

DEPARTEMENT DE SCIENCES AGRONOMIQUES

N° ...../5

THÈSE

Présentée par

**SEMCHEDDINE Nadjim**

Pour l'obtention du diplôme de

**Doctorat en Sciences**

**Filière : Agronomie**

**Spécialité: Production végétale**

THÈME

**Evaluation de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) par l'étude du bilan hydrique et des paramètres phéno-morpho-physiologiques.**

Soutenue publiquement le **07/06/2015**

DEVANT LE JURY

Président	<b>BENMAHAMMED Amar</b>	<b>Pr. UFA Sétif 1</b>
Directeur	<b>HAFSI Miloud</b>	<b>Pr. UFA Sétif 1</b>
Examineurs	<b>ALATOU Djamel</b>	<b>Pr. UM Constantine</b>
	<b>KARA Youcef</b>	<b>Pr. UM Constantine</b>

*Laboratoire d'Amélioration et de Développement de la Production Végétale et Animale  
(LADPVA)*

## Résumé

La sécheresse est le facteur le plus significatif et le plus limitant des cultures en général et du blé dur en particulier, surtout en zones semi-aride. L'objectif de ce travail est l'évaluation de la tolérance à la sécheresse chez quelques génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Sur trois sites expérimentaux différents et durant trois campagnes agricoles, dix génotypes de blé dur ont été testés dans des conditions de culture pluviales et irriguées, sous climat semi-arides des hautes plaines Sétifiennes. Les mesures ont porté sur le rendement en grains et ses composantes, la cinétique de l'épiaison, la teneur relative en eau et le poids spécifique de la feuille étendard, la vitesse et la durée de remplissage des grains et la teneur en chlorophylle de la feuille étendard. Une évaluation du bilan hydrique par la méthode gravimétrique et par simulation du logiciel *BUFGET* a été entreprise. Enfin, une évaluation de la tolérance à la sécheresse à travers certains indices a été effectuée. Les résultats ont montré que le stress hydrique a affecté de manière significative tous les caractères mesurés. L'irrigation au stade épiaison augmente significativement le rendement en grains entre 22 à 48%. La contrainte hydrique a affecté négativement le poids de mille grains. Les génotypes qui se caractérisent par un cycle végétatif court, une précocité à l'épiaison, une longue durée de remplissage des grains, une teneur relative en eau et en chlorophylle élevée, de bons peuplements épis et un nombre élevé de grains par unité de surface, enregistrent un haut rendement grains. Les résultats de simulation du bilan hydrique par *BUDGET* ont montré l'existence d'une grande variabilité génétique à l'échelle phénologique au sein de ce groupe de génotype. Ils indiquent que le stress hydrique peut se manifester à n'importe quel stade phénologique, avec différentes occurrences, durées et intensité mais, le stress hydrique terminal est celui qui affecte le plus la croissance et le rendement des génotypes. Quelque soit l'environnement, le stress hydrique n'est pas dû à un manque d'évaporation du sol, mais à un déficit de transpiration. Les génotypes les plus tolérants au stress hydrique sont ceux à cycle de croissance court et à épiaison précoce. L'étude typologique, basée sur les indices de tolérance à la sécheresse, identifient Bousselem, Hoggar et Mexicali comme performants et tolérants à la sécheresse comparativement à Oued Zenati et Polonicum, moins productifs et plus susceptibles au stress. L'étude de la stabilité et de la performance du rendement en grains, ont permis de caractériser : Bousselem et Waha comme stables et performants quelque soit l'environnement, Polonicum et Oued Zenati comme stables mais non performants quelque soit le milieu, Dukem, Altar et Sooty comme instables et performants en milieu défavorable, et enfin, Mexicali, Hoggar ainsi que Kucuk, comme instables et performants en milieu favorable.

**Mots-clés** : Blé dur, *BUDGET*, Indices de tolérance, Rendement, Sécheresse, Stress hydrique, Tolérance.

## ملخص

الجفاف هو العامل الأكثر تأثيراً معنوياً و الأكثر تحديداً للمحاصيل عموماً و للقمح الصلب خصوصاً، خاصة في المناطق شبه الجافة. الهدف من هذا العمل هو تقييم تحمل الجفاف عند بعض الأنماط الوراثية من القمح الصلب (*Triticum Durum* Desf.) في ثلاثة محطات تجريبية مختلفة و على مدار ثلاث مواسم زراعية متتالية. اختبرت عشرة أنماط وراثية من القمح الصلب في ظروف زرع جافة و مسقية تحت المناخ الشبه الجاف للهضاب العليا بسطيف. القياسات شملت كل من: المردود الحبي و مكوناته، حركية التسنبل، المحتوى المائي و الوزن النوعي للورقة العلم، سرعة و مدة ملئ الحب و محتوى اليخضور في الورقة العلم. أيضاً، تم تقييم المحصلة المائية عن طريق تقنية الجاذبية و كذلك باستعمال برنامج المحاكاة *BUDGET*. أخيراً، تم تقييم تحمل الجفاف باستعمال بعض المؤشرات. أظهرت النتائج أن الإجهاد المائي أثر معنوياً على جميع الصفات المقاسة. السقي في مرحلة التسنبل يرفع معنوياً المردود الحبي بين 22 و 48%. العائق المائي أثر سلباً على وزن ألف حبة. الأنماط الوراثية التي سجلت مردود حبي مرتفع تتصف ب: دورة نمو قصيرة، تسنبل مبكر، مدة ملئ الحب الطويلة، محتوى نسبي من الماء و اليخضور مرتفعان، عدد جيد من السنابل و من الحب في وحدة المساحة. نتائج محاكاة المحصلة المائية بواسطة *BUDGET* أظهرت وجود تنوع وراثي كبير على مستوى مراحل النمو لكافة الأنماط الوراثية. دلت النتائج على أن الإجهاد المائي قد يظهر في أي مرحلة من مراحل النمو بتكرار و مدة و شدة مختلفة ولكن الإجهاد النهائي هو الأكثر تأثيراً على النمو و المردود. مهما كانت البيئة، فإن الإجهاد المائي لا ينتج من نقصان تبخر التربة و إنما هو نتاج قلة النتج. الأنماط الوراثية الأكثر تحملاً للإجهاد المائي هي التي تتسم بدورة حياة قصيرة و تسنبل مبكر. دلت الدراسة التصنيفية على أساس مؤشرات تحمل الجفاف على أن *Hoggar*، *Bousselem* و *Mexicali* هم الأكثر أداء و تحملاً للجفاف مقارنة ب: *Oued Zenati* و *Polonicum* الأقل إنتاجاً و الأكثر حساسية. مكنت دراسة الاستقرار و أداء المردود الحبي من تشخيص كل من: *Bousselem* و *Waha* على أنهما مستقران و ذا أداء حبي عالٍ مهما كانت الظروف البيئية، *Polonicum* و *Oued Zenati* مستقران و ذا أداء منخفض مهما يكن الوسط، *Dukem*، *Altar* و *Sooty* غير مستقرين و ذوي أداء جيد فقط في الوسط غير الملائم و أخيراً *Hoggar* و *Mexicali* و أيضاً *Kucuk* غير مستقرين و ذوي أداء جيد في الوسط الملائم.

الكلمات المفتاحية: الجفاف، التحمل، قمح صلب، إجهاد مائي، مردود، مؤشرات التحمل، *BUDGET*.

« Toute personne a droit à un niveau de vie suffisant pour assurer sa santé, son bien-être et ceux de sa famille, notamment pour l'alimentation... » *Déclaration universelle des droits de l'homme, art. 25 (1948)*

## Avant propos

Louange à « Allah » qui m'a guidé et inspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait jamais abouti.

Je profite de cette occasion pour rendre hommage à mes enseignants, les regrettés ; **Boudjenouia A, Ayadi A.L et Temamna A**, qu'Allah leurs accorde sa miséricorde et qu'il les accueille dans son vaste paradis, Amine.

Je commence par un agréable devoir, celui de remercier tous ceux qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre, ou encouragé au cours de l'élaboration de ma thèse. Je remercie par la même occasion tous ceux qui ne sont peut être pas cités mais qui se reconnaîtront, et dont la présence ou intervention à un moment donné de la thèse était bénéfique.

Je tiens, en premier lieu, à remercier très sincèrement et très chaleureusement mon Directeur de thèse, Monsieur **Hafsi Miloud**, Professeur à l'université de Sétif 1, qui est à l'origine du projet de thèse, m'a proposé des méthodes et des orientations de travail tout en me laissant une grande liberté d'action. Il a veillé sur moi, m'a encouragé et a été d'un grand soutien morale, surtout dans les moments les plus difficiles. Son encadrement était des plus exemplaires

Mes respect et mes vifs remerciements à Monsieur le professeur ; **Benmahammed Amar** de l'université Sétif 1, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury et d'avoir accepté d'évaluer ce travail et pour tous ces encouragements.

Ma profonde gratitude et mes sincères remerciements vont aux Messieurs les professeurs ; **Alatou Djamel** et **Kara Youcef** de l'université Mentouri de Constantine, pour m'avoir accordé une partie de leur précieux temps, pour lire et examiner ce travail.

Mes sincères remerciements également aux Messieurs ; **Mahnane, Boukhelif** et **Salama**, Responsables de l'EAC "Dahel Nouari", Monsieur **Zitouni**, Directeur de l'EMIVAR, ainsi qu'au personnel de l'ITGC qui m'ont accueilli et mis à ma disposition les parcelles de terrain de l'expérimentation.

Mon dévouement total et tous mes respects vont à mes parents, qu'ils trouvent ici le fruit de leur éducation.

---

Mon affection et ma profonde reconnaissance à ma chère épouse, pour son soutien sans faille, sa grande indulgence, sa compréhension et surtout sa contribution dans le partage du stress de la recherche et de la vie quotidienne.

Aussi, je souhaite remercier mes collègues et amis, **Adjabi H, Madani T, Kherchi I, Rouabhi A, Missaoui K, Lymani Y, Guendouz A, Sella A, Oulmi A, Mennani A, Belghamez S, Soualini N, Nefir A**, pour leur soutien constant et leur sympathie.

Les données expérimentales acquises pour la réalisation de cette thèse sont l'aboutissement du travail de plusieurs étudiant(e)s que j'ai encadré et que je tiens à les remercier en particulier : **Abdelli, Naidja, Fadhel, Moudjahed, Boudab, Bhair, Feras, Khaoui, Chennouf, Rabehi, Kheddi et Attoui.**

Enfin, je dédie cette thèse à ma source d'amour et d'affection, mes adorables filles ; **Hanine, Lyman et Norane** et à toute ma famille et à tous mes amis.

**Nadjim.**

---

### Liste des abréviations

ALT	Altair
BHP	Bilan hydrique potentiel
BOUS	Bousselem
CIMMYT	Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz Y Trigo.
cm	Centimètre
cm <sup>2</sup>	Centimètre carré
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone
CRG	Début du remplissage des grains
DEP	Début de l'épiaison
DJE	Degré-jours à l'épiaison
DRG	Durée de remplissage des grains
D <sub>T</sub>	Déficit de transpiration
DUK	Dukem
EAC	Exploitation Agricole Collective
ET <sub>0</sub>	Évapotranspiration de référence
ETM	Évapotranspiration maximale
ETR	Évapotranspiration réelle
EUE	Efficacité de l'utilisation d'eau
FAO	Food and Agricultural Organization
FEP	Fin d'épiaison
FLO	Floraison
FRG	Fin du remplissage des grains
g	Gramme
GOF	Gonflement
ha	Hectare
HOG	Hoggar
ICARDA	International Center for Agricultural Research in the Dry Areas
ITGC	Institut Technique des Grandes Cultures
j	Jour
Kg	kilogramme
Kg/ha	Kilogramme par hectare
Km <sup>2</sup>	Kilomètre carré
K <sub>s</sub>	Coefficient de stress
KUC	Kucuk
m	Mètre
m <sup>2</sup>	Mètre carré

---

m <sup>3</sup> /ha/an	Mètre cube par hectare et par an
MADR	Ministère de L'Agriculture et du Développement Rural
MEP	Milieu d'épiaison
MEXI	Mexicali
mg	Milligramme
mg/g/ j	Milligramme par grain et par jour
Mha	Million d'hectares
mm	Millimètre
MPa	Mégapascal
MRG	Milieu du remplissage des grains
Mt	Million de tonne
NE/M <sup>2</sup>	Nombre d'épis par m <sup>2</sup>
NGE	Nombre de grains par épi
O Z	Oued Zenati
°C	Degré Celsius
PMG	Poids de 1000 grains
POL	Polonicum
PS	Poids Sec
PSF	Poids spécifique de la feuille étendard
q/h	Quintaux par hectare
Rdt	Rendement en grain
RFU	Réserve Facilement Utilisable
SAU	Surface Agricole Utile
SOOT	Sooty
SPAD	Soil Plant Analysis Development
s.m <sup>-1</sup>	Seconde par mètre
T et t	Température
t.ha <sup>-1</sup>	Tonne par hectare
TRE	Teneur en eau de la feuille étendard
VRG	Vitesse de remplissage du grain
WAH	Waha

<b>Liste des figures</b>	<b>Page</b>
Figure I.1 : Relations phylogénétiques entre les principaux groupes d'espèces monocotylédones.....	6
Figure II.1 : Diagramme ombrothermique de la campagne 2009/2010 de Béni Fouda.....	31
Figure II.2 : Diagramme ombrothermique de la campagne 2010-2011 du site de l'ITGC.....	31
Figure II.3 : Pluviométrie de la campagne 2010-2011 et de la période 1981-2005.....	32
Figure II.4 : Diagramme ombrothermique de la campagne agricole 2011-2012 du site d'Ain Arnat.	32
Figure III.1 Cinétique d'épiaison des dix génotypes.....	45
Figure III.2 : Corrélation entre le rendement en grain du traitement pluvial et traitements irrigués ....	52
Figure III.3 : Durée des phases phénologiques dans le site de Béni Fouda.....	55
Figure III.4 : Décomposition de la phase épiaison-maturité du régime sec à Béni fouda.....	56
Figure III.5 : Décomposition de la phase épiaison-maturité du régime irrigué à Béni fouda.....	56
Figure III.6 : Variation de la réserve hydrique du sol, à l'échelle du cycle cultural, dans le traitement sec du site de Béni Fouda.....	58
Figure III.7 : Transpiration potentielle et réelle et coefficient de stress à l'échelle du cycle de croissance dans le traitement sec (T <sub>0</sub> ) du site de Béni Fouda.....	59
Figure III.8 : Variation de la réserve hydrique du sol, à l'échelle du cycle cultural, dans le traitement irrigué (T <sub>1</sub> ) du le site de Béni Fouda.....	62
Figure III.9 : Transpiration potentielle et réelle et coefficient de stress à l'échelle du cycle de croissance dans le traitement Irrigué (T <sub>1</sub> ) du site de Béni Fouda.....	63
Figure III.10 : Durée des phases phénologiques dans le site de Sétif.....	66
Figure III. 11 : Décomposition de la phase épiaison-maturité dans le traitement en sec du site de Sétif.....	66
Figure III.12 : Décomposition de la phase épiaison-maturité dans le traitement irrigué du site de Sétif.....	67
Figure III.13 : Variation de la réserve hydrique du sol, à l'échelle du cycle cultural, dans le traitement sec (T <sub>0</sub> ) du le site de Sétif.....	69
Figure III.14 : Variation de la réserve hydrique du sol, à l'échelle du cycle cultural, dans le traitement irrigué (T <sub>1</sub> ) du le site de Sétif.....	70
Figure III.15 : Transpiration potentielle et réelle à l'échelle du cycle de croissance dans le traitement sec (T <sub>0</sub> ) du site de Sétif.....	71
Figure III.16 : Transpiration potentielle et réelle à l'échelle du cycle de croissance dans le traitement irrigué (T <sub>1</sub> ) du site de Sétif.....	72
Figure III.17. Relation entre le rendement et le coefficient de stress dans le site de Béni Fouda.....	78
Figure III.18 : Relation entre le rendement et le coefficient de stress dans le site de Sétif.....	78
Figure III.19 : Relation entre la variation de la réserve hydrique du sol mesurée par gravimétrie et simulée par le logiciel <i>BUDGET</i> dans le site de Béni Fouda.....	79
Figure III.20 : Relation entre la variation de la réserve hydrique du sol mesurée par gravimétrie et simulée par le logiciel <i>BUDGET</i> dans le site de Sétif.....	80
Figure III.21. Projection des indices de tolérance selon les 2 axes principaux.....	87
Figure III.22. Similitude des génotypes selon le potentiel du rendement et les indices de tolérances....	87
Figure III. 23 : Tendances des performances et de stabilité des génotypes du groupe 'A et D'.....	88
Figure III. 24 : Tendances des performances et de stabilité des génotypes du groupe 'C'.....	89
Figure III. 25 : Tendances des performances et de stabilité des génotypes du groupe 'B'.....	89

