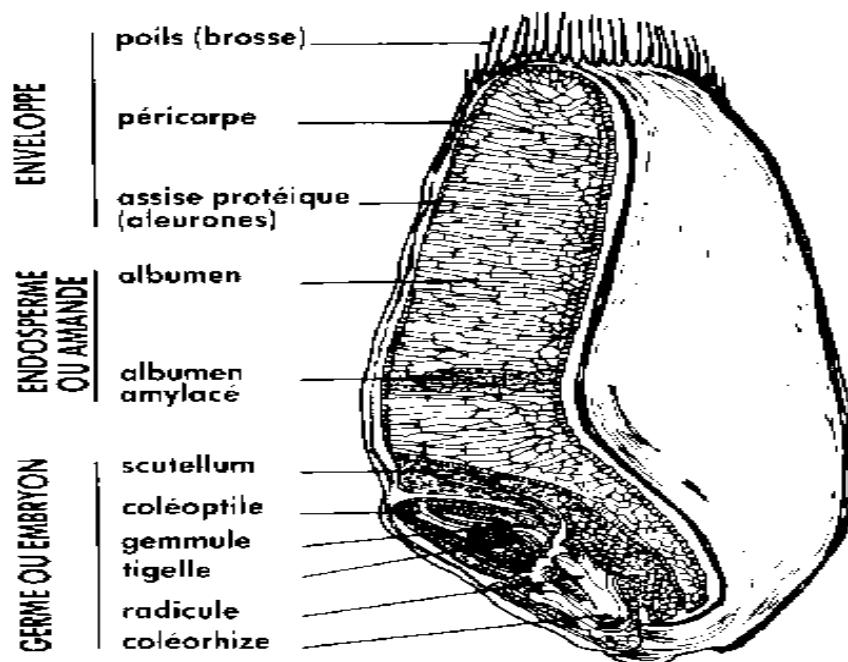


Figure 1 : Coupe longitudinale du grain du blé dur

2.3.2 Partie aérienne

Les tiges sont des chaumes, cylindriques, souvent creuses par résorption de la moelle centrale. Elles se présentent comme des tubes cannelés avec de long et nombreux faisceaux conducteurs de sève. Ces faisceaux sont régulièrement entrecroisés et renferment des fibres à parois épaisses, assurant la solidité de la structure.

Comme pour d'autres céréales, les feuilles de blé dur se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux (oreillettes). La tige principale et chaque brin portent une inflorescence en épi terminal.

Selon (Bozzini, 1988), l'inflorescence du blé dur est un épi muni d'un rachis portant des épillets séparés par des courts entrenœuds. Chaque épillet compte deux glumes (bractées) renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une rachéole.

Chaque fleur parfaite est renfermée dans des structures semblables à des bractées, soit la glumelle inférieure et la glumelle supérieure. Chacune compte trois étamines à anthère biloculaire, ainsi qu'un pistil à deux styles à stigmates plumeux. Le blé dur comprend surtout des espèces autogames.

Durant la floraison, les fleurs demeurent généralement fermées (fleurs cléistogames), et les trois anthères éclatent et libèrent le pollen (anthèse). Les fleurs peuvent aussi s'ouvrir avant la libération du pollen. Selon deVries (1971), les fleurs de blé demeurent ouvertes de 8 à 60 minutes selon le génotype et les conditions du milieu.

A maturité, le grain de pollen fusiforme contient habituellement trois noyaux. Chaque fleur peut produire un fruit à une seule graine, soit le caryopse.

2.3.3 Partie souterraine

A la germination la radicule ou racine primaire, et un entre-nœud sub-coronal émergent du grain : cet entre-nœud évolue vers la formation d'un collet près de la surface du sol.

Le système racinaire secondaire peut être assez développé. Il apporte les éléments nutritifs à la plante (**Soltner, 1988**). Le système racinaire du blé est du type fasciculé.

En général, 55% du poids total des racines se trouvent entre 0 et 25 cm de profondeur, 18% entre 25 et 50 cm, 15% entre 50 et 75 cm et 12% au-delà.

L'étude structurale des racines montre que le déficit hydrique provoque une croissance en longueur des cellules des différentes zones de la structure racinaire et limite la croissance diffuse et favorisant la croissance apicale (Labdelli et al, 2013).

2.4 Phases de croissance de la culture du blé dur

2.4.1 Introduction

Le cycle du blé comporte deux grandes périodes : une période végétative et une période reproductrice. La période végétative comporte les phases germination, pré tallage et tallage. Cependant la période reproductrice comporte les phases montaison, épiaison, floraison et maturation.

Les phases sont marquées par des stades repères identifiés sur le maître brin. Selon Soltner (2005), Trois échelles de notations sont développées pour repérer ces stades du blé à savoir celle de Jornard en 1952, de Feekes en 1954 et de Zadocks en 1974.

2.4.2 Germination

La germination est définie comme la sortie d'une radicule, puis un coléoptile à partir d'une graine humidifiée. Au début de la germination, la semence de blé est sèche. Après humidification, il sort une radicule, c'est une première petite racine puis un coléoptile. Une première feuille paraît au sommet du coléoptile.

Le coléoptile est un organe transitoire lors de la germination formant une gaine protectrice pointue autour des pousses émergentes chez les monocotylédones telles que les graminées. Quand le coléoptile atteint la surface du sol, il cesse de croître et les pré-feuilles percent son apex, poursuivant leur croissance au-delà. Le coléoptile du blé atteint son maximum de développement le troisième jour de la germination.

La germination est uniquement déterminée par une somme de température de 30 °C base 0°C. Il s'agit de la température moyenne quotidienne cumulée. Il faut en moyenne 30°C pour la germination, soit trois jours à 10°C ou 10 jours à 3°C, et environ 150°C pour la levée. L'axe portant le bourgeon terminal se développe en un rhizome, c'est la tige souterraine dont la croissance s'arrête à 2 cm en dessous de la surface du sol. Il apparaît un renflement dans la partie supérieure du rhizome qui grossit et forme le plateau de tallage.

2.4.3 Levée

La levée commence quand la plantule sort de la terre et que la première feuille pointe au grand jour son limbe. Deux autres feuilles suivent.

2.4.4 Tallage

Le tallage est marqué par l'apparition d'une tige secondaire, une talle, à l'aisselle de la première feuille. Les autres feuilles poussent elles aussi leurs talles. Au moment du plein tallage, la plante est étalée à port tombant. A la fin, les talles commencent à se redresser. Le tallage est l'un des principaux facteurs déterminant le rendement en grain chez les céréales (Hucl P et Baker RJ.,1989, Davidson et Chevalier.,1990).

La fin tallage est celle de la fin de la période végétative, elle marque le début de la phase reproductive, conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre-nœuds (Gate, 1995).

2.4.5 Montaison

La montaison est le redressement des gaines qui forment des fausses tiges. Elles s'allongent et les ligules des feuilles sont visibles. A 2 ou 3 cm du sol, le premier nœud est repérable au toucher sur le maître-brin où s'ébauche déjà l'épi. Les nœuds se succèdent jusqu'à la dernière feuille et la gaine enfle à la base de l'épi.

2.4.6 Epiaison

L'épiaison commence quand la gaine laisse entrevoir l'épi. Ensuite l'épi sort et se dégage complètement de la gaine.

La floraison s'observe à partir du moment où quelques étamines sont visibles dans le tiers moyen de l'épi. A la fin, quelques étamines desséchées subsistent sur l'épi.

2.4.7 Maturation

La maturation durant laquelle, le grain se développe en deux stades. Le stade laiteux, où le grain vert clair, au contenu laiteux, atteint sa dimension définitive. Le stade pâteux où le grain d'un vert jaune s'écrase facilement. Les glumes et les glumelles sont jaunes striées de

vert, les feuilles sèches et les nœuds de la tige encore verts. Puis le grain mûrit. Il prend une belle couleur jaune. Il est brillant et durci. Les nœuds de la tige deviennent jaune striés de vert. A maturité complète, le grain prend la couleur typique de la variété et la plante est complètement sèche. À sur-maturité, le grain est mat et tombe tout seul de l'épi.

2.5 Exigences agronomiques

2.5.1 Exigences édaphiques

Les plantes ont besoin d'eau et d'éléments nutritifs, lesquels sont transportés, via les racines, du sol vers la partie productive des plantes. Si des caractéristiques défavorables des terres entravent le développement ou le fonctionnement du système racinaire, il en résultera un manque d'eau ou d'éléments nutritifs qui influenceront négativement sur la croissance et le rendement de la culture. L'état structural du sol conditionne l'implantation du système racinaire et donc le prélèvement d'azote par les plantes comme il modifie les conditions pédoclimatiques (aération et humidité) et l'activité des micro-organismes sensibles à ces variations comme la microflore nitrifiante (Houot et al, 1990).

Les sols du type argilo-calcaire ou limoneuse à limono-argileux conviennent bien aux racines fasciculées du blé en assurant une grande surface de contact (Soltner, 2000).

Cependant, les sols à texture légère et acides, sont déconseillés pour le blé dur (Novak et al., 2006). Les sols qui conviennent le mieux au blé sont des sols drainés et profonds. On évitera les sols contenant de fortes teneurs en sodium, magnésium ou fer. Le pH optimale se situ dans la gamme de 6 à 8 (Doorenbos et **Kassam, 1979**).

Les blés durs sont sensibles au calcaire et à la salinité ; un pH de 6,5 à 7,5 semble approprié puisqu'il favorise l'assimilation de l'azote (**Soltner, 1988**). Le sel a un effet dépressif sur le taux de germination, la croissance biologique et la production en grain (Ben Naceur et al, 2001).

2.5.2 Exigences en eau

Les exigences en eau des cultures sont définies comme la lame d'eau nécessaire pour satisfaire l'évapotranspiration (*Dorrembos et Pruitt, 1977*)

Les besoins sont évalués à partir de la demande climatique et le coefficient cultural (Tiercelin, 1998). Les besoins du blé sont globalement situés entre 550 à 600 mm. Le blé à besoin de 4 à 5 mm par jour à la montaison, période qui voit s'élaborer une composante principale pour le rendement (Moule, 1980).

Les besoins en eau de la culture du blé varient suivant les phases du blé. La répartition de cette consommation en eau présentée lors du colloque organisé par Arvalis, est selon Bonnefoy et Moynier (2014) comme suit :

- ➔ durant la phase (epis 1 cm - 2 nœuds), d'une durée de 20 à 25 jours, elle est de 60 mm,
- ➔ durant la phase (2 nœuds - floraison), d'une durée de 30 à 40 jours, elle est de 160 mm,
- ➔ durant la phase (floraison - grain laiteux), d'une durée de 20 à 25 jours, elle est de 140 mm,
- ➔ durant la phase (grain laiteux- maturité), d'une durée de 15 à 20 jours, elle est de 90 mm

Sur la base d'une étude sur l'évaluation des besoins en eau de trois cultivars de blé dur dans la région du Chélif, il ressort que les besoins en eau du blé prennent de l'ampleur à partir du mois de mars, quelle que soit l'année climatique, la valeur maximale du coefficient cultural est atteinte au mois d'Avril (Bouthiba et Debaeke, 2009).

Selon Musick et al (1994), les différentes recherches ont montré que pour le blé, la production minimale en grain nécessite une consommation située entre 200 à 210 mm.

2.5.3 Température

Le zéro de végétation du blé dur est de 0°C, mais pratiquement, la température optimale varie de 20 à 22 °C, jusqu'à un maximum de 35 °C (Eliard, 1974 ; Boyldieu, 1982).

Selon Vilain (1987), le blé dur requiert une somme de température pour ses différentes phases physiologiques qui sont réparties ainsi : semi-levée (150 °C), levée-fin tallage (500 °C), montaison-floraison (850 °C), floraison-maturation (800°C), faisant un total de 2350 °C pour tout le cycle.

Le stress thermique durant la phase remplissage du grain fait diminuer le poids des grains et par conséquent le rendement et la production de farine (Guedira et al., 2002).

2.5.4 Lumière

La lumière est un paramètre climatique indispensable pour le déroulement du phénomène de la photosynthèse. Les céréales à paille sont des plantes de type C3 relativement peu exigeantes en rayonnement comparativement à d'autres espèces cultivées comme le maïs, plante du type C4.

Sur une feuille de blé en pleine croissance, l'assimilation du gaz carbonique atteint un palier à des niveaux de rayonnement de l'ordre de 0.7 à 0.8 cal/cm²/min. Pour le maïs, il faut une énergie lumineuse supplémentaire d'environ 50 % pour parvenir à la saturation de la photosynthèse. Malgré cette faible exigence, le rayonnement peut être limitant dans certaines conditions. Le rayonnement peut s'avérer limitant durant la période de pleine croissance pondérale de l'épi pendant laquelle se détermine le nombre de fleurs fertile entre la méiose pollinique et la fécondation apparaît comme la plus sensible à un défaut de rayonnement (Gate, 1997). Cependant la phase tallage a besoin des conditions d'éclairement optimales (Soltner, 1988).

Les densités de semis pratiquées engendrent une compétition pour la lumière au sein du peuplement végétal. Les effets de cette compétition sont inéluctables quand la culture amorce la phase montaison (Gate, 1997).

Pour une même variété de blé dur la durée de la période végétative est dépendante de la photopériode. En jours longs, les variétés de printemps ont une période végétative réduite (Moule, 1980).

2.5.5 Fertilisation

Selon Prats et al (1971), la détermination du rendement dépend du rôle fondamental que jouent les éléments fertilisants (N,P,K).

Le blé est une céréale exigeante en azote. L'azote en phase tallage et épiaison doit être présent dans le sol en quantités suffisantes. De ce fait les apports en azote doivent être fractionnés en deux ou trois apports suivant les besoins par phase critique pour éviter les pertes de cet élément en profondeur par lessivage.

Dans le calcul des apports, on doit tenir compte des quantités qui peuvent provenir du sol surtout si le précédent est une légumineuse ayant déjà enrichi le sol. L'azote est un fertilisant déterminant de la croissance car il rentre dans la composition des nucléo-proteines.

Les besoins en azote pour produire un quintal de grain varient de 2.2 à 3.5 kg/quintal selon les espèces. Pour le blé dur, ce besoin est de 3 kg/quintal. Les deux formes d'azote assimilables par la plante sont : la forme nitrique (NO_3^-) et la forme ammoniacale (NH_4^+). Quand le sol contient à la fois les deux formes, la plante absorbe préférentiellement la forme nitrique (Gat, 1997).

Le phosphore, c'est un facteur de précocité, sa carence provoque le jaunissement des feuilles. En jouant un rôle dans la fécondation, il agit donc positivement sur le rendement.

Le potassium joue un rôle fondamental dans l'amélioration de la résistance des jeunes plantules contre le froid. Il représente un facteur de résistance contre les maladies cryptogamiques.

2.6 Principaux maladies du blé

La culture du blé dur est exposée à plusieurs maladies. Les principales maladies sont les suivantes :

- ➔ La **rouille jaune** et brune se situent sur les feuilles. Ce sont des petites pustules jaune ou brunes qui empêchent le bon fonctionnement de la photosynthèse de la plante. Il peut donc être nocif pour la culture s'il est très présent. La rouille jaune apparaît en condition humide et fraîche tandis que la brune apparaît en condition douces et humides.

Des Outils d'aide à la décision sont utiles pour décider de traiter. Si la décision est prise, il faut traiter avec des triazoles ou strobilurines.

- ➔ La **septoriose** est aussi une maladie du feuillage, c'est un champignon. Il en existe deux sortes: la septoria tritici (automne-hiver jusqu'à épiaison) et la septoria nodorum (stade épiaison).

Elles ont un effet négatif sur les plantes, car en étant sur celle-ci, elles baissent le rendement de la photosynthèse par conséquent le rendement final. Des outils d'aide à la décision existent pour lutter contre ce champignon.

Pour cela de nombreux produits sont à la disposition avec des efficacités différentes. Les principales familles de produits chimiques sont les strobilurines et les triazoles. Mais l'apparition de résistances réduit l'efficacité des strobilurines.

- ➔ **L'oïdium** est un feutrage blanc sur les feuilles avec des fructifications noires. C'est un champignon qui se développe grâce à une hygrométrie élevée et à des températures douces. Le risque avec ce champignon, c'est le manque de talles à partir de la montaison sur toutes les plantes porteuses d'où perte de rendement. On peut traiter si besoin en début montaison.

- ➔ Le **piétin** verse est aussi un champignon qui s'installe dès l'automne mais qui apparaît au printemps le temps que l'incubation se produise. Il existe deux types de souches. Les souches dites rapides et les souches lentes. Le nom latin des souches rapides est *Tapesia yallundae* et celui des souches lentes est *Tapesia acuformis*.

L'effet sur la plante est caractérisé par un échaudage partiel et une verse de la plante. De nombreux outils d'aide à la décision existent pour le piétin verse. Pour traiter contre ces champignons, on peut utiliser du prochloraze ou du cyprodinil. Sachant toutefois que le premier fongicide, c'est le soleil.

- ➔ La **fusariose** de l'épi et du pied ; Il existe deux types de souches: la *fusa roséum* se trouvera sur les épis et *microdochium nivale* se situera sur les feuilles. La *fusa roséum* est caractérisée par un temps lourd et humide tandis que *microdochium nivale* est caractérisée par un temps frais et humide. La fusariose est responsable des mycotoxines.

Toutes les maladies fongiques ont une influence sur le rendement puisqu'elles encombrant pour certaines une partie de la feuille voire la totalité ; ce qui inhibe le rendement photosynthétique, donc le rendement, puisque la plante est moins bien nourrie.

En plus des différentes maladies fongiques, un grand nombre de ravageurs ont un impact plus ou moins important sur le rendement et la qualité des récoltes. Les limaces dévorent l'extrémité des feuilles de blé, mais aussi et surtout les pucerons qui attaquent la tige comme l'épi et plus secondaires les nématodes, cécidomyies, larves de tipules. Les sélectionneurs de blé dur tentent aussi de maintenir la résistance aux rouilles du blé et s'efforcent constamment d'intégrer une résistance stable aux taches foliaires, aux maladies transmises par les semences et à la fusariose de l'épi.

Il existe des gènes de résistance aux ravageurs, notamment à la cécidomyie orangée du blé (*Sitodiplosis mosellana*), au cèphe du blé (*Cephus cinctus*) et à la mouche de Hesse (*Mayetiola destructor*) (Lamb et al., 2000; Lamb et al., 2001; Clarke et al., 2002) dans le germoplasme du blé dur canadien. et les sélectionneurs y font constamment appel.

Certes, l'utilisation de variétés résistantes aux maladies est considérée comme étant le meilleur moyen de lutte par les chercheurs. Cependant, la rotation peut contribuer également comme un moyen alternatif de lutte culturale.

2.7 Qualité du grain de blé

La résistance aux maladies et une bonne qualité technologique reste parmi les plus recherchées (Benbelkacem *et al* , 1998). La quantification de l'interaction Génotype – Milieu explique que les conditions environnementales ayant un rôle prévalent à jouer dans la détermination des paramètres de qualité chez le blé dur (Hacini, 2014).

La concentration en ions métalliques varie beaucoup dans le grain, et l'on exploite actuellement cette variabilité pour sélectionner des cultivars à grains pauvres en cet élément (Clarke et al., 2002).

Selon Barbottin , (2004), la caractérisation des critères d'adaptabilité pour des variables relatives à la qualité des récoltes reste relativement peu fréquente dans la littérature. Une des raisons est que la qualité est généralement multicritère, représentée par de nombreuses variables.

Pour le blé, dans le cadre d'une étude des critères de qualité biscuitière et boulangère, Basset *et al.* (1989) ont montré les possibilités de la caractérisation de la stabilité génotypique sur la base des critères de qualités relatifs à la farine du blé.

BESOINS EN EAU, SECHERESSE ET IRRIGATION D'APPOINT DE LA CULTURE DU BLE DUR

3.1 Eau et production végétale

3.1.1 Rôle de l'eau dans la plante

L'eau joue un rôle fondamental dans la croissance et la vie des plantes. Seules certaines plantes adaptées à des conditions de vie désertiques ou semi-désertiques peuvent résister à une sécheresse prolongée (quelques plantes à feuilles réduites en épine, cactées, plante crassuléscentes). Toutes les activités physiologiques et métaboliques sont conditionnées par la présence de cet élément qui constitue un vecteur des éléments nutritifs (Riou, 1993). L'eau absorbée, qui entre dans la plante joue le rôle d'un liquide conducteur de sève (que ce soit la sève brute, riche en sels minéraux, où la sève élaborée, riche en sucre produites par les feuilles) et d'autre part pour la vie elle-même de chaque cellule de la plante.

Toutes les réactions biochimiques du vivant se produisent en effet en milieu aquatique. Il ne peut y avoir de division cellulaire, donc de croissance et de développement de nouveaux organes, sans eau. Selon Thiault (1977), la carboxylation photosynthétique qui s'effectue dans les chloroplastes utilise précisément l'hydrogène de l'eau pour la synthèse des glucides. Le manque d'eau peut ne pas être le seul élément freinant la photosynthèse : une température élevée supérieure à 30 °c provoque également la fermeture des stomates. En général la teneur en eau des tissus végétaux se maintient entre 60 et 90 % du poids frais (Binet et Brunet, 1967 ; Heller et al., 1993).

Selon Hillel (1984), en climat sec, les plantes qui croissent dans les champs consomment des centaines de tonnes d'eau par tonne de matière sèche végétale de croissance, c'est à dire que les plantes doivent véritablement transmettre à l'atmosphère instable la plus grande partie de l'eau qu'elles extraient du sol, souvent au delà de 90 %.

3.1.2 Estimation des besoins en eau des cultures

3.1.2.1 Introduction

Selon Poly (1979), le bilan d'eau au niveau d'une surface s'exprime en terme énergétique : C'est le bilan d'énergie. Il résulte d'apport et de pertes. Le climat est l'un des facteurs qui influe le plus sur le volume d'eau que la culture perd par évapotranspiration (Doorembos et Pruitt , 1975).

La détermination des besoins en eau des cultures se fait suivant deux grandes méthodes.

3.1.2.2 Méthode directe

Cette méthode est basée sur le principe du bilan hydrique à effectuer durant tout le cycle de développement de culture selon l'équation suivante :

$$ETM = I + P - D \pm V_s$$

I : Irrigation (mm)

P : Pluie (mm)..

D : Drianage (mm)

Vs : Variation du stock d'eau dans le sol

Les lysimètres sont les instruments nécessaires pour l'application de cette méthode. Deux types de lysimètres sont utilisés ; le lysimètre classique ou évapotranspiromètre à drainage et le lysimètre pesable. On doit donc réaliser des apports en irrigation quotidiennement, enregistrer les pluies, évaluer les pertes d'eau par drainage et déterminer la variation du stock d'eau dans le sol entre la réserve en eau initiale et finale du sol.

3.1.2.3 Méthode indirecte

Le principe de cette méthode est basé sur l'utilisation de la fameuse relation suivante :

$$ETM = K_c \times E_{To}$$

Kc : coefficient cultural

ETo : Evapotranspiration potentielle de référence

On calcule l'évapotranspiration potentielle journalière ou décadaire selon le degré de finesse voulu. Puis, on choisit le coefficient cultural multiplicatif le quel est fonction de la nature de la culture, de la phase de vie du végétal et des conditions climatiques (Ollier et Poirée, 1981). Plusieurs formules empiriques sont utilisées pour l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle issues de deux méthodes :

- ➔ Celles qui sont issues d'ajustement statistiques : Thornthwaite , Blaney - Criddle et Turc
- ➔ Celles qui sont issues de l'analyse de l'ETP en tant que processus énergétique : Bouchet, Brochet Gerdier, Penman et Penman-Monteit

L'importance des pertes d'eau par transpiration des feuilles des plantes dans les conditions optimales d'alimentation en eau est d'autant plus grande que le rayonnement est important, la température élevée, l'air sec et le vent fort (Gallais, 1980). L'accroissement des pertes d'eau transpirées semble provenir d'une augmentation de la tension de vapeur entre la feuille et l'air (Monteny, 1972).

3.1.3 Efficience agronomique de l'eau

L'efficience de l'eau consommée est définie comme étant le rapport entre le gain en matière sèche produite pendant un intervalle de temps donné et l'évapotranspiration d'un couvert végétal (Brunini et al., 1984). Selon Marty (1977), l'efficience s'exprime par le rapport de matière sèche totale à l'eau consommée. Elle est sensiblement égale au rapport de la photosynthèse nette à transpiration.

Selon Gros (1979), en absence de facteurs limitant agronomique (manque d'eau, carence, parasites...), le stockage de la matière sèche dans les grains est l'aboutissement de trois processus physiologiques à savoir :

- ➔ la rapidité de mise en place de la surface, son importance et sa durée de fonctionnement.
- ➔ l'efficience de la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique par le végétal.
- ➔ la répartition des métabolites produits par les feuilles entre les différents organes de la plante.

En milieu déficitaire en eau, par l'amélioration du niveau d'efficacité d'utilisation de l'eau en par les pratiques culturales (Gregory et *al.*, 2000). Effectivement, le travail du sol améliore la structure du sol, en assurant une porosité suffisante qui permet à son tour un meilleur stockage des eaux pluviales sans pertes par ruissellement superficiel.

3.2 Sécheresse en agriculture

3.2.1 Définition

Plusieurs définitions ont été données à la notion de sécheresse, il n'y'a pas une définition commune au concept de la sécheresse. Bien entendu, il est retenu que la sécheresse est un déficit en eau comparée à une situation considérée normale pour les plantes.

3.2.2 Tolérance des plantes à la sécheresse

La résistance à la sécheresse du blé dur est un phénomène très complexe qui fait intervenir plusieurs caractères phénologiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques (Daaloul et al, 2014). Les caractéristiques racinaires ne constituent qu'un des types d'adaptation que la plante doit aligner aux autres (adaptation physiologiques, morphologiques et phénologiques reliées aux autres parties de la plante) pour faire face à la sécheresse (EL Fakhri et al., 2010). Un système racinaire profond et puissant est une forme essentielle pour la résistance à la sécheresse. Selon Karrou, (1992), l'horizon superficiel 0-40 cm est la partie du profil cultural qui souffre le plus rapidement du déficit hydrique du fait qu'elle est exposée à une forte perte en eau par évaporation. Cette évaporation expose les racines à un dessèchement du sol et donc à la sénescence et au flétrissement rapide de la plante (Karrou, 1992 in Karrou, 2000).

Le développement racinaire est considéré comme l'un des facteurs importants de la variabilité inter et intra- spécifique de la tolérance à la sécheresse (benlaribi et *al.*,1990). Chez les blés dur et tendre, la diminution de l'indice foliaire soit la principale stratégie qui permet d'atténuer les effets de la diminution de la disponibilité de l'eau dans des conditions de stress. La diminution de l'expansion foliaire est soumise à un double contrôle, comprenant les équilibres hydriques et les signaux hormonaux provenant des racines (Alem et al, 2002).

Selon Tardieu et Dreyer (1997), en situation de manque d'eau disponible pour la plante, cette dernière ferme ses stomates pour diminuer les pertes. Cependant, cette fermeture diminue les échanges gazeux et par conséquent, le système photosynthétique sera perturbé. Cette perturbation entraîne une diminution de la productivité de la plante.