<b>Liste des tableaux</b>	<b>Page</b>
Tableau I.1. Coefficient cultural du blé.	16
Tableau I.2. Réserve en eau du sol selon la texture.	18
Tableau II.1 : Nom et origine du matériel végétal utilisé dans l'expérimentation	29
Tableau II.2 : Caractéristique géologique et physico-chimique du sol des sites expérimentaux.	33
Tableau II.3 : Caractéristiques des traitements hydriques appliqués	40
Tableau III.1 : Rendement moyen en grain (t ha-1) des géotypes et les groupes statistiques.	43
Tableau III.2. Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée.	44
Tableau III.3 : Valeurs moyennes des paramètres mesurés pour les différents traitements hydriques et géotypes.	44
Tableau III.4 : Carré moyen de l'analyse combinée de la variance ; de vitesse et de la durée de remplissage des grains, de la teneur relative en eau et du poids spécifique foliaire.	47
Tableau III.5 : Valeur moyenne des paramètres mesurés dans chaque traitement hydrique.	48
Tableau III.6 : Valeurs moyennes des paramètres mesurés pour chaque géotype	48
Tableau III.7 : Carré moyen de l'analyse combinée de la variance pour la teneur en chlorophylle.	50
Tableau III.8 : Valeurs moyennes de la teneur en chlorophylle (unité SPAD).	51
Tableau III.9 : Coefficient de corrélation entre le rendement en grains et les caractères mesurés	52
Tableau III.10 : Coefficient de corrélation entre la teneur en chlorophylle à différents stades et les caractères mesures	54
Tableau III.11 : Durée moyenne des phases phénologiques (en jour) dans le site de Béni Fouda.	55
Tableau III.12 : Comparaison entre l'évaporation potentielle ( $E_{pot}$ ) et réelle ( $E_{réel}$ ) du cycle de croissance dans le traitement sec ( $T_0$ ) du site de Béni Fouda.	57
Tableau III.13 : Paramètres du bilan hydrique de la 1ère et de la 2ème phase de stress hydrique dans le traitement sec du site de Béni Fouda.	60
Tableau III.14 : Comparaison entre l'évaporation potentielle ( $E_{pot}$ ) et réelle ( $E_{réel}$ ) du cycle de croissance dans le traitement irrigué ( $T_1$ ) du site de Béni Fouda.	61
Tableau III.15 : Paramètres du bilan hydrique de la 1 <sup>ère</sup> et de la 2 <sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement irrigué du site de Béni Fouda.	64
Tableau III.16 : Durée moyenne des phases phénologiques dans le site de Sétif.	65
Tableau III.17 : Comparaison entre l'évaporation potentielle ( $E_{pot}$ ) et réelle ( $E_{réel}$ ) du cycle de croissance du site de Sétif.	68
Tableau III.18 : Comparaison entre le coefficient de stress ( $K_s$ ) et le Déficit de transpiration ( $D_T$ ) du traitement sec ( $T_0$ ) et irrigué ( $T_1$ ) à l'échelle du cycle de croissance du site de Sétif.	72
Tableau III. 19 : Paramètres du bilan hydrique de la 1 <sup>ère</sup> et 2 <sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement sec et irrigué du site de Sétif.	73
Tableau III.20 : Paramètres du bilan hydrique de la 3 <sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement sec et irrigué du site de Sétif.	74
Tableau III.21 : Paramètres du bilan hydrique de la 4 <sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement sec du site de Sétif.	74
Tableau III.22 : Paramètres du bilan hydrique de la 4 <sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement irrigué du site de Sétif.	75

Tableau III.23 : Moyennes des carrés des écarts de l'analyse de la variance du rendement en grain faite par site et sur chaque traitement hydrique.	75
Tableau III.24 : Rendement en grain (t.h <sup>-1</sup> ) fait par site et pour chaque traitement hydrique.	76
Tableau III.25 : Coefficient de corrélation entre le coefficient de stress hydrique (K <sub>s</sub> ) et la durée des stades phénologiques post épiaison.	77
Tableau III.26 : Coefficient de corrélation entre le rendement et le coefficient de stress	78
Tableau III.27. Analyse de la variance du rendement en grain de chaque traitement hydrique.	80
Tableau III.28 : Rendement en grain moyen fait par traitement hydrique et combinant l'ensemble des traitements hydriques.	81
Tableau III.29. Analyse de la variance du rendement combinant les 8 traitements hydriques.	82
Tableau III.30. Analyse de la variance des indices de tolérance au stress.	82
Tableau III.31. : Valeurs des indices de tolérance au stress des différents génotypes	83
Tableau III.32 : Coefficients de corrélation entre les indices de tolérance au stress et les rendements	84
Tableau III.33 : Coefficients de corrélation entre les indices de tolérance et les facteurs de l'ACP	86

---

## Table des matières

---

Résumé.....	I
Avant propos.....	II
Liste des abréviations.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Liste des figures.....	V

---

<b>Introduction.....</b>	<b>01</b>
--------------------------	-----------

---

### **Chapitre I : Revue bibliographique**

<b>I.1. Généralités sur le blé .....</b>	<b>05</b>
I.1.1 Historique .....	05
I.1.2 Phylogénie et positionnement taxonomique.....	05
I.1.3 Importance économique .....	07
<b>I.2. La sécheresse et ces effets sur la culture du blé.....</b>	<b>08</b>
I.2.1 Les hautes températures .....	09
I.2.2 L'eau et son importance pour le végétal.....	10
I.2.3 Le stress hydrique et ces effets sur le blé.....	11
I.2.4. Quantification du stress hydrique à travers le bilan hydrique.....	12
I.2.5. Estimation du bilan hydrique .....	14
I.2.6. Sol et bilan hydrique.....	17
<b>I.3. L'adaptation comme moteur de l'évolution.....</b>	<b>19</b>
I.3.1 Intérêt d'étudier l'adaptation.....	20
I.3.2. L'adaptation à la sécheresse .....	21
I.3.2.1. Adaptations phénologiques .....	22
I.3.2.2. Adaptations morphologiques.....	22
A. Système racinaire.....	22
B. Surface foliaire.....	23
C. Longueur des barbes.....	23
I.3.2.3. Adaptations physiologiques.....	23
A. Régulation stomatique.....	24
B. Ajustement osmotique .....	24
C. Efficacité de l'utilisation de l'eau .....	25
I.4. Présentation de quelques travaux de sélection de blé dur en Algérie .....	26

### **II. Chapitre II : Matériel et méthodes**

---

II.1. Installation et conduite des essais .....	29
II.2. Caractéristiques climatiques des sites expérimentaux .....	30
II.3. Paramètres pédologiques des sites expérimentaux .....	33
II.4. Etude des caractères phéno morpho physiologiques .....	33
II.4.1. Teneur en chlorophylle .....	33
II.4.2. Teneur relative en eau (TRE) et Poids spécifique foliaire (PSF).....	34
II.4.3. Remplissage des grains .....	35
II.4.4. Cinétique de l'épiaison .....	35

---

II.4.5. Analyse des données.....	35
II.5. Evaluation du Bilan Hydrique.....	36
II.5.1. Suivi de la réserve hydrique du sol.....	36
II.5.2. Paramètres phénologiques.....	37
II.5.3. Simulation du bilan hydrique par le modèle <i>BUDGET</i> .....	37
II.5.3.1. Les paramètres d'entrée.....	38
A. Le sol.....	38
B. Matériel végétal.....	38
C. Pluviométrie.....	39
D. Evapotranspiration de référence ET <sub>0</sub> .....	39
E. Irrigation.....	40
II.5.4. Analyse statistique.....	40
II.6. Evaluation de tolérance à la sécheresse par les méthodes non paramétriques .....	41
II.6.1. Analyse statistique.....	42

---

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

<b>III.1. Caractères phéno morpho physiologiques (Campagne 2009/2010)</b> .....	43
III.1.1. Phénologie, rendement en grains et ses composantes .....	43
III.1.2. Teneur Relative en Eau (TRE).....	47
III.1.3. Poids spécifique foliaire (PSF).....	49
III.1.4. Remplissage des grains.....	49
III.1.5. Teneur en chlorophylle des feuilles.....	50
III.1.6 Relation entre les caractères.....	51
<b>III.2. Evaluation du Bilan Hydrique par le modèle <i>BUDGET</i></b> .....	55
III.2.1 Dans le site de Béni Fouda.....	55
III.2.1.1. Aspects phénologiques.....	55
III.2.1.2. Simulation de la variation de la réserve hydrique du sol et de l'évapotranspiration...	57
III.2.2 Dans le site de Sétif.....	65
III.2.2.1. Aspects phénologiques.....	65
III.2.2.2. Simulation de la variation de la réserve hydrique du sol et de l'évapotranspiration...	67
III.2.3. Performance pour le rendement en grain.....	75
III.2.4 Relation entre les stades phénologiques et le stress hydrique.....	77
III.2.5 Effet du stress hydrique sur le rendement.....	77
III.2.6. Validation du modèle <i>BUDGET</i> à travers la méthode gravimétrique.....	79
<b>III.3. Evaluation de tolérance à la sécheresse par les méthodes non paramétriques</b> .....	80
III.3.1. Variation du rendement intra et inter-milieu.....	80
III.3.2. Evaluation des indices de tolérance .....	82
III.3.2.1 Les indices S, TOL et YSI.....	83
III.3.2.2 Les indices MP, GMP, HMP et STI.....	84
III.3.3. Typologie génotypique.....	86
<b>Conclusion</b> .....	90

---

**Références bibliographiques.**

**Annexes.**

---

## **Introduction**

Les chiffres sont connus, y compris du grand public. La planète comptera plus de 9 milliards d'habitants en 2050, voire davantage si le taux de fertilité diminue moins que dans les prévisions de l'Organisation des Nations unies. La population mondiale augmentera ainsi d'environ 2,5 milliards d'individus par rapport à aujourd'hui, l'essentiel de cette croissance aura lieu dans les pays en développement et sur les deux prochaines décennies, d'où la question de la capacité de la planète à se nourrir à l'horizon 2050, et plus spécifiquement de la capacité des agricultures du monde à satisfaire les besoins alimentaires d'une population en croissance (Guyomard, 2009).

L'agriculture algérienne se caractérise principalement par les activités d'élevage (ovin, bovin, caprin, avicole) et de céréaliculture, mais aussi par l'arboriculture fruitière et les cultures maraîchères. Du fait que l'irrigation est peu pratiquée, ces productions dépendent fortement des conditions climatiques et subissent de grandes fluctuations d'une année à l'autre. De plus, l'Algérie dispose de superficies cultivables très limitées (3.4% de la superficie totale), dont la fertilité est généralement faible, pour subvenir aux besoins d'une population croissant rapidement.

L'Algérie a une superficie agricole totale d'environ 42,5 million d'hectares dont 20% seulement est utile, le reste est dominé par les pacages et parcours (77,5%) et les terres improductives (2,5%) (MADR, 2012). La céréaliculture demeure une spéculation stratégique de notre agriculture. Elle occupe près de trois millions d'hectares. La production a connu des augmentations sensibles, passant de près de 18 millions de quintaux au début des années 1960 (Hervieu *al.*, 2006) à plus de 51 millions de quintaux en 2012 (MADR, 2012). Malgré cette très forte croissance allant presque du simple au triple, elle reste faible comparée aux besoins qui augmentent constamment, faisant en sorte que les importations massives sont toujours d'actualité.

On peut penser qu'il sera de plus en plus risqué de miser sur les importations pour subvenir à ces besoins comme le fait aujourd'hui l'Algérie. Les changements climatiques et les sécheresses fréquentes de ces derniers temps, les explosions de prix comme celles de 1972-1973 et de 2007-2008 le montrent bien, et la fin du pétrole et du gaz rendront, à l'avenir ces explosions de prix difficilement surmontables (Bencherif, 2011).

---

La faible performance de la céréaliculture algérienne a plusieurs origines dont le manque d'eau constitue le principal facteur limitant (Chennafi *et al.*, 2006). A cela, s'ajoutent d'autres difficultés d'ordre technique qui relèvent de l'application d'itinéraires techniques souvent peu ambitieux, donc moins risqués, et de l'utilisation de variétés à faible performance mais rustiques.

En Algérie, la culture de blé dur (*Triticum durum*, Desf.) est une activité ancestrale. Elle se pratique sur une large étendue qui va du subhumide à l'aride supérieur et occupe presque, de moitié les emblavures annuelles en céréales. Pour l'année 2012, les emblavements, en blé dur ont atteint 1,34 million d'hectares pour une production moyenne de 24 million de quintaux soit un rendement moyen de 18 q/h (MADR, 2012) et qui reste très inférieur au rendement moyen de l'Union Européenne qui est de 29 q/h pour la même année (Anonyme, 2013).

Le chiffre de production est très controversé. En juin 2012, les autorités céréalières algériennes ont annoncé que le pays n'importerait pas de blé dur avant janvier 2013. Or, selon les données du Conseil International des Céréales, à la fin Novembre 2012 l'Algérie avait d'ores et déjà importé 545 000 t de blé dur contre 527 000 t au cours de la précédente campagne à la même date, soit une hausse de plus de 3 % (Anonyme, 2013). Selon Mekhlouf (2009), les contraintes liées au sol, au climat, aux variétés adoptées et au savoir-faire des agriculteurs limitent les espérances de rendement en grains.

En effet, l'eau est l'un des facteurs écologiques qui détermine le plus la croissance et le développement des cultures et son déficit joue un rôle important dans l'inhibition des rendements (Taheri *et al.*, 2011 ; Akinci et Lösel, 2012 ; Aldesuquy *et al.*, 2014). A l'échelle mondiale, le stress hydrique est le facteur majeur limitant les productions des cultures (Lonbani, 2011). Tout développement de programme de sélection pour l'amélioration de la résistance à la sécheresse chez les plantes, nécessite l'acquisition des connaissances génétiques et physiologiques sur les mécanismes de la tolérance (Inoue *et al.*, 2004).

Selon Slafer *et al.*, (2005), la caractérisation des mécanismes qui gouvernent la tolérance aux stress abiotiques doit être la première étape dans le processus de sélection dans les milieux au climat moins régulier. Levitt (1982) a classé ces mécanismes en stratégies ; d'évitement, d'esquive et de tolérance aux contraintes climatiques. Araus *et al.*, (2003)

---

soulignent que ces stratégies sont contrôlées par divers processus phéno-morpho-physiologiques.

La sélection variétale est pratiquée sur la base du rendement grain. Les résultats de plusieurs études s'accordent à montrer que le rendement grain est un caractère très variable, polygénique de nature, de faible héritabilité et le plus souvent soumis à de fortes interactions génotype x lieu (Bouzerzour et Dekhili, 1995). Le recours à des caractères agronomiques, utilisables en parallèle avec le rendement en grains, dans le cadre d'une approche intégrative, pourrait constituer une méthode efficace dans la recherche d'une meilleure stabilité de la production (Benmahammed *et al.*, 2005). En plus, dans un environnement de stress, l'efficacité de la sélection pourrait être améliorée, si certains caractères physiologiques et/ou morphologiques liées au rendement, pouvaient être identifiés et utilisés comme critères de sélection indirecte en complément à la sélection traditionnelle (Acevedo, 1991).

Ces traits, morpho-physiologiques doivent être hautement héritables, fortement corrélés avec la tolérance au stress et peuvent être facilement évaluée. Dans la littérature, une série de critères a été suggérée et qui pourrait être utilisée afin d'accroître l'efficacité de la sélection et employée en sélection indirecte pour améliorer le rendement dans des conditions de stress.

Le blé attire une attention particulière en ce qui concerne les caractères morphologiques et physiologiques liés à la tolérance à la sécheresse incluant les stomates (taille, nombre, ouverture) ; feuille ( superficie, forme, expansion, orientation, sénescence, pubescence, cires, résistance de la cuticule ) ; racine (longueur, densité, poids sec) ; utilisation de l'eau ; la teneur relative en eau ; l'efficacité de l'évapotranspiration ; les niveaux d'acide abscissique ; la stabilité de la membrane cellulaire ; protéines de choc thermique et la discrimination isotopique du carbone (Dencic *et al.* , 2000).

L'objectif de l'amélioration de la production des zones arides et semi-arides doit être focalisé sur la recherche de la tolérance aux stress afin d'arriver à une meilleure adaptation à la variabilité, de nature imprévisible, du milieu de production (Adjabi, 2011). Pour cela, deux alternatives se présentent et doivent d'ailleurs être menées de paire :

i) Poursuivre les investigations sur l'identification et la définition des caractéristiques phéno-morpho-physiologiques d'adaptation, de tolérance ou d'esquive au stress hydrique. Ces

---

approches permettront la compréhension des mécanismes développés par les céréales en générale et le blé dur en particulier.

ii) Développer une approche raisonnée à une échelle phénologique qui répond aux besoins de la plante. Ceci permettra de mieux caractériser la variable hydrique (précipitation), de repérer les périodes de stress. Ceci peut être réalisé à travers l'identification des séquences de sécheresse, leurs occurrences, leurs intensités et leurs durées.

Les objectifs visés dans cette thèse sont (1) l'évaluation de certains paramètres agronomiques et phéno-morpho-physiologiques dans différents environnements et conditions hydriques (2) étude du bilan hydrique par l'utilisation de la méthode gravimétrique et d'un modèle de simulation '*BUDGET*' et (3) l'évaluation de quelques indices de tolérance utilisés dans la sélection pour la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum*, Desf.).

## **I.1. Généralités sur le blé**

### **I.1.1 Historique**

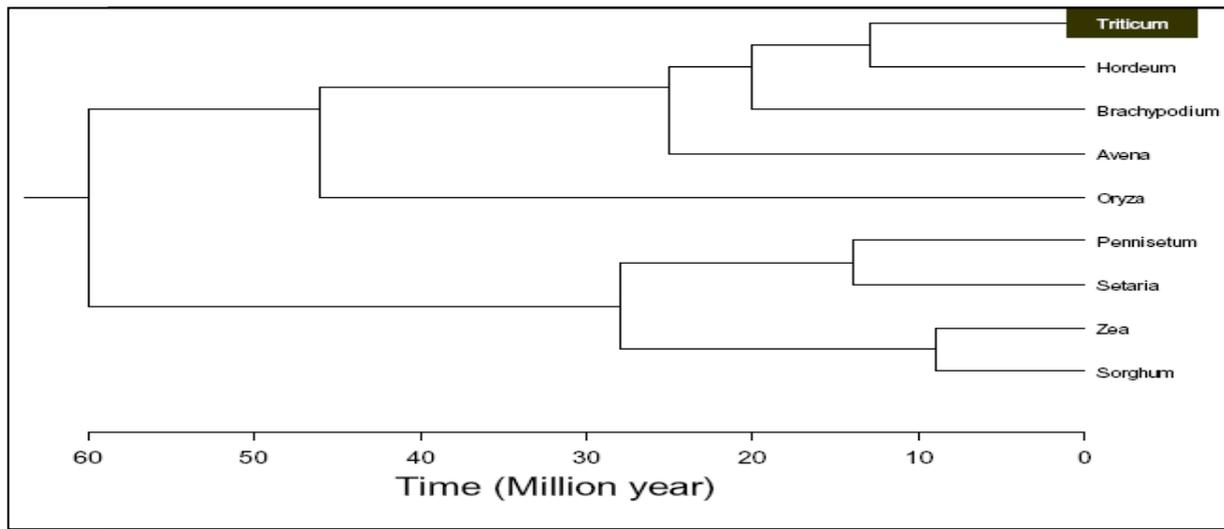
La domestication des blés constitue un jalon dans l'histoire des sociétés humaines marquant le début de l'ère Néolithique qui se traduira par l'adoption d'une économie de production fondée sur l'agriculture et l'élevage. C'est vers 10 000 ans av. J-C que les blés ont été domestiqués avec pour centre d'origine la région du "croissant fertile" entre le Tigre et l'Euphrate (Shewry, 2009). Les données archéologiques fournissent des preuves tangibles de la synchronie entre les débuts de la culture des blés et l'organisation de sociétés sédentaires, marquant ainsi la fin de la période nomade au cours de laquelle la chasse et la cueillette constituent les principaux moyens de subsistance (Diamond, 2002).

En effet, l'histoire de l'homme est intimement liée à celle des céréales qu'il a très tôt apprises à domestiquer, cultiver et sélectionner (Bonjean et Picard, 1991). Ces dernières sont considérées comme la base des grandes civilisations, car elles ont constitué l'une des premières activités agricoles, fournissant un moyen d'alimentation régulier, autour duquel l'activité humaine pouvait s'organiser. C'est ainsi que les civilisations européennes et moyen-orientales se sont construites autour du blé, celles de l'Extrême-Orient autour du riz, celles des peuples amérindiens autour du maïs et celles d'Afrique noire autour du mil.

### **I.1.2 Phylogénie et positionnement taxonomique**

Selon Charles (2010), le genre *Triticum* appartient à la tribu des Triticées, la sous-famille des *Pooideae* au sein de la famille des Poacées et plus largement au groupe des angiospermes monocotylédones (Figure I.1). Les espèces cultivées les plus proches des Triticées sont le maïs (*Zea mays*), le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le riz (*Oryza* sp.). Les blés sont couramment regroupés parmi les céréales, un groupe polyphylétique comprenant des Poacées (blé, orge, avoine, maïs) mais aussi une Polygonacée (Sarrasin), une Chénopodiacée (Quinoa) et une Pédaliacée (Sésame). Les Poacées comptent plus de 600 genres et 10 000 espèces, poussant sous des latitudes et des climats diversifiés (Kellogg, 2001).

---



**Figure I.1** : Relations phylogénétiques entre les principaux groupes d'espèces monocotylédones. D'après Bolot *et al.*, (2009).

Le genre *Triticum* regroupe de nombreuses espèces présentant une large gamme de diversité morphologique et agroécologique. Notamment, ce genre regroupe des espèces de ploïdies variées : des espèces diploïdes telles que l'Engrain (*Triticum monococcum*), des espèces tétraploïdes avec l'Amidonier (*Triticum dicoccum*) ou le blé dur (*Triticum durum*) et enfin des espèces hexaploïdes telles que le blé tendre (*Triticum aestivum*). Il apparaît que la polyploïdisation a joué un rôle majeur dans l'évolution de la famille des Poacées (Salse *et al.*, 2008 ; Bolot *et al.*, 2009). Selon la classification de Slageren (1994), le blé dur appartient à la Section Dicoccoidea au genre *Triticum* à l'espèce *turgidum* et la sous espèce *durum* (Desf.).

Les espèces du genre *Triticum* sont des herbacées annuelles à feuilles alternes. De graine à graine, le cycle du blé se compose d'une période végétative marquée par la production de racines, feuilles et tiges puis d'une phase reproductrice marquée par la formation des épis, des fleurs puis par le remplissage des grains. L'observation du cycle de développement du blé a conduit à l'identification de stades clés du développement décrits et normalisés par différents auteurs selon des échelles de développement comme celle de Zadoks *et al.*, (1974), utilisée pour reconnaître les stades par des modifications d'aspect interne (Différentiation de l'épi : Stade épi 1 cm) et de Jonard et Koller (1950), utilisée pour reconnaître les stades par des changements d'aspect externe (Levée - Montaison).

### **I.1.3 Importance économique**

A travers le monde, le blé est cultivé dans de différentes conditions climatiques, des latitudes Nord du Canada et de la Chine aux régions Sud de l'Amérique du Sud et de l'Australie. Le blé est adapté à une large gamme de conditions climatiques et pédologique et il est cultivé principalement en conditions pluviales. Il est surtout adapté aux régions tempérées dont les précipitations se situent entre 250 et 1750 mm (Curtis, 2002).

Le blé est une source alimentaire majeure pour une grande partie de la population mondiale (Curtis, 2002). Les gains de blé contiennent l'essentiel des nutriments ; incluant les carbohydrates (60-80% surtout de l'amidon), les protéines (8-17%) avec une quantité suffisante d'acides aminés essentiels (sauf la lysine, le tryptophane, et la méthionine), les lipides (1,5-2%), les minéraux (1,5-2%), les vitamines et les fibres (Peña, 2002).

Le blé est une céréale aux enjeux économiques très importants. Selon les statistiques de la FAO (2012), pour l'année 2010, le blé est cultivé sur une superficie de 217 million d'hectares et occupe le troisième rang mondial des céréales, en volume récolté, avec 653 millions de tonnes (Mt), derrière le maïs (840 Mt) et le riz (696 Mt). En termes de volume de production, l'Union Européenne (136 Mt) vient en tête de classement, suivie, respectivement, par la Chine (115 Mt), l'Inde (80 Mt) et les Etats Unis d'Amérique (60 Mt).

C'est aussi la céréale la plus importante en Algérie, avec 3,1 Mt récoltées en 2010 pour une surface cultivée de 1,9 Mha soit un rendement de 16,3 qx/h qui reste faible comparativement à la moyenne mondiale qui est de 30,09 q/h d'où le recourt de l'Etat Algérien à l'importation massive et la facture ne cesse d'augmenter au fil des ans. A titre indicatif, durant les années 1999/2001, les importations des céréales se chiffrent à 990 millions de dollars. Alors qu'en 2008, elles ont quadruplé, atteignant les 3,62 milliards de dollars. En effet, l'Algérie reste fortement tributaire des achats de blé sur le marché international pour couvrir ses besoins de consommation. Au cours de la campagne commerciale 2009/10, l'Algérie a importé environ 5,2 millions de tonnes. Elle devance le Maroc et la Tunisie qui ont importé respectivement, 2,3 et 1,4 million de tonnes et vient derrière l'Égypte qui est le plus gros importateur de blé, avec près de 10 millions de tonnes importées (FAO, 2012).

---

## **I.2. La sécheresse et ces effets sur la culture du blé**

L'écosystème de type méditerranéen se caractérise par des étés chauds et des hivers doux, un apport modéré d'air marin toute l'année, des précipitations moyennes concentrées dans les mois d'hiver avec des étés très secs, de longues périodes ensoleillées avec quelques nuages, notamment en été (Leisz, 1982).

La partie orientale de la péninsule Ibérique, les côtes septentrionales de l'Afrique (Algérie, Égypte, Libye, Maroc et Tunisie), l'île de Crète, Chypre et les îles Baléares constituent la zone aride de la région méditerranéenne. Dans ces zones les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 400 mm (Gottman, 1979 ; Wheeler et Kostbade, 1990). Cependant, suivant l'altitude, la direction des montagnes et la situation orographique, le climat méditerranéen connaît un grand nombre de variations. En Algérie, trois ensembles fortement contrastés climatiquement caractérisent le territoire :

- Le Sahara, ensemble désertique aride (pluviométrie moyenne inférieure à 100 mm/an).
- Le littoral et les massifs montagneux : le climat est de type méditerranéen, avec des pluies très violentes en hiver provoquant une forte érosion. En été, les précipitations sont extrêmement rares et les chaleurs très fortes. Les pluies pouvant atteindre 1600 mm/an sur les reliefs sont irrégulières d'une année sur l'autre et inégalement réparties.
- Les hauts plateaux occupent environ 9% de la superficie totale, dont 5 millions d'ha de terres agricoles, sont caractérisés par un climat semi aride (pluviométrie comprise entre 100 et 400 mm/an) (FAO, 2005).

Les hauts plateaux qui concernent plus de 80% de la céréaliculture algérienne, sont sous la triple influence de l'Atlas tellien qui limite les précipitations hivernales, de l'Atlas saharien et du Sahara, et de l'altitude qui entraîne des gelées tardives (Blady, 1993).

La mauvaise répartition des précipitations dans l'espace et dans le temps représente le principal facteur limitant l'amélioration du rendement grain des céréales conduites en culture pluviale. Mis à part la zone de l'extrême Nord Est de l'Algérie, toutes les cultures céréalières subissent un déficit hydrique d'intensité, de durée et de fréquence variable en fonction de la quantité et de la répartition des précipitations annuelles propres à chaque zone de culture. En année sèche, des surfaces considérables sont déclarées non productives. Le reste des surfaces emblavées connaissent des rendements faibles qui sont souvent à la limite du seuil de rentabilité (Mouhouche et Boulassel, 1997).

---

### I.2.1 Les hautes températures

Dans les hautes plaines Sétifiennes, la baisse du rendement est liée au stade végétatif où survient la contrainte et au degré de tolérance du génotype adopté (Adjabi, 2011). Dans ces zones, le stress thermique peut intervenir même en début du cycle. Karou *et al.*, (1998) observent une forte réduction du nombre de plantes levées par unité de surface, suite aux effets des hautes températures automnales.

Hazmoune (2000) rapporte une réduction de la longueur de coléoptile sous l'effet des hautes températures au semis. Rawson (1988) indique que l'effet négatif de l'élévation de la température est surtout dû au fait que la plante n'arrive pas à absorber les éléments nutritifs et l'eau et les utiliser au rythme imposé par le stress thermique.

Hauchinal *et al.*, (1993), remarquent une réduction du rendement des semis tardifs, liée à une diminution du nombre d'épi et du poids moyen du grain, causée par les effets des hautes températures. Ils notent aussi que l'effet pénalisant du stress thermique se matérialise par une accélération du développement et une réduction des dimensions des organes constitutifs de la plante.

Chennafi *et al.*, (2006) notent que le déficit hydrique est à craindre dès le mois de mai, à partir duquel les pluies se font rares et les températures de plus en plus élevées, engendrant une augmentation de la demande en eau de la part de la plante à une phase critique où se détermine le rendement

Les hautes températures interviennent comme une contrainte limitant le potentiel de production des zones semi-arides. Elles affectent les organes floraux, la formation du fruit, ainsi que le fonctionnement de l'appareil photosynthétique (El Madidi et Zivy, 1993).

La température est un facteur important pour la durée des phases de pré et post-anthèse. Le taux de développement des génotypes au cours des phases pré et post-anthèse sont différents en raison de la variation de la température selon les années et les environnements (Araus *et al.*, 2003).

En effet, la méiose et la phase de remplissage des grains sont particulièrement sensibles à l'élévation de la température. Les seuils entre 25° et 27 °C sont rapportés comme étant très pénalisants.

---

Ehdaie *et al.*, (2006) rapportent que les températures supérieures à 30° C, après floraison, ont des effets négatifs sur le stockage des assimilés et sur la qualité du grain, à cause de l'échaudage. Au cours du remplissage du grain, les fortes températures affectent le poids du grain, les génotypes précoces évitent le plus souvent cette contrainte.

Wardlaw et Moncur (1995) soulignent que les températures élevées, au cours de la phase de remplissage stoppent l'accumulation de la matière sèche.

Haddad, (2009) indique que des températures, au-dessus de 30°C, affectent le poids final de grain. Alors que, Bahlouli *et al.*, (2005) mentionnent que le nombre de grains par épi et par unité de surface sont fortement affectés.

Selon Chennafi *et al.*, (2008), la période la plus critique vis à vis du stress hydrique est comprise entre les 20 jours qui précèdent l'épiaison jusqu'à la fin du palier hydrique.

D'après Hargas (2002), les variétés tardives donnent de meilleurs rendements, au cours des campagnes relativement pluvieuses en fin de cycle. Lors des campagnes dont la fin de cycle est sèche, les variétés plus ou moins tardives souffrent des baisses de rendement liées à la coïncidence de la phase de remplissage du grain avec la période d'absence d'eau et d'élévation de la température.

La sélection du blé dur, pour les zones d'altitude, doit prendre en compte la présence simultanée de plusieurs types de risques climatiques: les basses températures tardives et le stress hydrique et les hautes températures de fin de cycle (Annichiarico *et al.*, 2006).

## **I.2.2 L'eau et son importance pour le végétal**

L'eau s'y trouve naturellement à l'état liquide, mais aussi sous forme de vapeur d'eau dans les chambres sous stomatiques des feuilles (Laberche, 2004). La richesse en eau des plantes est variable selon les espèces, les organes et les milieux de vie. Une feuille est composée souvent de 80 à 90% d'eau et le bois fraîchement coupé peut renfermer 30 à 50 % d'eau (Leclerc, 1999). Il faut 1 500 litres d'eau pour obtenir 1 Kg de blé, 500 litres d'eau pour 1 Kg de maïs et 4 500 litres d'eau pour 1 Kg de riz (Bernard, 2006).

Elle est le milieu dans lequel a lieu la quasi-totalité des réactions biochimiques; elle joue le rôle de solvant, substrat et de catalyseur. Par la pression qu'elle exerce sur les parois, l'eau permet la turgescence cellulaire qui est indispensable au port érigé des plantes herbacées

---

et à l'expansion cellulaire dans les tissus en croissance. La turgescence est également à la base des mouvements des organes (feuilles, étamines) et des cellules (stomates). A l'échelle de l'organisme, l'eau permet de véhiculer les substances nutritives, les déchets du catabolisme et des phytohormones (Martre, 1999).

### **I.2.3 Le stress hydrique et ces effets sur le blé**

Levitt (1980) attribue le stress à n'importe quel facteur environnemental défavorable pour une plante. Selon Jones *et al.*, (1989) un stress désigne à la fois l'action d'un agent agresseur et les réactions qu'il entraîne dans l'organisme agressé, une force qui tend à inhiber les systèmes normaux. Tsimilli-Michael *et al.*, (1998) considèrent que le stress a une signification relative, avec un contrôle comme état de référence, ils considèrent le stress comme une déviation du contrôle à une contrainte.

Le déficit hydrique est un problème sérieux dans beaucoup d'environnements arides et semi-arides, où les précipitations changent d'année en année et où les plantes sont soumises à des périodes plus ou moins longues de déficit hydrique (Boyer, 1982).

Il existe de nombreuses définitions du stress hydrique. En agriculture, il est défini comme un déficit marqué et ce compte tenu des précipitations qui réduisent significativement les productions agricoles par rapport à la normale pour une région de grande étendue (Mckay, 1985 in Bootsma *et al.*, 1996). En effet, on assiste à un stress hydrique lorsque la demande en eau dépasse la quantité disponible pendant une certaine période ou lorsque sa mauvaise qualité en limite l'usage (Madhava Rao *et al.*, 2006).

Le stress hydrique est toute restriction hydrique qui se traduit par une baisse de potentiel de la plante suite à une perturbation de son activité physiologique provoquée par un déficit de consommation en eau (Mouhouche et Boulassel, 1997).

Les stress environnementaux, notamment le stress hydrique, limitent sérieusement la croissance des plantes ainsi que la productivité végétale (Wang *et al.*, 2003). Chez le blé, le déficit hydrique agit sur les trois principales composantes du rendement : nombre d'épi, nombre des grains par épis et le poids de 1000 grains (Assem *et al.*, 2006). L'effet sur ces composantes, et par conséquent sur le rendement, dépend du stade au cours duquel ce déficit survient (Debaeke *et al.*, 1996<sup>a</sup>).

---

Au stade tallage, le déficit hydrique réduit le nombre de talles herbacées (Black, 1970). A la montaison, il entraîne une régressions importante de nombre de talles (Deumier, 1987), la régression intense des talles et/ou la baisse du nombre de grains par épi (notamment par augmentation du taux d'avortement des épillets et l'induction de stérilité mâle) (Debaeke *et al.*, 1996<sup>b</sup>). Si la sécheresse survient durant les deux dernières semaines précédant l'épiaison, elle peut réduire le nombre de grains par épillet (Fisher, 1973). Le manque d'eau après la floraison, combiné à des températures élevées, entraîne une diminution du poids de 1000 grains par altération de la vitesse de remplissage des grains et/ou de la durée de remplissage (Triboï, 1990). Au cours du remplissage des grains, le manque d'eau a pour conséquence une réduction de la taille des grains (échaudage), réduisant par conséquent le rendement (Gate *et al.*, 1995).

Le déficit hydrique peut avoir une incidence sur le rendement et la teneur en protéines du blé tout au long du cycle. En effet, avant la floraison, un déficit hydrique limite la production de matière sèche et l'accumulation d'azote par la culture et, par conséquent, peu limiter le nombre de grains par m<sup>2</sup> (Wardlaw, 1995). Cette limitation du nombre de grains peut entraîner ensuite une augmentation de la teneur en protéines par effet de concentration.

Après floraison, le stress hydrique limite l'accumulation de biomasse par la culture et provoque une maturation précoce des grains (Kobata *et al.*, 1992), diminuant ainsi le poids de mille grains. La teneur en protéines des grains a alors tendance à augmenter puisque d'une part, l'accumulation de carbone est limitée, et d'autre part, sans augmenter l'accumulation d'azote, celui-ci est transféré plus vite vers les grains. Cette augmentation de la teneur en protéines du blé a également été observée dans une étude menée par Debaeke *et al.* (1996)<sup>a</sup>. De plus, il est fréquent d'observer une combinaison entre déficit hydrique et hautes températures après floraison, qui conduit également à une augmentation de la teneur en protéines (Gooding *et al.*, 2003).

#### **I.2.4. Quantification du stress hydrique à travers le bilan hydrique**

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnés par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période. Il tient aussi compte de la constitution de réserves et des prélèvements ultérieurs sur ces réserves. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à l'évapotranspiration.

---

Les deux grandeurs sont évaluées en quantité d'eau par unité de surface, mais elles sont généralement traduites en hauteurs d'eau, l'unité la plus utilisée étant le millimètre. Ces deux grandeurs étant ainsi physiquement homogènes, on peut les comparer en calculant soit leur différence (Précipitations moins évaporation), soit leur rapport (précipitations sur évapotranspiration.).

Le bilan est évidemment positif lorsque la différence est positive ou que le rapport est supérieur à un. L'écoulement à partir d'une unité de surface sera compté dans les pertes. L'infiltration est considérée comme une mise en réserve sous forme de nappes souterraines ou d'eau capillaire dans le sol. Les précipitations solides constituent des réserves immédiatement constituées. Elles ont une durée variable, inter saisonnière dans le cas des tapis neigeux, inter saisonnière et interannuelle dans le cas des glaciers, voire inter séculaire dans le cas de calottes polaires ou des grandes masses de très hautes montagnes (Anonyme, 2004).