L'analyse systématique des caractères phénologiques et morpho physiologiques d'adaptation au déficit hydrique montre que le problème de tolérance ne peut être envisagé indépendamment du type de sécheresse rencontré (Ali Dib et al, 1992).

La sécheresse de début de cycle coïncide avec le démarrage de la culture (levée, tallage) et celle de fin du cycle, qui est la plus fréquente et qui affecte le remplissage des grains (Watts et El Mourid, 1988). Selon Debaeke (2009), la stratégie d'esquive à la sécheresse consiste à décaler les stades phénologiques les plus sensibles au déficit hydrique (souvent la floraison) par le choix de variétés précoce ou de semis anticipées.

L'analyse des régimes pluviométriques à des échelles mensuelles et décadaires décrit le type de régime pluviométrique et confirme le caractère erratique des précipitations sans toutefois permettre de situer la contrainte par rapport aux différents stades morphologiques de la plante (Benseddik et Benabdelli, 2000).

Classiquement, dans les études sur les effets de la sécheresse, la réduction de la croissance de la plante n'était envisagée que comme une conséquence du manque d'eau. Aujourd'hui, les chercheurs ont repensé cette relation, et considèrent la régulation de la croissance de la surface foliaire et du système racinaire comme un moyen de s'adapter au déficit hydrique. Ainsi, la croissance des feuilles est-elle directement régulée par les conditions climatiques: plus la demande évaporatoire est importante (atmosphère sèche, vent), plus la croissance des feuilles est faible, même pour des plantes bien alimentées en eau. Par ailleurs, en situation de déficit hydrique, un signal d'origine racinaire entraîne une réduction supplémentaire de la croissance des feuilles. Le déficit hydrique inhibe plus la croissance du système racinaire que le système aérien (Khaldoun et al, 1990 ; Benlaribi et al 1990).

Un changement, quel qu'il soit dans une des composantes environnementales du blé devient alors une opportunité pour la sélection à modifier les types génotypiques, afin de créer des cultivars mieux adaptés aux nouvelles conditions (Austin, 1999). De nouvelles technologies pour l'évaluation, la dessiccation, et la cartographie des composantes de la tolérance à la sécheresse ainsi que le transfert de cette information parmi les espèces, permettent d'accélérer la compréhension de ce phénomène. De plus, l'exploitation de la variation génétique et des avantages évolutifs de certaines espèces peuvent augmenter notre connaissance et nous apporter une source de gènes pour les transférer à d'autres espèces (Sorrells et al, 2000).

3.2.3 Stress thermique chez le blé dur

Les excès de température pendant la pleine croissance de l'épi (entre le stade de méiose et la floraison) se traduisent par des diminutions de rendement. Sur l'ensemble de la phase de remplissage, l'optimum thermique se situe vers 14 °c (Gate, 1997).

Aux températures élevées, l'activité respiratoire du grain croit de manière considérable et est en partie responsable des pertes de matière sèche. Les températures excessives pourraient aussi intervenir sur le contrôle de la synthèse de l'amidon et sur la régulation du transport des photosynthétats vers l'endosperme.

Contrairement aux basses températures survenant au même stade, le stress thermique induit surtout une stérilité femelle. A 30 °c, le tiers des ovaires a des sacs embryonnaires absents ou très peu développés (Gat, 1997).

L'augmentation de la température des feuilles accélère le taux de transpiration et par conséquent ceci favorise l'apparition du stress hydrique chez la plante (Anderson, 1990).

L'effet dépressif peut résulter en parallèle d'un arrêt plus précoce de l'activité photosynthétique lié à l'apparition de la sénescence. Des températures extrêmes, supérieures à 30°C peuvent provoquer une altération des membranes des chloroplastes et diminuer l'activité de certaines enzymes de la photosynthèse comme la rubisco (Gate, 1997). Cet effet dépressif est accentué quand l'augmentation de température s'accompagne de l'élévation de la demande climatique ou d'un déficit hydrique.

Le stade épi à 1cm constitue une limite critique dans le parcours de la plante car à partir de ce stade, la plante est très sensible au gel. Une seule journée de température inférieure à -4° sous abris peut engendrer des dégâts. L'apparition de cette sensibilité au gel à ce stade précis s'explique par le fait qu'avant le stade épi 1cm, l'épi est logé au milieu du plateau de tallage situé au bas du sol et donc mieux protégé. Au cours de montaison, l'épi se situe d'une part à une hauteur de plus en plus élevée et d'autre part, il n'est plus entouré que par sa tige et par les gaines et limbes de feuilles qui cessent de l'abriter au fur et à mesure de leur émergence. Il est possible de limiter les effets du gel en créant par l'intermédiaire d'une densité faible, des décalages assez importants d'état de croissance entre les tiges d'une même plante. Dans les régions où la double contrainte climatique (risque de gel d'épis en cours de montaison et d'échaudage au

cours du remplissage du grain) est fortement présente, le choix d'une date de semis précoce doit donc s'accompagner d'une faible densité de semis (Gate, 1997).

3.2.4 Stress hydrique chez le blé dur

3.2.4.1 Concept du stress hydrique

Les stress hydrique et thermique (gel et hautes températures) affectent le développement de la céréale tout au long de son cycle (Bouzerzour et Monneveux, 1992). Cependant, la sévérité de l'incidence du stress hydrique sur le rendement dépend du stade végétatif auquel survient la contrainte hydrique (Mongensen et al, 1985).

Selon (Abbad et al, 2004) au fur et à mesure que le stress hydrique se développe, la photosynthèse de l'épi diminue moins que celle de la feuille étendard. Indépendamment du niveau du stress appliqué, on note une meilleure corrélation de la photosynthèse de l'épi avec la biomasse et le rendement par rapport à celle notée avec la feuille étendard. Parmi les acides aminés indicateurs du stress hydrique par leur accumulation est la proline. Plusieurs sélectionneurs et physiologistes se sont basés sur son accumulation dans le criblage de génotypes résistants au déficit hydrique (Benlarabi et Monneveux ,1988) . Parmi les processus d'accumulation de la proline est la stimulation de sa synthèse par les stress (Morris *et al.*, 1969 ; Boggess *et al.*, 1976).

Tahri et al, (1998) à travers les résultats d'une étude sur l'effet du stress osmotique ont montré l'existence d'une connexion vraisemblable entre les voies de biosynthèse des pigments chlorophylliens et de la proline. Selon (Dekkaki et al, 2000), la fluorescence chlorophyllienne constitue un outil potentiellement intéressant pour l'évaluation de la tolérance du blé dur aux basses températures et au stress hydrique. Le comportement du cal vis-à-vis du stress n'est cependant pas toujours similaire à celui de la plante entière et la prise en considération de ces deux niveaux d'organisation apparaît nécessaire pour une meilleure compréhension de la complexité des mécanismes permettant à la plante de faire face au stress (Bajji et al, 2000). Les racines produites sous stress hydrique sont plus longues, plus fines et ramifiées. Un effet compensatoire apparaît entre les paramètres d'enracinement. Le nombre et le volume de racines sont réduits (Daaloul, 2014).

Le phénomène du stress hydrique dépend également des facteurs internes relatifs à la plante comme le fonctionnement de leur système hormonal régulateur des plantes. En cas de stress hydrique, les stomates après élévation du gaz carbonique dans les chambres sous-stomatiques se ferment. Cette fermeture est commandée par l'hormone appelée acide abscissique. En cas de déficience de certaines hormones, les stomates ne se ferment pas et par conséquent la plante flétrit suite aux pertes d'eau (Meyer et al., 2004).

Les effets du stress sont liés au degré et la durée du stress, au stade de développement du végétal et sa capacité génotypique (Welsch et al, 2008). Cependant selon Ben Naceur (1999), quel que soit le stade durant lequel survient le déficit hydrique, il affecte aussi bien la croissance que le rendement. Des déficits hydriques précoces pendant la phase tallage entraînent un arrêt du tallage (Davidson et Chevalier, 1990 ; Gate, 1995). Lorsqu'il survient juste avant l'épiaison (gonflement), ses conséquences sont les plus néfastes. Pendant cette période l'épi est déjà formé mais les organes floraux peuvent être sérieusement endommagés ce qui donne des épis dont la base et le sommet sont stériles. D'où l'intérêt d'apporter une irrigation de complément pendant cette période afin d'atténuer les effets de la sécheresse et sauver le maximum de production en cas de déficit hydrique.

La précocité d'épiaison est un mécanisme d'adaptation très important qui permet l'esquive des stress de fin de cycle (Ceccarelli et Grando, 1992 ; Monneveux P, This D, 1996; Richards et al, 1997).

3.2.4.2 Indicateurs morfo-physiologiques du stress hydrique

3.2.4.2.1 Méthodologie

Le stress hydrique peut être détecté par la mesure de certains paramètres biophysiques et physiologiques qui sont en relation avec la croissance et l'état hydrique de la plante tel que les indices de végétation, la teneur en chlorophylle, l'indice de surface foliaire, la transpiration, le potentiel hydrique et les isotopes stables. Des méthodes pour estimer et mesurer ces indicateurs sont actuellement utilisées par les chercheurs. La télédétection infrarouge thermique présente l'avantage de la rapidité et de la facilité d'acquisition. Ceci a conduit au développement de plusieurs indicateurs de stress hydrique basés sur la relation qui existe entre la température, les propriétés optiques des végétaux et leur état hydrique. L'utilisation de ces indicateurs en agriculture de précision se heurte à plusieurs limites. La plupart des indicateurs a été développée en utilisant

des mesures satellitaires et aéroportées pour établir des diagnostics à l'échelle régionale. Or, les facteurs environnementaux qui conditionnent la transpiration au niveau de la plante ainsi que la structure du couvert végétal exigent des mesures plus précises à l'échelle spatiale (KOTCHI, 2004).

3.2.4.2.2 Paramètres liés à la croissance de la plante

Les principaux indices en relation avec la croissance de la plante utilisés actuellement par les chercheurs sont les indices de végétations, l'indice de chlorophylle et l'indice de surface foliaire.

L'indice de végétation NDVI permet de mesurer la biomasse à l'aide du Green seeker en balayant la surface du végétal du côté supérieur. Selon Kogan, (1995), l'indice indicateur du stress hydrique est l'indice de condition de la végétation (VCI), il est déterminé à partir du NDVI par la relation suivante :

$$CVI = \frac{(NDVI - NDVI_{\max})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})} \times 100$$

NDVI_{min} : minimum du NDVI décadaire moyen

NDVI_{max} : maximum du NDVI décadaire moyen

NDVI : valeurs respectives du NDVI des décades

Les mesures des indices GA et GGA s'effectuent par prises de photos digitales de la partie supérieure des plantes sur une hauteur de un mètre. Les photos seront ensuite traitées par des logiciels spécifiques tels que le BreedPix. Ces indices soient déterminés pour différents stades de croissance critiques du végétal.

L'indice de végétation (GA) représente toute la surface foliaire des feuilles vertes et celles en sénescence. Tandis que, l'indice de végétation (GGA) représente uniquement le taux de la surface foliaire active.

L'indice SPAD, permet la détermination du taux de chlorophylle relative. Le principe de cette mesure est basé sur la conversion de la lumière transmise par les feuilles en signal élec

trique par le SPAD. Le rapport entre les intensités de lumière transmise aux longueurs d'onde correspond à l'indice SPAD.

L'indice de surface foliaire (LAI) qui peut subir des transformations morphologiques suite à l'apparition d'une contrainte hydrique. Cet indice représente le rapport de la surface foliaire cumulée de l'ensemble des feuilles (une seule face) à la surface du sol correspondante. Plusieurs méthodes permettent l'évaluation des surfaces des feuilles. La méthode classique basée sur le décalque des feuilles sur papier. Après découpage de la surface de papier correspondante, la surface foliaire est déterminée par pesée en référence au poids d'une surface connue du même papier. On détermine la surface moyenne par pied. En déterminant le nombre moyen de pieds par mètre linéaire, on calcule la surface foliaire moyenne pour l'unité de surface correspondante. Cette méthode est laborieuse, elle nécessite le sacrifice des plantes du quelles sont arrachées les feuilles. D'autres méthodes basées sur le scannage ou prises de photos sont préférées actuellement.

3.2.4.2.3 Paramètres liés à l'état hydrique de la plante

La conductance stomatique est mesurée en calculant le flux et le gradient de vapeur. Cette mesure est réalisée à l'aide du poromètre .

Le taux de transpiration des plantes est lié au degré d'ouverture des stomates. L'ouverture des stomates dépend de la température foliaire. La température foliaire instantanée est mesurée à l'aide du pistolet infrarouge. L'appareil possédant une lentille optique qui capte l'énergie émise par les feuilles sous forme de radiation. Cette énergie collectée et concentrée par l'appareil est traduite en température, affichée sur son écran.

L'indice de stress (CWSI) est calculé par la relation suivante :

$$CWSI = \frac{T_c - T_w}{T_s - T_w}$$

T_c : température du couvert végétal est déterminée par une caméra thermique

T_w : température du thermomètre mouillé

T_s : température de l'air sec mesurée sous abris

3.2.4.2.4 Isotopes stables

La préoccupation majeure des chercheurs actuellement est le développement de variétés de blé tolérantes à la sécheresse et ce pour assurer la sécurité alimentaires des populations dans le monde. Plusieurs projet à travers le monde, particulièrement dans les régions à contraintes ont été entrepris ces dernières années. Cependant les mécanismes physiologiques complexes et la variabilité des environnements posent des difficultés. Parmi les plus importants caractères de tolérance à la sécheresse est l'efficacité d'utilisation de l'eau. De ce contexte, l'émergence de la méthode isotopique a complètement modifié ces données. Le formalisme mathématique des transferts de CO₂ et de vapeur d'eau ainsi que celui du fractionnement isotopique du carbone lors de la photosynthèse permet d'attribuer à une plante ou à un organe donné d'une plante une valeur de composition isotopique qui révèle son efficacité d'utilisation de l'eau (Merah et *al.*, 1999). Le $\delta_{13}C$ varie en fonction des limitations photosynthétiques ou stomatiques, c'est un indicateur de l'efficience utilisation de l'eau. Cependant que le $\delta_{15}N$ est étroitement lié au métabolisme du nitrogène de la plante. Il permet potentiellement de détecter les différents comportements génotypiques sous conditions de stress.

3.3 Irrigation d'appoint du blé dur

On définit généralement l'irrigation comme l'apport d'eau au sol dans le but d'assurer l'humidité nécessaire à la croissance des plantes. Cependant l'irrigation de complément ou d'appoint a été définie par plusieurs auteurs convergeant pratiquement aux mêmes attentes.

Afin de faire face aux effets négatifs de la sécheresse, toute stratégie d'amélioration et de stabilité des rendements sous conditions climatiques méditerranéennes nécessite des apports d'eau supplémentaires pour la culture du blé dur qui était habituellement conduite en pluvial.

Selon Gros (1979), l'irrigation constitue le moyen le plus normal d'augmenter l'offre d'eau à la plante. La définition du concept de l'irrigation d'appoint a été définitivement arrêtée dans les recommandations du séminaire de Damas en 1990 par le comité du projet national de la gestion de l'irrigation d'appoint en culture pluvial et l'amélioration de la gestion de l'irrigation au niveau de l'exploitation agricole comme « l'irrigation d'appoint des céréales consiste dans l'apport d'une quantité d'eau complémentaire en vue d'augmenter la production et de la stabiliser sous des conditions où les cultures céréalières sont habituellement réalisées grâce aux seules précipitations pluviométriques, et sous lesquelles les apports effectués n'auraient pas suffi, seuls

à conduire, et ce, quelque soit le niveau des ressources en eau disponibles pour l'irrigation rares ou abondantes ». Ce concept a évolué, actuellement plusieurs auteurs l'expriment en irrigation déficitaire.

L'irrigation déficitaire est l'un des moyens permettant l'économie d'eau dans les régions à ressources hydriques limitées, sans toutefois pénaliser les rendements des cultures. L'efficacité de cette approche peut être testée en établissant de façon expérimentale la relation eau-rendement (Radhouane et Jamil Mellouli ; 2007).

Dans les zones semi-arides du sud de la méditerranée, la faiblesse des précipitations et leur distribution aléatoire se traduisent souvent par une situation de contrainte hydrique qui est présente pratiquement tout au long du parcours du rendement du blé dur. La région du Chélif fait partie des zones céréalières de l'Algérie frappées par cette sécheresse. Des baisses de rendements considérables du blé dur y sont enregistrées, parfois les rendements sont nuls. L'irrigation d'appoint y est devenue donc l'une des principales alternatives à entreprendre pour l'amélioration et la stabilité des rendements.

La valorisation des eaux de pluie par des irrigations de complément, en zone 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). Selon Lacoix (1989), en matière de dose et de fréquence d'irrigation, la marge de manœuvre s'inscrit dans la limite du niveau d'équipement de l'installation dont dispose l'irrigant au regard des surfaces à irriguer. Les caractéristiques essentielles en sont le débit maximum effectif d'irrigation et la surface à irriguer. Le niveau d'équipement peut s'exprimer en débit mobilisable moyen en mm/jour.

$$Q = \frac{1/10 q \times t}{S}$$

Q : débit mobilisable (mm/jour)

q : Débit de pompage (m³/h),

t : Temps effectif moyen d'irrigation (h/jour),

S : surface à irriguer (ha).

Les utilisateurs industriels exigent actuellement une certaine gamme de protéine dans le grain de blé pour d'éventuelles utilisations alimentaires (semoulerie, panification..). Cependant les travaux communiqués par l'institut du végétal (Arvalis) en 2013 montrent qu'il existe une relation négative entre le rendement et la teneur en protéines : à niveau de fertilisation équivalent, plus le rendement de la variété est élevé, plus sa teneur en protéines est faible. Mais pour un même niveau de rendement, certaines variétés valorisent mieux l'azote et affichent des teneurs en protéines plus élevées que d'autres. L'enjeu du choix variétal est estimé à +/-0.7% de protéines.

3.4 Pilotage de l'irrigation

3.4.1 Définition

Le pilotage de l'irrigation est encore appelé conduite ou programmation des arrosages. Il vise à prédire les besoins en eau d'irrigation et le contrôle de l'état de l'eau dans la plante. Il consiste donc à définir pour chaque irrigation, la date et la dose jugée optimale (Decroix et Peuch, 1985).

3.4.2 But du pilotage de l'irrigation

L'objectif du pilotage consiste à optimiser l'irrigation en répondant aux questions : Quand et combien faut-il apporter de l'eau d'irrigation ? (Decroix et Puech, 1985). Le pilotage tient compte également des façons de distribution de l'eau aux cultures tout en évitant les pertes importantes. Le pilotage préconise une maximisation des rendements et donc une optimisation de l'utilisation de l'eau d'irrigation en situation de déficit. Le pilotage permet d'éviter les effets des excès d'humidité dans le sol. Une irrigation pilotée, permet d'éviter tout type de stress hydrique que se soit du à un excès ou manque d'humidité dans le sol. Elle aide donc l'optimisation de la gestion des périmètres irrigués.

En face de rareté de cet élément précieux, il devient plus qu'indispensable d'adopter une gestion rigoureuse des pratiques d'irrigation permettant une meilleure économie des volumes d'eau d'irrigation et la protection de l'environnement, car on considère que l'irrigation est aussi une source de pollution. Actuellement ces pratiques font l'objet de l'agriculture de précision (Seelan et al., 2003).

3.4.3 Méthodes de pilotage

3.4.3.1 Pilotage par tensiométrie

Le principe de cette méthode est basé sur le suivi régulier de la tension de chaque tensiomètre après étalonnage de ce dernier entre deux valeurs, une valeur minimale à partir de laquelle se déclenche l'irrigation et une valeur maximale lorsque elle est atteinte l'irrigation. Les mesures doivent être effectuées sur la zone racinaire active à différentes pas de profondeur (Aidaoui et Hartani, 2000). Cependant, on doit noter que cette méthode ne convient pas bien aux cultures céréalières comme le cas du blé dur à cause des niveaux élevés de dessèchement que peuvent atteindre ces sols en absence de pluie. Les tensiomètres ne possèdent pas toute la souplesse de réagir entre des valeurs extrêmes de tension pour longtemps.

3.4.3.2 Pilotage par mesure de la température de surface

Cette méthode consiste à suivre quotidiennement l'écart entre la température du couvert végétale T_s et la température de l'air T_a . Les écarts positifs ($T_s - T_a$) sont cumulés et on considère que ce cumul est représentatif du déficit hydrique de la plante lorsqu'il atteint une valeur seuil estimée entre 4 et 5 °C. Au-delà, le rendement est pénalisé et il faut déclencher l'irrigation. Cette méthode est contraignante puisqu'elle nécessite un suivi quotidien au environ du midi solaire. Les mesures étant de plus perturbées en cas de vent ou de passage nuageux. Cependant elle offre des avantages, les mesures fournissent une information sur l'état physiologique de la plante et la mesure peut être répétée en n'importe quel endroit de la parcelle (Aidaoui et Hartani, 2000).

3.4.3.3 Pilotage par mesure du potentiel foliaire

Cette méthode est moins utilisée car elle présente l'inconvénient d'être laborieuse et délicate, parfois incertaine. Le principe consiste à mesurer la pression de l'eau dans les feuilles grâce à une chambre à pression appelée "chambre de Scholander". La mesure du potentiel foliaire s'effectue le jour sur une feuille fraîchement cueillie. On insère la feuille dans la chambre à pression en ne laissant sortir qu'une partie du pétiole, la mesure est d'autant plus précise que la portion sortante du pétiole est faible.

MATERIELS ET METHODES

4.1 Présentation de la région d'étude

4.1.1 Sols et superficies

La vallée du Chélif est composée de trois grands périmètres irrigués : Le haut , moyen et bas Chélif. Le périmètre du haut chélif est située à une altitude moyenne de 300 m, sa superficie totale est de 37000 ha dont 20300 ha équipés. Il est subdivisé en deux plaines séparées par le massif Doui ; la plaine de Khemis-Miliana d'une superficie de 25700 ha et la plaine de Kherba-El-Abadia, plus étroite d'une superficie de 11300 ha (Legoupil, 1974). Le périmètre s'étire le long de l'oued Chélif depuis la commune de Djendel à l'Est jusqu'à celle de Ain-Defla à l'Ouest. Il est délimité au nord par les monts du Zaccar et au sud par la commune de Bir Oueld Khelifa et Djelida.

Le périmètre du moyen chélif est situé à une altitude moyenne de 160 m, sa superficie totale de 25386 ha dont 18000 ha équipés. Le périmètre du bas chélif est située à une altitude moyenne de 70 m, sa superficie totale de 28249 ha dont 14575 ha équipés. Donc la superficie totale est de la vallée du Chélif est de 90635ha dont 52875 ha équipée. Par conséquent, le taux d'équipement moyen de la superficie totale de la vallée est de 58.34 avec un taux maximum d'équipement de 71 au niveau du moyen chélif. Les superficies irrigables sont : Haut Chélif (16500 ha), moyen Chélif (10000 ha) et le bas Chélif (15000 ha). Donc le taux moyen de la superficie irrigable de la vallée n'est que de 45.80 par rapport à la superficie totale.

Selon Boulaine (1957), les caractères des types de sols de la région sont :

- ➔ les sols alluviaux peu évolués qui dépendent essentiellement des modes d'alluvionnement,
- ➔ les sols hydro morphes qui sont assez étendus malgré le climat,
- ➔ les sols salins du chélif sont dans la très grande majorité des cas des sols primaires : ce n'est que dans des cas très limités que leur salure est secondaire,
- ➔ le type de sols automorphes des plaines du chélif.

Les principaux caractères communs de tous ces sols sont : un pH supérieur à 7, la présence d'horizon d'accumulation du calcaire même lorsque la roche mère n'est pas carbonatée, une nette argilification du profil par de l'argile de néoformation, des teneurs en sels solubles qui ne sont pas complètement négligeables, la répartition de la matière organique dans tout le profil, et une grande épaisseur de celui-ci.

Selon Picon (1974), il existe sept grandes classes au niveau de la plaine de khemis-miliana : des sols minéraux bruts, des sols peu évolués, des sols calcimagnésiques, des sols à sesquioxides de fer, des vertisols, des sols iso humiques et des sols hydro morphes.

4.1.2 Ressources en eau et irrigation

Les barrages implantés dans la vallée du chélif ont des capacités initiales totales (CIT) et touchés par des taux d'envasement (TE) différents à savoir : barrage Ghrib d'une CIT (240 Hm³) et TE (48%), barrage Deurdeur d'une CIT (115 Hm³) et TE (4%), barrage Harraza d'une CIT (70 Hm³) et TE (1%), barrage oued El Fodda d'une CIT (228 Hm³ et TE (45 %), barrage de Sidi Yaakoub d'une CIT (285 Hm³) et TE (1 %), barrage de Gargar d'une CIT (450 Hm³) et TE (3 %), barrage de Merdja S Abed d'une CIT (55 Hm³) et TE (13%), barrage Ouled Mellouk d'une CIT (127 Hm³), barrage sidi Mhamed Bentaïba d'une CIT (75 Hm³). En 2009, l'ensemble de ces barrages ont contribué avec un apport globale de 300 Hm³ en eau potables des populations et 490 Hm³ en eau d'irrigation.

Les fractions des superficies irrigués en fonction des spéculations pour l'année 2011 sont : pomme de terre de saison(16 %), la pomme de terre d'arrière-saison (12 %), l'arboriculture (49 %), fourrage (1 %), les cultures maraîchères (18 %) et les céréales (4 %). On constate l'absence des cultures industrielles dans la région.

Selon Boulaine (1957), comme toutes les plaines de comblement du pourtour de la méditerranée, les plaines du chélif constituent un milieu difficile à mettre en valeur. L'irrigation et le drainage doivent y être pratiqués conjointement et sont les seules moyens possibles d'une augmentation de la production végétale. Sur la base d'une étude de la biodiversité et de la pollution dans les canaux de l'Ouest Algérien : le cas de l'oued Cheliff, Anamar et al, (2011) conclue

qu'une vigilance constante et la mise en place d'une technique d'étude et de surveillance des cyanophycées et de leurs toxines sont fortement recommandées.

4.2 Caractéristiques du site expérimental

4.2.1 Situation géographique du site

Le site expérimental est situé dans les plaines de Khemis-Milina appartenant au périmètre du haut Chélif. Le principal terrain expérimental appartient à l'Institut Technique des Grandes Cultures de Khemis-Miliana. Il est situé à (36°15'N, 02°14'E, altitude 282 m). Le second terrain appartient à l'exploitation agricole de l'université de Khemis-Miliana, il est situé à 400 mètres environ du côté ouest du premier. On doit noter que l'ensemble des expérimentations de 2001 à 2009 sont réalisées sur le terrain de l'ITGC, à l'exception de la dernière expérimentation de 2014, qui a été réalisée dans le terrain de l'université.

4.2.2 Caractéristiques climatiques

4.2.2.1 Etage bioclimatique

Le climat est du type méditerranéen avec un caractère de continentalité marqué, aux étés très chauds, aux hivers froids, un printemps écourté (mars) et un automne très bref (octobre). Une station météorologique de l'ITGC fournit les principales variables climatiques journalières (Tableau 1) : températures maximale et minimale, durée d'insolation, vitesse du vent, humidité relative, précipitation. Le site appartient à l'étage bioclimatique semi-aride mais qui est au seuil de l'aridité suivant la valeur quotient d'Emberger qui est égal à 38.12, calculée sur la période (1990-2003) (figure 2). Ce quotient est calculé avec la relation $Q_2 = (3.43 \times P) / (t_{\max} - T_{\min})$, avec P : pluviométrie moyenne annuelle de la période (372.07 mm), t_{\max} : température moyenne des maximas du mois le plus chaud (37.31 °C), t_{\min} : température moyenne des minimas du mois le plus froid (3.83 °C).

Tableau 1

Précipitation (P) en mm et évapotranspiration potentielle de Penman moyenne mensuelle (ETP) en mm pour la période (1990-2008) et les saisons expérimentales 2001, 2002, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008 et 2009.

Périodes	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN
1990-2008 p ETP	32.0 82.7	53.2 39.3	54.9 23.4	54.5 25.7	46.8 40.6	42.7 76.9	35.9 103.3	25.4 151.7	5.9 193.5
2000-2001 p ETP	52.4 75.4	106 40.3	45.6 28.8	103.5 27.3	19.4 40.8	1.2 89.2	56.7 115	15.5 149.1	0 214.2
2001-2002 p ETP	45.2 92	77 41	32.7 23.1	25.9 29.2	12.8 45.4	28 85.5	26.4 107.7	38.3 163.4	0.4 206.5
2002-2003 p ETP	24 87.6	53.6 39.1	44.9 28.2	117.4 28.6	75.6 37.7	9.4 78.4	41.8 101	16.9 158.5	0 215.4
2003-2004 p ETP	35.6 79.8	79 39.1	101.8 23.5	38.7 25.5	33.3 45.9	41.3 76.2	31.1 107.5	42.6 123.2	9.6 192.4
2005-2006 p ETP	72.1 40.1	55 34.1	81.4 20.2	51.1 23.4	77.3 33.3	25.2 80.1	7.9 116.1	62.9 151.6	4.9 179.9
2006-2007 p ETP	1.6 97.3	11.7 47.6	69 21.2	15.4 26.3	47.9 45.1	126.8 70.1	78.5 85	0.5 150.1	0 194.3
2007-2008 p ETP	57.6 74.9	109.8 32	39 24.3	26.3 26.1	17.6 49.5	63.1 79.8	6.6 117.6	25.4 126.6	8.1 137.4
2008-2009 p ETP	43.2 75.6	77.2 40	105 20.7	89.4 31.7	31.8 47.3	73.5 88.9	74.9 96.2	19.1 165.8	0.4 204.9

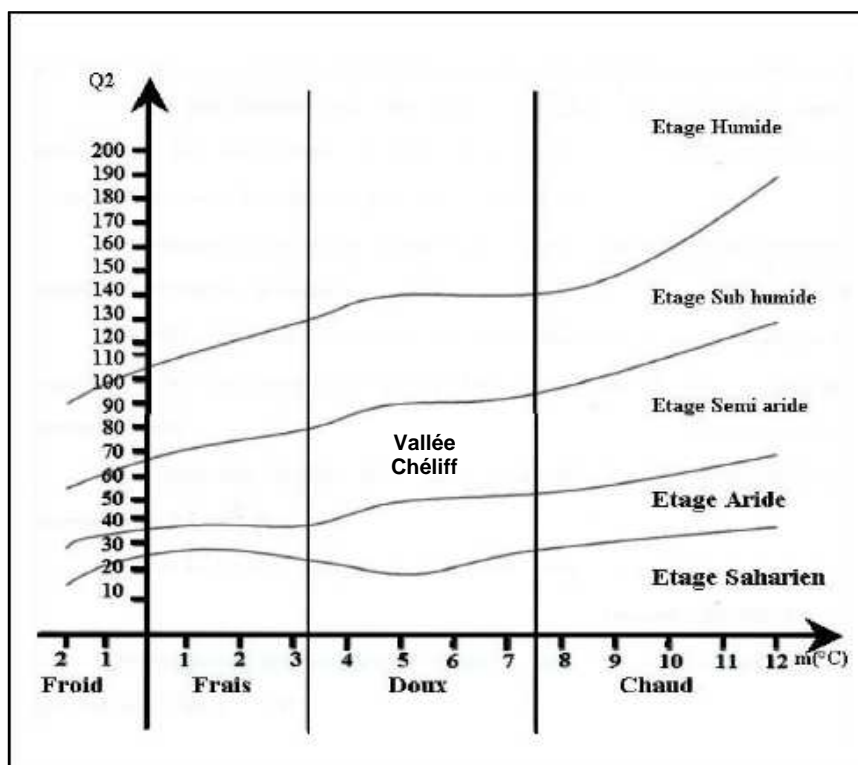


Figure 2 : Diagramme d'Emberger

La pluviométrie annuelle moyenne a connue des grandes variations sur plusieurs périodes d'estimation. Durant la période de Seltzer (1913 - 1938), la pluviométrie moyenne annuelle fut de 471 mm. Cependant durant la période (1990-2003), la moyenne annuelle enregistrée n'est que de 373 mm avec une régression d'environ de 100 mm.

Encore, la pluviométrie moyenne (1990-2008) cumulée des mois d'octobre à juin est de 351 mm, soit une régression de 120 mm et la valeur d'ETref (Penman) cumulée est de 737 mm, soit un déficit pluviométrique moyen de 386 mm sur cette période. Cette quantité de pluie est faible par rapport aux exigences hydriques de la culture qui sont de 550 à 600 mm (Moule, 1980)

Au cours des mois de décembre, janvier et février coïncidant avec la période d'installation et le démarrage de la culture du blé dur, les températures minimales moyennes enregistrées varient de 2 à 5 °c avec des valeurs extrêmes qui oscillent entre -1.9 et 15.7 °c parfois ne sont pas favorable à la bonne germination (Eliard, 1974 ; Boyldieu, 1982). Egalement, le nombre de jour de gelée est très important, il dépasse souvent 20 jours. Ceci peut pro-

voquer des dégâts sur le rendement final (Gate, 1997). En plus des fortes températures dépassant parfois les 30 °c, fréquemment, cette région est soumise à des journées de sirocco au mois de mars et avril coïncidant généralement avec la période de formation du grain. De ce fait le parcours de l'élaboration du rendement final du blé soit soumis au phénomène d'échaudage durant son stade de remplissage du grain.

4.2.2.2 Période sèches et humides

Les valeurs moyennes mensuelles des températures confrontées aux valeurs moyennes mensuelles de la pluviométrie de la période (1990-2003) (Tableau 2) montrent à l'aide du diagramme ombrothermique de Gaussen une longue période sèche allant de la mi-avril à la mi-octobre (Figure 3).

Tableau 2

Température et pluviométrie mensuelles moyennes (période :1990-2003)

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
P(mm)	60.81	42.45	37.70	38.8	25.0	6.40	2.5	4.30	26.3	29.2	50.16	45.4
T°C	9.75	10.60	13.30	14.72	19.77	25.13	28.28	28.68	24.56	19.45	14.08	10.67

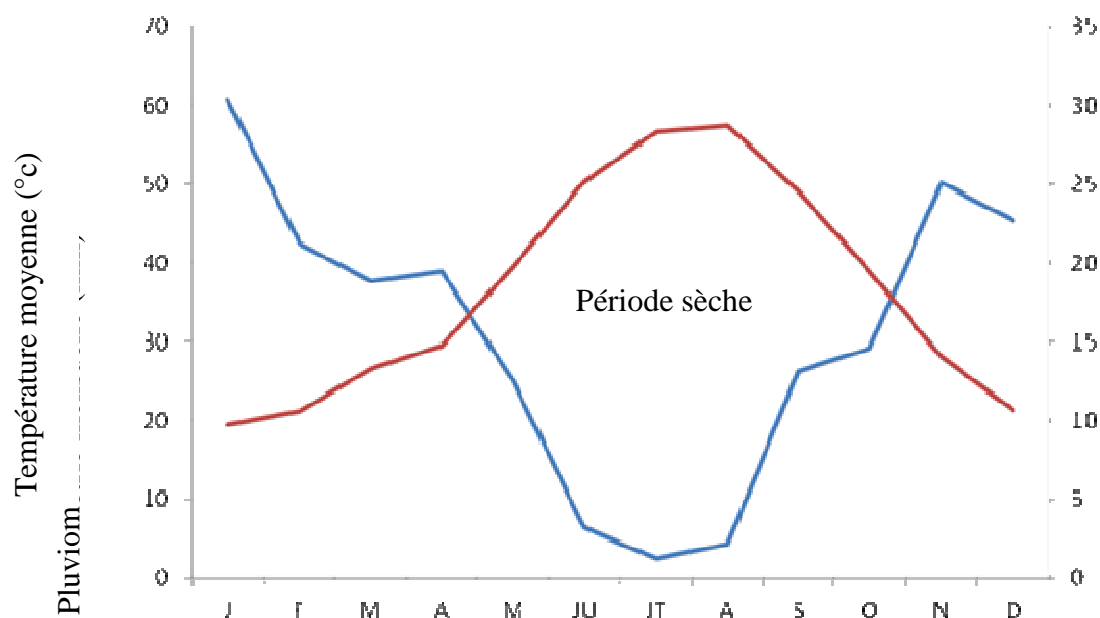


Figure 3 : Diagramme Ombrothermique de Gaussen (1990-2003)

4.2.3 Caractéristiques du sol

Les principales caractéristiques physico-chimiques des sols sont résumées au *Tableaux 3 et 4*. Le sol du terrain 1 de l'ITG est de texture limono-argileuse. Il n'est pas salé car sa conductivité électrique est inférieure à 4 mmhos/cm. Le sol est calcaire et sa capacité d'échange cationique est élevée. Le sodium représente des proportions inférieures à 10 % de la capacité totale d'échange. Les risques d'alcalinisation sont toutefois limités car le complexe absorbant est principalement saturé en calcium. Le sol est bien pourvu en matière organique dans le premier horizon (2 %), mais est très pauvre en profondeur. La réserve utile moyenne sur une profondeur de mètre est de 183 mm. La perméabilité moyenne du sol mesurée à saturation hydrique selon le principe de Mentz est de 1.15 cm/heure. Le sol du terrain 2 de l'université est à texture argileux limoneuse d'une capacité de rétention plus grande que celle du premier, son humidité pondérale moyenne au Pf 2.5 est de 27 % est celle du point de flétrissent est de 13 %. La réserve en eau utile sur une profondeur de un mètre est de 189 mm. Le sol n'est pas salé car sa conductivité électrique à l'extrait dilué est inférieure à 1.2. Le sol est bien pourvu en matière organique dans son premier horizon mais pauvre en profondeur.

Tableau 3
Principales caractéristiques physico-chimique du terrain 2

Horizon	CE (dS/m)	pH	CT %	MO %	Granulométrie		
					A%	L%	S%
0-25 cm	0,15	7,26	2.54	2.18	47.22	30.41	22.37
25-50 cm	0,10	7,80	1.69	1.54	48.99	31.60	19.41
50-75 cm	0,13	7,78	3.39	1.73	51.36	25.33	23.30
75-100 cm	0,15	7,77	4.24	1.10	45.71	22.94	31.35

Tableau 4
Caractéristiques physico-chimiques du terrain 1

Horizons pédologiques (cm)	0-25	25-45	45-70	70-100
Argiles (%)	30,49	31,00	30,45	43.00
Limons Fins (%)	23,94	25,14	24,25	20.16
Limons Grossiers (%)	24,15	24,73	24,53	18.85
Sables Fins (%)	10,08	9,83	10,03	5.97
Sables Grossiers (%)	10.67	9,30	10,73	11.97
Matière organique (%)	2,04	1,32	1.31	1.31
CO (%)	1,18	1,21	1,24	1.23
Nt (%)	0,04	0,03	0,03	0.06
Na+ (ppm)	305.9	317.4	319.7	724.5
Ca++ (ppm)	308.6	312.4	302.8	315
Mg ++ (ppm)	419.87	378.73	405.35	453.75
K+ (ppm)	261.97	250.24	242.42	246.33
CEC cmol/kg	21,15	23,04	22,61	21.14
Caco3 (%)	7,67	7,65	7,30	10.41
PH	7,69	7,55	7,56	8.07
CE (ds/m)	0,31	0,37	0,28	0.57
Densité apparente	1.34	1.40	1.37	1.48
Humidité pondérale du sol à la capacité au champ (Pf 2.5), (%)	25.20	24.60	24.80	25.40
Humidité pondérale du sol au point de flétrissement permanent (Pf 4.2), (%)	11.90	11.80	11.90	12.00

4.3 Dispositifs expérimentaux

Entre 2001 et 2014, neuf expérimentations annuelles ont été conduites sur l'irrigation de complément du blé dur pour exploiter la forte variabilité pluviométrique attendue. Entre 2001 et 2009, deux types d'expérimentations ont été menés :

- ➔ des expérimentations visant à étudier la réponse d'une seule variété à plusieurs régimes hydriques (2001, 2003)
- ➔ des expérimentations comparant la réponse de plusieurs variétés en régime pluvial ou irrigué.

Des dispositifs du type blocs aléatoires complets (*figure 4*) ont été adoptés pour les expérimentations 2001 à 2006. De 2007 à 2009, le dispositif est un split-plot avec le facteur irrigation en parcelle principale et la variété en sous-parcelle (*figure 5*). La surface de chaque parcelle élémentaire est de 6 m², constituée de 6 lignes de 5 m de long, séparés par une interligne de 20 cm.

En 2014, le dispositif est également un split-plot (*figure 6*) avec un facteur principal : irrigation et un facteur secondaire : variété avec trois répétitions. Le premier facteur est constitué de trois niveaux ; deux conduits en irrigué et un en pluvial. Le second est composé de quatre variétés (Chen's, Mexicali, Siméto et Vitron). Chaque variété occupe une parcelle élémentaire. La surface de chaque parcelle élémentaire est de 9.6 m², constituée de 6 lignes de 8 m de long, séparés par une interligne de 20 cm. Les parcelles des quatre variétés sont disposées aléatoirement, côte à côte, espacées de 20 cm.

Chaque répétition est constituée de 12 parcelles élémentaires faisant donc 36 parcelles élémentaires pour l'ensemble du dispositif. Cette expérimentation vise à atteindre un objectif spécifique ajouté à l'objectif global préconisé. Il s'agit d'un travail expérimental in situ conduit dans une perspective de rechercher les premiers outils de pilotage de l'irrigation du blé dur à grande échelle sur la base d'indicateurs de stress.

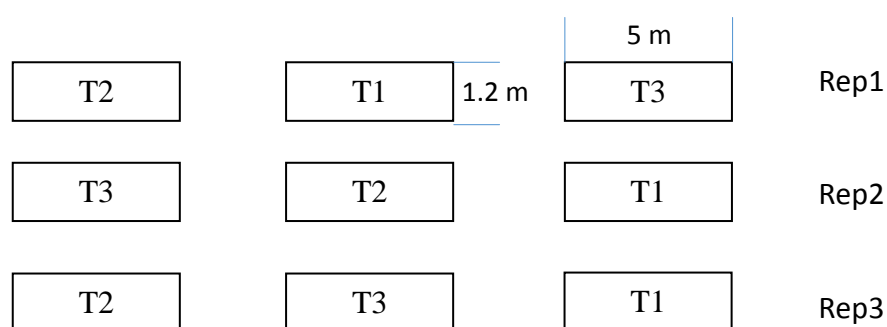


Figure 4 : Dispositif expérimental en blocs aléatoires complets (2006)

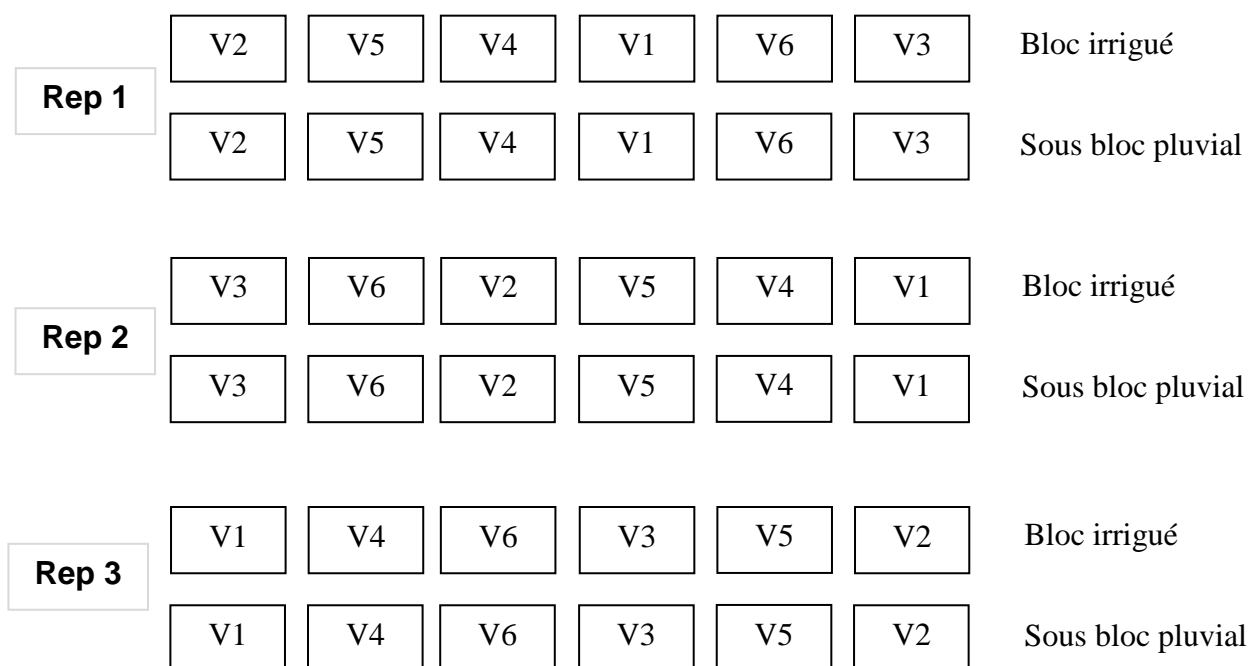


Figure 5 : Dispositif expérimental Split-Plot (2009)

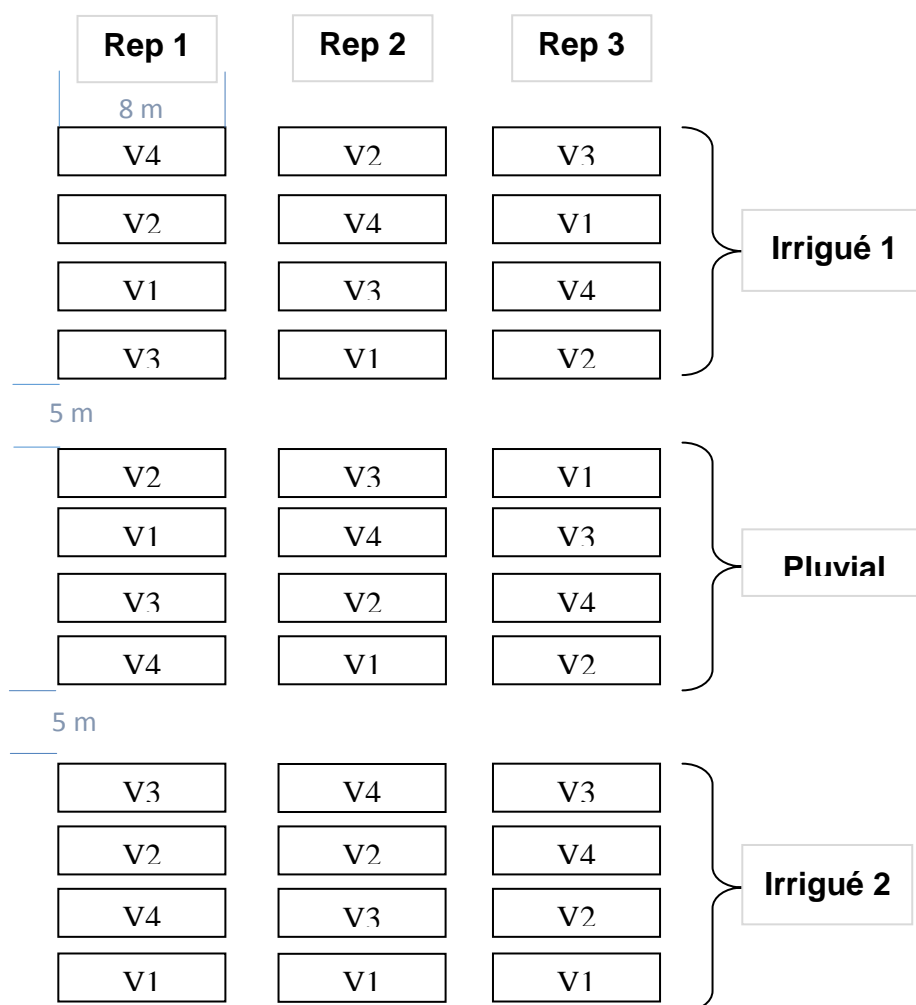


Figure 6 : Dispositif expérimental Split-Plot (2014)

4.4 Matériel végétal

Les génotypes de blé dur retenus pour cette étude sont : Bousselam (B), Chen's (C), , Mexicali (M), Mohammed Ben Bachir (MBB), Vitron (V), et Waha (W). Ce sont des lignés purs. Ils figurent parmi les génotypes les plus couramment utilisés en Algérie (Annicchiarico et al., 2006). Seul MBB est issu d'une sélection dans une population locale. Les autres variétés proviennent de sélections Cimmyt (Chen's, Mexicali), Icarda (Bousselam, Waha) ou espagnole (Vitron). En terme de précocité (à l'épiaison), les variétés se classent ainsi, de la plus précoce à la plus tardive: $C = M = W > V > B > MBB$. La différence de précocité entre le 1^{er} groupe et MBB est de 10 jours à l'épiaison (Mekhlouf et al., 2006).

4.5 Conduite de la culture

De 2001 à 2009, après un apport de $69 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de super phosphate (46 % P), le sol est labouré à 30 cm de profondeur après les premières pluies d'automne à l'aide d'une charrue à disques puis une reprise est effectuée à l'aide d'un covercrop suivi d'un passage de herse à rouleau cage avant semis. Les semis sont réalisés en décembre à l'aide d'un semoir expérimental à une densité de $350 \text{ grains m}^{-2}$. Les précédents culturaux sont dans l'ensemble des jachères sauf en 2004 et 2008, sont successivement fève et poids chiche. La fertilisation azotée est de $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ d'urée (46 % N) réalisée en deux apports, 40 kg ha^{-1} au stade trois feuilles et 60 kg ha^{-1} au stade début épiaison. Les sols sont riches en potassium avec de bonnes réserves d'où la fertilisation potassique n'est pas justifiée. La récolte est effectuée fin mai à début juin pour une humidité du grain de 12 à 14 % (*Tableau5*).

En 2014, le semis est tardif réalisé le 7 janvier sur précédent pomme de terre après un premier apport de 70 kg ha^{-1} d'azote, phosphore et potasse réalisé le 23 décembre à partir de l'engrais (15,15,15). Un deuxième apport en azote de 30 kg/ha à partir de l'urée (46 %) est réalisé au stade montaison.

4.6 Irrigation

En 2001, une expérimentation préliminaire a été menée sur la variété Chen's pour préciser les doses d'irrigation de complément pour le blé dur sur la base du déficit pluviométrique moyen. Ce déficit est la différence entre l'évapotranspiration potentielle de référence (ETref) et la pluviométrie. Les 4 régimes hydriques comparés étaient les suivants : (T1) pluvial ; apport à 3 stades clés (montaison, épiaison, début maturation) d'une dose d'irrigation couvrant 80 % (T2), 100 % (T3) et 120 % (T4) du déficit pluviométrique moyen calculé pour les 30 jours (T2) ou 20 jours (T3, T4) précédant le stade d'application (tableau 5).

La dose optimale obtenue en 2001 a été retenue comme base pour l'application d'une dose d'irrigation de référence pour les autres années d'étude, avec toutefois un ajustement selon la précocité et l'intensité du déficit pluviométrique. Le déficit pluviométrique moyen sur la période janvier-mai pendant laquelle s'opère l'irrigation est de 195 mm en moyenne (105-300 mm selon les années) . La contribution en eau du sol permise par le précédent jachère est très variable selon les années. Par ailleurs, la profondeur du front racinaire du blé ne dépasse pas 60 cm certaines années en raison de la sécheresse du sol au-delà et de la faible pluviométrie automnale.

Sur la base de ce déficit hydrique, les irrigations appliquées de type déficitaire visent à satisfaire le besoin en eau des variétés au cours des phases critiques du cycle cultural. Par contre, le calendrier d'application n'est pas optimisé par des règles de décision.

Les apports d'eau ont été réalisés par micro-aspersion à l'aide d'arrosiers étalonnés à l'échelle de chaque parcelle élémentaire. Cependant, durant l'expérimentation de 2014, les apports ont été réalisés par aspersion classique d'une densité moyenne de 3.5 mm/heure. Deux niveaux d'irrigations sont réalisés parallèlement au traitement conduit en pluvial. Le premier a reçu une dose globale de 150 mm fractionnée en sept apports variables. Cependant le second a reçu une dose globale de 75 mm, fractionnée en quatre apports variables. Le principe d'irrigation pour le premier traitement est basée sur une grande fréquence d'irrigation c'est à dire un important fractionnement de la dose globale et ce pour assurer une réserve facilement utilisable du sol au moins dans une couche partielle du profil d'épuisement durant toutes les phases critiques de la culture.

La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée par les variables suivantes : Ca⁺⁺ (6.93 meq/l), Mg⁺⁺ (5.67 meq/l), Na⁺ (6.43 meq/l), Hco₃⁻ (3.75 meq/l), CE (conductivité électrique) (2.5 ds/m), et PH (7.5). Le SAR (Sodium Adsorption Ratio) est égal à 2.62, ce qui ne présente aucun risque pour la dégradation du sol. Selon la classification de Riverside, cette eau appartient à la classe C₄S₁, niveau de salinité considéré comme élevé mais n'affectant pas le rendement potentiel du blé dur (Ayers et Westcot, 1985 ; Bauder et al, 2005).

Tableau 5
Principaux éléments de la conduite culturale et doses d'irrigation (mm)
Des expérimentations de 2001 à 2009.