L'expression générale utilisée pour le calcul du bilan hydrique (Fraquin, 1973):

$$ETR = P - R - D - \Delta Ru \quad (1)$$

où : ETR : évapotranspiration réelle, P : précipitation, R : ruissellement, D : drainage profond,  $\Delta Ru$  : variation de la réserve utile du sol de chaque période de temps considérée.

En général, l'expression du bilan est susceptible de subir des simplifications. Compte tenu de la topographie et de l'infiltrabilité des parcelles étudiées, le drainage comme le ruissellement, ou les deux ensemble peuvent être négligés (Rezgui *et al.*, 2005 ; Merabet et Boutiba, 2005).

Une estimation du bilan hydrique peut être obtenue à partir de la comparaison des valeurs d'évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP) servant de base aux études agro climatologiques. Du point de vue climatique, le bilan hydrique potentiel (BHP = P - ETP) est la variable indicatrice la plus pertinente du déficit hydrique (Choisnel, 1992). Il est obtenu par la différence entre la pluie et l'ETP.

Mais pour mieux caractériser les conditions d'alimentation en eau du végétal, il faut tenir compte de l'influence de la nature du sol et de sa position topographique, le raisonnement doit aller au-delà du bilan hydrique potentiel, il doit se faire en terme de bilan hydrique pédologique par le suivi du profil hydrique (Rognon, 1994).

---

Le recours au bilan hydrique pédologique permet l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui, par définition, dépend du niveau d'évapotranspiration potentielle (ETP), de l'humidité du sol, et de la régulation stomatique (Tuzet et Perrier, 1998).

A l'échelle de la parcelle, la méthode la plus rigoureuse pour établir un bilan hydrique sous culture, est l'utilisation d'un humidimètre à neutrons couplé à des tensiomètres (Vachaud *et al.*, 1985). Une sonde est introduite dans le sol à travers des tubes enfoncés verticalement et maintenus en place pendant toute la culture. Cet appareil permet d'évaluer le taux d'humidité du sol et sa variation dans le temps, au même endroit. Cette variation de l'humidité a, globalement et en absence de ruissellement, trois sources: les apports d'eau, la consommation en eau de la culture (extraction racinaire) et les flux hydriques (drainage, remontées capillaires sous la zone racinaire).

### **I.2.5. Estimation du bilan hydrique**

Pour évaluer les différents termes du bilan, il faut estimer les flux sous la zone racinaire. Ceci se fait généralement grâce à des tensiomètres placés en profondeur. Il s'agit là de techniques relativement complexes et délicates à mettre en œuvre. A défaut de cette technique, on peut plus simplement utiliser une tarière pour prélever du sol et mesurer son humidité pondérale après séchage à l'étuve. On ne mesure alors que des variations d'humidité dans le profil.

Une autre méthode consiste à utiliser un modèle de simulation du bilan hydrique. L'évaluation des termes du bilan se fait par calcul. Différents modèles de simulation plus ou moins sophistiqués sont disponibles; comme *CROPWAT* (FAO, 1992) ou *BUDGET* (Raes, 2004). Dans tous les cas, il est évident que la précision et la validité des paramètres de sortie du modèle (ETR, drainage) dépendent de la précision des paramètres d'entrée (pluies, ETP, dynamique racinaire, etc.).

L'évapotranspiration réelle est celle qui se produit effectivement au dessus d'une couverture végétale, l'apport d'eau étant constitué par les seules précipitations. Elle est fonction de la quantité d'eau disponible, du pouvoir évaporant de l'air et de la capacité de rétention du sol (Samba et Diop, 2000). Alors que l'ETP est l'association de l'évaporation de l'eau à partir de toute surface et de la transpiration provenant des plantes (Chang, 1965) quand la fourniture en eau au substratum terrestre n'est pas limitée (Pédelaborde, 1968).

---

L'évapotranspiration est un phénomène complexe qui non seulement résulte de processus physiques tels que le potentiel efficace du sol, les changements d'état de l'eau, la diffusion moléculaire ou turbulente de la vapeur d'eau, elle peut aussi être soumise à la régulation stomatique, la surface foliaire ou le développement racinaire. La mesure de l'évapotranspiration réelle n'aura de signification que si les systèmes mis en œuvre, d'une part reflètent fidèlement les aspects de l'environnement : sol, végétation, atmosphère et d'autre part éliminent les effets restrictifs des contraintes biologiques. Le dispositif utilisé devra donc reconstituer le profil pédologique local, utiliser un couvert végétal dense ; uniforme et toujours en pleine croissance et enfin contenir en permanence une réserve hydrique voisine de la capacité au champ de l'échantillon de sol (Brochet *et al.*, 1974).

L'ETP peut être mesurée par l'utilisation des cases lysimétriques ou estimée à partir de formules mathématiques comme celle de Thornthwaite, (1948) ; Penman, (1948) ; Turc, (1961)...etc., prenant en compte les variables climatiques (température, pluies, vent, etc.).

L'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) est définie comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau (Allen *et al.*, 1998). La détermination de l' $ET_0$  peut être faite : soit directement à l'aide de lysimètre ; soit indirectement à l'aide de formules empiriques et théoriques qui combinent des variables climatiques en se servant de logiciel spécifique tel que l' $ET_0$  (Raes, 2000).

Depuis 1950, plusieurs formules ont été développées pour estimer l'évapotranspiration potentielle ou de référence. Elles sont classées en quatre groupes selon le paramètre utilisé (température, rayonnement solaire, humidité relative, combinant plusieurs paramètres).

Pour les méthodes utilisant la température de l'air, on cite la Méthode de Blaney-Criddle (1950), qui est utilisée lorsqu'on dispose de la température comme seule donnée climatique. Pour les méthodes utilisant la radiation, il y'a celle Hargreaves (1982), qui utilisent le rayonnement solaire ou le rayonnement extra-terrestre. La méthode d'Eagleman (1967), exprime l' $ET_0$  en fonction de l'humidité de l'air et des tensions de vapeur de l'air. Enfin, les méthodes combinées d'estimation de  $ET_0$  comme celle de Penman (1963) qui intègre différents paramètres climatiques (rayonnement, vitesse du vent...etc.). Parmi les méthodes combinées de calcul de l' $ET_0$ , celle de Penman-Monteith est la plus recommandée par la FAO (Allen *et al.*, 1998).

---

L'évapotranspiration d'un sol couvert par de la végétation est difficile à estimer. Pour faciliter la tâche et dans un souci d'homogénéisation des modèles, les chercheurs sont arrivés à déterminer les besoins en eau des cultures, par la correction de l'évapotranspiration potentielle ( $ET_0$ ) d'une culture de référence, qui est le gazon, par un coefficient appelé "coefficient cultural" ( $k_c$ ) en utilisant la formule suivante :

$$ET_c = k_c * ET_0. \quad (2)$$

L'échelle de temps sur laquelle les besoins sont calculés peut être l'heure, la journée, la décade, le mois ou la phase de croissance, selon l'objectif poursuivi et la disponibilité de données. (Allen, 1998). L'  $ET_c$  est calculée dans les conditions de culture optimum à savoir ; absence de maladie, culture bien fertilisée et un état hydrique édaphique optimum.

La valeur de  $K_c$  (Tableau I.1) est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, sa durée de cycle, et son taux de croissance, mais aussi par la fréquence des pluies ou de l'irrigation au début du cycle de la culture.  $K_c$  est toujours établi expérimentalement au début, pour une région et une culture données, puis ensuite confiné dans des tables pour une utilisation ultérieure dans la même région ou dans une région similaire.

**Tableau I.1. :** Coefficient cultural du blé.

	Germination Levée	Levée Montaison	Montaison Epiaison	Epiaison Maturation	Source
<b>Kc</b>	0,5	1	1,2	1	(Arles, 1986)
	0,17 - 1,10	1,10 - 1,15	1,15	1,15 - 0,35	(Raes, 2004)
	0,3 - 0,4	0,7 - 0,8	1,05 - 1,2	1,2 - 0,25	(FAO, 1992)

L' $ET_c$  adj est l'évapotranspiration réelle de la culture sous des conditions agronomiques non optimales c'est à dire qui diffèrent des conditions standards, comme la présence d'animaux nuisibles, fertilisation insuffisante, salinité du sol, les maladies, stress hydrique... . D'où l'introduction du coefficient de stress  $K_s$  (Allen *et al.*, 1998). L'évapotranspiration de la culture sera donc ajustée et calculée par la formule (3) :

$$ET_{c \text{ adj}} = ET_0 * K_c * K_s \quad (3)$$

où :  $1 \leq K_s \leq 0$ . En absence de stress  $K_s = 1$  et en présence de stress,  $K_s$  est inférieur à 1

---

## I.2.6. Sol et bilan hydrique

L'état hydrique des sols correspond à la quantité d'eau qu'un sol est susceptible de renfermer, dans l'absolu et dans la réalité. Les sols contiennent plus ou moins d'humidité et leur état hydrique dépend de la capacité des réservoirs des matériaux à absorber et à conserver de l'eau. En fonction de la quantité d'eau présente dans le sol, il existe une grande variété de son état hydrique.

D'une manière générale, dans les sols on distingue quatre principaux types (états) d'eau en fonction de la taille des porosités : l'eau; capillaire, hygroscopique, d'hydratation et l'eau libre qui s'écoule librement, dans des macroporosités, des fissures larges de quelques centimètres à quelques millimètres voire moins, mais qui permettent un écoulement sous l'effet de la gravité. Une grande partie de l'eau libre circule en profondeur dans les fissures et les porosités des matériaux qui forment les versants pour rejoindre des nappes qui peuvent alimenter les cours d'eau.

La réserve utile en eau est la quantité d'eau du réservoir d'un sol pouvant être plus ou moins facilement utilisée par les racines d'une plante (Thornthwaite et Mather, 1957), variant au cours du temps en fonction des apports, et des pertes dues à l'ETR du couvert végétal (Jacquart et Choissnel, 1995). La réserve d'eau utile du sol (RU) est définie par les paramètres hydriques du sol : la capacité de rétention et le point de flétrissement permanent, et par la profondeur utile qui peut être limitée ; soit par des facteurs pédologiques : encroûtement, nappe phréatique salée, soit par l'enracinement des cultures (Damagnez, 1975).

La capacité au champ est la quantité d'eau qu'un sol (saturé en eau) est capable de retenir après un ressuyage par la force gravitaire de l'eau libre. Elle représente environ 75% de la capacité maximale de rétention pour chaque type de sol (Chen et Dudhia, 2001). Le point de flétrissement correspond à l'humidité qui n'est plus extractible par les plantes, excepté, les halophytes et certaines espèces ligneuses xérophytes (Halitim, 2006).

Chaque famille texturale (Tableau I.2) présente des caractéristiques hydriques propres et notamment une valeur de "réserve en eau" théorique. On utilise un tableau de correspondance entre la texture et la réserve en eau par unité volumique mis en point par l'INRA de France (Jamagne *et al.*, 1977).

---

Le réservoir en eau du sol est estimé en additionnant les valeurs contenues pour chaque horizon. Cette démarche s'appuie donc sur des hypothèses simplificatrices et surtout elle considère que la texture est la seule caractéristique qui intervient dans la rétention en eau, ce qui n'est généralement pas le cas (Halitim, 2006).

**Tableau I.2. :** Réserve en eau du sol selon la texture (Jamagne *et al.*, 1977).

Classe de texture	Humidité à la capacité au champ (en %)	Humidité au point de flétrissement (en %)	Réserve utile (%)	Densité apparente (grs/cm <sup>3</sup> )	Réserve utile (mm/cm <sup>3</sup> )
S	8	3	5	1,35	0,70
SL	12	5	7	1,40	1,00
SA	19	10	9	1,50	1,35
LIS	15	7	8	1,50	1,20
LS	19	9	10	1,45	1,45
LmS	20	9	11	1,45	1,60
LSA	22	11	11	1,50	1,65
LAS	24	12	12	1,45	1,75
LI	17	8	9	1,45	1,30
Lm	23	10	13	1,35	1,75
LA	27	13	14	1,40	1,95
AS	33	22	11	1,55	1,70
A	37	25	12	1,45	1,75
AL	32	19	13	1,40	1,80
ALo Sédimentaire	29	18	11	1,50	1,65
ALo Altération	38	25	13	1,30	1,70

La réserve facilement utilisable (RFU) est la quantité d'eau qu'une plante peut extraire d'un sol sans que sa production ne soit affectée de façon notable. Elle est définie par l'introduction d'un coefficient empirique, *f*. Ce coefficient représente le risque potentiel de soumettre la plante à un stress hydrique, celui ci est fonction de la culture. Il est généralement admis de lui donner une valeur de 2/3 (Van Laere, 2003).

La réserve facilement utilisable (RFU) varie entre des limites importantes. Cette réserve facilement utilisable ne peut pas être déterminée a priori pour chaque sol, car elle est sous la dépendance étroite de la dynamique d'exploitation des réserves d'eau du sol; elle dépend en particulier du volume de sol exploité par les racines et de la vitesse de dessèchement du sol qui fait intervenir des facteurs climatiques tels que l'évapotranspiration potentielle. Cette aptitude plus ou moins grande à utiliser les réserves d'eau du sol se traduit, pour des apports d'eau identiques, pluie et irrigation ou épandage de crue, par une consommation d'eau réelle plus ou moins élevée. Toutes les conditions de sol étant égales, une culture dont l'enracinement est dense et profond pourra se contenter d'apports d'eau

---

relativement espacés, mais importants, à condition que la réserve utile du sol soit grande (Damagnez, 1975).

### **I.3. L'adaptation comme moteur de l'évolution**

L'adaptation est le processus selon lequel une population accroît sa survie et son succès reproducteur dans un environnement donné par l'action de la sélection naturelle. Celle-ci peut agir si les individus de la population ne sont pas tous identiques et qu'une part de cette variabilité affecte des caractères jouant sur la valeur sélective qui est définie comme le produit de la survie et du succès reproducteur (nombre de descendants viables) (Rhoné, 2008).

L'évolution d'une population par l'action de la sélection nécessite de plus que la variabilité de ces caractères soit contrôlée génétiquement, au moins partiellement, et ne varie pas uniquement en fonction de l'environnement, de façon à ce que les changements phénotypiques soient transmis à la génération suivante. La sélection agit donc sur la part héritable des caractères dits adaptatifs, c'est-à-dire corrélés avec le succès reproducteur, pour produire des changements adaptatifs (Rhoné, 2008).

Par exemple, chez les plantes annuelles, la date de floraison est un caractère adaptatif important. En effet, le passage de l'état végétatif à l'état reproducteur est un événement majeur du développement souvent irréversible ; pour que le succès reproducteur soit assuré cette transition doit être initiée lorsque les conditions abiotiques (température, disponibilité des nutriments, photopériode) et biotiques (pressions parasitaires et herbivores, présence des pollinisateurs) du milieu sont favorables. Les variations de la date de floraison en fonction des conditions du milieu ont pu être mises en évidence dans la nature chez de nombreuses espèces (Sandring *et al.*, 2007). Ces études montrent que la date de floraison est un caractère fortement héritable et que les différences de date de floraison dans divers environnements sont le fait de pressions de sélection qui s'exercent sur le caractère et conduisent à l'adaptation des populations à leur environnement.

Cependant, les caractères héritaibles peuvent également évoluer de façon aléatoire : tous les individus viables d'une population n'auront pas nécessairement de descendants à cause d'aléas environnementaux ou de la taille limitée de la population qui impose alors un échantillonnage des individus. Cet échantillonnage peut notamment dépendre du régime de reproduction et est d'autant plus important que la taille de la population qui se reproduit (taille effective ou efficace) est limitée. On parle alors d'évolution neutre des caractères et de dérive

---

génétique (les gènes qui contrôlent ces caractères dérivent aléatoirement). Cet effet peut être déterminant en particulier pour les caractères héréditaires peu corrélés à la valeur sélective qui sont alors « neutres » vis-à-vis de la sélection. La dérive génétique est d'autant plus forte que l'effectif de la population est faible. Ainsi pour comprendre l'évolution d'un caractère, il est nécessaire de déterminer quelle part de cette évolution est due à la dérive aléatoire et quelle part est due à la sélection naturelle, c'est-à-dire à l'adaptation proprement dite (Rhoné, 2008).

### **I.3.1 Intérêt d'étudier l'adaptation**

L'adaptation de populations évoluant dans des environnements contrastés participe au maintien de la diversité dans la nature. En effet, s'il existe une variabilité génétique suffisante (qui apparaît au hasard par les mutations), la majorité des organismes vivants sont alors capables d'évoluer dans une grande variété de milieux. Dans chaque environnement, si la sélection naturelle est efficace (peu de dérive), le phénotype moyen de la population tend à évoluer vers le phénotype présentant la meilleure valeur sélective dans cet environnement.

Ainsi, l'adaptation locale des populations à chaque environnement particulier (ou micromilieu) maintient une diversité phénotypique au sein de l'espèce. Cette diversité participe à sa survie à l'échelle de l'écosystème puisqu'elle est disponible pour une nouvelle adaptation en cas de perturbation du milieu. A l'extrême, si au cours de l'adaptation des barrières à la reproduction se mettent en place du fait de l'isolement, la divergence prolongée des populations peut finalement conduire à l'apparition de nouvelles espèces (Hendry et Kinnison, 2001).

Du fait de la prise de conscience récente de l'impact de l'activité humaine sur l'évolution de la diversité des espèces sauvages et cultivées (exploitation, dégradation des habitats et modification du climat), la biologie de la conservation a connu un essor important ces dernières années (Stockwell *et al.*, 2003). Il en ressort finalement que l'un des enjeux majeurs de cette discipline est le maintien de la variabilité adaptative. En effet la capacité d'une population à s'adapter aux changements futurs, qu'ils soient liés à l'environnement (modification du milieu, changement climatique global, évolution des populations de parasites), à l'évolution de la demande de la société (agriculture plus respectueuse de l'environnement, qualité des produits, diversification) ou à la demande des producteurs (maintien du revenu dans un contexte de baisse des prix de vente, limitation du nombre d'intermédiaires) est déterminée par la disponibilité de la variabilité adaptative.

---

### **I.3.2. L'adaptation à la sécheresse**

La sécheresse est une notion relative, car non seulement ses manifestations sont diverses mais sa définition même varie en fonction de son impact et selon l'approche scientifique (Reyes-Gómez *et al.*, 2006).