Années	Date de semis	Date de récolte	Variétés	Irrigation	Tal	Mon	Epi	Mat	Total	ETR/ETM
2001	6/12/00	02/06/01	C	T1 (pluv)	-	-	-	-	-	0.51
				T2 (irrig)	-	40	40	60	140	0.73
				T3 (irrig)	-	50	60	80	190	0.81
				T4 (irrig)	-	60	70	90	220	0.85
2002	22/12/01	01/06/02	C, M, V, W	T4 (irrig)	-	60	70	90	220	0.76
2003	18/12/02	28/05/03	W	T1 (pluv)	-	-	-	-	-	0.61
				T2 (irrig)	-	-	40	60	100	0.83
				T3 (irrig)	-	-	60	70	130	0.89
				T4 (irrig)	-	-	70	80	150	0.92
2004	18/12/03	05/06/04	C, M, W	T1 (pluv)	-	-	-	-	-	0.50
				T2 (irrig)	-	60	70	-	130	0.82
2006	24/12/05	28/05/06	C, M, V	T1 (irrig)	50	-	60	80	190	0.87
2007	17/12/06	08/06/07	B, C, M, MBB, V, W	T1 (pluv)	-	-	-	-	-	0.68
				T2 (irrig)	50	-	-	-	50	0.81
2008	12/12/07	08/06/08	B, C, M, MBB, V, W	T1 (pluv)	-	-	-	-	-	0.38
				T2 (irrig)	50	-	50	80	180	0.66
2009	28/12/08	07/06/09	B, C, M, MBB, V, W	T1 (pluv)	-	-	-	-	-	0.52
				T2 (irrig)	50	-	50	80	180	0.82

C:Chen's, M : Mexicali, MBB : Mohammed Ben Bachir, V : Vitron, W : Waha

Tal: Tallage, Mon: Montaison, Epi: Épiaison, Mat: Maturation, (T1 à T4) : Traitements

Tableau 6
Principaux éléments de la conduite culturale et doses d'irrigation (mm)
de l'expérimentation de 2014.

Date semis	Date récolte	V	Irrig.	FT	M	FM	DE	E	FE	DM	Ma	Total	ETM/ETR
07/01 /14	12/06 /14	C,M, S,V	T1(pluv)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.40
			T2(irrig)	10	15	15	20	30	30	30	-	150	0.54
			T3(irrig)	-	20	-	20	-	20	-	15	75	0.68

V : variété, FT : Fin tallage, M : montaison, FM : fin montaison, E épiaison, FE : fin épiaison, DM : début maturation, Ma : maturation, (T1 à T3) traitements.

4.7 Bilan hydrique

Un modèle simple de bilan hydrique a été construit pour calculer la consommation d'eau (ETa) pour chaque situation. La consommation satisfaisant le besoin de la culture (ETopt) est calculée comme le produit $Kc \times ET_{ref}$. Les coefficients culturaux par stade (Kc) (tableau 7) proviennent de la FAO (Doorenbos et Kassam, 1979). On considère que la culture réduit sa consommation de façon linéaire dès que le régime ETopt n'est plus maintenu c'est à dire dès que la réserve en eau du sol devient inférieure à la réserve facilement utilisable, pour s'annuler lorsque la réserve en eau devient nulle. La réserve facilement utilisable correspond aux 2/3 de la réserve utile soit 121 mm. Sur la base d'une vitesse d'enracinement de 1.2 mm par jour (Paillard et al, 1992), on augmente régulièrement la taille du réservoir accessible aux racines. La quantité d'eau au semis du blé est initialisée en tenant compte du bilan pluviométrique des mois d'octobre et de novembre qui ont un poids déterminant sur la recharge du profil hydrique.

Tableau 7
Coefficients culturaux

Stade	initial	Developpement	Intermédiaire	Final	Récolte
Kc	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.65-0.7	0.2-0.25

4.8. Mesures sur la plante

4.8.1 Paramètres de production

Après la levée, le nombre de plantes levées est compté sur une placette de 1.2 m² (6 lignes) de chaque traitement. Les récoltes sont effectuées à la fin mai et début juin quand le grain atteint une humidité moyenne située entre 12 et 14 %. Les épis sont découpés in situ, manuellement à l'aide d'un ciseau. Après détermination du nombre d'épis par mètre carré, on compte le nombre de grain par épi sur des échantillons d'épis pris aléatoirement de la même placette unitaire. Après battage mécanique du reste des épis récoltés, on détermine le rendement en grain. Après mélange de la quantité totale des grains obtenus, on détermine le poids de mille grains. Le rendement en paille est obtenu en pesant les plants découpés à la base. Les résultats obtenus sont extrapolés sur un hectare.

4.8.2 Paramètres morfo physiologiques

En 2007, la mesure de la sénescence est effectuée en stade maturité sur la feuille étendard de trois plants choisis au hasard. Les mesures sont réalisées régulièrement pratiquement tous les deux jours à l'aide d'une règle à partir du début de la sénescence.

En 2014, les mesures sont élargies à d'autres paramètres morphologiques et physiologiques effectuées à différentes phases du cycle de la culture.

Ces mesures comportent la chlorophylle à l'aide de l'indice SPAD qui représente, le rapport entre les intensités de lumière transmises par les feuilles, converties en signal électrique aux longueurs d'ondes.

Les mesures ont portées également sur les indices de végétation (GA) et (GGA). Le GA représente toute la surface des feuilles, y compris les feuilles en sénescence tandis que le GGA représente uniquement les feuilles vertes actives. Ces indices sont déterminés par traitement de photos numériques à l'aide du logiciel spécifique Breed Pix_0_2.jar. Les prises de photos sont faites verticalement à un mètre au dessus de l'extrémité supérieure de la plante, couvrant une superficie de 01 m². La biomasse exprimée en indice de végétation normalisé (NDVI), à l'aide du Greenseeker. Un dosage précis des isotopes stables du Carbone et Azote au niveau du grain récolté et la feuille étendard a été réalisé au niveau du laboratoire de l'université de Barcelone. Le dosage des isotopes a été réalisé seulement sur les échantillons issus des parcelles du traitement conduit en pluvial et le traitement (T2) ayant reçu la plus grande dose d'irrigation.

4.9 Indicateurs d'efficience de l'eau

On utilisera ici la terminologie proposée par Oweis et al (2006) pour comparer l'efficience de l'eau pour la production de grain entre années, régimes d'irrigation et variétés.

Ainsi, on parlera de PEP (productivité de l'eau de pluie) pour l'efficience de l'eau permise par la pluviométrie, de PET (Productivité de l'eau totale) pour l'efficience de l'eau permise par la pluie et l'irrigation, enfin de PEI (productivité de l'eau d'irrigation) pour traduire le gain marginal de rendement permis par l'irrigation. Ne disposant pas de mesures d'ETA pour chaque variété, on utilisera les précipitations (PEP), la somme précipitation + irrigation (PET) et l'irrigation (PEI) en dénominateur des 3 ratios précédents

4.10 Critères de qualité technologique

4.10.1 Teneur d'azote total du grain

Le dosage de l'azote total du grain est réalisé suivant la méthode de kjeldahl sur l'ensemble des traitements en pluvial et irrigué. Cette méthode date depuis 1983, son principe repose sur la transformation quantitative de l'azote organique contenu dans le grain en sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ par minéralisation avec de l'acide sulfurique concentré. Après mélange des grains récoltés, on prend un échantillon aléatoirement qui fait l'objet d'analyse. Les grains sont lavés avec l'eau distillée, séchés à 105 °c, avant de procéder à la phase minéralisation, distillation et titrage.

4.10.2 Teneur en protéine du grain

Le taux de protéine pour le blé destiné à la consommation humaine est obtenue en multipliant le taux d'azote par un coefficient ($K= 5.7$) utilisé par les chimistes céréaliers et les meuniers, différent de celui utilisé par les industries de l'alimentation animale ($K=6.25$).

4.11 Analyses statistiques

Les analyses de variance ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistix 9.0 (Analytical Software, Tallahassee, FL, USA) et les moyennes ont été comparées à l'aide de test statistique séparant les groupes homogènes sur la base des différences significatives au seuil $P < 0.05$. Des corrélations globales ont été réalisées à l'aide du logiciel Spss. Ces corrélations ont permis d'établir les modèles optimisés entre le rendement en grains et les variables explicatives. Des corrélations entre les isotopes stables (carbone et azote) du grain et de la feuille étendard d'une part et les autres paramètres morpho-physiologiques et de production d'autre part sont déterminées. Puis des modèles mathématiques entre isotopes et les paramètres significativement corrélés sont réalisés. On note que le traitement (T3), moyennement irrigué, a été exclu de ces corrélations et modèles de relations réalisés à cause du manque d'analyses des isotopes stables.

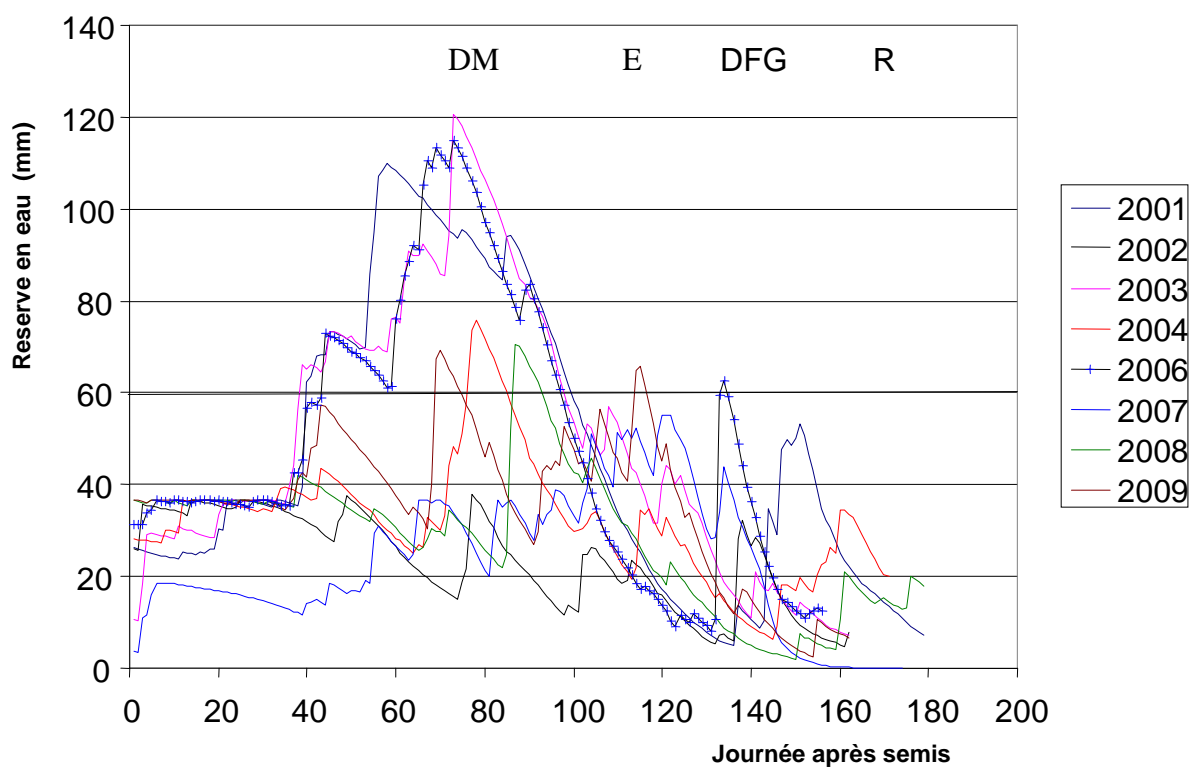
Résultats et discussion

5.1 Intensité et répartition annuelle de la contrainte hydrique

Pour la période expérimentale (2001-2009), on observe une grande variabilité des régimes pluviométriques (*Tableau 1*) puisque les précipitations enregistrées entre octobre et juin varient de 287 mm (2001-02) à 515 mm (2008-09). Sachant que la normale est de 351 mm, on peut distinguer 4 types d'années selon la pluviométrie : (i) déficitaire (2002 : 81 % de la normale) ; (ii) proche de la normale (2001, 2003, 2007, 2008 : < 115 %) ; (iii) excédentaire (2004, 2006 : 115-125 %) ; (iv) fortement excédentaire (2009 : 146 %).

Sur la base du déficit climatique P-ETref, on obtient sensiblement le même classement avec 2 années extrêmes : 2002 (117 % de la normale) et 2009 (37 %). Les autres années s'échelonnent entre 65 % (2006) et 97 % (2003).

Pour apprécier les différences inter-annuelles de répartition de la contrainte hydrique, nous avons simulé l'évolution de la réserve en eau du sol en régime non irrigué pour les années d'étude (*Figure 7*). On distingue ainsi une situation à sécheresse précoce très marquée (2007) avec un retour tardif des pluies en fin de montaison. A l'inverse, les années 2001, 2003 et 2006 se caractérisent par une forte disponibilité en eau jusqu'en montaison suivie d'un dessèchement marqué du profil de sol. C'est le cas également de 2004 et 2008 avec une plus faible disponibilité avant montaison. L'année 2009 se traduit à l'inverse par une grande régularité de la disponibilité en eau au cours du cycle bien que celle-ci se situe à un niveau modéré. A l'inverse, l'année 2002 se caractérise par un déficit hydrique précoce et prolongé. Pendant la phase de formation du nombre de grains par épi, c'est l'année 2009 qui est la plus favorisée. En phase de remplissage du grain, l'année 2001 apparaît comme la moins pénalisée.



DM : début montaison ; E :épiaison ; DFG : début formation du grain ; R : récolte
 SE : onset of stem elongation ; H : heading ; GF : early grain filling ; Harv : harvest

Figure 7 : Evolution de la réserve en eau du sol disponible pour la plante au cours des 8 années d'étude : simulations issues du bilan hydrique simplifié

Les différentes années ont permis de disposer de scénarios de sécheresse contrastés et d'évaluer leurs impacts sur le rendement du blé en pluvial. Les sécheresses précoces de 2004 et 2007 qui ont impacté le nombre de plantes et le nombre d'épis par m² ont fortement réduit le potentiel de production. En effet, la contrainte hydrique au stade tallage provoque un arrêt de l'émission des talles et la réduction de la croissance des talles émises (El Hafid et al., 1998). Un stress hydrique sévère réduit la longueur et le volume des racines séminales, principalement dans les couches profondes du sol, réduisant donc la ressource en eau disponible ultérieurement pour le blé (Adda et al., 2005). Il en résulte une sensibilité accrue au déficit hydrique et une pénalisation du potentiel de production difficile à compenser par des irrigations plus tardives.

Les scénarios de sécheresse plus habituels concernent la mise en œuvre plus ou moins précoce et rapide de la sécheresse au cours de la montaison avec pour conséquence une réduction de la fertilité de l'épi et/ou du poids d'un grain. La régression des talles au cours de la montaison peut également affecter le nombre d'épis (Debaeke et al., 1996).

La représentation du parcours d'élaboration du rendement proposée à la (*Figure 14*) rend bien compte de cet éloignement graduel vis-à-vis du potentiel de production en conditions de pluviométrie régulière.

Les variétés testées ont été différemment affectées par les scénarios de sécheresse selon leurs caractéristiques morphologiques, physiologiques et phénologiques ainsi que leur mode d'élaboration du rendement. En comparant deux variétés Waha et Vitron sous deux traitements de déficit en eau, Larbi et al (2000), a conclu que Waha est relativement tolérante à la sécheresse au stade levée que Vitron. David (2009) a évalué la capacité d'ajustement osmotique de plusieurs cultivars de blé dur basée sur l'expression du grain de pollen, il a conclu que MBB, Bousselam et Chen's ont la plus haute tolérance à la sèche, Waha et Mexicali d'une tolérance intermédiaire et Vitron d'une faible tolérance.

5.2 Evaluation des besoins et consommations en eau du blé dur

5.2.1 Besoins en eau maximums

Les résultats d'estimation empirique de l'évapotranspiration maximale (ETM) du blé dur sous climat semi-aride définie par le produit du coefficient cultural à l'évapotranspiration potentielle de Penman sont représentés dans le (*tableau 8*) . On constate que ces besoins sont caractérisés par une grande variabilité inter-annuelles. Les besoins du cycle complet fluctuent d'un minimum de 307.91 mm en 2007 vers un maximum de 463.29 en 2009. Ces variations sont dues principalement aux changements contrastés de la demande climatique.

Tableau 8:
Besoins en eau maximum (ETM) en mm du blé dur

Date	S-L	L-DT	DT-DM	DM-DE	DE-DMA	DMA-RE	Cycle
2001	4.77	6.75	36.68	114.87	125.64	137.94	426.65
2002	4.59	5.21	36.77	119.67	129.12	128.07	423.43
2003	4.59	5.10	27.77	86.30	120.60	127.24	371.60
2004	4.32	5.9	47.32	122.57	124.44	76.29	380.84
2006	3.33	4.66	22.95	95.17	139.14	124.87	390.12
2007	2.70	5.70	24.56	69.48	79.47	126.00	307.91
2008	4.17	3.38	41.65	91.04	147.12	119.75	407.11
2009	3.57	7.56	40.42	110.34	100.69	200.71	463.29
Moyenne	4.00	5.53	34.76	101.18	120.78	130.11	396.37

S : semis, L : levée, DT : début tallage, DM : début montaison, DE : début épiaison
DMA : début maturation, RE : récolte

La répartition moyenne des besoins en eau suivant les stades de la culture estimée sur la période (2001- 2009) montre que les phases épiaison et maturation sont les plus exigeantes en eau avec 120.78 et 130.11 mm respectivement (Figure. 8).

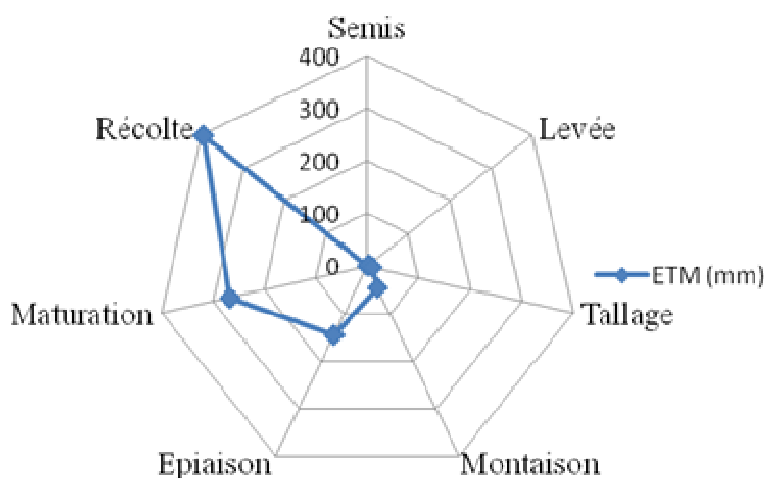


Figure 8 : Répartition des besoins en eau maximum sur les phases de la culture

5.2.2 Consommations en eau en pluvial

Les résultats d'estimation par bilan hydrique simplifié de l'évapotranspiration réelle (ETR) en pluvial sous climat semi-aride sont représentés dans le tableau (Tableau 9). Une grande variabilité interannuelle est enregistrée qui s'étale d'un minimum de 154.5 mm en 2008 à un maximum de 241.1 mm en 2009, avec une moyenne de 206.64 mm sur la période (2001- 2009).

Tableau 9 :
Evapotranspiration réelle (ETR) en mm du blé dur en pluvial

Date	S-L	L-DT	DT-DM	DM-DE	DE-DMA	DMA-RE	Total (cycle)
2001	4.77	6.75	36.68	86.97	25.93	58.16	219.26
2003	4.56	5.10	27.77	84.41	75.20	29.11	226.15
2004	4.32	5.90	40.98	74.64	35.70	28.61	190.15
2007	2.65	5.70	24.56	69.48	79.47	26.72	208.58
2008	4.17	3.38	32.80	63.42	31.39	19.41	154.57
2009	3.57	7.56	38.54	84.94	72.60	33.90	241.11
Moyenne	4.01	5.74	33.56	77.31	53.38	32.65	206.64

S : semis, L : levée, DT : début tallage, DM : début montaison, DE : début épiaison
DMA : début maturation, RE : récolte

5. 2.3 Consommations en eau en irrigué

Les résultats d'estimation par bilan hydrique simplifié de l'évapotranspiration réelle (ETR) en irrigué sous climat semi-aride sont représentés dans le tableau (tableau 10). Une grande variabilité interannuelles est enregistrée, qui s'étale d'un minimum de 248.55 mm en 2007 à un maximum de 380.78 mm en 2009, avec une moyenne de 329.19 mm sur toute la période (2001- 2009).

Tableau 10 :
Evapotranspiration réelle (ETR) en mm du blé dur en irrigué

Date	S-L	L-DT	DT-DM	DM-DE	DE-DMA	DMA-RE	Total (cycle)
2001 R1	4.77	6.75	36.68	107.97	62.15	94.70	313.02
R2	4.77	6.75	36.68	112.78	74.38	111.46	346.82
R3	4.77	6.75	36.68	113.08	82.17	119.12	362.57
2002	4.59	5.21	28.36	88.99	88.48	108.1	323.73
2003 R1	4.56	5.10	27.77	84.41	104.64	81.82	308.30
R2	4.56	5.10	27.77	84.41	112.87	96.55	331.26
R3	4.56	5.10	27.77	84.41	115.13	106.11	343.08
2004	4.32	5.90	40.98	112.56	100.13	48.62	312.51
2006	3.33	4.66	22.95	94.04	98.96	114.86	338.80
2007	2.65	5.70	24.56	69.48	79.47	66.69	248.55
2008	4.17	3.38	32.98	63.53	75.93	88.87	268.86
2009	3.57	7.56	40.34	95.15	99.88	134.28	380.78
Moyenne	4.22	5.66	31.96	92.57	91.18	97.60	323.19

S : semis, L : levée, DT : début tallage, DM : début montaison, DE : début épiaison
DMA : début maturation, RE : récolte , (R1,R2,R3) ; régimes d'irrigation

5.2.4 Besoins et consommation en eau en pluvial et irrigué

La comparaison de la consommation en eau avec les besoins maximums pour les années 2007, 2008 et 2009 sous climat semi-aride (*figure 9*) montre qu'il existe un rapport de liaison stable entre le niveau de consommation en eau (ETR) d'une part, les besoins maximums empirique et l'état hydrique du sol d'autre part.

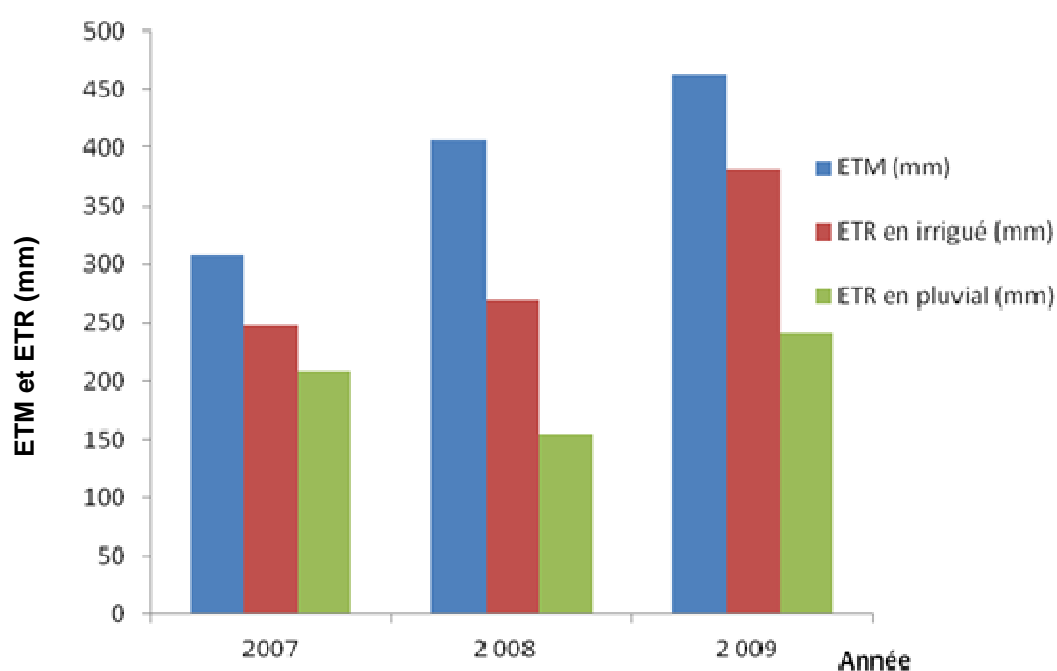


Figure 9 : Variations des besoins en eaux maximums et consommations en eau du blé dur sous climat semi-aride

5.2.5 Répartition des taux de consommation en eau sur les phases de la culture

La répartition des taux de consommation en eau sur les différentes phases de la culture est illustrée dans la *figure 10*.

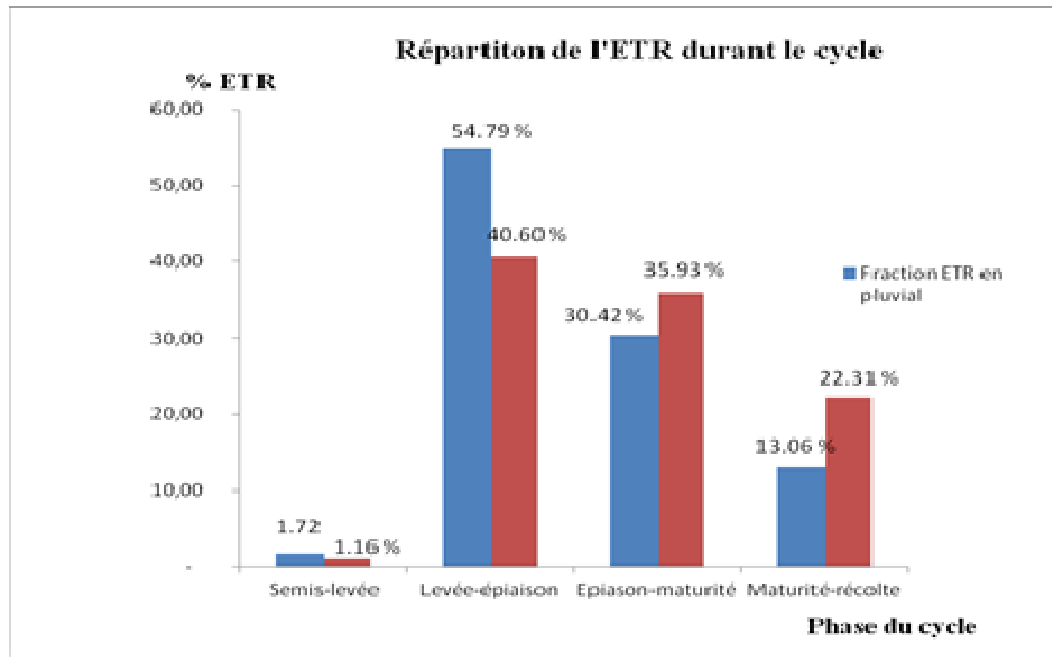


Figure 10 : Répartition des taux de consommation en eau sur les phases de la culture

On constate que :

- ➔ la phase : levée-épiaison renferme la plus importante fraction d'eau consommée
- ➔ relativement aux autres phases. En pluvial, cette fraction devient plus importante et prend plus d'écart. En irrigué, la consommation en eau est beaucoup mieux répartie par rapport à celle en pluvial. On peut dire donc que plus le sol est humide, plus que la culture prolonge mieux ses capacités d'utilisation de l'eau jusqu'aux dernières phases du cycle.

5.2.6 Taux de satisfaction des besoins en eau de la culture

Les taux de satisfaction des besoins en eau du blé dur exprimés par le rapport ETR/ETM durant les phases du cycle de la culture sont représentés dans les *tableaux 11 et 12*, respectivement pour les traitements conduits en pluvial et en irrigué.

Tableau 11
Répartition des taux(%) de satisfaction des besoins en eau (ETR/ETM) cumulées en pluvial

Phase	L-E	E-MA	MA-RE	Cycle
2001	84	20	43	51
2003	99	64	23	61
2004	80	29	37	50
2007	99	100	22	68
2008	74	22	16	38
2009	83	75	11	52

L : levée, E : épiaison, MA , maturation, RE : récolte

Tableau 12
Répartition des taux (%) de satisfaction des besoins en eau en irrigué

Année	Phase	L-E	E-MA	MA-RE	Cycle
2001	R1	96	48	70	73
	R2	99	59	82	81
	R3	99	65	87	85
2002		76	68	84	76
2003	R1	99	88	64	83
	R2	99	94	76	89
	R3	99	96	84	92
2004		91	81	64	82
2006		100	73	89	87
2007		100	100	54	81
2008		74	53	72	66
2009		90	100	45	82

L : levée, E : épiaison, MA : maturation, RE : récolte

5.3 Effet de la dose d'irrigation sur le taux de satisfaction

Les taux de satisfaction varient linéairement en fonction de la dose globale d'irrigation (Figure 11) mais en sont faiblement corrélés ($R^2=0.20$). Ceci montre clairement que la réponse du rendement du blé dur à la consommation en eau dépend de la répartition de cette satisfaction en fonction des apports sur les différentes phases critiques de la culture et non seulement sur la satisfaction globale durant tout le cycle.

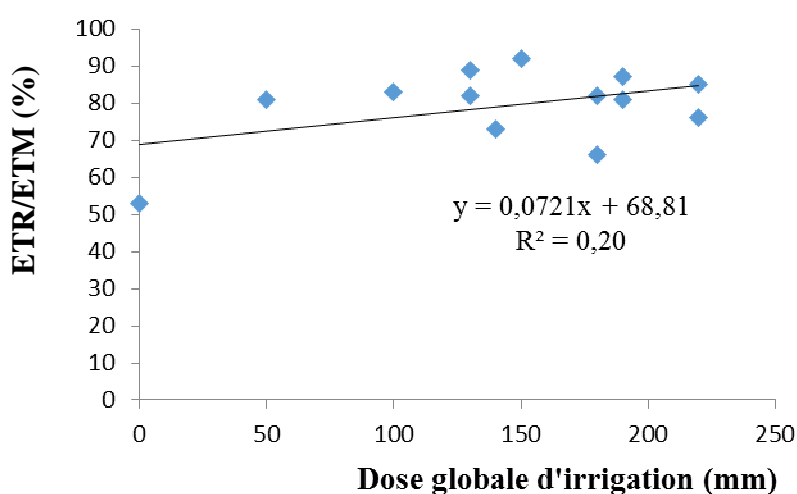


Figure 11 : Effet de la dose globale d'irrigation sur le taux de satisfaction moyen des besoins en eau du blé dur

5.4 Réponse pluriannuelle du blé dur en pluvial et irrigué

5.4.1 Gamme de réponse globale du rendement et ses composantes

Les réponses moyennes globales du rendement et ses composantes à l'irrigation en fonction des variétés étudiées et les années sous différentes conditions en pluvial et irriguées sont représentées dans le *tableau 13*.

Tableau 13

Réponses du rendement et ses composantes à l'irrigation en fonction des variétés et des années entre (2001-2006).

Année	Variété	Irrigation	Epis.m ⁻²	Grain.epi ⁻¹	PMG(g)	RG (q.ha ⁻¹)
2001	C	Pluvial	221b	28.7b	32.6b	17.32c
	C	Irrigué 1	282a	31ab	43.6b	33.81b
	C	Irrigué 2	279a	34.3a	43.03b	34.67b
	C	Irrigué 3	289a	34.3a	54.2a	43.98a
2002	C	Irrigué	272c	30c	31.96a	15.27b
	M	Irrigué	284a	18c	25.20c	11.47c
	V	Irrigué	278b	26b	27.95b	27.95a
	W	Irrigué	268 c	27b	30.80 ^a	10.73c
2003	W	Pluvial	296a	26.0b	27.8b	27.28c
	W	Irrigué1	297a	27.3ab	36.34 ^a	35.79b
	W	Irrigué2	297a	28.3a	35.82 ^a	37.07ab
	W	Irrigué3	298a	29 ^a	34.36 ^a	37.84 ^a
2004	C	Pluvial	152c	12.7b	21.76a	9.03b
	M		168a	15ab	23.62a	12a
	W		158b	15.7a	22.02a	6.68b
	C	Irrigué	189a	31.3a	25.91b	18.76a
	M		143b	30.3a	27.92a	12.41b
	W		199a	32a	27.64ab	17.85a
2006	C	Irrigué	373a	37.3a	24.81a	18.96a
	M		310b	31.7b	22.09b	10.68b
	V		220c	38a	21.35b	10.56b

(C): Chen's, (W): waha, (M): Mexicali. Les valeurs (une variété, une année) terminée par la même lettre dans la colonne est non significative au seuil (P <0.05).

Les corrélations simples entre le rendement et ses principales composantes ont été analysées pour les différents jeux de données (Tableau 14). Puis une régression linéaire stepwise a été réalisée (au seuil 5 %) (Tableau 15).

Tableau 14 **Correlations entre rendement en grain et composantes du rendement**

	N	Plantes.m⁻²	Epi.m⁻²	Grains.épi⁻¹	Grains.m⁻²	PMG
Total	57	0.255 ^{ns}	0.596 ^{***}	0.612 ^{***}	0.700 ^{***}	0.554 ^{***}
Irrigué	34	0.130 ^{ns}	0.406 [*]	0.649 ^{***}	0.655 ^{***}	0.595 ^{***}
Pluvial	23	0.401 ^{ns}	0.700 ^{***}	0.687 ^{***}	0.763 ^{***}	0.428 [*]
Chen's	14	0.469 ^{ns}	0.500 ^{ns}	0.635 [*]	0.633 [*]	0.732 ^{**}
Waha	13	0.488 ^{ns}	0.707 ^{**}	0.564 [*]	0.713 ^{**}	0.671 [*]

(ns) not significant ; * (P < 0.05) ; ** (P < 0.01) ; *** (P < 0.001)

Tableau 15

Coefficients de signification à (P < 0.05) de la régression stepwise linéaire entre le rendement en grain et ses composantes

	N	R²	Constante	Plantes.m⁻²	Epi.m⁻²	Grains.epi⁻¹	PMG
Total	57	0.652	-17.21 [*]	-0.057 [*]	0.049 ^{***}	0.448 ^{***}	0.809 ^{***}
Irrigated plots	34	0.703	-35.30 ^{***}		0.036 [*]	0.625 ^{***}	0.871 ^{***}
Rainfed plots	23	0.598	-2.19 ^{ns}		0.045 [*]	0.301 [*]	
Chen's	14	0.911	1.68 ^{ns}	-0.266 ^{**}	0.086 [*]	1.141 ^{***}	0.806 ^{***}
Waha	13	0.807	-46.75 ^{**}		0.092 ^{**}		1.531 ^{**}

Les cases vides correspondent aux variables non incluses dans le modèle à P < 0.05

Il ressort ainsi qu'en régime pluvial, les composantes d'élaboration les plus précoces comme le nombre d'épis par m² et le nombre de grains par épi sont les plus explicatives du rendement. En irrigué, les composantes NGE et PMG, cette dernière d'élaboration plus tardive, sont plus explicatives du rendement final. Par ailleurs le coefficient de corrélation du rendement avec le peuplement est plus élevé en pluvial qu'en irrigué où des compensations sont possibles par les autres composantes. La variation de poids d'un grain joue beaucoup moins en sec qu'en irrigué sur l'élaboration du rendement final.

De même entre les variétés Chen's et Waha, la hiérarchie des composantes importantes pour le rendement diffère : le NE est ainsi plus fortement explicatif du rendement pour Waha

alors que le PMG l'est davantage pour Chen's. Un fort nombre de plantes peut même être préjudiciable au rendement de cette dernière variété.

5.4.2 Réponses variétales pluriannuelles comparatives

5.4.2.1. Réponse variétale en conditions pluviales

La réponse du rendement de 6 variétés de blé dur a été comparée pendant 3 années (2007-2009) en conditions pluviales (*Tableau 16*). En régime pluvial, la variété Mohammed Ben Bachir est la moins productive en 2008 et 2009. Dans un contexte de sécheresse précoce (2007), elle est moins pénalisée que d'autres variétés mais sa production reste toujours < à 20 q.ha⁻¹. La variété Chen's exprime des rendements très stables en pluvial à un niveau supérieur à 20 q.ha⁻¹. Bousselam permet d'atteindre de forts potentiels (> 30 q.ha⁻¹) 2 années sur 3. Les variétés Mexicali, Vitron et Waha expriment une plus forte variabilité de production en pluvial avec des rendements analogues aux précédentes en 2009, année à bonne disponibilité hydrique.

Tableau 16

Réponse du rendement en grain (q/ha) des variétés en pluvial durant trois saisons agricoles

Année	Bousselam	Chen's	Mexicali	Mohammed Ben Bachir	Vitron	Waha
2007	30.17 a	22.83 b	12.00 c	16.33 c	13.17 c	12.17 c
2008	19.04 b	26.70 a	22.34 ab	6.90 c	25.22 b	21.40 b
2009	34.00 a	25.00 bc	33.33 a	17.33 c	25.00 bc	31.00 ab

Les valeurs suivies de la même lettre sur la même ligne présentent des différences non significatives

Tableau 17

Indices de récolte (IR) en conditions pluviales durant trois saisons agricoles

Année	Bousselam	Chen's	Mexicali	Mohammed Ben Bachir	Vitron	Waha
2007	0.49	0.40	0.30	0.17	0.28	0.27
2008	0.36	0.41	0.40	0.15	0.39	0.40
2009	0.33	0.30	0.37	0.22	0.33	0.34

5.4.2.2 Réponse variétale en conditions irriguées

Les comparaisons des moyennes des rendements élaborés par les variétés durant trois saisons agricoles sont représentées dans le *Tableau 18*. Les indices de récolte moyens sont résumés dans le *tableau 19*.

Tableau 18
Réponse du rendement en grain (q/ha) des variétés en conditions irriguées durant trois saisons agricoles

Année	Bousselam	Chen's	Mexicali	Mohammed Ben Bachir	Vitron	Waha
2007	34.60 a	29.41 ab	20.33 c	25.32 abc	21.50 bc	29.51 abc
2008	22.68 b	34.25 a	31.42 a	12.10 c	27.07 a	30.52 a
2009	51.33	49.33 ab	47.67 ab	28.00 c	40.33 b	53.00 a

Les valeurs suivies de la même lettre sur la même ligne présentent des différences non significatives

Tableau 19
Indices de récoltes (IR) en conditions irriguée durant trois saisons agricoles

Année	Bousselam	Chen's	Mexicali	Mohammed Ben Bachir	Vitron	Waha
2007	0.48	0.45	0.39	0.21	0.39	0.42
2008	0.38	0.46	0.40	0.25	0.36	0.43
2009	0.35	0.42	0.40	0.26	0.40	0.43

A l'instar de la variabilité pluviométrique, la variabilité inter-annuelle du rendement est forte dans les conditions semi-arides du haut Chélif : en effet, le rendement du blé dur en régime pluvial (toutes variétés confondues) varie de 9 (2004) à 28 q.ha⁻¹ (2009) et la consommation en eau ne dépasse pas 250 mm pour les 6 années d'étude.

En irrigué, le rendement maximal de 45 q.ha⁻¹ est atteint en 2009 et où la consommation maximale fut de 380 mm. L'année 2009 peut donc être retenue comme référence de production potentielle pour la région relativement au facteur eau. La variabilité observée est à relier à la diversité des stratégies d'irrigation testées.

En 2002, 2004 et 2006, les rendements sont particulièrement bas ($< 15 \text{ q.ha}^{-1}$) même en conduite irriguée. Plusieurs jours de vent desséchant (sirocco) lors de la floraison-fécondation sont à l'origine d'avortements d'épillets en 2002 et 2006 : ainsi 46 % des épis sont notés stériles en raison du fort déficit hydrique, de hautes températures et de fortes valeurs d'ETref journalières autour des phases floraison-fécondation.

En 2002, 15 jours après le début épiaison, sont enregistrées des températures allant de 29.5 °C à 32.1 , sur durée successive de 6 jours. En 2006, le même phénomène, s'est reproduit en deux périodes de 3 et 4 jours consécutives. Durant la première, 14 jours après épiaison, les températures ont atteint des valeurs situées entre 31.1 à 32.9 °C . Durant la deuxième période, 18 jours après épiaison, les températures ont atteint des valeurs situées entre 29 et 34.8 °C .

En 2004, le peuplement à la levée très faible ($< 200 \text{ plantes.m}^{-2}$) a pénalisé le rendement même en irrigué.

Le rendement du blé dur, toutes variétés confondues, augmente linéairement avec la consommation d'eau que celle-ci provienne des précipitations ou de l'irrigation d'appoint (Figure 13). La relation obtenue est la suivante : $\mathbf{RG}_{(t,ha-1)} = \mathbf{0.122xETR}_{(mm)} - \mathbf{3.557}$ ($\mathbf{R} = \mathbf{0.94}$), les années 2002, 2004 et 2006 ayant été exclues de la relation car pénalisées par des stress thermiques. Ceci correspond à une efficacité d'utilisation de l'eau moyenne de $1.10 \text{ kg grain.m}^{-3}$.

5.5. Réponse à l'irrigation d'appoint selon les années et les stratégies

Une irrigation d'appoint modérée permet un gain de rendement de 7 à 28 q.ha^{-1} selon les années et les stratégies d'apport. Le supplément de rendement permis par l'irrigation est en général inférieur à 10 q.ha^{-1} sauf en 2009 où des suppléments de 15 à 25 q.ha^{-1} ont été obtenus. La réponse à l'irrigation est d'autant plus forte que le rendement en pluvial est élevé.

Rendements en irrigué et en pluvial sont fortement corrélés pour les 6 années où une comparaison est possible ($\mathbf{R} = \mathbf{0.74}$) (Figure 12). On ne met pas en évidence d'interaction statistique significative pour le rendement entre régime hydrique et classement variétal.

En 2001 (cv.Chen's), le niveau de toutes les composantes du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation (moyenne des 3 régimes) : +28% (Epis.m⁻²), +16% (Grains.épi⁻¹), +45% (PMG), ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 116 % (*Tableau 13*).

En 2003 (cv.Waha), l'effet est plus modéré : pas d'accroissement du nombre d'épis, progression similaire du nombre de grains par épi et du poids d'un grain (+28 %), d'où un effet de +35 % sur le rendement en grains.

En 2004 (3 variétés), l'effet est significatif sur l'ensemble des composantes comme en 2001. Le très faible nombre d'épis est légèrement augmenté (+11%), l'effet est fortement marqué sur le nombre de grains par épi (+117 %) et plus modéré sur le poids d'un grain (+21 %). Si l'effet est important sur le rendement final (+77 %), le rendement permis par l'irrigation reste faible en valeur absolue.

En 2007 (6 variétés), l'apport précoce de 50 mm a augmenté significativement le nombre de grains par épi (+13 %) avec des conséquences positives sur le rendement (*Tableau 18*). Le nombre d'épis par m² a été peu augmenté en moyenne, stagnant à moins de 200.

En 2008 (6 variétés), les effets positifs de l'irrigation ne se sont manifestés significativement que sur le nombre d'épis par m² (+25 %).

En 2009 (6 variétés), l'irrigation d'appoint a joué positivement sur le nombre d'épis par m² (+10 %) et le nombre de grains par épi (+ 9 %).

Du fait de l'augmentation du nombre de grains par m² avec l'irrigation, le poids d'un grain augmente peu avec l'irrigation et les différences pour cette composante n'apparaissent plus significatives avec la conduite pluviale.

En l'absence d'interaction significative entre variété et régime d'irrigation pour les variables étudiées, on ne peut conclure à des réponses différentes des variétés testées aux différents régimes d'irrigation étudiés.

Ainsi, en irrigué, les parcours d'élaboration du rendement sont relativement constants tout au long du cycle en raison notamment d'irrigations souvent programmées à partir de l'épiaison.

En 2007, l'efficacité de l'irrigation précoce (50 mm) a été très élevée : PEI est de 1.35 kg.m⁻³ Un même apport de 180 mm en 2008 et 2009 n'a pas eu la même efficacité les 2 années : 0.34 vs 0.96 kg.m⁻³.

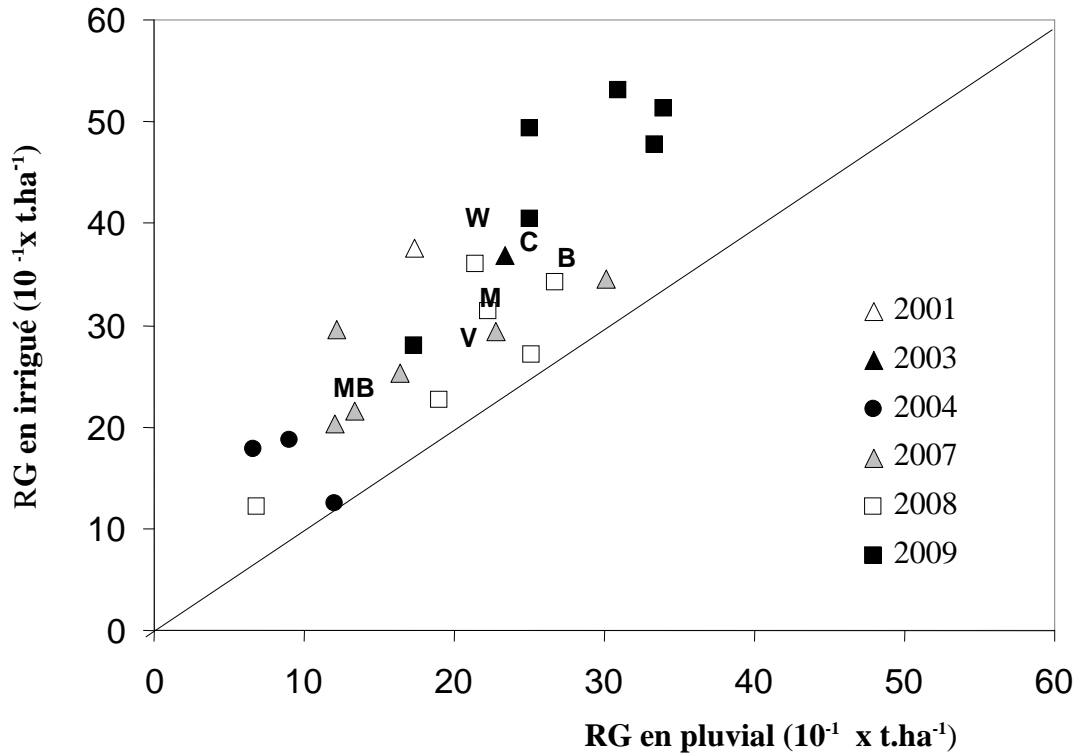


FIGURE 12 :Relation entre le rendement en grain en pluvial et en irrigué suivant les variétés et les essais de croissances

5.6 Réponse globale du blé dur à l'eau consommée

La bonne corrélation obtenue entre le rendement en grain et l'évapotranspiration réelle (Figure 13) ainsi que la productivité suggère que le model du bilan simplifié utilisé pour le calcul de l'ETR est raisonnablement réaliste dans ces sols. Les différents scénarios climatiques et les stratégies d'irrigation contrastées ont permis d'étudier la relation entre rendement et consommation en eau pour une gamme étendue de valeurs de rendement et d'ET. La valeur d'efficience d'utilisation de l'eau de 1.1 kg.m⁻³ correspond à la moyenne donnée par Zwart et Bastianssen (2004) pour le blé dans leur synthèse, ce qui masque une variation très

large de cette variable. Doorenbos et Kassam (1979) ainsi que Musick et Porter (1990) ont indiqué des valeurs communes de CWP entre 0.8 et 1.2. En Algérie et Tunisie, respectivement Bouthiba et al (2008) et Rezgui et al (2005) indiquent des valeurs de 0.6 à 1.4 selon la zone climatique de l'irrigation et variété

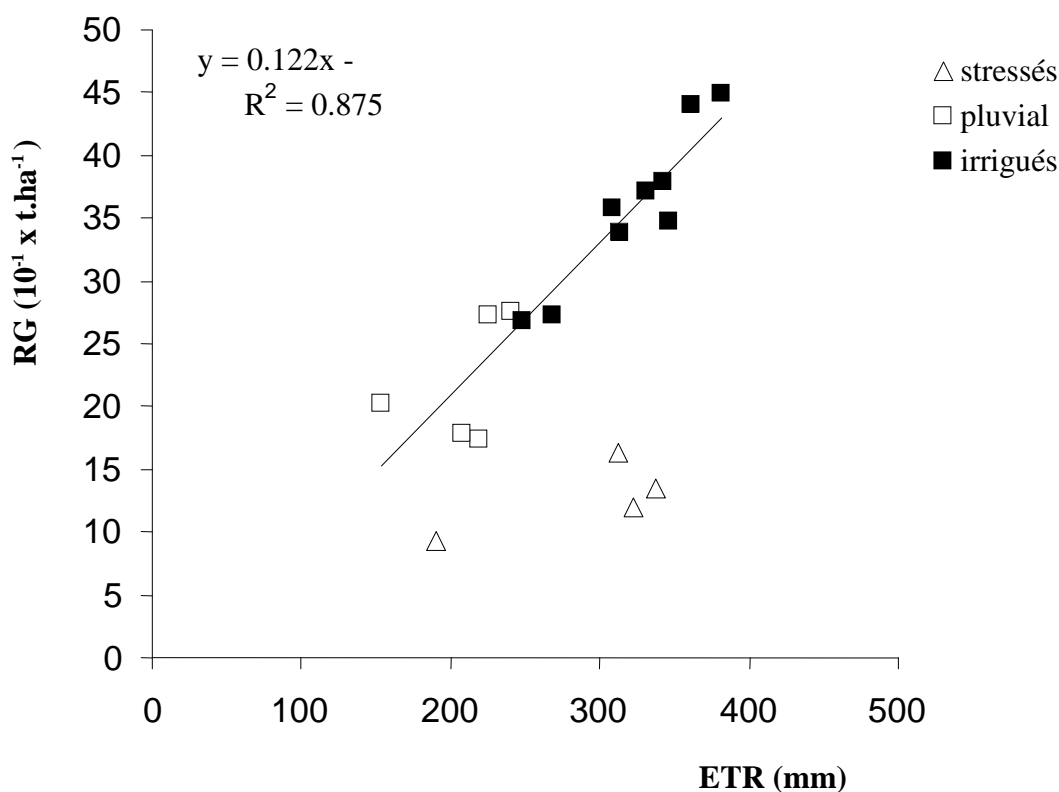


Figure 13 : Relation entre le rendement en grain et la consommation en eau de la culture

5.7. Comportement des variétés en pluvial et en irrigué

5.7.1 Variations inter annuelles des composantes du rendement

Les résultats de comparaison des composantes de rendement des six variétés conduite en pluvial et en irrigué sont représentés dans le (tableau 20).

Tableau 20

Réponse des composantes de rendement à l'irrigation en fonction des variétés et les années: 2007, 2008, 2009

Année	Composantes de rendement	Irrigation	B	C	M	MBB	V	W
2007	Epis.m ⁻²	Pluvial	197a	205a	155a	239a	164a	144a
		Irrigué	235a	190a	141a	284a	171a	150a
	Grain.épi ⁻¹	Pluvial	35abc	39.3abc	30.0bc	29.0c	33.0bc	35.0abc
		Irrigué	35.7 abc	45a	36.7abc	31.7bc	36.7abc	41.3ab
	PMG (g)	Pluvial	44.5a	31.3b	39.8a	23.0c	30.6b	34.3b
		Irrigué	44.1b	32.4c	45.0a	24.8d	38.3b	38.4b
2008	Epis.m ⁻²	Pluvial	359ab	335ab	343ab	270b	313ab	331ab
		Irrigué	475a	408ab	402ab	366b	406ab	390ab
	Grain.épi ⁻¹	Pluvial	31.3bc	37.0ab	30.3bc	26.7c	34.3ab	38.7a
		Irrigué	32.7bc	43.3a	31.3bc	28.0c	37.3ab	40.3a
	PMG (g)	Pluvial	31.5bc	39.3a	37.3ab	34.6ab	36.2ab	28.1c
		Irrigué	32.9abc	35.3abc	40.2a	30.9bc	38.7ab	30.2c
2009	Epis.m ⁻²	Pluvial	388a	302b	342ab	315b	311b	345ab
		Irrigué	407a	345a	402a	367a	311a	401a
	Grain.épi ⁻¹	Pluvial	49.3a	49.7a	48.3a	50.7a	51.7a	48a
		Irrigué	56.3a	55a	51.7a	54.7a	55a	53.3a
	PMG (g)	Pluvial	30.7a	35.3a	35.5a	31.7a	32.3a	31.7a
		Irrigué	34.7a	34.8a	36.7a	33.0a	37.7a	38.3a

Les valeurs suivies de la même lettre sur la même ligne présentent des différences non significatives

5.7.2. Diagnostic de l'élaboration du rendement en pluvial

L'élaboration du rendement du blé d'hiver est sanctionnée par 4 étapes : (i) la mise en place du peuplement à la levée (composante plantes.m⁻²) ; (ii) la mise en place du nombre d'épis par m² réalisée à l'épiaison (composante : épis.m⁻²) ; (iii) la mise en place du nombre de grains par m² achevée au début du remplissage (composante : grains.m⁻²) ; (iv) le remplissage du grain, achevé à la maturité physiologique (rendement en grain, q.ha⁻¹).

Pour effectuer un diagnostic des périodes du cycle qui ont été pénalisées par la sécheresse, nous avons représenté l'élaboration du rendement du blé dur sous la forme d'un parcours chronologique en exprimant chaque composante en % d'une référence bien alimentée en eau. La

référence retenue est le parcours réalisé en conditions irriguée par la variété Chen's en 2009, année de référence pour l'expression du potentiel de rendement. Le parcours d'élaboration du rendement a été représenté à la *Figure 14* pour les années 2001, 2003, 2004, 2007, 2008 et 2009 pour lesquelles un régime pluvial a été implanté. La variété Chen's a été choisie car elle est présente chaque année sauf en 2003 où seule Waha a été évaluée.

On observe ainsi que l'élaboration du rendement peut être compromis dès la phase de levée comme en 2004 où le peuplement est particulièrement faible en raison d'une sécheresse précoce. En 2007, la sécheresse est forte pendant la montaison ce qui aboutit à un faible nombre d'épis par m². En 2007, la sécheresse est forte pendant la montaison ce qui aboutit à un faible nombre d'épis par m². En 2008 et 2009, la contrainte hydrique est plus réduite et se manifeste lors de l'élaboration du nombre de grains par épi. Ainsi, en régime pluvial, les parcours d'élaboration du rendement divergent progressivement de l'optimum avec l'intensification de la contrainte hydrique au cours de la saison.