D'un point de vue météorologique, la sécheresse est une absence prolongée, un déficit significatif, voire une faible distribution, des précipitations, en relation avec une valeur dite normale (McKee *et al.*, 1993).

En hydrologie, on parle de sécheresse dès lors qu'à l'échelle régionale la hauteur des pluies est inférieure à la moyenne saisonnière, ce qui se traduit par un approvisionnement insuffisant des cours d'eau et des réserves d'eau superficielles ou souterraines.

Les socio-économistes, quant à eux, parlent de sécheresse quand les pluies sont insuffisantes et ont des effets désastreux sur les populations et sur l'économie régionale.

Les agro-pastoralistes mettent davantage l'accent sur la sévérité et la fréquence d'un phénomène qui reste tout relatif. Pour eux, une année sèche chaque décennie est souvent critique et permet d'évaluer les effets réels du manque d'eau (Dyer, 1984).

Une autre approche de la sécheresse est celle des agronomes qui la définissent comme étant un déficit marqué et permanent de la pluie qui affecte les productions agricoles estimées d'après des valeurs moyennes ou attendues (Gadsden *et al.*, 2003).

Au cours de l'adaptation, la sélection, qui agit directement sur le phénotype, entraîne à chaque génération des changements dans la composition génétique sous-jacente. Un phénotype est l'expression de la relation complexe entre un génotype et son environnement. Pour comprendre comment agit la sélection au cours de l'adaptation, il est tout d'abord important de pouvoir relier les caractères adaptatifs à leur base génétique puis de comprendre comment cette base génétique participe en retour à l'évolution adaptative des populations dans un environnement donné (Rhoné, 2008).

L'adaptation se définit comme la capacité d'une plante à croître et à donner des rendements satisfaisants dans des zones sujettes à des stress de périodicités connues (Bensemmane, 2004). Plusieurs études ont montré que, lors d'un déficit hydrique, les plantes adoptent des stratégies d'adaptation qui diffèrent d'une espèce à une autre et qui font

---

Intervenir une large combinaison de facteurs morphologiques, physiologiques et phénologiques.

### **I.3.2.1. Adaptations phénologiques**

Les paramètres phénologiques d'adaptation, ou paramètre de précocité, constituent un important mécanisme d'esquive à la sécheresse de fin de cycle (Ben Naceur *et al.*, 1999). La précocité au stade épiaison est une composante importante d'esquive des stress de fin de cycle chez le blé dur. Compte tenu de la distribution aléatoire des précipitations, l'adoption de variétés à cycle relativement court est nécessaire dans les régions arides à semi-arides (Mekhlouf *et al.*, 2006). Fischer et Maurer (1978) notent que chaque jour de précocité confère un gain en rendement de 30 à 85 kg/ha.

En milieu où le gel tardif est une contrainte à la production des céréales, une précocité excessive n'est d'aucune utilité. Au contraire, elle risque d'être une source d'instabilité des rendements en grains. Une précocité modérée peut cependant constituer un avantage lors de la reprise de la croissance après un bref stress (Bouzerzour, 1998).

### **I.3.2.2. Adaptations morphologiques**

L'effet de la sécheresse peut se traduire, selon la stratégie adaptative de chaque espèce ou variété, par des modifications morphologiques pour augmenter l'absorption d'eau et/ou pour diminuer la transpiration et la compétition entre les organes pour les assimilât. Ces modifications affectent la partie aérienne ou souterraine : réduction de la surface foliaire et du nombre de talles, enroulement des feuilles et/ou meilleur développement du système racinaire (Slama, 1996).

### **A. Système racinaire**

Un système racinaire capable d'extraire l'eau du sol est un trait essentiel pour la résistance à la sécheresse (Subbarao *et al.*, 1995). Les cultivars de blé à système racinaire extensif peuvent exploiter un grand volume de sol, absorber une grande quantité d'eau et avoir un rendement considérable (Hurd, 1974).

---

## **B. Surface foliaire**

La diminution de la surface de la feuille sous stress hydrique est considérée comme une réaction de résistance moyenne ou d'adaptation au manque d'eau (Blum, 1996). Un autre type d'adaptation foliaire développé par la plante face à un manque d'eau est l'enroulement de la feuille qui peut être considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation (Amokrane *et al.*, 2002).

O'toole et Cruz (1980) ont montré que l'enroulement des feuilles entraîne une diminution de 40 à 60% de la transpiration. La glaucescence, la pilosité des feuilles ou des tiges, la couleur claire des feuilles et la présence des cires sont des caractères génétiques et qui s'extériorisent en condition de stress (Gate, 1995), induisent tout une augmentation de la réflectance qui conduit à une réduction des pertes en eaux (Al Hakimi, 1992).

## **C. Longueur des barbes**

La longueur des barbes est un paramètre morphologique qui semble être étroitement lié à la tolérance au déficit hydrique terminal, tout au moins chez le blé dur (Hadjichristodoulou, 1985). Slama (2002) mentionne que la variété ayant la barbe la plus développée, sous contrainte hydrique présente le meilleur rendement. En plus, la présence des barbes augmente l'efficacité d'utilisation de l'eau et l'élaboration de la matière sèche lors de la phase de maturation du grain (Nemmar, 1980).

Lors de la phase du remplissage des grains, La photosynthèse est moins sensible à l'action inhibitrice des hautes températures chez les génotypes barbus comparativement aux génotypes glabres (Fokar *et al.*, 1998).

### **I.3.2.3. Adaptations physiologiques**

Les paramètres physiologiques d'adaptation permettent de rendre compte des phénomènes de tolérance avec le potentiel hydrique élevé qui est liée à la réduction des pertes d'eau par la régulation stomatique (Monneveux, 1991), de tolérance avec un abaissement de potentiel hydrique qui s'exprime par un maintien de la turgescence, rendu possible grâce à l'ajustement osmotique (Monneveux et This, 1997).

---

## A. Régulation stomatique

La surface des feuilles est percée de pores microscopiques et nombreux (environ 10.000 par  $\text{cm}^2$ ) : les stomates, qui jouent un rôle fondamental dans la régulation des pertes en eau de l'appareil foliaire. La régulation de l'ouverture-fermeture des stomates dépend, du potentiel hydrique foliaire et de l'humidité de l'air au champ (Turner, 1997) Le degré de fermeture des stomates est déterminé par la mesure de la conductance stomatique (Grieu et *al.*, 2008). Une faible conductance conduit à une fermeture des stomates rapide en conditions de déficit hydrique. Les génotypes à faible conductance sont plus sensibles au déficit de vapeur et à la baisse du potentiel hydrique foliaire que les génotypes à forte conductance. Une faible conductance est généralement proposée comme un trait favorable à l'adaptation à la sécheresse (Jones et Rawson, 1979).

La fermeture stomatique s'accompagne d'une réduction de l'assimilation de  $\text{CO}_2$  dans les feuilles (par diminution de diffusion) et d'une augmentation de la température des feuilles (le flux transpiratoire contribue à une dissipation de l'énergie radiative incidente) qui peut entraîner une altération des processus photochimiques de la photosynthèse (Grieu *et al.*, 2008).

En situation de stress hydrique, au niveau des racines, l'hormone végétale naturelle ; ABA (acide abscissique) est synthétisée en réponse à la dessiccation du sol. L'émission de cette hormone bloque la croissance des organes et ferme les stomates (Hamon, 2007), mais la forte accumulation de l'acide abscissique ou la réactivité élevée vis-à-vis de cette hormone en présence de stress hydrique semblent affecter négativement la croissance et l'activité photosynthétique de la plante en conditions de sécheresse (Sarda *et al.*, 1992).

## B. Ajustement osmotique

De nombreuses plantes réagissent au stress hydrique par une diminution du potentiel osmotique, provoqué par l'accumulation de soluté. Ce processus est appelé ajustement osmotique (William et Hopkins, 2003). Cette réponse permet éventuellement de maintenir la turgescence foliaire à une valeur positive, en dépit d'un abaissement du potentiel hydrique du milieu (Winkel et Do, 1992). L'ajustement osmotique est réalisé grâce à une accumulation des solutés principalement vacuolaire conduisant à un maintien du potentiel de turgescence (Blum, 1989).

---

L'accumulation des solutés dans le cytoplasme permet à la plante de maintenir sa turgescence et d'éviter la déshydratation (Morgan *et al.*, 1986). Les solutés responsables de l'osmo-régulation sont essentiellement des acides organiques, des acides aminés et des sucres. Certains constituants inorganiques peuvent être présentes tel que : les nitrates et le potassium. Parmi les acides aminés : la proline, qui accumulée pourrait jouer un rôle d'osmoticum (Kauss, 1977). Elle pourrait, également, intervenir dans la régulation du pH cytoplasmique (Pesci et Deffagna, 1984) ou constituer une réserve d'azote utilisée par la plante postérieurement à la période du stress (Tal et Rosenthal, 1979).

L'ajustement osmotique apparaît donc comme un mécanisme majeur d'adaptation à la sécheresse : il permet le maintien de nombreuses fonctions physiologiques (photosynthèse, transpiration, croissance...) ; il peut intervenir à tous les stades du développement et son caractère inductible suggère qu'il n'a pas (ou peu) d'incidence sur le rendement potentiel (Belhassen *et al.*, 1995).

### **C. Efficacité de l'utilisation de l'eau**

La tolérance à la sécheresse d'une plante cultivée est le résultat de l'expression de nombreux caractères d'adaptation dont l'efficacité d'utilisation de l'eau (Hafsi, 2001). Généralement l'efficacité d'utilisation de l'eau exprime le rapport de la matière sèche totale produite à l'évapotranspiration pendant une période donnée (Richards *et al.*, 2002). Si cette période est spécifique au cycle cultural, on parle d'efficacité d'utilisation nette ; si elle s'étale durant toute l'année, on parle d'efficacité d'utilisation brute (Bos, 1985). Lorsque la production considérée n'est pas la biomasse totale, mais une partie de celle-ci, telles que les grains ou les fruits, on parle alors d'efficacité d'utilisation de l'eau pour le rendement. D'un point de vue économique, l'efficacité de l'eau est définie comme le rapport du rendement économique à la quantité d'eau utilisée (Gardner *et al.*, 1985).

Certains auteurs ont montré que l'amélioration de cette efficience dépend de la photosynthèse et de la production de matière sèche de la partie aérienne. En effet dans les zones arides et semi-arides où les quantités d'eau stockées dans les horizons profonds du sol sont faibles ou nulles, la stratégie à adopter est d'orienter plus d'assimilat carbonés vers la production de matière sèche de la partie aérienne que vers celle des racines. La sélection de variétés ayant la capacité d'avoir un ratio matière sèche de la partie aérienne/matière sèche de la partie souterraine élevé et des feuilles érigées est donc à privilégier. La position érigée des

---

feuilles peut favoriser l'interception de plus d'eau de pluies et réduire la lumière incidente et donc la quantité d'eau perdue par transpiration (Karrou, 2000). L'irrigation d'appoint est considérée comme une technique potentielle qui améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau (Boutfirass *et al.*, 1994).

#### **I.4. Présentation de quelques travaux de sélection de blé dur en Algérie**

Les géotypes locaux et introduits ont fait l'objet de nombreuses recherches, phénologiques, physiologiques et morphologiques destinées surtout à approfondir la connaissance des mécanismes impliqués dans la tolérance au stress abiotique. Benbelkacem *et al.*, (1993) indiquent que l'amélioration du rendement et de la qualité passe par la création variétale et le choix de critères fiables pour l'identification de mécanismes d'adaptation aux contraintes environnementales. Parmi ces critères, la stabilité du rendement, la tolérance aux stress abiotiques, la résistance aux maladies et la bonne qualité technologique restent les plus recherchées.

Dans leurs travaux, sur un germoplasme composé d'une centaine de géotypes, d'origines diverses, Bouzerzour *et al.*, (1998) notent que ; les géotypes à cycle végétatif court et à épiaison précoce se caractérisent par une forte teneur relative en eau de la feuille étendard. Ces mêmes auteurs, mettent en relief l'utilité de réaliser les tests physiologiques de la tolérance aux stress hydrique et thermique au matériel végétal en cours de sélection. Les résultats de ces tests interviennent comme aide à la décision lors du choix d'un géotype donné. La sélection pour une tolérance globale vis-à-vis de plusieurs contraintes semble plus difficile à trouver vu que les valeurs de différents tests sont peu liées. Il est nécessaire donc de recourir aux croisements et inter-croisements pour cumuler ces caractéristiques souhaitables dans le même fond génétique après le choix des géotypes qui portent ces caractéristiques.

Benlaribi *et al.*, (1991) rapportent que la diminution de la teneur en eau des feuilles et du potentiel hydrique foliaire est moins rapide chez les variétés locales. En revanche, l'effet du stress hydrique sur la surface de la dernière feuille est moins net chez les variétés introduites.

Benlaribi et Vigne (1986), in Brinis (1995) mettent en évidence la supériorité des variétés locales à germer dans les conditions de faible humidité du sol. Araus *et al.*, (1991) indiquent que les variétés locales ont des feuilles plus larges et une densité stomatique plus

---

élevée, leur photosynthèse nette est toutefois plus affectée par le déficit hydrique que celle des variétés du Moyen-Orient.

Dans une évaluation de 5 génotypes de blé dur, Bahlouli *et al.*, (2008) rapportent que le début de la phase active du remplissage du grain correspond au début de la sénescence foliaire et que la vitesse de remplissage des grains est négativement liée à la durée de remplissage. Aussi, le rendement en grains est associé à une grande quantité d'assimilats stockés et transférés des tiges pour le remplissage des grains. La participation des assimilats venant de la tige diminue lorsque le milieu permet l'expression d'un meilleur rendement.

Dans son expérimentation sur l'effet des basses températures chez 3 lignées de blé dur ayant subi ou non un endurcissement au froid, Mekhlouf (2009) souligne que la teneur en chlorophylle est peu variable entre génotypes, par contre l'endurcissement induit des variations par rapport aux échantillons non endurcis. Ses résultats indiquent que l'endurcissement maintient le contenu chlorophyllien à niveau significativement supérieur, comparativement aux échantillons non endurcis. Aussi, il note que la synthèse des protéines totales révèle des variations chez l'ensemble des traitements étudiés. L'endurcissement, induit une augmentation de la quantité des protéines totales de 38.6% à celle notée chez le traitement non endurci et soumis au choc du froid.

Chez un groupe de génotypes locaux et introduits, Hafsi (2001) et Hafsi *et al.*, (2009) signalent une corrélation positive et significative entre, les valeurs de la discrimination isotopique du carbone du grain, de la feuille-étendard et du col de l'épi d'une part ; et d'autre part, le rendement en grains, obtenus dans différents environnements des hautes plaines Sétifiennes. Adjabi *et al.*, (2007), indiquent que les génotypes ayant une faible discrimination isotopique du carbone sont plus aptes de maintenir la croissance sous conditions semi-arides que les génotypes présentant des valeurs élevées de discrimination isotopique du carbone.

Semcheddine *et al.*, (2012) notent que les génotypes de blé dur à cycle court et précoce à l'épiaison sont moins sensibles au stress hydrique, ont une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau, une forte discrimination isotopique du carbone et des rendements élevés comparativement aux génotypes à cycle long et tardifs à l'épiaison.

Sur blé dur, les résultats de Hafsi (2001) et Hafsi *et al.*, (2013) ont mis en évidence une forte corrélation entre la sénescence évaluée visuellement et évaluée par la méthode d'analyse numérique de l'image (NAI).

---

Sur la feuille-étendard d'un matériel végétal composé de 10 génotypes de blé dur, Guendouz *et al.*, (2012<sup>a</sup>), ont mesuré la réflectance et la sénescence par analyse numérique de l'image et la teneur en chlorophylle par un chlorophylle-mètre, de type SPAD. Leurs résultats font ressortir des corrélations significatives entre les trois paramètres mesurés, laissant penser que la technique d'analyse numérique de l'image peut servir comme outil de mesure de la réflectance et delà, l'estimation de la teneur en chlorophylle.

Dans son expérimentation sur l'effet de l'irrigation de complément sur 3 variétés de blé dur (Waha, Vitron et Chen's.) cultivées dans les plaines du Chlef pendant 4 campagnes agricoles, Bouthiba et Debaeke (2009) ont mis en relief des différences génotypiques dans la réponse du blé dur à la sécheresse et à l'irrigation complémentaire, avec pour conséquences des interactions irrigation x génotype significatives pour le rendement en grains.

La présence de l'interaction génotypes/environnement joue un rôle crucial dans la détermination de la performance du matériel génétique testé dans différents lieux et années. Les résultats d'étude d'Adjabi *et al.*, (2013) sur 15 génotypes de blé dur cultivés sur cinq années consécutives, ainsi que ceux de Nouar *et al.*, (2012) sur l'adaptation et la stabilité chez 12 génotypes de blé dur, ont révélé que le modèle additif de l'ANOVA et la régression conjointe ne sont pas apte à expliquer l'interaction génotypes/environnement comparativement à la méthode AMMI (Additive Main effects and Multiplicative Interactions).

La sélection classique pour la performance de rendement dans les milieux variables a fait peu de progrès à cause de la faible héritabilité et aux interactions génotypes x milieux du rendement. L'approche analytique suggère l'utilisation des caractères liés au rendement et qui confèrent l'adaptation à la variation environnementale.

Dans leurs travaux sur des croisements réalisés entre génotypes de blé dur (Ofanto/Waha, Ofanto/Mohamed Ben Bachir et Ofanto/Oum Rabia) et le suivi des hybrides F1, F2 et F3, sous conditions semi arides des hautes plaines Sétifiennes, Laala *et al.*, (2009) montrent que la sélection sur la base de la biomasse, du poids des épis et de leur combinaison, sous la forme d'un indice, chez les trois populations F2 aboutit à des effets positifs sur le rendement en grains de la descendance en F3. Ces effets varient, en valeur, selon le potentiel de la population sous sélection.

---

## II. Matériel et méthodes

L'expérimentation a été menée, dans trois communes de la wilaya de Sétif. Sur 3 campagnes agricoles successives ; 2009/2010 (Beni Fouda), 2010/2011 (Sétif) et 2011/2012 (Ain Arnat), représentant les régions ; Centre, Nord Est et Nord Ouest de la wilaya de Sétif. Le matériel végétal utilisé durant toute l'expérimentation (Tableau II.1) est constitué d'une collection de 10 géotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Six géotypes ont été obtenus à partir d'une sélection CIMMYT/ICARDA et les quatre autres, à partir de la station de recherche agricole de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC).