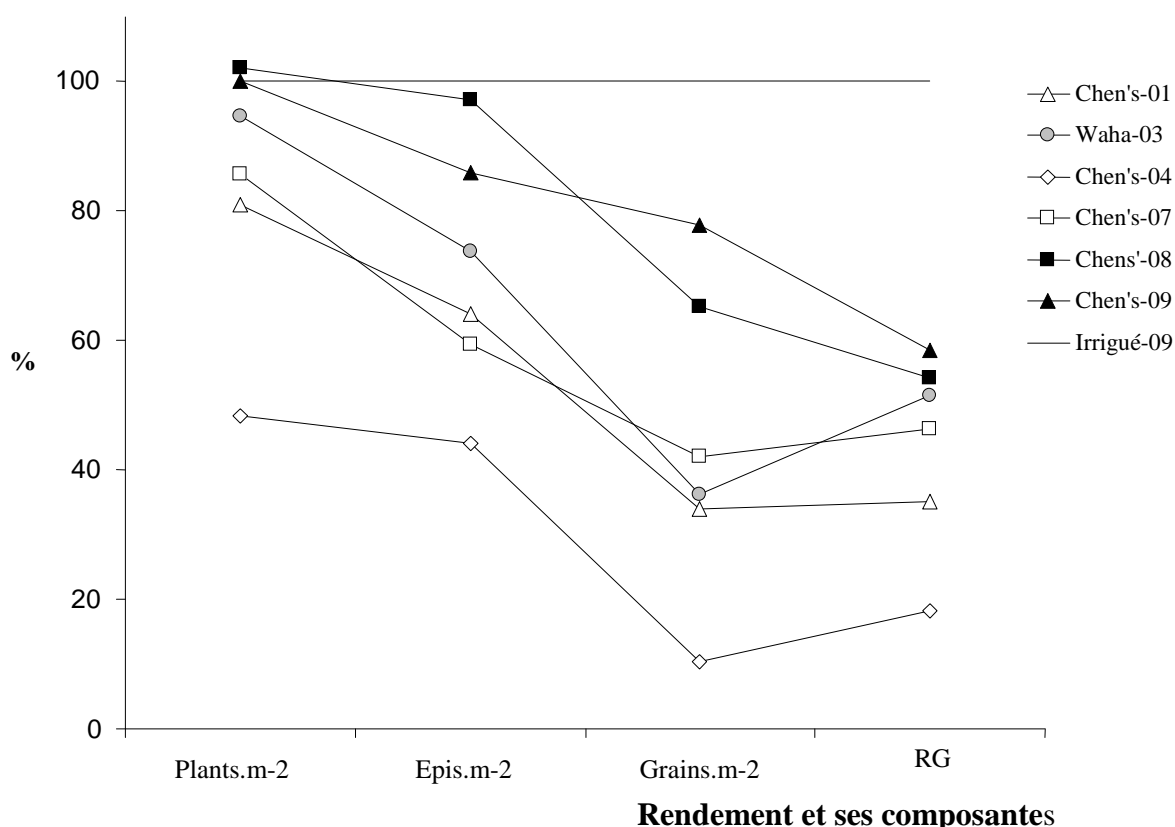


Figure 14 : Parcours annuel d'élaboration du rendement en pluvial ; Les composantes de rendement sont exprimées relativement aux valeurs de références de 2009.

5.7.3 Productivité de l'eau chez différentes variétés

Les différences variétales sont faibles mais on peut cependant distinguer 3 types de comportement : Les variétés Bousselam et Waha, qui tolèrent la sécheresse précoce, ne répondent pas bien à l'irrigation précoce ($PEI_{2007} = 0.89$ et 0.81 respectivement) : ce type de variété est redevable d'apports plus tardifs qui sont alors bien valorisés. La variété Chen's se caractérise par une tolérance moyenne sur tout son cycle, avec une réponse à l'eau stable qu'elle provienne de la pluie ou de l'irrigation printanière ($PEP = 1.01$, $PET = 0.93$, $PEI = 1.03$). Cette variété répond bien à des apports modérés, répartis sur tout le cycle. Cette variété valorise le plus régulièrement l'irrigation indépendamment des scénarios de sécheresse. La réponse de Chen's en 2001 est particulièrement élevée ($\sim 20 \text{ q.ha}^{-1}$). Les variétés Mexicali et Vitron, très sensibles à la sécheresse précoce ($PEP = 0.38$ et 0.42 , respectivement), nécessitent des apports importants au stade tallage si le déficit est précoce. La valorisation de ces apports précoces est particulièrement élevée ($PEI = 1.67$ et 1.63 , respectivement). La variété MBB, variété tardive à faible potentiel, valorise mal l'irrigation sauf dans le cas d'une sécheresse précoce. Mais cette bonne réponse en 2007 ($PEI = 1.80$) ne permet pas d'atteindre un rendement élevé en raison du faible potentiel de la variété (*Tableau 5*). En effet, son potentiel reste toujours inférieur à 30 q.ha^{-1} en année favorable à la croissance. La meilleure réponse globale du rendement à l'eau disponible est obtenue pour la variété Waha (1) suivie de Chen's (0.93) et Bousselam (0.89).

La productivité de l'eau en pluvial (*Tableau 21*) est forte pour Waha, Bousselam et Chen's (PEP entre 1 et 1.1 kg.m^{-3}), plus modérée pour Mexicali et Vitron (~ 0.9) et faible pour la variété locale Mohammed Ben Bachir (0.5). Si on utilise l'indicateur PET, le classement est conservé mais les valeurs sont plus faibles sauf pour la variété locale. En 2007, année à sécheresse précoce, la valeur de PEP est faible en moyenne (0.68). Cependant, les deux variétés Bousselam et Waha expriment une bonne valorisation de l'eau dans ce contexte ($PEP = 0.96$ et 1.09 , respectivement). En 2008, année à sécheresse tardive, la meilleure valorisation en pluvial est obtenue pour les variétés Chen's et Vitron ($PEP = 1.44$ et 1.36 , respectivement) alors que la variété MBB, tardive, est très pénalisée (0.37). En 2009, année à pluviométrie bien répartie, la valorisation des précipitations est plus faible qu'en 2008, et les variétés Chen's, Vitron et MBB apparaissent comme les moins efficaces.

On conclue également que la rentabilité de l'eau du blé est relativement élevée au sein des traitements conduits en pluvial que ceux en irrigué. Ceci permet de dire qu'à un certain seuil, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture augmente avec la diminution de l'humidité du sol.

Tableau 21
Indicateurs de la productivité de l'eau en grain (kg.m⁻³) en fonction de la variété, irrigation et année : 2007, 2008 et 2009

Variété	Bousselam	Chen's	Mexicali	Mohammed Ben Bachir	Vitron	Waha	Total
PEP							
2007	0.96	0.72	0.38	0.52	0.42	1.09	0.68
2008	1.03	1.44	1.21	0.37	1.36	1.16	1.10
2009	1.17	0.86	1.14	0.59	0.86	1.06	0.95
Moyenne	1.05	1.01	0.91	0.49	0.88	1.10	0.91
PET							
2007	0.95	0.81	0.56	0.69	0.59	1.05	0.78
2008	0.62	0.94	0.86	0.33	0.74	0.84	0.72
2009	1.09	1.05	1.01	0.59	0.86	1.12	0.95
Moyenne	0.89	0.93	0.81	0.54	0.73	1.00	0.82
PEI							
2007	0.89	1.32	1.67	1.80	1.63	0.81	1.35
2008	0.20	0.42	0.50	0.29	0.10	0.51	0.34
2009	0.96	1.35	0.80	0.59	0.85	1.22	0.96
Moyenne	0.68	1.03	0.99	0.89	0.86	0.85	0.88

PEP = productivité de l'eau de pluie PET = Productivité de l'eau totale (pluie + irrigation)
PEI = productivité de l'eau d'irrigation

Le calcul de la productivité moyenne en kg de grain /m³ d'eau pour les eaux de pluie (PEI) des traitements conduits en pluvial et celles des eaux de (pluie et d'irrigation) (PET) des traitements conduits en irrigué durant les années 2007, 2008 et 2009 a permet de classer les génotypes étudiés (tableau 22).

Tableau 22
Classement des variétés en fonction de la productivité

Genotype	PEI (kg/ m3)	PET (kg/ m3)
Bousselam	1.29	1.01
Waha	1.10	1.05
Chen 's	1.01	0.81
Mexicali	0.91	0.81
Vitron	0.88	0.73
Mohamed Ben Bachir	0.50	0.54

On constate que les génotypes en question possèdent des capacités de productivité de l'eau différentes mais qui restent encore non significatives. Bousselam est classée donc en première position cependant Mohamed Ben Bachir est la plus déclassée dans ce groupe.

5.8 Production de paille sèche

5.8.1 Production de paille sèche en pluvial

La comparaison des moyennes de production de paille sèche en pluvial des génotypes étudiés est représentée dans le tableau *le tableau 23*.

Tableau 23

Réponse du rendement en paille (q/ha) des variétés en pluvial durant trois saisons agricoles

Année	Bousselam	Chen's	Mexicali	Mohammed Ben Bachir	Vitron	Waha
2007	24.33 b	29.33 b	24.50 b	76.67 a	30.33 b	29.67b
2008	29.60 ab	32.65 ab	28.92 b	38.40 a	33.66 ab	26.36 b
2009	61.33 a	50.67 ab	50.33 ab	56.67 ab	45.67 b	53.67 ab

Les valeurs suivies de la même lettre sur la même ligne présentent des différences non significatives

5.8.2 Production de paille sèche en irrigué

La comparaison des moyennes de production de paille sèche en irrigué des génotypes étudiés est représentée dans le tableau *le tableau 24*.

Tableau 24

Réponse du rendement en paille (q/ha) des variétés en irrigué durant trois saisons agricoles

Année	Bousselam	Chen's	Mexicali	Mohammed Ben Bachir	Vitron	Waha
2007	31.67 b	32.33 b	28.83 b	91.33 a	29.33 b	34.83 b
2008	35.52 a	35.35 a	44.65 a	35.67 a	43.13 a	37.04 a
2009	88.00 a	62.00 bc	64.00 bc	79.00 ab	54.33 c	65.33 bc

Les valeurs suivies de la même lettre sur la même ligne présentent des différences non significatives

5.9 Synthèse de la réponse du blé dur à l'irrigation d'appoint

L'irrigation d'appoint mise en œuvre permet en moyenne d'accroître le rendement du blé dur en pluvial de 12 q.ha⁻¹ (6 – 20 q.ha⁻¹ selon les années, toutes variétés confondues). Le rendement atteint en irrigué est de 34 q.ha⁻¹ en moyenne pour un rendement en pluvial de 22 q.ha⁻¹ soit une augmentation relative de 55 % (pour 150 mm apporté en moyenne). Il s'agit ici d'une irrigation déficitaire ne couvrant qu'une partie du besoin en eau du blé (Geerts et Raes, 2009). Cependant ces apports limités permettent de stabiliser la production et de la situer au niveau requis pour combler le déficit de productivité (Khila et al., 2013).

Les études menées dans la zone WANA pour le blé dur concluent à des augmentations parfois plus fortes. Ainsi, en Algérie, Bouthiba et al. (2008) obtiennent une augmentation de 270 % du rendement pluvial (13 q.ha⁻¹) par une irrigation complète (270 mm), 107 % du rendement pour des irrigations avant l'épiaison (130 mm) et de 67 % pour des apports post-épiaison (140 mm). En Syrie, Oweis et al. (1999) obtiennent des augmentations de 45, 71 et 80 % du rendement pluvial (26 q.ha⁻¹) pour des irrigations couvrant 1/3, 2/3 et l'ensemble des besoins de complément du blé dur (320 mm d'irrigation).

Zhang et Oweis (1999) montrent que les phases de sensibilité maximales du blé dur à la sécheresse se situent du redressement au gonflement puis de l'anthèse au stade pâteux, d'où l'importance de bien assurer l'alimentation hydrique de complément au cours de ces phases. Les programmes testés correspondaient à de telles irrigations déficitaires sauf en 2007 où la sécheresse très précoce menaçait de compromettre le rendement du blé. L'apport de 50 mm en 2007 a permis d'augmenter le rendement de 52 %. En Turquie, Ilbeyi et al. (2006) obtiennent également une augmentation de 65 % du rendement pour une irrigation précoce. Ce résultat est lié à l'action conjuguée d'un déficit hydrique précoce sur la croissance des racines et des parties aériennes, ainsi que sur l'initiation des feuilles et des organes reproducteurs, dont la taille ou le nombre potentiel peuvent être limités.

Les différents types de sécheresse (précoce, tardive) caractérisant les zones semi-arides algériennes apparaissent de manière très aléatoire et avec des intensités variables. Le choix de la précocité à l'épiaison doit procéder d'une analyse fréquentielle que peut aider l'usage d'un modèle de simulation (Rezzoug et al., 2008). Parmi les variétés testées, Mohammed Ben Bachir est

la plus tardive : si elle échappe en partie aux stress précoces, elle sera pénalisée en fin de cycle par l'action des fortes températures qui raccourcissent la durée de remplissage. Ainsi, la photosynthèse post-floraison peut être fortement raccourcie, avec une compensation possible par la remobilisation des sucres depuis la tige. Dans ce cas, l'irrigation tardive devrait être plus favorable à ce type variétal. Latiri et al (2013) a indiqué que l'effet amortissant de ce processus pour le maintien du rendement en grain dans des conditions d'eau limitées.

En condition pluviale, les composantes d'élaboration précoce comme NE et NGE sont les plus explicatives du rendement car elles sont les plus fortement limitées. Le poids d'un grain est moins affecté car il bénéficie de la réduction du nombre de puits, d'où un meilleur rapport source/puits pour le carbone.

En condition irriguée, l'ensemble des 3 composantes participent à l'élaboration du rendement. Ces observations confirment celles de Garcia del Moral et al (2005) issues d'une 'analyse de Path' de l'élaboration du rendement de 25 géotypes en sec et en irrigué. Ces auteurs montrent bien qu'en condition irriguée le rendement dépend en proportion égale des 3 composantes NE, NGE et PMG, alors qu'en condition sèche, la variation de rendement est principalement due à NE et dans une moindre mesure à NGE. En sec, c'est la production de talles qui limite NE alors qu'en irrigué c'est le taux de régression des talles. De manière générale, on confirme que l'irrigation réalisée a permis d'augmenter l'ensemble des composantes du rendement avec un effet régulier sur la composante nombre de grains par épi.

Cependant l'irrigation de complément a ses limites. En effet, les zones semi-arides sont fréquemment soumises à des aléas climatiques tel que les vents chauds qui engendrent de très forts taux d'échaudage, dépassant parfois 50 %. Dans ces situations, l'impact de l'irrigation de complément devient négligeable chez les variétés les moins tolérantes à la sécheresse. Par ailleurs, Oweis et al. (1999) concluent à l'intérêt d'apports se situant entre 1/3 et 2/3 du besoin d'irrigation total du blé, pour des raisons d'efficacité et de rentabilité, en regard aux ressources en eau disponibles.

Il n'y a pas d'interaction significative observée entre variété et régime hydrique pour le rendement contrairement aux résultats de Bouthiba et al. (2008) qui comparaient plusieurs stratégies d'irrigation mais sont en adéquation avec les résultats atteints par Gummuluru, et al (1989). Cependant, on peut conclure que les variétés Mexicali, Vitron et Waha qui sont très ins

tables en pluvial doivent recevoir systématiquement des irrigations de complément, mais aussi que des variétés à bon potentiel et assez tolérantes à la sécheresse telles que Bousselem et Chen's valorisent bien l'irrigation de complément surtout si elle est positionnée entre la fin montaison et le stade laiteux-pâteux du grain.

5.10 Indicateurs morfo physiologiques de production du blé dur

5.10.1 Période de sénescence de la feuille étendard

5.10.1.1 Sénescence de la feuille étendard en pluvial

Globalement la sénescence de la feuille étendard s'étale sur une période de 18 à 22 jours en pluvial comme en irrigué. Elle évolue en deux étapes à rythmes distincts. Une première période d'environ de deux semaines où la sénescence atteint un taux de 50 %. Cependant une deuxième période très courte de 2 à 4 jours suffira pour l'achèvement complet de la sénescence (figure15), les détails de mesure de l'évolution du taux de sénescence sont représentés en annexe.

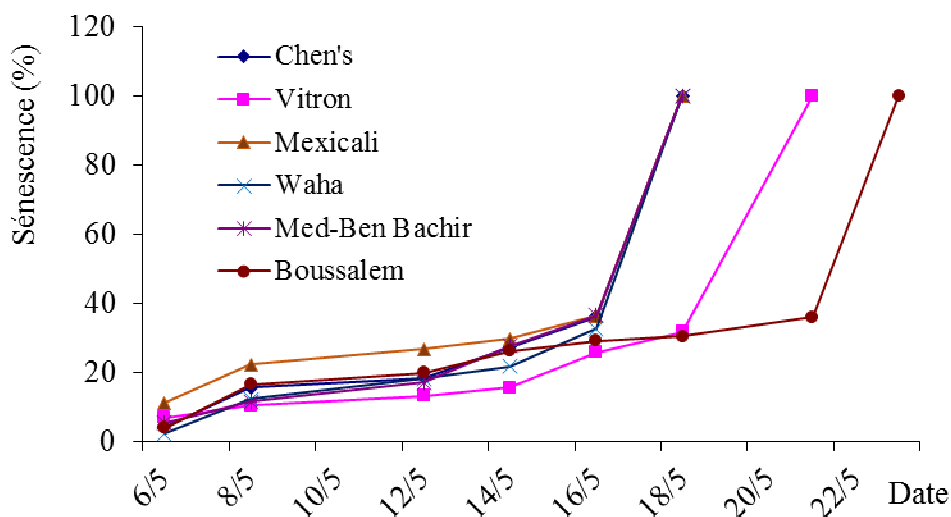


Figure 15 : Evolution de la sénescence de la feuille étendard en pluvial

5.10.1.2 Sénescence de la feuille étendard en irrigué

Globalement la sénescence de la feuille étendard s'étale sur une période de 18 à 22 jours en irrigué comme en pluvial. Elle évolue en deux étapes à rythmes distincts. Une première période d'environ de deux semaines où la sénescence atteint un taux de 50 %. Cependant une deuxième période très courte de 2 à 4 jours suffira pour l'achèvement complet de la sénescence (figure 16). les détails de mesure sont en annexe.

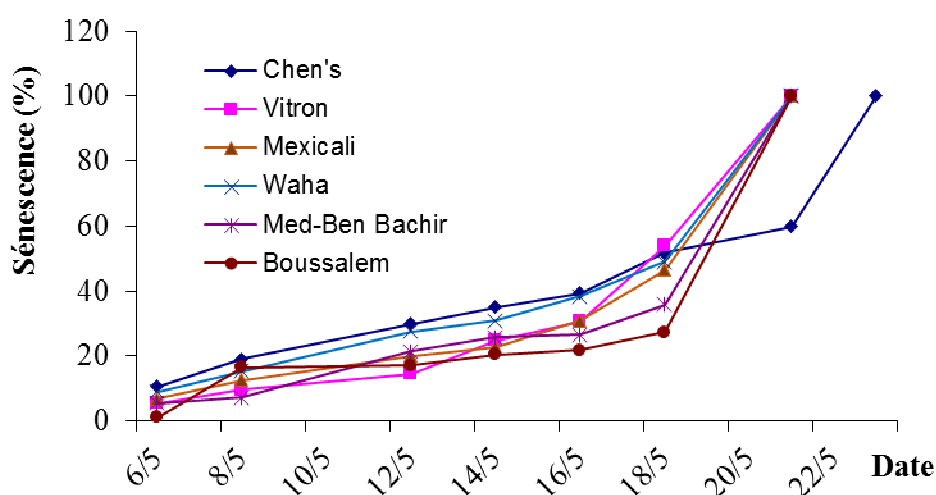


Figure 16 : Evolution de la sénescence de la feuille étendard en irrigué

Le début de la phase active du remplissage du grain correspond au début de la sénescence foliaire. La vitesse de remplissage des grains est négativement liée à la durée de remplissage. La participation des assimilés venant de la tige diminue lorsque le milieu permet l'expression d'un meilleur rendement en grains (Bahlouli et al.,2008). Une longue durée de remplissage est souvent indicatrice d'une activité photosynthétique optimale, par contre une vitesse de remplissage élevée est indicatrice des effets des stress hydriques (Sofield et al.,1977). Selon Gebeyehou et al. (1982) l'étude de deux pour 11 génotypes de blé dur différents a montré que la durée de remplissage variait de 33,0 à 40,3 jours. Ce résultat indique que dans notre cas, la durée de 22 jours est très courte. Fokar et al. (1996) trouvent que les génotypes qui se caractérisent par une sénescence

foliaire précoce font plus appel aux hydrates de carbone solubles dans l'eau (WSC). Ceci indique que la capacité d'utilisation des WSC est une caractéristique constitutive.

5.10.2 Discrimination isotopique

5.10.2.1 Corrélations entre isotopes et paramètres morpho-physiologiques

Les résultats de corrélations linéaires de Pearson effectuées entre les concentrations des isotopes stables (carbone et azote) du grain et la feuille étandard, les principaux paramètres morphologiques : Biomasse représentée par l'indice de végétation normalisé (NDVI), indices de végétation (GA) et GGA sont représentées dans le *tableau 24*.

Tableau 24

Corrélations des isotopes stables suivant Pearson avec paramètres morpho- physiologiques

Isotopes	NDVI(E)	NDVI(M)	GA(M)	GGA(M)	SPAD(M)
$\delta^{15}\text{N}_{\text{grain}}$	ns	ns	Ns	ns	ns
$\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$	-0.671**	-0.923**	-0.826**	-0.494*	-0.912**
$\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$	-0.444*	-0.532**	-0.468*	Ns	-0.570**
$\delta^{13}\text{C}_{\text{feuille}}$	ns	ns	Ns	ns	ns

Signification : ns non significatif, * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), $\delta^{15}\text{N}_{\text{grain}}$: azote du grain
 $\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$: Carbone du grain, $\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$: Azote de la feuille, $\delta^{13}\text{C}_{\text{feuille}}$: Carbone de la feuille,
 E : épiaison, M : maturation

5.10.2.2 Corrélations entre isotopes et consommation en eau, efficience de l'eau, rendement et ses composantes.

Les résultats de corrélations linéaires de Pearson effectuées entre les concentrations des isotopes stables (carbone et azote) du grain et la feuille étandard, la consommation en eau (ETR), l'efficience de l'eau (WUE), la matière sèche totale ainsi que le rendement en grain et ses composantes sont présentées dans le *tableau 25*.

Tableau 25

Corrélations des isotopes stables suivant Pearson avec la consommation en eau, l'efficacité, matière sèche totale, rendement et ses composantes

Isotopes	NE/m ²	NG/E	PMG	RG	MST	ETR	WUE
$\delta^{15}\text{N}_{\text{grain}}$	ns	ns	ns	Ns	Ns	ns	ns
$\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$	-0.897**	-0.769**	-0.850**	-0.852**	-0.942**	-0.956**	-0.607**
$\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$	-0.486*	ns	-0.432*	-0.557**	-0.523**	-0.563**	-0.471*
$\delta^{13}\text{C}_{\text{feuille}}$	-0.471*	-0.520**	ns	Ns	ns	ns	ns

Signification : ns non significatif, * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), $\delta^{15}\text{N}_{\text{grain}}$: azote du grain
 $\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$: Carbone du grain, $\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$: Azote de la feuille, $\delta^{13}\text{C}_{\text{feuille}}$: Carbone de la feuille,

On constate que l'isotope du carbone au niveau du grain ($\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$) est significativement corrélé négativement à l'ensemble des paramètres morpho physiologiques ainsi que le rendement et ses composantes. On observe également des liaisons significatives entre l'azote des feuilles étendards et ces paramètres.

5.10.2.3 Réponse isotopique variétal à l'eau

Les isotopes $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{15}\text{N}$ sont potentiellement utilisés pour la détection des différences génotypiques sous les conditions de stress car ils sont liés au métabolisme de la plante. La comparaison des moyennes de la discrimination isotopique des quatre variétés de blé dur Chen's (C), Mexicali (M), Siméto (S) et Vitron (V) est représentée dans le tableau 26. On constate qu'il n'existe pas de différences significatives entre ses génotypes.

Tableau 26

Réponse isotopique des variétés à l'eau

Irrigation	Variété	$\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{feuille}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{grain}}$
Pluvial	C	6.3571a	-24.670a	-28.556ab	5.4680ab
	M	6.0640a	-24.458a	-28.823ab	6.4271a
	S	5.7553a	-24.452a	-28.124a	5.9848ab
	V	4.8337a	-24.417a	-28.611ab	5.8118ab
	Moy	5.7525a	-24.499a	-28.528a	5.9229a
Irrigué	C	3.9378a	-26.513c	-28.794ab	5.2974ab
	M	4.7758a	-26.429bc	-29.218b	5.9073ab
	S	4.5674a	-26.423bc	-28.763ab	6.1432ab
	V	4.4635a	26.015b	-28.862ab	5.0273b
	Moy	4.4361a	-26.345b	-28.909b	5.5938a

Les valeurs suivies de la même lettre sur la même colonne présentent des différences non significatives (C) : Chen's, (M) : Mexicali, (S) : Siméto, (V) : Vitron

5.10.2.4 Modèles de relations linéaires des isotopes du blé dur

5.10.2.4.1 Modèles de relations des isotopes avec les variables morpho physiologiques du blé dur

Les résultats d'élaboration de modèles de stéwise linéaires simples entre les isotopes étudiés et les variables morpho physiologiques les plus corrélés au stade maturation sont représentés dans le *tableau 27*. Il ressort que seule, la discrimination isotopique du carbone grain qui a donné des modèles explicatifs de ces variables morpho physiologiques.

Tableau 27
Modèles de stepwise linéaire des isotopes et variables morpho physiologiques

Erreur standart	Test (T)	Proba	R ²	R ² _{adj}	Modèles
0.02644	6.93	0.0000	0.6856	0.6713	GA = - 0.1831 x $\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$ - 4.4683
0.01425	11.39	0.0000	0.8550	0.8485	NDVI = - 0.1622 x $\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$ - 3.79043
0.02597	2.91	0.0082	0.2773	0.2444	NDVI = -0.0754 x $\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$ + 0.71971
2.04579	10.44	0.0000	0.8321	0.8245	SPAD = - 21.3628 x $\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$ - 519.9999
3.36184	3.21	0.0040	0.3195	0.2886	SPAD = -10.8050 x $\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$ + 78.1280

5.10.2.4.2 Modèles de relations des isotopes avec la consommation en eau et production du blé dur

Les résultats d'élaboration de modèles de relations linéaires simples entre les isotopes étudiés et la consommation en eau réelle, la production en grain et en matière sèche totale sont représentés dans le *tableau 28*. Il ressort que la discrimination isotopique du carbone du grain ($\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$) est fortement explicative de la consommation en eau, de la production en grain et matière sèche. Cependant la discrimination de l'azote de la feuille étandard ($\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$) ne les explique que faiblement.

Tableau 28
Modèles de relations entres isotopes et consommations en eau

Erreur standart	Test (T)	Proba	R ²	R ² _{adj}	Modèles
4.60180	15.67	0.0000	0.9177	0.9140	ETR = - 72.0920 x $\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$ - 1557.22
10.87	3.15	0.0046	0.3110	0.2796	ETR = - 34.2532 x $\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$ + 449.996
2.6483	7,77	0,0000	0,7330	0,7208	RG = - 20.5796 x $\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$ - 470.262
3.48551	3.11	0,0051	0.3057	0.2742	RG = -10.8486 x $\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$ + 108.178
2.86499	13.32	0.0000	0.8897	0.8847	MST = - 38.1660 x $\delta^{13}\text{C}_{\text{grain}}$ - 861.586
6.02076	2.84	0.0094	0.2689	0.2356	MST = - 17.1255 x $\delta^{15}\text{N}_{\text{feuille}}$ + 195.911

La discrimination isotopique du carbone et azote stables au niveau du grain du blé dur et la feuille étendard montre l'existence des niveaux de corrélations nettement différents entre ces deux éléments. L'isotope carbone grain constitue une variable plus explicative du système photosynthétique comparativement à l'isotope azote. On constate donc une réponse globale significative de cette discrimination à l'eau (*tableau 25*). Les corrélations négatives obtenues sont adéquates avec ceux atteints par les auteurs car selon Arus et al, (2013), les corrélations phénotypiques du $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ avec le rendement en grain étaient négatives, suggérant que les génotypes capables de maintenir haute efficacité de l'eau et une conductance stomatique aient été les plus productives et les mieux adaptés ; $\delta^{15}\text{N}$ fut également négativement corrélé avec le rendement en grain indépendamment des conditions de croissance.

Effectivement, selon (Merah et al, 2001), la variation génotypique et l'héritabilité au sens large du carbone grain sont plus élevées que celles du carbone de la feuille étendard et celui de la barbe est mieux corrélée au rendement en grain et l'indice de récolte. Le carbone grain fournit donc une meilleure évaluation du comportement des génotypes face à la sécheresse durant le remplissage du grain. Pour ces auteurs, ce résultat souligne l'intérêt potentiel de l'utilisation de la discrimination isotopique du carbone comme critère pour l'amélioration du rendement en grain dans les conditions de sécheresse méditerranéennes.

Cependant, cette discrimination n'est pas distinguée entre les quatre génotypes étudiés. La comparaison des moyennes au seuil de 5 %, ne montre pas de différences significatives ; les génotypes forment le même groupe homogène (*tableau 26*). On conclue que ces variétés ont atteint des niveaux très proches d'adaptation aux conditions semi-arides à travers les années.

Les modèles de stepwise linéaires obtenus (*tableau 27*) montrent que le critère de discrimination isotopique, principalement l'isotope carbone est au centre du métabolisme de la culture du blé dur. On constate que ces modèles de régression confirment bien que l'isotope carbone constitue une meilleure variable explicative du comportement morpho physiologique, de la consommation en eau et la production du blé dur en conditions semi-arides. Effectivement, l'utilisation du $\delta^{13}\text{C}$ pour évaluer les réponses physiologiques des plantes sous différents régimes d'eau et des niveaux de lumière a aidé à comprendre l'effet de ces facteurs exogènes sur les rendements des cultures (Araus et al., 1999b; Voltas et al., 1999; Wullschlegel et al., 1991).

5.11 Critères de qualité

5.11.1 Teneur d'azote du grain

L'analyse de variance au seuil de 5 % des taux d'azotes enregistrés ne montre pas de différences significatives entre les traitements conduit en irrigués et ceux en pluvial. Ce paramètre de qualité dépendait beaucoup plus de l'état hydrique et nutritionnel du sol durant la phase floraison. A ce stade, l'état d'humidité du sol fut favorable et similaire pour l'ensemble des traitements. Seulement, on peut noter que les variétés chen "S" et Mohamed Ben Bachir présentent des taux légèrement supérieurs aux autres variétés (*tableau 29*).

Tableau 29
Azote total en (%) de la matière sèche du grain

Variété	Bousselam	Chen's	Mexicali	Med Ben bachir	Vitron	Waha
Pluvial	1.98	2.04	1.51	2.09	1.66	1.86
Irrigué	1.91	2.13	1.83	1.99	1.61	1.94

En 2007, les taux d'azotes enregistrés dans la matière sèche du grain (*Tableau 29*) ne montrent pas de différences significatives entre les variétés en pluvial et irrigués. Ce paramètre de qualité dépend beaucoup plus de l'état hydrique et nutritionnel du sol durant la phase floraison. A ce stade, l'état d'humidité du sol fut favorable et similaire pour l'ensemble des traitements. Seulement, on peut noter que les variétés chen's et Mohamed Benbachir présentent des taux légèrement supérieurs aux autres variétés.

5.11.2 Teneur en protéine du grain

La teneur du grain en protéines est le résultat de la dilution de cette quantité totale d'azote dans l'amidon du grain (*tableau 30*).

Tableau 30
Protéine en (%) de la matière sèche du grain

Variété	Bousselam	Chen's	Mexicali	Med Ben bachir	Vitron	Waha
Pluvial	11.29	11.63	8.61	11.91	9.46	10.60
Irrigué	10.89	12.14	10.43	11.34	9.18	11.06

Le taux de protéine est un critère déterminant sur le marché du blé destiné à la fabrication du pain. Le taux de protéine dans le grain dépend de plusieurs paramètres comme les quantités d'apport en azote, leur fractionnement ainsi la résistance des géotypes au mitadinage. Selon (Bedoussac et Justes , 2010), la concentration en protéines des grains de blé dur est souvent trop faible, notamment dans les systèmes à faibles intrants en azote. L'accumulation de la matière sèche du grain provient principalement de la photosynthèse après floraison. Les teneurs en protéines enregistrées montrent que les variétés : chen's, Med Ben Bachir, Bousselam ont une bonne force boulangère. Elle est moyenne chez Waha , Mexicali mais faible chez Mexicali et Vitron . Cependant, ces taux de protéines dans leur ensemble sont plus bas que la valeur de référence de 13.7 % chez le blé dur en généra (Feillet, 2000).

CONCLUSION GENERALE

L'irrigation et l'amélioration variétale permettent d'atteindre deux principaux objectifs : l'accroissement des rendements et la stabilité de la production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les régions méditerranéennes semi-aride.

Les années de conduite expérimentales de la période (2001-2009) furent caractérisées par une grande variabilité pluviométrique allant de 287 mm en (2001-2002) à 512 mm en (2008-2009).

Les rendements en grains en pluvial varient de 9 quintaux par hectare en 2004 à 28 quintaux en 2009. La variété locale Mohammed Ben Bachir est considérée la moins productive en pluvial, son rendement reste inférieure à 20 quintaux par hectare mais présente une meilleure stabilité relativement aux autres variétés, elle est moins affectée par la sécheresse précoce.

Cependant Mexicali et Vitron sont très instables en conditions pluviales et doivent recevoir systématiquement des irrigations d'appoint. Effectivement, selon Bouthiba (2007), dans le cas où l'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 favorise la diffusion de la maladie.

Les cultivars Bousselam et Chen's sont les seules variétés caractérisées par un bon potentiel de rendement et une tolérance à la sécheresse. Elles pourraient maximiser la productivité les eaux d'irrigation appliquée spécialement entre la fin montaison et le stade grain pâteux. Le rendement en grain chez la variété Bousselam dépasse 30 quintaux par hectare.

La productivité de l'eau de pluie (PEP), constituant le rapport du rendement en grain à la précipitation varie de 0.5 chez Mohammed Ben Bachir à 1.1 kg.m⁻³ pour Bousselam, chens et Waha qui montrent une meilleure tolérance à la sécheresse.

Avec une irrigation déficitaire de 140 mm en moyenne, le rendement en grain augmentent de 7 à 25 quintaux par hectare suivant le déficit climatique et la stratégie d'irrigation.

Les rendements les plus élevés sont enregistrés en 2001 et 2009, atteignent successivement de 43 et 45 quintaux par hectare.

La productivité de l'eau d'irrigation (PEI), constituant le gain de rendement marginal apporté par l'irrigation est le plus élevé pour Chen's, Mexicali et Vitron (1 kg.m^{-3}) et le plus faible pour Bousselam (0.7 kg.m^{-3}).

En pluvial, le nombre d'épis. m^2 (NE) et le nombre de grain par épis (NGE) constituent les composantes les plus déterminant dans l'élaboration du rendement final tandis que sous irrigation, le nombre de grain par épis (NGE) et le poids de mille grains (PMG) sont les plus déterminants.

Les résultats obtenus montrent une interaction non significative entre le facteur variétal et le régime. Des études réalisées ont montré également l'absence de cette interaction (Gummuluru et al., 1989).

Le développement de l'irrigation déficitaire adaptée avec les variétés de blé dur choisie et le respect des itinéraires techniques de la culture peuvent contribuer à réduire les différences entre les rendements actuels et escomptés ainsi que la diminution de la variabilité interannuelle de la performance du blé dans les zones semi-arides Algériennes.

En effet dans les conditions expérimentales des six années d'étude (2002 et 2006 sont exclus), le rendement en grain moyen obtenu en irrigué est de 32 quintaux par hectare (au lieu de 20 quintaux par hectare en irrigué) avec une rentabilité agronomique de l'irrigation de 0.83 kg.m^{-3} . Cependant, la pénurie de ressources en eau en Afrique du Nord et leur priorité pour des utilisations domestiques ainsi que l'irrigation les cultures à caractère commercial d'une part et face aux aléas climatiques qui influent sur la rentabilité de l'eau sur des céréales d'autre pourraient limiter l'accès à l'irrigation des céréales. Le développement du système de rotation pomme de terre jachère et pomme de terre fourrage permettrait la rentabilité des réseaux d'irrigation tel que l'aspersion (enrouleur, pivot..).

Donc, Oweis et al (1999) recommandent des irrigations d'appoint entre un tiers et deux des exigences totales du blé dur pour des raisons d'efficacité et de rentabilité, étant donné les ressources en eau limitées disponibles pour l'irrigation dans les régions semi-arides méditerranéennes.

Face aux risques fréquents des dégâts causés par les effets thermiques de siroco et pour réduire leurs répercussions sur le rendement final, l'irrigation d'appoint devrait être planifiée afin de permettre des interventions opportunes.

Les couches superficielles qui constituent le réservoir principal en eau pour les racines sont les plus soumises à l'action de l'évaporation en zones semi-arides. Leur dessèchement est de retour fréquent et rapide même sous apports importants d'eau. Pour atténuer l'installation de ce stress hydrique et améliorer donc l'efficacité globale des eaux de pluie et d'irrigation, il faut adopter une stratégie d'irrigation pilotée en fonction de l'état d'humidité du sol. Le fractionnement des apports d'eau d'irrigation devient donc plus avantageux du fait qu'il permet de maintenir le plus longtemps possible une humidité favorable des couches superficielles au profit de la culture.

Les sols de la région, de texture à tendance fine sont très compacts en profondeur. Afin d'augmenter leur capacité de stockage des eaux, il est vivement conseillé qu'ils subissent un sous solage d'une profondeur d'environ 60 cm. Ce remaniement de la structure améliorera significativement la conductivité hydraulique du sol, sa porosité totale et efficace. Cet état facilite la pénétration maximale des eaux de pluies d'automne dans le sol. Ces eaux constitueront une réserve initiale nécessaire pour le démarrage de la culture du blé. Egalement, par la réduction des ruissellements de surface, la bonne perméabilité du sol contribue à l'augmentation de l'efficacité agronomique des eaux de pluie et d'irrigation chez la culture.

Les sols lourds de la région possédant une forte capacité de rétention de l'eau, sont aptes à stocker les pluies du début de la saison entre octobre et décembre. En fonction de leurs importances, ses réserves permettent à la culture une résistance relative en cas de sécheresse précoce.

L'amélioration génétique devrait être concentrée pour développer des génotypes de blé de comportement stable sous sécheresse modérée, mais caractérisée par une forte réponse à l'irrigation d'appoint.

Le développement d'une production de blé dur durable à grande échelle dans cette région nécessite la mise en place d'un système de production associé à d'autres cultures telles que la pomme de terre permettant d'assurer des conditions édaphiques potentiellement favorable d'une part et éviter les risques d'infestation par les maladies.

Les systèmes d'association du blé à d'autres cultures maraichères conduites en irrigués aide à meilleure valorisation des eaux d'irrigation.

Le pilotage d'une irrigation optimisée exige la connaissance au temps réel l'évapotranspiration du couvert végétal, l'état hydrique du sol.

La discrimination isotopique, principalement celle du carbone du grain est significativement corrélé aux variables morpho physiologiques et système photosynthétique du blé dur des variétés : Chen's, Mexicali, Siméto et Vitron. Les modèles significatifs ajustés entre cet isotopes et les paramètres de réponse ; morpho physiologique permettent de conclure que le carbone grain constitue une réelle variable explicative du rendement du blé dur. De ce fait, il peut être retenu comme l'un des critères de sélection des variétés tolérantes à la sécheresse en zones semi-arides Algériennes. Pour cela, il est vivement recommandé d'élargir l'étude de ce critère sur une gamme de variétés locales et introduites dans une optique de sélection.

En perspective, on doit rechercher les outils souples qui aident au pilotage de l'irrigation d'appoint optimisée des blés installés sur de grandes surfaces sous climat aléatoirement déficitaire. Ces outils à rechercher seront basés sur la détermination de modèles de relations entre les informations obtenues par télédétection, traitant des photos satellitaires du couvert végétal d'une part et les variables liées au végétal tel que l'indice de végétation et de la biomasse à différents stades critiques corrélées préalablement en expérimentation au champ avec le rendement final. Dans un même sens, Aidaoui et Hartani (2008) montrent que les méthodes de maîtrise du développement de la culture du blé dur est de trouver des critères simples et facilement mesurables sur la plante pour caractériser sa réaction aux conditions du milieu et par la même de piloter plus efficace les irrigations.

Toute stratégie d'irrigation à mettre en place s'explique par le niveau d'efficience agronomique des apports d'eau et par conséquent sa rentabilité économique dans un contexte concurrentiel. Toute augmentation de la production planifiée dans un contexte de développement durable et sécurité alimentaire exige le respect des techniques culturales réduisant les pertes, le bon choix des variétés sélectionnées, la lutte contre les maladies, la maîtrise de l'irrigation et l'amélioration des capacités de stockage. La vulgarisation de l'irrigation d'appoint du blé dur au sein des agriculteurs, nécessite des démonstrations amenant à une amélioration de la production, couvrant toutes les charges relatives à l'eau et le système utilisé avec évidemment des marges bénéficiaires.

Références bibliographiques

- ABBAD H, EL JAAFARI S, BORT J, ARAUS J L (2004) Comparison of flag leaf and ear photosynthesis with biomass and grain yield of durum wheat under various water conditions and genotypes *Agronomie* 24 (2004) 19–28 19
- Adda A., Sahnoune M., Kaid-Harch M., Merah O., 2005. Impact of water deficit intensity on durum wheat seminal roots. *C. R. Biologies* 328, 918–927
- Aidaoui A ; Hartani T (2000) Gestion de l'irrigation du blé dur par des indicateurs de l'état hydrique. *Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires Méditerranéens*, pp. 579-582
- Alem C., Labhilili M., Brahmi K., Jlibene M., Nasrallah N Maltouf A.,(2002) – Adaptations hydrique et photosynthétique du blé dur et du blé tendre au stress salin. *C.R. Biologies* (325) 1097-1109p
- Ali Dib T, Monneveux P, Araus JL (1992) Adaptation à la sécheresse et notion d'idéotype chez le blé dur. *Caractères physiologiques d'adaptation. Agronomie*, 12 , 381 : 393
- Anderson, J. L. ; Ashcroft, G. L. ; Richardson, E.A. ; Alfaro, J. F. ; Griffin, R. E. ; Hanson, G. R. et Keller, J. (1990). Effects of evaporative cooling on temperature and development of apple buds. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 100 (3), p. 229-231.
- Annicchiarico P, Bellah F., Chiari T, 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.
- Araus, J.L., Slafer, G.A. and Romagosa, I. (1999b), "Durum wheat and barley yields in antiquity estimated from ^{13}C discrimination of archaeological grains: a case study from the Western Mediterranean Basin", *Australian Journal of Plant Physiology*, 26 : 345-52.
- Araus, J. L, Lloren A,D, Cabrera-Bosquet L, Dolores Serret MA, Bort J and María Nieto-Taladriz M.T.(2013) Comparative performance of $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ and $\delta^{15}N$ for phenotyping durum wheat adaptation to a dryland environment. *Functional Plant Biology*, , 40, 595–608
- Assem N, El Hafid L, Haloui B, El Atmani K, (2006) Effets du stress hydrique appliqué au stade trois feuilles sur le rendement en grains de dix variétés de blé cultivées au Maroc oriental. *Sécheresse* 17: 499-505.
- Austin, R.B. (1999) Yield of Wheat in the United Kingdom: Recent Advances and Prospects. *Crop Science* 39 : 1604-1610.
- Ayers RS, Westcot DW (1985) Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 29, 174 p, Rome

Bahlouli F, Bouzerzour H &, Benmahammed A (2008) Effets de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilats de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie. *Biotechno.Agron.Soc.Environ* 12 (1) : 31-39

Bajji M, Lutts S et Kinnet J.M., (2000) La résistance au stress hydrique chez le blé dur: Comparaison des comportements au niveau cellulaire et au niveau de la plante entière In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges*. Zaragoza : Options Médit : Série A. Séminaires Médit. (40) : 227-231

Baldy C (1993) Effets du climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en Méditerranée occidentale. In : Monneveux P, Ben Salem M, eds. *Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale*. Paris : INRA, 64 : 83-100.

Barakat F, Handoufe A (1998) Approche agro climatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse* 9: 201-208

Barbottin A (2004) Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des géotypes : Pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre. Thèse Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, 237p.

Bauder, T.A., Waskom, R.M., Davis, J.G (2007) *Irrigation water quality criteria, Crop serie. Note 506. Colorado State University Extension. 4p*

Basset, L.M., R.E. Allan, and G.L. Rubenthaler. (1989). *Genotype*Environment Interactions on soft White Winter Wheat Quality. Agronomy Journal* 81 : 955-960.

Bedoussac L. et Justes E. (2010) L'efficacité des cultures associées blé dur-pois d'hiver pour améliorer la production et la teneur en protéine du grain de blé dépend de la disponibilité de l'azote en début de croissance, *Plant Soil* , 330:19–35

Bedrani S (2008) Algérie .L'agriculture, la pêche et le développement rural dans les pays méditerranéens : tendances et politique. In Allaya (ed). *Les agricultures méditerranéennes* : 140 Options Méditerranéennes B64- Analyses par pays. Montpellier : CIHEAM-IAM p37-73 (Options méditerranéennes. Serie B : Etudes et Recherches ; n. B 61

Belhassen E, Dominique T, Monneveux P (1995) L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. *Cahiers Agricultures*. 4: 251-261

Benamar N, Mouadhi N, Benamar A (2011) Étude de la biodiversité et de la pollution dans les canaux de l'Ouest algérien : le cas de l'oued Cheliff
Colloque International, usages écologique, économique et sociaux de l'eau en méditerranée : quels enjeux pour quels services ? Université de Provence, Marseille.

Benbelkacem, A.; Brinis, L.; Nachit, M.M. (1998). Yield stability and physiological traits of Algerian durum wheat in dryland Algeria. Pages 153-155 *in* Proceedings of the Ninth International Wheat Genetics Symposium, Vol. 2, 2- 7 Aug 1998, Saskatoon, Canada ,A.E. Slinkard, ed..

Benbelkacem A, Kellou K. (2001). Évaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) cultivées en Algérie. Options Méditerranéennes 6 : 105-10.

Benlarabi, M. et Monneveux, Ph. (1988). – Etude comparée du comportement en situation de déficit hydrique de deux variétés algériennes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) adaptées à la sécheresse. *C.R Acad. Agric. France.*, 74 (5) : 73-83.

Benlarabi OU Benlarabi M., Monneveux PH., Grignac P., 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.

Ben Naceur M , Naily M, Selmi M (1999) Effet d'un déficit hydrique, survenant a différents stades de développement du ble, sur l'humidite du sol, la physiologie de la plante et sur les composantes du rendement. *MEDIT* n°2.

Ben Naceur M., Rahoune C., Sdiri H., Lai Meddahi M., Selmi M (2001)- Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en de quelques variétés magrebines de blé. *Revue secheresse*, 12, (3), 167-74p

Benseddik B et Benabdelli K., 2000 – Impact du risque climatique sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride : Approche éco physiologique. *Revue sécheresse*, (11), (1) : 45-51.

Binet P et Brunet J-P (1967) *Physiologie végétale* , Doin, Paris, 339 p.

Bogges, S-F ; Aspinall, D. ; Paleg, L-G. (1976). - Stress metabolism. IX. The significance of end product inhibition of proline synthesis and of compartmentation in relation to stress-induced proline accumulation. *Aust. J. Plant Physiol.*, (3) ; 513-525.

Bonnefoy M, Moynier J-L (2014) : Besoins en eau des céréales.
Colloque au champ-Irrigation-le Magneraud, Arvalis, France

Boufenar-Zaghouane F , Zaghouane O, (2006) Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine), ITGC, Alger, 154p.

Boulaine J (1957) : Etude des sols des plaines du Chelif
Etude régionale n°7 , Banlieu Alger

Bouthiba (2007) Optimisation de l'irrigation de complément du blé dans la region de chéiff
thèse de Doctorat d'état INA, El-Hrrach (Alger), 120p

Bouthiba A., Debaeke P., Hamoudi, S.A (2008). Varietal differences in the response of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) to irrigation strategies in a semi-arid region of Algeria. *Irrigation Science* 26, 239-251.

Bouthiba A, Debeke P (2009) Besoins en eau de différentes variétés de blé dur en conditions semi-arides. Symposium International (AGRUMED), Rabat, Maroc, 188-195.

Bouzerzour H, Monneveux P. (1992) Analyses des facteurs de stabilité du rendement de l'orge dans les conditions des hauts plateaux algériens. Les Colloques 1992 ; 64 : 205-15.

Bouzerzour ,H. et Benmahammed,A., (2009) Variation in Early Growth, Canopy Temperature, Translocation and Yield of Four Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes under Semi Arid Conditions. Jordan. *Journal of Agricultural Sciences*, Volume 5, (2):142-154

Boyldieu J (1982) Blé tendre. Techniques agricole Tome 1

Bozzini A "origin,distribution and production of durum wheat in the world" dans Fabriani G. et C. Lintas (éd). Durum: Chemistry and Technology AACCC (Minnesota). Etats-Unis. P.1-16p

Brunini O, Sawazaki E, Miranda L.T (1984), Water Use efficiency for corn cultivars. Conférence internationale, INRA, Paris , 361-368

Ceccarelli S, Grando S.(1991) Selection environment and environmental sensivity in barley. *Euphytica* ; 57 : 157-67.

Chehat F. . 1994 Impact des réformes économiques sur la céréaliculture algérienne. In Jouve A.-M. (ed.) . Crises et transitions des politiques agricoles en Méditerranée . Montpellier : CIHEAM-IAMM, 1994. p. 105-115 : 5 tables. (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches ; n. 8).

Chehat F , 2007., Analyse macroéconomique des filières , la filière blés en Algérie.Projet PAMLIM « Perspectives agricoles et agroalimentaires Maghrébines Libéralisati et Mondialisation » Alger : 7-9 avril 2007.

Chennafi H, Aïdaoui A, Bouzerzour H, Saci A (2006). Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to déficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian j. Plant Sci.* 5:854-860.

Clarke, J.M., W.A. Norvell, F.R. Clarke et T.W. Buckley (2002) Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines. *Can. J. Plant Sci. Revue Canadienne de phytotechnie*, 82:27-33.

Daaloul A, Bchini H, Sayar R (2014) Variabilité génétique de quelques paramètres du système racinaire du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous deux régimes hydriques. *Biodiversity International* , FAO 129 : 25 - 31

David M (2009). Osmotic adjustment capacity and cuticular transpiration in several wheat cultivars cultivated in Algeria. *Roman. Agric. Res.* 26:29-33.

Davidson DJ, Chevalier PM. (1990) Pre-anthesis tiller mortality in spring wheat
Crop Sciences ; 30 : 832-6.

Debaeke P., Puech, J., Casals, M.L. (1996). Elaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. I. Etude en lysimètres. Agronomie, 16 : 3-23.

Debaeke P (2009) Quels outils pour concevoir, conduire et évaluer des systèmes de culture adaptés à la contrainte hydrique. ? Symposium. International.
AGDUMED, Rabat, Maroc, 14-16 Mai.

Decroix, M., and Puech, J., (1985) Le pilotage de l'irrigation a la parcelle. In : Les besoins en eau des cultures. Conférence international Paris,INRA-CIIFL, Paris: 693-724.

Dekkaki .M, Amssa. M, Qariani. L (2000), Identification des critères agro-physiologiques d'adaptation du blé dur aux basses températures et à la sécheresse.
Ed CIHEAM-IAMZ, 245-249P.

DeVries, A.P. (1971). « Flowering Biology of Wheat, Particularly in View of Hybrid Seed Production - A Review ». *Euphytica*, 20:152-170.

Djermoun A., (2009). La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. Revue Nature et Technologie, 01 ; 45 : 53

Doorenbos J et Pruitt W.O (1975) Crop Water Requirements, FAO, Rome 179 p

Doorenbos J, Kassam A. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper n° 33. FAO, Rome. 193 p

Doorenbos J, Pruitt WO (1996) Les besoins en eau des cultures. Bulletin *F.A.O.* d'irrigation et de drainage, 24, Rome, 144p

EL Fakhri M, Mahboub S, Benchekroun M, Nsarellah N (2010) Effet du stress hydrique sur les caractéristiques d'enracinement du blé dur (*Triticum Durum*. Desf). Revue « Nature et Technologie ». (03) : 06 - 12

El Hafid R, Smith DH, Karrou M, Samir K (1998) Root and shoot growth, water use and water use efficiency of spring durum wheat under early-season drought. Agronomie 18:181-195

El Hafid R, Smith DH, Karrou M, Samir K (1998) Morphological attributes associated with early season drought tolerance in spring durum wheat in a mediterranean environment. *Euphytica* 101: 273–282

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

FAOSTAT (2014). Statistics Division, FAO, <http://faostat3.fao.org>

Feldman, M. (2001). « Origin of Cultivated Wheat ». Dans Bonjean A.P. et W.J. Angus (éd.) *The World Wheat Book: a history of wheat breeding*. Intercept Limited, Andover, Angleterre, p 3-58.

Feillet P (2000) Le grain de blé : composition et utilisation. *INRA*. Paris Paris: 23- 25p

Feliachi K, Amroun R, Khaldoun A (2001) Impact de la sécheresse sur la production des céréales cultivées dans le nord de l'Algérie. *Céréaliculture- ITGC, Algérie*, 35: 28-34

Fisher RA. (1973)The effect of water stress at various stages of development in yield processes in wheat. In : Slatyer RO, ed. *Plant response to climatic factors. Proc Uppsala Symp.* Paris : Unesco.