**Tableau II.1** : Nom et origine du matériel végétal utilisé dans l'expérimentation

Géotype	Nom	Origine	Géotype	Nom	Origine
1	Bousselem	Algérie	6	Altar	ICARDA/CIMMYT
2	Hoggar	Algérie	7	Dukem	ICARDA/CIMMYT
3	Oued Zenati	Algérie	8	Kucuk	ICARDA/CIMMYT
4	Polonicum	Algérie	9	Mexicali	ICARDA/CIMMYT
5	Waha	ICARDA/CIMMYT	10	Sooty	ICARDA/CIMMYT

### II.1. Installation et conduite des essais

Le site expérimental de Béni Fouda a été mis à notre disposition par l'Exploitation Agricole Collective dénommée : "Dahal Nouari" située au lieu dit : "Chirhoum" (commune de Béni Fouda), distant de 12 kilomètres au Nord Est du chef lieu de la wilaya de Sétif.

Celui de Sétif est situé à la ferme de démonstration et production de semences de Sétif et qui est affiliée à l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC). La ferme est située à 4 kilomètres, en ligne droite au Sud Ouest de la ville Sétif.

Enfin, la parcelle expérimentale d'Ain Arnat est localisée à l'EMIVAR (Entreprise de mise en valeur et d'aménagements ruraux), dans le lieu dit El Anasser (commune d'Ain Arnat) distant de 10 km à l'Ouest du chef lieu de la wilaya de Sétif.

Dans les trois sites, les parcelles expérimentales ont été conduites, pratiquement, de manière analogue. Avec un labour en automne suivi d'un recroisement et la préparation du lit de semence. Le semis a été exécuté au début Décembre dans le site de Sétif et à la fin du même mois pour les sites de Béni Fouda et d'Ain Arnat.

La dose de semis a été fixée à 350 grain/m<sup>2</sup>. La fumure de fond phosphatée a été réalisée juste avant le semis, avec du triple super phosphate TSP (46%) à raison d'un

---

quintal/ha. La fumure azotée a été apportée durant le stade plein tallage sous forme d'urée (46 %) avec une dose de 0,8 q/ha. Le désherbage a été effectué à la main tout au long du cycle végétatif de la culture afin d'éviter tout effet négatif d'herbicides sur les génotypes.

Dans le site de Béni fouda, les génotypes ont été testés sur quatre niveaux de traitements hydriques. Le premier traitement a été mené en condition pluviale ( $T_0$ ) considéré comme témoin (condition stressante). Les trois autres traitements ont subis différentes doses d'irrigation combinée à différents stades phénologiques. Il s'agit de :  $T_1$  (50 mm au stade gonflement),  $T_2$  (50 mm au stade gonflement & 15 mm à l'épiaison) et  $T_3$  (50 mm au stade gonflement & 30 mm à l'épiaison).

Ensuite, dans le site de Sétif (ITGC), les génotypes ont été évalués sur deux traitements hydriques. Le premier traitement a été conduit en condition pluviale ( $T_0$ ) considéré comme témoin (condition stressante). Le second traitement a consisté en un apport de 60 mm d'eau au stade épiaison. Enfin, dans le site d'Ain Arnat et en plus du traitement pluvial (témoin), un régime hydrique a été adopté. Il a consisté en une dose de 60 mm, appliquée à l'épiaison et fractionnée en deux apports.

La récolte a été réalisée durant le mois de Juillet sur les trois sites d'étude, selon le degré de maturité des génotypes. A maturité, un échantillon d'un mètre linéaire pour chaque parcelle élémentaire est moissonné manuellement. Le rendement en grains est déterminé en  $g/m^2$  puis exprimés en  $t.ha^{-1}$ . Le même échantillon est utilisé pour estimer : le nombre d'épis/ $m^2$ , le nombre de grains/épi, le nombre de grains/ $m^2$  et le poids de mille grains.

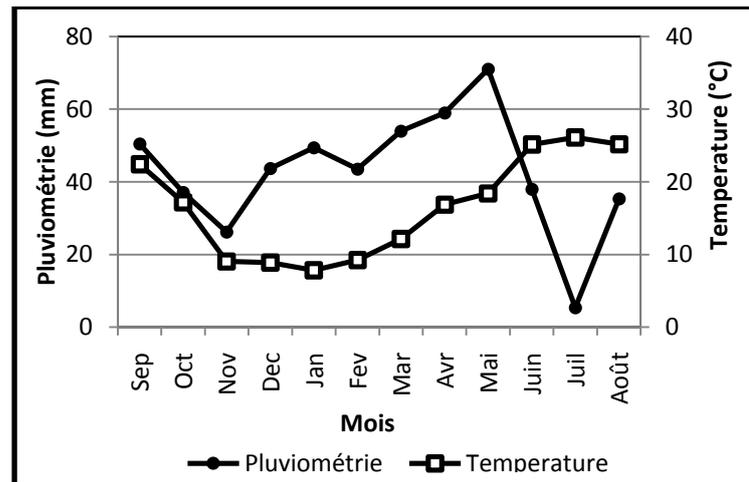
Dans chaque site expérimental et pour chaque traitement hydrique, le dispositif expérimental adopté est en blocs complètement randomisés à trois répétitions.

## **II.2. Caractéristiques climatiques des sites expérimentaux**

Les données climatiques utilisées durant toute l'expérimentation proviennent des stations météorologiques se trouvant au niveau du site expérimental (Béni Fouda), de celle de l'aéroport (Ain Arnat) et de celle d'Ain Sfiha (Sétif).

Le climat du site expérimental de Béni Fouda, pour la campagne 2009/2010, se caractérise par une période pluvieuse entre Septembre et mi Mai et une autre sèche marquée entre mi Mai et Août (Figure II.1).

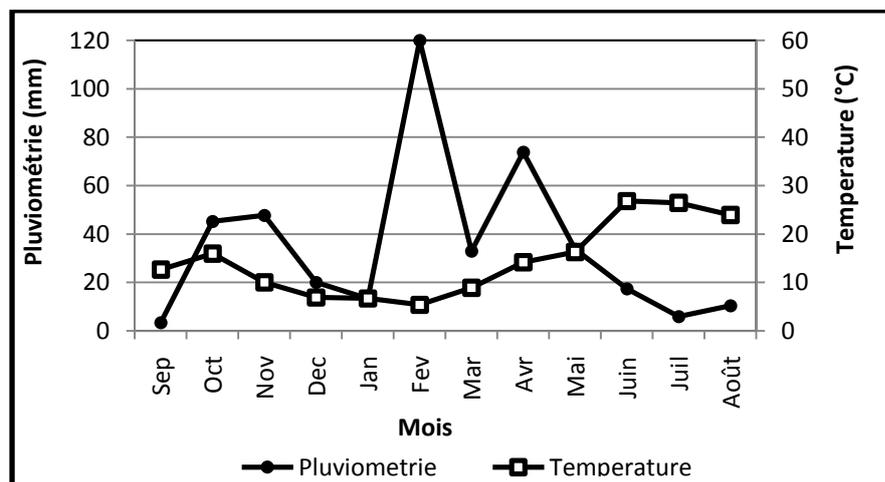
---



**Figure II.1 :** Diagramme ombrothermique de la campagne 2009/2010 de Béni Foua.

La pluviométrie totale enregistrée durant le cycle cultural (De Novembre à Juillet) est de 388 mm. La pluviométrie maximale est enregistrée en Mai (71 mm) alors que la minimale est enregistrée en Juillet (3 mm). Les températures moyennes maximales et minimales sont signalées en Juin (29°C) et Janvier (1,6°C) respectivement.

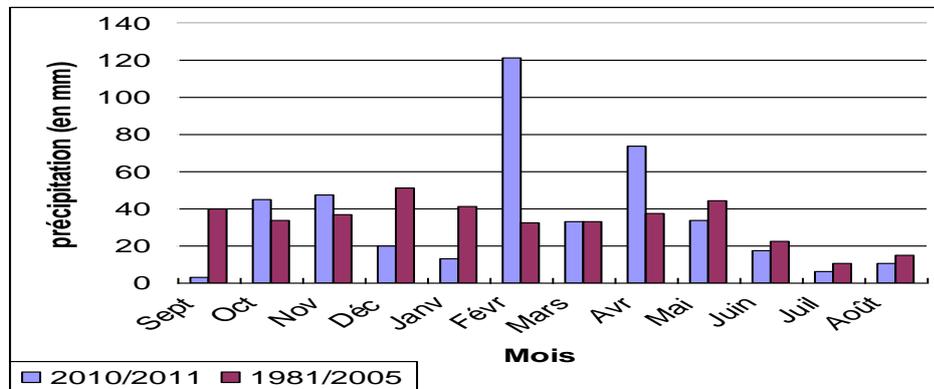
Pour le site de l'ITGC, le diagramme ombrothermique, de la campagne 2010/2011, fait ressortir deux phases. La première phase est humide. Elle s'étale du mois d'Octobre jusqu'à la fin du mois d'Avril. La seconde phase est sèche. Elle s'établit dès le mois de Mai et s'étale jusqu'à la fin de la saison (Figure II.2).



**Figure II.2 :** Diagramme ombrothermique de la campagne 2010-2011 du site de l'ITGC.

Le cumul pluviométrique de la campagne ; 2010-2011 est de l'ordre de 425 mm. Il est légèrement supérieur à celui de la période 1981/2005 qui est de 399 mm. Les précipitations de cette saison sont très différentes comparativement à la normale. A titre d'exemple, Septembre (3,4 mm) et Février (121 mm) de cette campagne, qui sont simultanément moins et

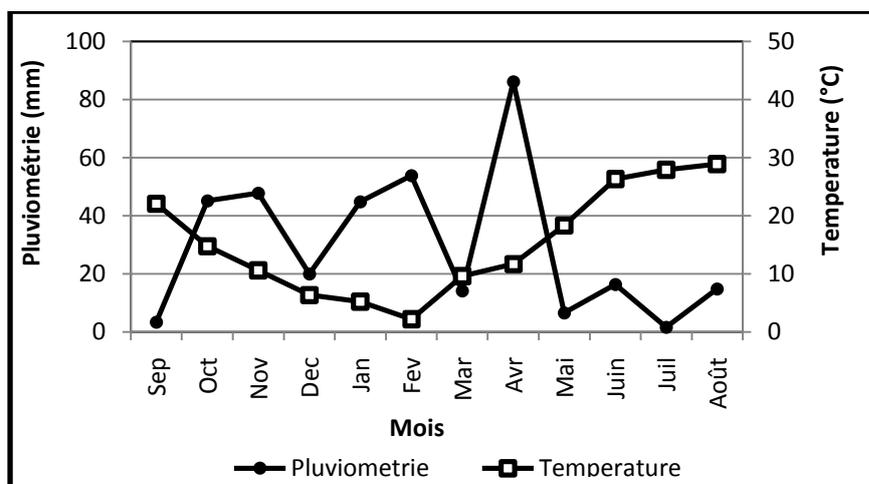
plus pluvieux, sont largement différents des mêmes mois enregistrés sur un quart de siècle respectivement 40,1 et 32,6 mm, (Figure II.3). Ceci montre la nature aléatoire de la distribution temporelle des précipitations dans les hautes plaines Sétifiennes.



**Figure II.3 :** Pluviométrie de la campagne 2010-2011 et de la période 1981-2005.

Pour le site d'Ain Arnat, les données climatiques indiquent que les mois les plus pluvieux sont Avril (86,2 mm), Février (53,8 mm) et Janvier (44,8 mm), alors que le mois le moins pluvieux est Mai (6,6 mm) qui coïncide directement avec la période d'épiaison. Durant le mois de Février, il a été enregistré 15 jours de neige sur un total de 19 jours de neige par an.

Les températures moyennes varient de 2,20 à 26,32°C. Février et Janvier sont les plus froids et Juin le mois le plus chaud (26,32°C) et qui coïncide avec la phase de remplissage et maturation des grains. A l'échelle du cycle cultural, le diagramme ombrothermique fait ressortir une phase humide qui se déroule d'Octobre au mi Avril, suivie par une phase sèche qui s'étale à la fin de saison (Figure. II.4).



**Figure II.4 :** Diagramme ombrothermique de la campagne agricole 2011-2012 du site d'Ain Arnat.

---

### II.3. Paramètres pédologiques des sites expérimentaux

Les caractéristiques géographiques et les analyses physicochimiques, du sol des sites expérimentaux, ont été réalisées au laboratoire de pédologie et sur champs. Les méthodes et les résultats des analyses sont donnés dans le Tableau II.2 :

**Tableau II.2 :** Caractéristique géologique et physico-chimique du sol des sites expérimentaux.

Paramètres		Résultats d'analyses			Méthodes d'analyses et matériel utilisé
		Béni Fouda	Sétif	Ain Arnat	
Géographie	Latitude (Nord)	36° 9' N	36° 08' N	36° 07' N	GPS 'Garmin'
	Longitude (Est)	5° 21'	5° 20'	5° 18'	
	Altitude	1175 m	1 081 m	1075 m	
Granulométrie	Argile %	35	45	30	Pipette de ROBINSON
	Limon %	49	41	49	
	Sable %	16	14	21	
Calcaire total %		--	--	0,34	Calcimètre de BERNARD
pH eau		7,9	8,2	8,05	pH mètre BIOBLOCK 93517
Conductivité électrique (mmohs/cm)		0,15	0,14	0,15	Conductimètre LF538
Densité apparente		1,40	1,35	1,51	Méthode du cylindre. Yoro et Godo, (1990)
Point de saturation %		45	43	40	Tableau de correspondance Jamagne <i>et al.</i> , (1977)
Capacité au champ %		27	25	23	
Point de flétrissement		13	12	10	
Perméabilité (mm/h)		10,4	8,4	12,5	Dispositif de Muntz. Colombani <i>et al.</i> , 1973
Caractères biochimiques	Carbone organique %	--	0,79	1,23	Méthode Anne
	Matière organique %	--	1,35	2,11	C % x 1.72

### II.4. Etude des caractères phéno morpho physiologiques

Cette expérimentation a été réalisée au cours de la campagne 2009-2010 sur le site de Béni Fouda. Elle a porté sur la mesure des paramètres suivants :

#### II.4.1. Teneur en chlorophylle

Le chlorophylle-mètre, Minolta SPAD-502 (Soil and Plant Analysis Development) a été utilisé pour estimer l'azote (indirectement par la mesure de la chlorophylle corrélée à une valeur SPAD) chez le blé. L'instrument mesure la transmission de la lumière rouge à 650 nm, à laquelle la chlorophylle absorbe la lumière, et la transmission de la lumière infrarouge à 940 nm, à laquelle aucune absorption n'a eu lieu. Sur la base de ces deux valeurs de transmission, l'instrument calcule une valeur SPAD qui est assez bien corrélée à la teneur en chlorophylle (Wood *et al.*, 1993 ; Markwell *et al.*, 1995). Dans chaque traitement hydrique, trois répétitions

de lecture au chlorophylle-mètre (Valeurs SPAD) ont été prises à la face abaxiale des deux mêmes feuilles drapeaux. Cette opération a été réalisée à différents stades phénologiques : gonflement (GOF), au début de l'épiaison (DEP), en milieu d'épiaison (MEP), la fin d'épiaison (FEP), durant la floraison (FLO), au début du remplissage des grains (CRG), en milieu de remplissage des grains (MRG) et vers la fin du remplissage des grains (FRG).

#### **II.4.2. Teneur relative en eau (TRE) et Poids spécifique foliaire (PSF)**

Deux mesures, de la TRE et du PSF, ont été réalisées à l'épiaison et au stade du remplissage des grains. La TRE a été déterminée à partir d'un échantillon de 5 feuilles étendards. Ces dernières sont pesées pour déterminer leur poids frais (PF). Ensuite, elles sont mises, à l'abri de la lumière, dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée. Après 4 heures, à l'obscurité, elles sont retirées des tubes à essai et séchées avec du papier buvard puis pesées pour obtenir leur poids turgide (PT). Ensuite, les feuilles sont placées dans une étuve à 65°C pendant 16 heures. Enfin, les feuilles sont sorties pour une dernière fois et sont repesées pour obtenir leur poids sec (PS). La TRE est obtenue par calcul à partir de la formule donnée par la méthode de Barrs et Weatherly (1962) :

$$\text{TRE (\%)} = (\text{PF} - \text{PS}) / (\text{PT} - \text{PS}) \times 100.$$

Concernant le poids spécifique foliaire, 10 feuilles étendards du maître-brin sont prélevées à leur base. La longueur (L) et la largeur (l) de chaque feuille sont mesurées. La surface foliaire (SF) est donnée par la formule suivante :

$$\text{SF (cm}^2\text{)} = 0.606 (L \times l)$$

Où : L est la longueur moyenne de la feuille étendard, l est la largeur moyenne de la feuille étendard et 0,606 est le coefficient de régression de la surface estimée à partir du papier grammage sur celle déduite par le produit (Lx l).

Ensuite, les feuilles étendards sont séchées à 85°C pendant 48 heures et pesées pour obtenir le poids sec (PS). Le poids spécifique foliaire (PSF) est calculé à partir de la formule donnée par Sarkar *et al.*, (2003) :

$$\text{PSF (mg/cm}^2\text{)} = \text{PS/SF}$$

---

#### II.4.3. Remplissage des grains

De l'anthèse à la maturité, chaque deux jour, 5 plants de chaque parcelle élémentaire sont échantillonnés. Ensuite, le poids sec de 10 grains du tiers médian de l'épi, soit au total 50 grains/échantillon sont mesurés. La vitesse de remplissage (VRG en mg/j) est déterminée à partir de la valeur de la pente de la droite de régression de l'évolution du poids sec du grain (Tribio, 1990), alors que la durée de remplissage (DRG en jour) est déterminée par le rapport du poids du grain atteint à maturité sur la vitesse de remplissage (Bahlouli *et al.*, 2008).

#### II.4.4. Cinétique de l'épiaison

La durée de l'épiaison en Degrés-Jours (DJE) est calculée par une simple formule arithmétique de l'accumulation de la température moyenne quotidienne au dessus de 0°C considérée comme température de base pour la culture du blé. La DJE est obtenue par la formule suivante :

$$\text{Accumulation en DJE} = \sum_{k=i}^n \left[ \left( \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right) - T_b \right]$$

Où :  $T_{\max}$  et  $T_{\min}$  sont les températures moyennes journalières maximales et minimales et  $T_b$  est la température de base (Cao et Moss, 1989<sup>a</sup>, 1989<sup>b</sup> ; Kirby *et al.*, 1999) ;  $i$  est la date de semis et  $n$  est la date de sortie de plus de 50 % de la gaine (Stade de croissance 55 selon l'échelle de Zadoks *et al.*, 1974).