Fisher RA (1973) The effect of water stress at various stages of development in yield processes in wheat. In ; *Plant response to climatic factors. Proc Uppsala Symp.* Paris : Unesco. *Ecology and conservation* 5:233-241

Fokar M., Nguyen H.T. & Blum A., (1996). Heat tolerance in spring wheat II. Grain filling. *Euphytica*, 104, 9-15.

Gallais A (1980) Selection du maïs fourrage
Revue Cult. ; France , 133:28-30

Garcia del Moral LF, Rharrabti Y, Elhani S, Martos S, Royo C, 2005. Yield formation in Mediterranean durum wheats under two contrasting water regimes based on path-coefficient analysis. *Euphytica* 146: 203–212

Gate P. *Écophysiologie du blé* (1995) Paris : Tec et Doc-Lavoisier.

Gate P (1997) – *Ecophysiologie du blé*, préface de Tony Fischer, 103p

Geerts, S., Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agric. Water Manag.* 96, 1275-1284

Gebeyehou G., Knott D.R. & Baker R.J., (1982). Relationships among duration of vegetative and grain filling phases, yield components and grain yield in durum wheat cultivars. *Crop Sci.*, 22, 287-290.

Gregory P.J., Simmonds L.P., Pilbeam C.J. (2000). Soil type, climatic regime, and the response of water use efficiency to crop management. *Agron. Journal* , 92: 814-820.

Grignac (P.). 1965. — *Contribution d l'étude de Triticum durum* (Desf.) Thèse, Fac. Sci. Toulouse, 152 p

Gros A (1979) *Engrais .Guide pratique de la fertilisation*.
Ed. Maison. Rustique, Paris, 382p.

Guedira, M., PJ McCluskey, F. MacRitchie et GM Paulsen. 2002. Composition et qualité du blé cultivés dans des pousses et des racines différentes Les températures au cours de la maturation. *Cereal Chemistry*. 79: 397-403.

Gummuluru, S., Jana, S., Hobbs, S.L.A, 1989. Genotypic variability in physiological characters and its relationship to drought tolerance in durum wheat. *Can. J. Plant Sci.* 69, 703-711.

Hacini N (2014) Etude de l'interaction Génotype X Environnement et effet de l'origine de quelques cultivars de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sur les aptitudes adaptatives et qualitatives. Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, 135p.

Haddouche L, Mekliche L (2008) Etude comparative de quelques populations de blé dur (*Triticum durum* Desf) et leur parents. *Céréaliculture-ITGC, Algérie* 50 : 10-15

Hafsi M, Monneveux P, Merah O, Djekoune A (2001) Discrimination isotopique du carbone et rendement du blé dur dans les hautes plaines sétifiennes, Algérie. *Sécheresse* 12: 37-43

Hazmoun T (2000) Erosion des variétés de blé dur en Algérie: perspectives
CIHEAM-IAMZ, serie A, 291-294.

Heller, R., Esnault, R., and Lance, C. (1993) *Physiologie végétale, 1. Nutrition*, Paris, 294p.

Hillel D (1984) *L'eau et le sol .Principes et processus physique*
Academia.Louvain la Neuve, Belgique 288p

Houot S, Mordelet P, Tardieu F, Molina J (1990) Effet du tassement du sol sur la biomasse microbienne et la libération d'azote. *Symp. INRA-Paris Grignon, France* , PP :201-207.

Hucl P, Baker RJ. (1989) Tilling patterns of spring wheat genotypes grown in a semi-arid environment. *Can J Plant Sci* 1989 ; 69 : 71-9

Ilbeyi A, Ustun H, Oweis T, Pala M, Benli B, 2006. Wheat water productivity and yield in a cool highland environment: effect of early sowing with supplemental irrigation. *Agricultural Water Management* 82, 399–410.

Karam F, Kabalan R, Breidi J, Roupheal Y, Oweis T, 2009. Yield and water-production functions of two durum wheat cultivars grown under different irrigation and nitrogen regimes *Agricultural Water Management* 96, 603-615.

Karrou M.(2000) Contribution à la mise en place d'une approche intégrée de lutte contre la sécheresse chez le blé dur au Maroc. In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges* . Zaragoza : CIHEAM, 559 -567 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n° 40)

Khaldoun A, Chery J, 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.

Khila SB, Douh B, Mguidiche A, Ruget F, Mansour M, Boujelben A (2013). Yield and water use efficiency of a durum wheat (*Triticum Durum* Desf.) cultivar under the influence of various irrigation levels in a Mediterranean climate. *J. Nat. Prod. Plant Resour.* 3(1):78-87.

Kobata T, Palta JA, Turner NC (1992). Rate of development of post-anthesis water deficit and grain filling of spring wheat. *Crop Sci* 32 : 1238-1242.

Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, (15), 11: 91-100.

Kotchi S.O (2004) Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge application à la culture de la pomme de terre , mémoire de maîtrise, faculté des études supérieures de l'université Laval, Québec , 115p.

Labdelli M , adda A, soualem S. (2013) Étude des caractères morphologiques et anatomiques des racines séminales du blé dur (*Triticum durum* Desf.) soumis au déficit hydrique en milieu hydroponique. *Revue Ecologie-Environnement* (9)

Lacroix (1989) Irrigation du maïs, quelle dose, quelle fréquence
Revue Cultivar, France, (250) : 40-42

Lamb, R., R. McKenzie, I. Wise, P. Barker, M. Smith et O. Olfert. (2000) Resistance to wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae), in spring wheat (Gramineae) *Can. Entomol.* 132:591–95.

Lamb, R., M. Smith, I. Wise, P. Clarke et J. Clarke. (2001) Oviposition deterrence to *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae): a source of resistance for durum wheat (Gramineae) *Can. Entomol.* 133:579 :591.

Larbi A, Mekliche A, Abed R, Badis M (2000). Effet du déficit hydrique sur la production de deux variétés de blé dur en région semi-aride. *Options Méditerranéennes* 40:295- 297.

Latiri K, Lhomme JP Lawlor DW (2013). Grain filling of durum wheat through assimilate remobilisation under semi-arid conditions. *Exp. Agric.* 49:197-211.

Lemeilleur S.; Tozanli S.; Bencharif A (2009). Dynamique des acteurs dans les filières agricoles et agroalimentaires = Dynamics of the actors in agricultural and agrofood channels. In In Abis S. (coord.), Blanc P. (coord.), Lerin F. (coord.), Mezouaghi M. (coord.) . Perspectives des politiques agricoles en Afrique du Nord . Paris : CIHEAM, 2009. p. 93-141 : 30 réf., 16 graph., 9 tabl. (*Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches ; n. 64*)

Loue A (1982) Le potassium et les céréales

Marty J-R (1997) Irrigation des fourrages. Production et valorisation de l'eau de quelques espèces fourragères. Bulletin Technique Info, , France 319: 209-220

Mekhlouf A, Bouzerzour H, Benmahammed A, Sahraoui AH, Harkati N (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. Sécheresse 17 : 507-513.

Merabet B.A , Bouthiba, (2004) Effet de l'irrigation de complément sur quelques variétés de blé dur dans une région semi-aride (plaine du Chélif) Annales INA EL-Harrach (Alger), 25 :89-109

Merah O, Monneveux P, Nachit MM, Deléens E (1999). La composition isotopique du carbone, critère intégrateur du fonctionnement photosynthétique : application à l'amélioration génétique du blé dur en conditions méditerranéennes. Cahiers Agricultures ; 8 : 37-47.

Merah O, Deléens E, Teulat B , Monneveux P (2001) Productivity and carbon isotope discrimination in durum wheat organs under a Mediterranean climate. Comptes Rendues de l'Académie des sciences Series III Sciences de la vie, 324 (1) : 51-57.

Meyer S., Reeb C., Bosdeveix R (2004). Botanique : Biologie et physiologie v.g.tale. Ed Maloine. 163-164p

Mogensen VO, Jensen HE, Abdur.Rab (1985) Grain yield, yield components, drought sensitivity and water use efficiency of spring wheat subjected to water stress at various growth stages. Irrig Sci 6 : 131-140

Monneveux P, This D. (1996) La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse : espoirs et difficultés. Sécheresse ; 8 : 29-37.

Monteny, B. A., 1972. Evapotranspiration de différents couverts végétaux en région méditerranéenne semi-aride. (Evapotranspiration of different crops in a Mediterranean semi-arid region.) Agnk Meteorol., 10: 19-38.

Morris, L.C. ; Thompson, J.F.; Johnson, C.M. (1969) Metabolism of glutamic and N-acetyl glutamic acid in leaf discs and cell-free extracts of higher plants. *Plant Physiol.*, 44, pp. 1023-1026.

Moule C (1980) Bases scientifiques et techniques de la production des principales espèces de grande culture en France, Ed, Miason Rustique, Paris, 319p.

Musick JT, Porter KB (1990). Wheat. In : BA Stewart, DR Nielsen (eds) Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy Monograph 30, ASA- CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, pp. 597-638.

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

Nachit M, Picard E, Monneveux P, Labhilili M, Baum M., Rivoal R (1998) Présentation d'un programme international d'amélioration du blé dur pour le bassin méditerranéen. Cahiers Agricultures 7: 510-515

Novak, S., Kockmann, F et Villard, A., (2006) Adapter la stratégie culturale au type de sol 140
Perspective Agricole 322 : 14-17

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

Oweis T, Hachum A, 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management* 80, 57-73.

Paillard C., Masse J., Robert D., Crosson P., 1992. Blé d'hiver : modélisation de la progression racinaire. *Persp. Agric.* 175, 112-115.

Paul M.H., Planchton C. & Ecochard R. 1979. Etude des relations entre le développement foliaire, le cycle de développement et la productivité chez le soja. *Amélio plants*. 29 : 479 -492 p.

Picon B, 1974 Etude agro-pédologique de la plaine d'El Khemis (2^{ème} partie)
D.E.M.R.H , Alger 53p

Poly J (1979) L'INRA , l'eau est la production végétale.
SEI.CNPA , Versailles, Paris, 269 P.

Radhouane L, Jamil Mellouli H (2007) Effet d'un stress hydrique sur les rendements de deux écotypes locaux de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) Cahiers Agricultures. Vol 16, (1) 17-22.

Rezgui M, Zairi A, Bizid E, Ben Mechlia N, 2005. Consommation et efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) cultivé en conditions pluviales et irriguées en Tunisie. Cahiers Agric 14, 391-397.

Rezzoug w, Gabrielle B, Suleiman A, Benabdeli K (2008). Application and évaluation of the DSSAT wheat in the Tiaret région of Algeria. *Afr. j. Agric. Res.* 3:284-296.

Richards RA, Rebtzke GJ, Van Herwaardlen AF, Dugganb BL, Condon A. (1997). Improving yield in rainfed environments through physiological plant breeding. *Dryland Agriculture* ; 36 : 254-66.

Richards R.A., Rebetzke G.J., Condon A.G., Van Herwaarden A.F. (2002). Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci.* 42 : 111-121.

Riou C (1993) L'eau et la production végétale, *Revue Secheresse* , 4 : 75-83

- Royo C, Aparicio N, Blanco R, Villegas D (2004) Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under Mediterranean conditions. *Eur J Agron* 20: 419-430
- Sahnoune F, Belhamel M, Zelmat M, Kerbachi R (2013). Climate change in Algeria: vulnerability and strategy of mitigation and adaptation. *Energy Procedia* 36:1286-1294.
- Sharma, H. et B.S. Gill. (1983). « Current status of wide hybridization in wheat. » *Euphytica*, 32:17- 31.
- Seelan, S. K., Laguette, S., Casady, G. M., Seielstad, G. A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, (88), n° (1-2) : 157-169.
- Slafer GA, Araus JL, Royo C, Garcia del Moral LF (2005) Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Ann appl Biol* 146: 61-70
- Sofield T., Evans J., Cook M.G. & Wardlaw I.F., (1977). Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust. J. Plant Physiol.*, 4, 785-797.
- Soltner,D., (1985) -Les grandes productions végétale, céréale , plantes et prairies sarclées *Ed. collection science et technique agricole. 471P.*
- Soltner D., (1988) Les bases de la production végétale.
Ed. Collec. Sci et Tech. Agri., Paris, 566 p.
- Soltner,D., (2000) Phytotechnie générale : les bases de la production végétales. Tome 1 : le sol et son amélioration. Ed. collection sciences et techniques agricoles, 467 p.
- Smadhi D, Zella L (2009) Céréaliculture en sec et précipitations annuelles : le cas de l'Algérie du Nord. *Sécheresse* 20 : 199-203.
- Sorrells ME, Diab A, Nachit M (2000) Comparative genetics of drought tolerance. *Options Méditerranéennes série A* 40 : 191-201.
- Tahri E, Belabed A, Sadki K (1998) Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum*). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, 21 : 81-87
- Tardieu, F., and Dreyer, E. (1997) Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. In *L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau.* Éditions. Institut National de Recherche Agronomique, 41-59pp.
- Tiercelin JR (1998) *Traité d'irrigation. Ed. Paris: Lavoisier*
- Vilain M (1987), la production végétale Volume I, les composantes du rendement.
Ed. JB Baillierie ; Paris, 294p
- Voltas, J., Romagosa, I., Lafarga, A., Armesto, A.P., Sombrero, A. and Araus, J.L. (1999), Genotype by environment interaction for grain yield and carbon isotope discrimination of barley in Mediterranean Spain°, *Australian Journal of Agricultural Research*, 50 :1263-71.

Watts D, El Mourid M. (1988) Rainfall patterns and probabilities in the semi-arid cereal production region of Morocco. USAID Project n° : 608-0136. Settat : Aridoculture Center INRA.

Welsch R, Wüst F, Bär C, Al-Babili S et Beyer P (2008) A third phytoene synthase is devoted to abiotic stress-induced abscisic acid formation in Rice and defines functional diversification of phytoene synthase genes. *Plant Physiol* 147: 367:380

Wullschleger, S.D., Oosterhuis, D.M., Hurren, R.G. and Hanson, P.J. (1991) Evidence for light dependent recycling of respired carbon dioxide by the cotton fruit, *Plant Physiology*, 97 574-9.

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

Zhang HP, Oweis TY, Garabet S, Pala M (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

Zwart SJ, Bastiaanssen WGM, (2004) Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize; *Agricultural Water Management* 69, 115–133

Tableau : Principaux paramètres mesurés

Annexe

Année			Nplt/m ²	NE/m ²	NG/E	LE	NG/m ²	PMG	RG	HP	RPS	
2001	chen's	T1(pluv)	241	221	29	5,8	6409	32,57	17,31	46,1	26,08	
	chen's	T2	242	282	31	6,2	8742	43,62	33,81	56,38	34,4	
	chen's	T3	240	279	34	6,3	9486	44,03	34,67	57,91	35,46	
	chen's	T4	240	289	34	6,3	9826	54,24	43,97	63,27	39,26	
2002	chen's	Irrigué	259	272	30	6,05	8160	31,96	15,27	60,34	35,06	
	Mexicali	Irrigué	276	284	18	6,81	5112	25,19	11,47	59,62	35,71	
	Vitron	Irrigué	260	278	26	6,94	7228	27,95	10,57	55,38	37,6	
	Waha	Irrigué	263	268	27	6,9	7236	30,79	10,73	61,62	35,9	
2003	Waha	Pluv (T1)	265	296	26	6,2	7696	27,75	27,28	65,15	59	
	Waha	Irrigué (T2)	267	297	27	6,1	8019	36,34	35,79	65,25	63,75	
	Waha	Irrigué (T3)	261	297	28	6,5	8316	35,82	37,07	66,3	64	
	Waha	Irrigué (T4)	259	298	29	6,3	8642	34,36	37,84	66,1	65	
2004	chen's	pluvial	143	152	13	7	1976	21,76	9,02	59	24,8	
	chen's	Irrigué	205	189	31	7,41	5859	25,91	18,75	70,61	33,22	
	Mexicali	Pluvial	146	168	15	7,4	2520	23,62	12	61	25,8	
	Mexicali	Irrigué	190	143	30	7,25	4290	27,92	12,41	65,48	30,13	
	Waha	pluvial	181	158	16	7,3	2528	22,01	6,68	65	18,45	
	Waha	Irrigué	160	199	32	6,09	6368	27,64	17,85	63,16	25,4	
2006	Mexicali	Irrigué	284	310	32	6,87	9920	22,09	10,68	59,91	44,61	
	Vitron	Irrigué	210	220	38	7,23	8360	21,35	10,56	55,8	44,32	
	chen's	Irrigué	299	373	37	5,98	13801	24,81	18,96	54,59	42,43	
2007	chen's	pluvial	254	205	39	5,88	7995	31,29	22,83	80	29,33	
	chen's	Irrigué	254	190	45	5,78	8550	32,35	29,41	79,67	32,33	
	Vitron	Pluvial	267	164	33	5,61	5412	30,59	13,17	84,33	30,33	
	Vitron	Irrigué	267	171	37	6,1	6327	38,29	21,5	86	29,33	
	Mexicali	Pluvial	287	155	30	5,77	4650	39,83	12	87,33	24,5	
	Mexicali	Irrigué	287	141	37	6,64	5217	45,01	20,33	90	28,83	
	Waha	Pluvial	273	144	35	5,72	5040	34,32	12,17	83,33	29,67	
	Waha	Irrigué	273	150	41	6,2	6150	38,38	29,51	85,67	34,83	
	Bousselam	Pluvial	297	197	35	5,64	6895	44,55	30,17	89	24,33	
	Bousselam	Irrigué	297	235	36	5,74	8460	44,05	34,6	84,33	31,67	
	Med Ben	Pluvial	287	239	29	5,39	6931	22,97	16,33	130,67	76,67	
	Med Ben	Irrigué	287	284	32	5,78	9088	24,81	25,32	76,67	91,33	
	2008	chen's	pluvial	302	335	37	5,52	12395	39,26	26,7	65,42	32,65
chen's		Irrigué	302	408	43	5,68	17544	35,34	34,25	70,09	35,35	
Vitron		Pluvial	302	346	34	6,27	11764	36,21	25,22	67,92	33,66	
Vitron		Irrigué	302	406	37	6,3	15022	38,7	27,07	73,19	43,13	
Mexicali		Pluvial	220	343	30	5,74	10290	37,25	22,34	75,13	28,92	
Mexicali		Irrigué	220	402	31	6,11	12462	40,24	31,42	80,71	44,66	
Waha		Pluvial	230	331	39	6,86	12909	28,11	21,4	69,51	26,36	
Waha		Irrigué	230	390	40	6,53	15600	30,24	30,52	79,02	37,04	
Med Ben		Pluvial	308	270	27	5,86	7290	34,57	6,9	70,28	38,4	
Med Ben		Irrigué	308	366	28	6,03	10248	30,89	12,1	85,37	35,67	
Bousselam		Pluvial	298	359	31	5,94	11129	31,46	19,04	71,36	29,6	
Bousselam		Irrigué	298	475	33	6,26	15675	32,94	22,67	77,51	35,52	
2009		chen's	Pluvial	296	302	50	5,67	15100	35,33	25	69	50,67
		chen's	Irrigué	296	345	55	6	18975	34,83	49,33	73	62
	Vitron	Pluvial	219	311	52	6,33	16172	32,33	25	65,67	45,67	
	Vitron	Irrigué	219	311	55	7,33	17105	37,67	40,33	71,33	54,33	
	Mexicali	Pluvial	292	342	48	6,67	16416	35,5	33,33	76,67	50,33	
	Mexicali	Irrigué	292	402	52	6	20904	36,67	47,67	79	64	
	Waha	Pluvial	280	345	48	6	16560	31,67	31	75,33	53,67	
	Waha	Irrigué	280	401	53	7	21253	38,33	53	78	65,33	
	Med Ben	Pluvial	250	315	51	6,67	16065	31,67	17,33	87,67	56,67	
	Med Ben	Irrigué	250	367	55	6,67	20185	33	28	88,67	79	
	Bousselam	Pluvial	263	388	49	6,67	19012	30,67	34	77,67	61,33	
	Bousselam	Irrigué	263	407	56	7	22792	34,67	51,33	81,33	88,33	

Statistix 9.0
15:38:32

2003, 11/12/2014,

Randomized Complete Block AOV Table for NE

Source	DF	SS	MS	F	P
Rep	2	26.0000	13.0000		
IRR	3	6.2500	2.0833	0.13	0.9403
Error	6	98.0000	16.3333		
Total	11				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 297.25 CV 1.36

Tukey's 1 Degree of Freedom Test for Nonadditivity

Source	DF	SS	MS	F	P
Nonadditivity	1	30.0328	30.0328	2.21	0.1973
Remainder	5	67.9672	13.5934		

Relative Efficiency, RCB 0,92

Means of NE for IRR

IRR	Mean
I1	297.00
I2	297.33
I3	298.33
S	296.33

Observations per Mean 3
Standard Error of a Mean 2.3333
Std Error (Diff of 2 Means) 3.2998

Randomized Complete Block AOV Table for NGE

Source	DF	SS	MS	F	P
Rep	2	4.6667	2.33333		
IRR	3	15.3333	5.11111	6.57	0.0252
Error	6	4.6667	0.77778		
Total	11				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 27.667 CV 3.19

Tukey's 1 Degree of Freedom Test for Nonadditivity

Source	DF	SS	MS	F	P
Nonadditivity	1	0.34990	0.34990	0.41	0.5524
Remainder	5	4.31677	0.86335		

Relative Efficiency, RCB 1,30

Means of NGE for IRR

IRR	Mean
I1	27.333
I2	28.333
I3	29.000
S	26.000

Observations per Mean 3
Standard Error of a Mean 0.5092
Std Error (Diff of 2 Means) 0.7201

Randomized Complete Block AOV Table for PMG

Source	DF	SS	MS	F	P
Rep	2	0.863	0.4316		
IRR	3	141.690	47.2301	37.55	0.0003
Error	6	7.547	1.2578		
Total	11				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 33.570 CV 3.34

Tukey's 1 Degree of Freedom Test for Nonadditivity

Source	DF	SS	MS	F	P
Nonadditivity	1	0.41956	0.41956	0.29	0.6108
Remainder	5	7.12742	1.42548		

Relative Efficiency, RCB 0,84

Means of PMG for IRR

IRR	Mean
I1	36.347
I2	35.820
I3	34.360
S	27.753
Observations per Mean	3
Standard Error of a Mean	0.6475
Std Error (Diff of 2 Means)	0.9157

Randomized Complete Block AOV Table for RDT

Source	DF	SS	MS	F	P
Rep	2	1.171	0.5853		
IRR	3	214.540	71.5134	71.69	0.0000
Error	6	5.985	0.9975		
Total	11				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 34.497 CV 2.90

Tukey's 1 Degree of Freedom Test for Nonadditivity

Source	DF	SS	MS	F	P
Nonadditivity	1	0.08123	0.08123	0.07	0.8036
Remainder	5	5.90379	1.18076		

Relative Efficiency, RCB 0,88

Means of RDT for IRR

IRR	Mean
I1	35.793
I2	37.070
I3	37.840
S	27.283
Observations per Mean	3
Standard Error of a Mean	0.5766
Std Error (Diff of 2 Means)	0.8155

Analysis of Variance Table for NE

Source	DF	SS	MS	F	P
rep	2	5589.1	2794.5		
irr	1	12958.0	12958.0	37.18	0.0259
Error rep*irr	2	697.1	348.5		
var	5	33238.5	6647.7	3.03	0.0339
irr*var	5	4300.5	860.1	0.39	0.8484
Error rep*irr*var	20	43871.9	2193.6		
Total	35				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 352.97
CV(rep*irr) 5.29
CV(rep*irr*var) 13.27

Analysis of Variance Table for NGE

Source	DF	SS	MS	F	P
rep	2	65.056	32.528		
irr	1	200.694	200.694	168.02	0.0059
Error rep*irr	2	2.389	1.194		
var	5	52.806	10.561	0.38	0.8577
irr*var	5	15.472	3.094	0.11	0.9886
Error rep*irr*var	20	558.556	27.928		
Total	35				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 51.972
CV(rep*irr) 2.10
CV(rep*irr*var) 10.17

Analysis of Variance Table for PMG

Source	DF	SS	MS	F	P
rep	2	31.597	15.7986		
irr	1	81.000	81.0000	6.86	0.1201
Error rep*irr	2	23.625	11.8125		
var	5	67.722	13.5444	0.83	0.5435
irr*var	5	57.417	11.4833	0.70	0.6274
Error rep*irr*var	20	326.444	16.3222		
Total	35				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 34.361
CV(rep*irr) 10.00
CV(rep*irr*var) 11.76

Analysis of Variance Table for RDT

Source	DF	SS	MS	F	P
rep	2	48.22	24.11		
irr	1	2704.00	2704.00	54.81	0.0178
Error rep*irr	2	98.67	49.33		
var	5	1742.89	348.58	15.52	0.0000
irr*var	5	192.33	38.47	1.71	0.1776
Error rep*irr*var	20	449.11	22.46		
Total	35				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 36.278

CV(rep*irr) 19.36

CV(rep*irr*var) 13.06

CV(rep*eau*var) 19.28

Statistix 9.0

RP 2009, 14/11/2012,

07:17:46

Analysis of Variance Table for RP

Source	DF	SS	MS	F	P
rep	2	44.67	22.33		
eau	1	2224.69	2224.69	42.69	0.0226
Error rep*eau	2	104.22	52.11		
var	5	2358.92	471.78	4.34	0.0078
eau*var	5	379.81	75.96	0.70	0.6308
Error rep*eau*var	20	2174.44	108.72		
Total	35				

Note: SS are marginal (type III) sums of squares

Grand Mean 60.917

CV(rep*eau) 11.85

CV(rep*eau*var) 17.12

Tableau : Evolution du taux de sénescence de la longueur de la feuille étendard en pluvial

Date	6/05	8/05	12/05	14/05	16/05	18/05	21/05	23/05
Variété								
V1 Chen's	4.30	15.64	18.42	27.21	36.21	100 %		
V2 Vitron	6.88	10.38	13.19	15.54	25.74	31.6	100%	
V3 Mexicali	11.10	22.20	26.60	29.62	36.29	100 %		
V4 Waha	2.28	12.31	18.11	21.73	32.60	100 %		
V5 Med Ben Bachir	5.51	11.53	17.00	27.55	36.41	100 %		
V6 Boussalem	3.86	16.60	19.90	26.09	29.02	30.41	36.02	100

Tableau : Evolution du taux de sénescence de la longueur de la feuille étendard en irrigué

Date	6/05	8/05	12/05	14/05	16/05	18/05	21/05	23/05
Variété								
V1 Chen's	10.6	19.01	29.83	35.04	39.35	51.85	59.85	100
V2 Vitron	5.45	9.67	14.6	24.78	30.73	53.90	100	
V3 Mexicali	6.93	12.54	20	22.8	30.8	46.5	100	
V4 Waha	8.97	15.38	27.60	30.97	38.46	49.05	100	
V5 Med Ben Bachir	5.56	7.26	21.42	25.70	26.57	35.78	100	
V6 Boussalam	10.21	16.43	17.05	20.46	21.82	27.28	100	