#### II.4.5. Analyse des données

Les données collectées ont fait l'objet d'une analyse de la variance, simplement, sur chaque traitement hydrique, puis, une analyse de la variance combinant tous les traitements hydriques, en utilisant le logiciel SAS, (Statistical Analysis System; Version 9.2 ; SAS Institute, Cary, NC, USA.). Les différences entre traitements et entre génotypes ont été traitées par le test du LSD au seuil de signification de 5%. Les coefficients de corrélation linéaire, entre toutes les paires possibles de caractères, ont été calculés sur les données combinant tous les traitements, en utilisant le logiciel STATISTICA (StatSoft, 1997). La régression linéaire simple est utilisée pour évaluer les relations entre les paramètres mesurés.

---

## II.5. Evaluation du Bilan Hydrique

L'étude du bilan a porté sur les campagnes agricole ; 2009-2010 (Béni Fouda) et 2010-2011 (Sétif). Sur chaque site, deux essais ont été installés. Un essai conduit en sec et un autre en irrigué. Dans le site de Béni Fouda le traitement irrigué choisi est l'apport de 50 mm au stade gonflement (fractionné en 3 doses) & 30 mm (fractionné en 2 doses) à l'épiaison. Pour celui de l'ITGC, une dose de 60 mm a été appliquée à l'épiaison et fractionnée en deux doses.

### II.5.1. Suivi de la réserve hydrique du sol

L'évolution du stock hydrique du sol est déterminé, chaque décade et sur un profil de 60 cm, tout au long du cycle de développement. La réserve hydrique est évaluée selon la méthode gravimétrique décrite par Gardner, (1985). La procédure consiste à sécher (passer dans une étuve à 105 °C pendant 48 heures) l'échantillon du sol et connaître ensuite par pesée finale (ramenée à la pesée initiale) le poids d'eau contenu par l'échantillon. L'humidité pondérale ( $\theta_p$ ) est calculée par la relation suivante donnée par Ollier et Poirée (1981) :

$$\theta_p = 100 \frac{M_e}{M_s} = 100 \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Où :

- ✓  $\theta_p$  : la teneur gravimétrique en eau (g(eau)/100g(sol sec) )
- ✓  $M_e$  : la masse d'eau (g)
- ✓  $M_h$  : la masse de l'échantillon humide (sol + eau) (g)
- ✓  $M_s$  : la masse de l'échantillon sec (sol) (g)

Ensuite, la teneur en eau gravimétrique est convertie en teneur volumique en eau ( $\theta_v$ ) à l'aide de la densité apparente ( $D_a$ ), entre autre parce que le modèle *BUDGET* requiert la teneur volumique, suivant cette relation :

$$\theta_v (\% \text{ vol}) = \theta_p * D_a$$

La variation de la réserve hydrique du sol ( $\Delta W$ ) exprimée en mm est calculée avec la formule suivante :

$$\Delta W = (D_a / 10) * \Delta \theta_p * Z_r$$

Où :  $D_a$  est la densité apparente du sol,  $\Delta \theta_p$  est la variation de l'humidité pondérale du sol et  $Z_r$  est la profondeur du profil (Damagnez, 1975).

Sachant que :

$$EU = (\theta_{FC} - \theta_{WP})$$

---

La réserve utile en eau (RU) et facilement utilisable (RFU) sont obtenues par les relations suivantes (Allen et *al.*, 1998) :

$$RU = EU * Z_r = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) * Z_r$$

$$RFU = RU * f$$

Où : EU est la teneur en eau utile du sol (mm/m), ( $\theta_{FC}$ ) est le contenu en eau à la capacité au champ, ( $\theta_{WP}$ ) est la teneur en eau au point de flétrissement et f est un coefficient empirique.

### **II.5.2. Paramètres phénologiques**

Un suivi et des notations de la durée des stades phénologiques a été effectué sur chaque traitement. Il s'agit de repérer et de compter le nombre jour, après semis, correspondant à chaque stade de croissance des génotypes. Il concerne les stades suivants :

- Levée,
- Montaison,
- Epiaison,
- Floraison,
- Remplissage,
- Maturité.

### **II.5.3. Simulation du bilan hydrique par le modèle BUDGET**

Le logiciel *BUDGET* est un modèle de bilan d'eau, développé à l'Institut pour la Gestion des Eaux et des Terres, de la Katholieke Universiteit Leuven de Belgique (Raes, 2004). Le modèle comprend plusieurs sous-modèles qui décrivent les mouvements verticaux de l'eau et les processus de l'extraction de l'eau par les racines dans un profil donné. Les différents processus pris en compte par ce logiciel sont :

- ✓ l'infiltration à la suite de la précipitation et/ou l'irrigation;
- ✓ l'écoulement superficiel ;
- ✓ le drainage interne ;
- ✓ la percolation profonde;
- ✓ l'évaporation ;
- ✓ la transpiration.

*BUDGET* calcule donc pour chaque jour le stockage en eau dans un profil du sol, affecté par des entrées en eau et par l'extraction en eau. Pendant des périodes de manque d'eau, les pertes relatives de récoltes sont estimées à l'aide des coefficients de réponse du rendement

---

(Ky). Ces valeurs pour les différents stades de croissance sont données par Doorenbos et Kassam (1979). En sélectionnant les critères de la dose d'irrigation (quantité) et le moment de l'irrigation (intervalle), *BUDGET* peut également générer des schémas d'irrigation.

Ainsi, en calculant la teneur en eau dans un profil du sol en fonction de l'apport et l'extraction d'eau pendant la période de simulation, le logiciel est apte à :

- ✓ Estimer le déficit hydrique dans des conditions pluviales,
- ✓ Estimer la réponse des rendements au déficit hydrique,
- ✓ Concevoir des schémas d'irrigation,
- ✓ Evaluer des stratégies d'irrigation.

Globalement, le logiciel *BUDGET* emploie la formule de Doorenbos et Kassam (1979), pour calculer le rendement relatif sur la base de l'évapotranspiration relative:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left[ \frac{ET_{act}}{ET_{crop}} \right]$$

Avec :  $Y_a/Y_m$  ; rendement relatif,  $1-Y_a/Y_m$  ; réduction de rendement relatif,  $K_y$  ; coefficient de réponse du rendement saisonnier,  $ET_{act}/ET_{crop}$  ; évapotranspiration relative et ;  $1- ET_{act}/ET_{crop}$  stress hydrique ou déficit d'évapotranspiration relative.

### **II.5.3.1. Les paramètres d'entrée**

*BUDGET* requiert l'entrée de divers paramètres qui sont d'ordre pédologique, climatique, matériel végétal et de programmation. Les données sont classées en 5 modules :

#### **A. Le sol**

Les données requises sont ; la texture, la profondeur des profils ainsi que leurs caractéristiques (point de saturation, capacité au champ, point de flétrissement, perméabilité), le drainage et le ruissellement. Dans cet essai, ses deux derniers paramètres ont été négligés.

#### **B. Matériel végétal**

Les principaux éléments d'entrée de ce module sont: la durée des stades phénologiques, les coefficients culturaux, le paillage, le taux du couvert végétal, la profondeur racinaire, le coefficient de tolérance au stress hydrique (f), et enfin le coefficient de sensibilité du rendement durant les phases de croissance. Dans notre expérimentation, nous avons fixé les mêmes paramètres pour tous les génotypes, sauf ceux relatifs aux stades de croissance (levée, montaison, épiaison et maturité) qui ont été paramétrés.

---

### C. Pluviométrie

Elles sont fournies par les stations météorologiques. Pour notre cas, les précipitations sont saisies en mm/jour.

### D. Evapotranspiration de référence $ET_0$

Elle est introduite (en millimètre) par jour, par décade ou par mois. Elle peut être obtenue par mesure sur des cases lysimétriques ou estimées à partir des formules empiriques. Dans notre expérimentation, nous l'avons estimé à partir de la formule de Penman et Monteith modifiée et recommandée par la FAO (Allen *et al.*, 1998) en utilisant le logiciel  $ET_0$  (2000) selon la procédure suivante :

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot R_n \cdot d + \gamma \frac{900}{t+273} v(e_w - e)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34v)}$$

Avec :  $ET_0$  ; en  $mm \cdot j^{-1}$ ,  $R_n$  ; rayonnement net ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $d$  ; longueur du pas de temps en k secondes ( $d=0,0864$ ),  $t$  ; température moyenne journalière de l'air à 2m ( $^{\circ}C$ ),  $\Delta$  ; pente de la courbe de la tension de vapeur saturante ( $kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ),  $\gamma$  ; constante psychométrique ( $kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ),  $e$  ; tension de vapeur ( $kPa$ ),  $e_w$  ; tension de vapeur saturante ( $kPa$ ),  $v$  ; vitesse du vent à 2 m ( $m \cdot s^{-1}$ ).

Pour un pas de temps journalier et une végétation de gazon bien irriguée et couvrant une hauteur de 0,12 m, de résistance extérieure de  $70 s \cdot m^{-1}$  et un albédo de 0.23, Les paramètres climatiques exigés sont : les températures journalières moyennes, maximales et minimales ; la vitesse journalière moyenne du vent à 2m ; le rayonnement net total journalier. (Allen *et al.*, 1998).

Les paramètres indispensables dans le calcul de l' $ET_0$  proviennent des données des stations météorologiques pour  $t$ ,  $R_n$  et  $v$ , (annexe 1 et 2) d'estimations pour ' $e_w$ ' & ' $e$ ' et de calculs de constantes physiques ;  $\gamma$  et  $\Delta$  en utilisant les relations :

$$e_w = 0,6108 \cdot \exp \left[ \frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3} \right] \quad \text{et} \quad e = \frac{H_r x(t)}{100}$$

Avec  $e_w$  et  $e$  en  $kPa$ , ( $H_r$ ) humidité relative moyenne journalière en (%) et ( $t$ ) température moyenne journalière en ( $^{\circ}C$ ).

La constante physique  $\gamma$  est calculée à partir de la pression atmosphérique ( $P$ ) enregistrée sur site selon cette relation :

---

$$\gamma = 0,665.10^{-3}.P \quad (\gamma \text{ en kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1})$$

Si on ne dispose pas de données, la pression peut être estimée à partir de l'altitude (z en mètre) :

$$P \text{ (kPa)} = 101,3. \left( \frac{(293 - 0,0065.z)}{293} \right)^{5,26}$$

La constante  $\Delta$  est calculée à partir de la température (t en °C) moyenne journalière, comme suit :

$$\Delta = \frac{4098. \left[ 0,6108. \exp \left( \frac{17,27.t}{t+237,3} \right) \right]}{(t + 237,3)^2}$$

Il est à noter que, les données climatiques nécessaires dans l'étude du bilan hydrique (annexe 1 et 2) ont été collectées à partir des stations météorologiques. Il s'agit des paramètres suivants :

- La température journalière (minimale et maximale).
- L'humidité relative de l'air (journalière).
- La vitesse moyenne du vent (journalière).
- Le rayonnement solaire journalier.
- La pluviométrie (journalière).

## **E. Irrigation**

La dose d'irrigation (quantité) et la fréquence (moment) de l'irrigation sont entrées selon les critères donnés dans le tableau II.3

**Tableau II.3 : Caractéristiques des traitements hydriques appliqués**

<b>Campagne agricole</b>	<b>Site expérimental</b>	<b>Traitement hydrique</b>	<b>Stade phénologique</b>	<b>Dose d'irrigation</b>
<b>2009-2010</b>	Béni Fouda	Sec (Témoin)	--	-
		Irrigué	Gonflement	50 mm
			Epiaison	30 mm
<b>2010-2011</b>	Sétif	Sec (Témoin)	--	-
		Irrigué	Epiaison	60 mm

### **II.5.4. Analyse statistique**

Elle a consisté en des analyses de variances simples pour chaque traitement hydrique puis, combinées à tous les traitements, des comparaisons de moyennes par le test LSD de Fischer, des corrélations et des régressions linéaires, entre variables mesurées, par l'utilisation du logiciel CoStat (2008) et STATISTICA (StatSoft , 1997).

---

## II.6. Evaluation de tolérance à la sécheresse par les méthodes non paramétriques

L'étude de la tolérance à la sécheresse est approchée par le calcul des indices de tolérance entre le milieu favorable (traitement irrigué du site d'Ain Arnat) et le milieu défavorable (traitement en sec du site de Béni Fouda) avec les relations suivantes :

- L'indice de la sensibilité à la contrainte hydrique de Fischer et Maurer (1978) :

$$S = (1 - Y_S / Y_F) / (1 - \bar{Y}_S / \bar{Y}_F)$$

- L'indice de la productivité moyenne (MP) et de la tolérance (TOL) :

$$MP = (Y_F + Y_S) / 2 \quad \text{Hossein et al., (1990)}$$

$$TOL = Y_F - Y_S \quad \text{Hossein et al., (1990)}$$

- L'indice de stabilité du rendement (YSI) et de la tolérance au stress (STI) :

$$YSI = Y_S / Y_F \quad \text{Bousslama et Schapaugh, (1984).}$$

$$STI = (Y_F + Y_S) / \bar{Y}_F^2 \quad \text{Fernandez (1992)}$$

- La moyenne géométrique de la productivité (GMP) et la moyenne harmonique de productivité (HMP) :

$$GMP = (Y_F \times Y_S)^{0.5} \quad \text{Fernandez (1992)}$$

$$HMP = [2 * (Y_S * Y_F)] / (Y_S + Y_F)$$

où :  $Y_s$  = rendement du génotype considéré dans le milieu stressant,  $Y_F$  = rendement du même génotype réalisé dans le milieu non stressant,  $\bar{Y}_S$  = moyenne des rendements de l'ensemble des génotypes testés dans le milieu stressant et  $\bar{Y}_F$  = moyenne des rendements de l'ensemble des génotypes testés dans le milieu favorable.

Une analyse de la stabilité, du rendement en grains, a été effectuée sur les dix génotypes dans les huit traitements hydriques, représentant les trois sites expérimentaux, selon la méthode de Finlay et Wilkinson (1963), qui consiste à établir une régression par génotype du rendement dans les différents milieux (traitements hydriques) sur la moyenne du rendement des génotypes dans ces mêmes milieux.

---

Chaque génotype peut être caractérisé par la pente de la droite de régression ( $b$ ) qui mesure sa **réactivité** à la variation du milieu. Trois cas de figure se présentent :

- $b > 1$  : génotype très productif mais dont le rendement est faible en milieu défavorable,
- $0 < b < 1$  : génotypes tamponnant les variations du milieu,
- $b = 1$  : stable donc, capable de s'adapter à une large gamme de milieux.

### **II.6.1. Analyse statistique**

Elle a porté sur des analyses de variance simple et combinée, des analyses factorielles (Analyses en composante principales) et des régressions multiples. Les logiciels utilisés sont : CoStat (2008), STATISTICA (StatSoft, 1997) et Past (Hammer *et al.*, 2001).

### III. Résultats et discussions

#### III.1. Caractères phéno morpho physiologiques (Campagne 2009/2010)

##### III.1.1 Phénologie, rendement en grains et ses composantes

Pour chaque traitement hydrique, les résultats de l'analyse de la variance ont montré une différence hautement significative entre génotypes pour les rendements en grains (Tableau III.1) indiquant une forte variation génétique et la possibilité de sélection dans ce riche pool de gènes pour l'amélioration de la tolérance à la sécheresse.

**Tableau III.1** : Rendement moyen en grains ( $t \cdot ha^{-1}$ ) des génotypes et les groupes statistiques\*.

Génotype	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
Bousselem	6.01 <sup>a</sup>	5.68 <sup>a</sup>	7.35 <sup>a</sup>	7.58 <sup>a</sup>
Dukem	4.76 <sup>ab</sup>	4.70 <sup>abc</sup>	5.57 <sup>b</sup>	6.32 <sup>bc</sup>
Mexicali	4.24 <sup>abc</sup>	5.46 <sup>ab</sup>	6.54 <sup>ab</sup>	6.51 <sup>ab</sup>
Waha	4.22 <sup>abc</sup>	4.61 <sup>abc</sup>	5.68 <sup>ab</sup>	6.40 <sup>bc</sup>
Altar	4.20 <sup>abc</sup>	4.72 <sup>abc</sup>	5.40 <sup>b</sup>	5.53 <sup>bc</sup>
Hoggar	3.90 <sup>abc</sup>	4.40 <sup>bc</sup>	6.20 <sup>ab</sup>	6.36 <sup>bc</sup>
Sooty	3.88 <sup>abc</sup>	4.68 <sup>bc</sup>	5.45 <sup>b</sup>	5.46 <sup>bc</sup>
Kucuk	3.72 <sup>bc</sup>	3.72 <sup>c</sup>	4.89 <sup>b</sup>	5.49 <sup>bc</sup>
Oued Zenati	2.41 <sup>c</sup>	3.48 <sup>c</sup>	2.71 <sup>c</sup>	3.99 <sup>d</sup>
Polonicum	2.31 <sup>c</sup>	3.63 <sup>c</sup>	3.10 <sup>c</sup>	5.21 <sup>c</sup>
<b>Moyenne</b>	3.96 <sup>d</sup>	4.50 <sup>c</sup>	5.28 <sup>b</sup>	5.88 <sup>a</sup>
<b>LSD<sub>5%</sub></b>	1.95	1.10	1.59	1.11

\*moyenne suivie par la ou les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

L'analyse des facteurs génotypiques et environnementaux est toujours importante en sélection des plantes (Jackson *et al.*, 1996 ; Yan et Hunt, 1998). Dans cette étude et à travers l'analyse combinée de la variance, les effets génotype et irrigation ont été trouvés hautement significative au seuil de 0,1% pour le rendement en grains (Rdt), le nombre d'épis par mètre carré (NE/m<sup>2</sup>), le nombre de grains par épi (NG/E) et le nombre de grains par m<sup>2</sup> (NG/m<sup>2</sup>). L'effet irrigation pour le poids mille grains (PMG) et pour les degrés-jours à l'épiaison (DJE) était significatif au seuil de probabilité de 5% et 1% respectivement et hautement significatif au seuil de probabilité de 1% pour l'effet génotype (Tableau.III.2).

**Tableau III.2.** Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée.

Source de variation	Carré moyen					
	NE/m <sup>2</sup>	DJE (°C)	NG/m <sup>2</sup>	NG/E	PMG (g)	Rdt (t h <sup>-1</sup> )
Traitement hydrique	90 795***	8965**	214 791 667***	83***	63*	21***
Génotype	41 465***	29 287***	112 618 431***	146***	269***	12***
Traitement x Génotype	5367ns	1301ns	14 084 787ns	31***	27ns	0.603ns
CV (%)	13.55	3.12	16.73	7.27	10.37	12.71

NE/m<sup>2</sup>: Nombre d'épis/m<sup>2</sup>, DJE : épiaison en degrés jours, NG/m<sup>2</sup>: Nombre de grains/m<sup>2</sup>, NG/E : Nombre de grains par épi, PMG: Poids de mille grains et Rdt : Rendement en grain. ns, \*, \*\*, \*\*\* : non significatif et significatif au seuil : 5, 1 et 0.1%

Cependant, l'effet interaction irrigation x génotype était significatif, seulement pour le nombre de grains par épi (NG/E) (P<0.001). Les caractères liés à la tolérance à la sécheresse, comme la maturité précoce, conduisent à une diminution de l'évapotranspiration saisonnière totale (Rizza *et al.*, 2004). Nos résultats montrent que l'irrigation prolonge significativement la période de croissance végétative. Les degrés-jours à l'épiaison (DJE) ont été significativement plus faibles (1 304 °C) en traitement stressé (T<sub>0</sub>) comparativement aux traitements irrigués qui varient entre 1 333 et 1 344 °C (Tableau.III.3).

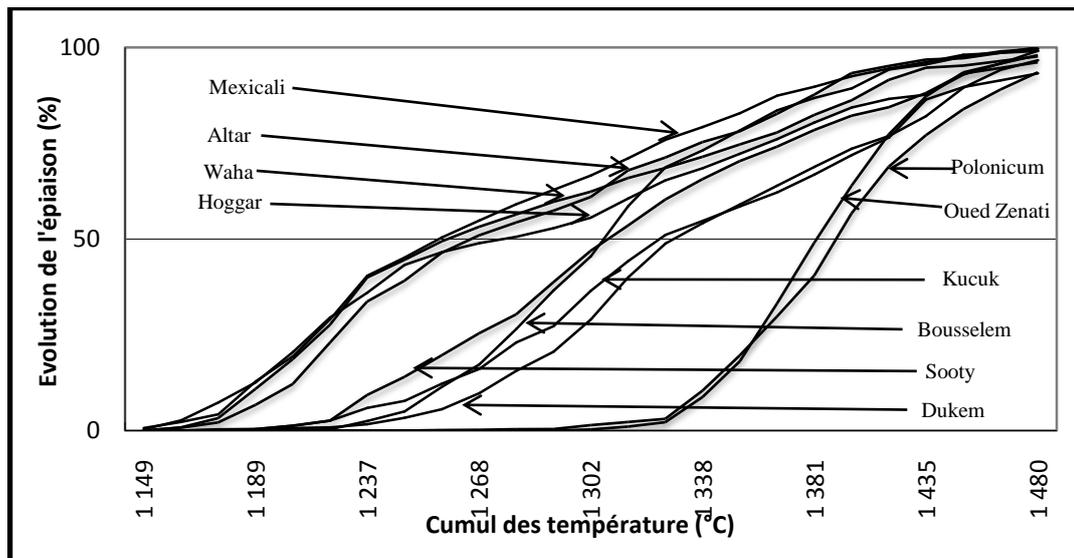
**Tableau III.3 :** Valeurs moyennes des paramètres mesurés pour les traitements et génotypes.

Traitement hydrique	NE/m <sup>2</sup>	DJE (°C)	NG/m <sup>2</sup>	NG/E	PMG (g)	Rdt (t h <sup>-1</sup> )
T <sub>3</sub>	558.69 <sup>a</sup>	1333.0 <sup>a</sup>	20 064 <sup>a</sup>	35.76 <sup>a</sup>	50.51 <sup>a</sup>	5.88 <sup>a</sup>
T <sub>2</sub>	530.21 <sup>a</sup>	1333.4 <sup>a</sup>	18 161 <sup>b</sup>	34.11 <sup>b</sup>	48.28 <sup>ab</sup>	5.28 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>	530.59 <sup>a</sup>	1344.9 <sup>a</sup>	18 446 <sup>b</sup>	34.46 <sup>b</sup>	47.02 <sup>b</sup>	4.50 <sup>c</sup>
T <sub>0</sub>	433.09 <sup>b</sup>	1304.3 <sup>b</sup>	13 808 <sup>c</sup>	31.73 <sup>c</sup>	48.45 <sup>ab</sup>	3.96 <sup>d</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>513.14</b>	<b>1328.9</b>	<b>17 620</b>	<b>34.02</b>	<b>48.56</b>	<b>4.91</b>
LSD <sub>5%</sub>	35.73	21.37	1515	1.27	2.58	0,5
<b>Génotype</b>						
Bousselem	529.1 <sup>ab</sup>	1326.2 <sup>b</sup>	17528.7 <sup>bc</sup>	32.68 <sup>de</sup>	57.17 <sup>a</sup>	6.65 <sup>a</sup>
Dukem	561.9 <sup>a</sup>	1352.4 <sup>b</sup>	21424.6 <sup>a</sup>	37.70 <sup>ab</sup>	41.53 <sup>d</sup>	5.34 <sup>bc</sup>
Mexicali	574.9 <sup>a</sup>	1268.0 <sup>c</sup>	19834.6 <sup>ab</sup>	34.67 <sup>cd</sup>	50.67 <sup>bc</sup>	5.69 <sup>b</sup>
Waha	592.9 <sup>a</sup>	1291.2 <sup>c</sup>	19827.3 <sup>ab</sup>	33.41 <sup>de</sup>	45.14 <sup>cd</sup>	5.22 <sup>bc</sup>
Altar	468.0 <sup>bc</sup>	1283.7 <sup>c</sup>	15355.7 <sup>cd</sup>	32.58 <sup>de</sup>	50.64 <sup>bc</sup>	4.96 <sup>cd</sup>
Hoggar	544.8 <sup>a</sup>	1287.4 <sup>c</sup>	19964.8 <sup>ab</sup>	36.49 <sup>bc</sup>	49.84 <sup>bc</sup>	5.22 <sup>bc</sup>
Sooty	463.8 <sup>bc</sup>	1321.1 <sup>b</sup>	18369.4 <sup>abc</sup>	39.36 <sup>a</sup>	44.30 <sup>d</sup>	4.87 <sup>cd</sup>
Kucuk	527.2 <sup>ab</sup>	1344.8 <sup>b</sup>	18407.5 <sup>abc</sup>	34.92 <sup>cd</sup>	43.93 <sup>d</sup>	4.46 <sup>d</sup>
Oued Zenati	444.0 <sup>c</sup>	1403.4 <sup>a</sup>	12089.5 <sup>e</sup>	27.00 <sup>f</sup>	52.40 <sup>b</sup>	3.15 <sup>e</sup>
Polonicum	424.5 <sup>c</sup>	1410.5 <sup>a</sup>	13399.7 <sup>de</sup>	31.38 <sup>e</sup>	50.04 <sup>bc</sup>	3.56 <sup>e</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>513.1</b>	<b>1328.9</b>	<b>17620.2</b>	<b>34.02</b>	<b>48.56</b>	<b>4.91</b>
LSD <sub>5%</sub>	56.4	33.79	2395.5	2.00	4.09	0.50

NE/m<sup>2</sup>: Nombre d'épis/m<sup>2</sup>, DJE : Degrés-jours à l'épiaison, NG/m<sup>2</sup>: Nombre de grains/m<sup>2</sup>, NG/E : Nombre de grains par épi, PMG : Poids de mille grains et Rdt : Rendement en grains. Les moyennes suivies par la ou les même(s) lettre (s) ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Parmi ces génotypes, le maximum et le minimum de DJE ont été observés chez Polonicum (1 410°C) et Mexicali (1268°C) respectivement. Polonicum et Oued Zenati ont une épiaison tardive. Mexicali, Altar, Waha et Sooty ont une épiaison précoce alors que les autres génotypes ont une épiaison intermédiaire (Figure. III.1).

Sous de bonnes conditions hydriques ou de déficit (faible stress), l'identification des variétés à potentiel élevé est une principale approche de sélection des génotypes de blé dur (Blum, 1988).



**Figure III.1** : Cinétique d'épiaison des dix génotypes

Concernant le facteur irrigation, le rendement en grains sous régime pluvial ( $T_0$ ) et irrigué ( $T_3$ ), varie de 3,96 t.ha<sup>-1</sup> à 5,88 t.ha<sup>-1</sup>. S'agissant du facteur génotype, le rendement en grains varie de 3,15 t.ha<sup>-1</sup> à 6,65 t.ha<sup>-1</sup> (Tableau. III.3). Dans chaque condition hydrique, Bousselem a le rendement le plus élevé, comparativement à Polonicum et Oued Zenati qui ont le plus faible rendement. Zhang et Oweis (1999) signalent que la réponse du blé au stress hydrique est plus sensible de l'élongation de la tige au gonflement, suivi par les stades floraison et remplissage des grains. Zhang *et al.*, (2004) et Kang *et al.*, (2002) rapportent aussi que les augmentations du rendement en grains chez le blé, varient de 20 à 45% après application de 30 à 60 mm d'eau d'irrigation complémentaire.

Comparés au traitement pluvial, nos résultats montrent que le rendement moyen en grains augmente significativement de 14% après application de 50 mm d'apport d'eau au stade de gonflement. Egalement, un autre apport d'eau de 15 ou 30 mm au stade épiaison, améliore significativement le rendement moyen en grains de 33 et 48% respectivement.

---

Dans leurs expérimentations, en plein champs et sous serre et sous différentes conditions de stress hydrique, Simane *et al.*, (1993) indiquent que la réduction du rendement est la plus forte sous stress de mi-saison (58%), suivi par le stress terminal (30%) et le stress précoce (22%). Dans les hautes plaines Sétifiennes d'Algérie, Chennafi *et al.*, (2006) ont indiqué que sur dix campagnes agricoles, le rendement en grains obtenu en conditions d'irrigation déficitaire a été augmenté par 93.4% comparé au traitement pluvial.

Erchidi *et al.*, (2003) mentionnent que le rendement en grains peut être exprimé comme le produit de deux composantes ; le nombre de grains par unité de surface et le poids de grains. Dans cette étude, les résultats montrent que le déficit hydrique réduit significativement le nombre d'épis par m<sup>2</sup> au stade de gonflement. Aussi, il réduit significativement mais graduellement le nombre de grains par unité de surface et le nombre de grains par épi au stade épiaison (Tableau III.3). Le poids des grains n'est pas significativement différent en traitements irrigués (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) comparé au traitement pluvial (T<sub>0</sub>). La différence significative existe seulement entre T<sub>3</sub> (50,51 g) et T<sub>1</sub> (47,02 g).

Sur le plan des génotypes, Polonicum (424 épis/m<sup>2</sup>) et Oued Zenati (444 épis/m<sup>2</sup>) se caractérisent par un faible peuplement des épis. Egalement, ils enregistrent le plus faible nombre de grains par épi et par m<sup>2</sup> mais, un PMG élevé (Tableau.III.3). Sooty et Altar enregistrent des valeurs intermédiaires d'épis/m<sup>2</sup> (soit 463 et 468 épis/m<sup>2</sup> respectivement). Les autres génotypes enregistrent un PMG élevé ainsi qu'un nombre élevé d'épis par m<sup>2</sup> (allant de 529 à 592 épis). Dukem est caractérisé par un nombre élevé de grains/m<sup>2</sup> (21 424 grains/m<sup>2</sup>) et de grains par épi (37,70 grains/épi) mais son PMG (41,53 g) est significativement le plus faible.

Bousselem possède un faible nombre de grains par épi (32,68 grains/épi) mais compensé significativement par un PMG élevé (57,17 g). Mexicali, Waha, Hoggar et Kucuk sont caractérisés par des valeurs moyennes du nombre de grains par m<sup>2</sup> variant entre 18 407 et 19 964 grain/m<sup>2</sup>. Concernant le PMG, Mexicali et Hoggar ont enregistré des valeurs élevées (soit 50,67 et 49,84 g respectivement) et Kucuk a une plus faible valeur (43,93 g). Finalement, Waha se caractérise à la fois par un faible nombre de grains par épi (33,41 grains/épi) et un faible PMG (45,14 g).

---

### III.1.2. Teneur Relative en Eau (TRE)

Teulat *et al.*, (1997) signalent que la teneur relative en eau peut être utilisée comme une technique de criblage dans des programmes de sélection pour la tolérance à la sécheresse.

Selon Siddique *et al.*, (2000), durant le développement végétatif, le stress dû à la sécheresse, réduit significativement les valeurs de la teneur relative en eau.

A différents stades de croissance du blé, Almeselmani *et al.*, (2011) rapportent des différences significatives entre génotypes pour la teneur relative en eau de la feuille. En plus, la réduction de la TRE est plus prononcée chez les variétés sensibles à la sécheresse.

Aux stades épiaison et remplissage des grains, nos résultats indiquent que la teneur relative en eau est significativement différente entre les traitements hydriques. Entre génotypes, aucune différence n'a été observé (Tableau. III.4).

**Tableau III.4** : Carré moyen de l'analyse combinée de la variance ; de la vitesse et de la durée de remplissage des grains, de la teneur relative en eau et du poids spécifique foliaire.

Source de variation	Carré moyen					
	VRG	DRG	TRE		PSF	
			Au stade Épiaison	Au stade Remplissage	Au stade Épiaison	Au stade Remplissage
<b>Traitement hydrique</b>	0.185**	132***	249*	515**	3.91***	19.43***
<b>Génotype</b>	0.120**	97***	64ns	196ns	0.87ns	16.31***
<b>Traitement *Génotype</b>	0.058*	26ns	60ns	91ns	0.58ns	1.75ns
<b>CV (%)</b>	12.97	12.94	11.36	13.26	11.72	14.80

ns, \*, \*\*, \*\*\* : non significatif et significatif au seuil de 5, 1 et 0.1%. VRG : vitesse de remplissage des grains, DRG: Durée de remplissage des grains, TRE : Teneur relative en eau et PSF : Poids spécifique foliaire.

Sur l'ensemble des quatre traitements hydriques, les valeurs moyennes, les plus élevées et les plus basses, de la teneur relative en eau ont été enregistrées aux stades remplissage des grains (77%) et épiaison (74%), respectivement (Tableau III.5).

A l'épiaison, la TRE était la plus élevée dans toutes les conditions irriguées (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) par rapport à la condition stressée (T<sub>0</sub>). Durant le remplissage des grains, la TRE diminue significativement en T<sub>3</sub> comparativement à T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> (Tableau III.5).

**Tableau III.5 :** Valeur moyenne des paramètres mesurés dans chaque traitement hydrique.

Traitement hydrique	TRE (%)		PSF (mg/cm <sup>2</sup> )		VRG (mg/g/j)	DRG (jour)
	Au stade Epiaison	Au stade Remplissage	Au stade Epiaison	Au stade Remplissage		
T <sub>3</sub>	73.21 <sup>ab</sup>	70.79 <sup>b</sup>	7.74 <sup>ab</sup>	6.53 <sup>b</sup>	1.59 <sup>a</sup>	30.32 <sup>b</sup>
T <sub>2</sub>	77.34 <sup>a</sup>	79.75 <sup>a</sup>	8.12 <sup>a</sup>	8.02 <sup>a</sup>	1.44 <sup>b</sup>	34.50 <sup>a</sup>
T <sub>1</sub>	74.81 <sup>ab</sup>	78.62 <sup>a</sup>	7.49 <sup>b</sup>	7.93 <sup>a</sup>	1.43 <sup>b</sup>	30.51 <sup>b</sup>
T <sub>0</sub>	70.46 <sup>b</sup>	78.68 <sup>a</sup>	7.28 <sup>b</sup>	8.43 <sup>a</sup>	1.44 <sup>b</sup>	33.43 <sup>a</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>73.96</b>	<b>76.96</b>	<b>7.66</b>	<b>7.70</b>	<b>1.47</b>	<b>32.19</b>
<b>LSD<sub>5%</sub></b>	<b>4.32</b>	<b>5.24</b>	<b>0.46</b>	<b>0.58</b>	<b>0.09</b>	<b>2.14</b>

\*TRE : Teneur Relative en Eau, PSF : Poids Spécifique Foliaire, VRG : Vitesse de remplissage des grains et DRG : Durée de remplissage des grains.

Aux stades épiaison et remplissage des grains, Dukem réalise des valeurs maximales pour la teneur relative en eau, avec 78 et 82% respectivement. Waha (70%) à l'épiaison, Polonicum (71%) et Oued Zenati (71%) au stade remplissage des grains, ont obtenu les valeurs minimales (Tableau III.6). Nos résultats sont en accord avec ceux de Taheri *et al.*, (2011) qui mentionnent une différence significative pour la teneur relative en eau, entre les différents niveaux de stress hydrique et aucune différence significative entre génotypes et pour l'interaction. En début d'épiaison et au stade remplissage, Golestani Araghi et Assad (1998) ont montré que six génotypes sont différents par leur TRE en environnement stressé.

**Tableau III.6 :** Valeurs moyennes des paramètres mesurés pour chaque génotype

Génotype	TRE (%)		PSF (mg/cm <sup>2</sup> )		VRG (mg/g/j)	DRG (jour)
	Au stade Epiaison	Au stade Remplissage	Au stade Epiaison	Au stade Remplissage		
Bousselem	74.88	80.75	7.16	7.82 <sup>a</sup>	1.48 <sup>b</sup>	34.53 <sup>ab</sup>
Dukem	78.36	82.49	7.65	8.46 <sup>a</sup>	1.47 <sup>b</sup>	31.31 <sup>abcd</sup>
Mexicali	74.67	76.43	7.56	8.29 <sup>a</sup>	1.46 <sup>b</sup>	35.56 <sup>a</sup>
Waha	69.87	78.88	7.49	8.42 <sup>a</sup>	1.40 <sup>b</sup>	33.83 <sup>abc</sup>
Altar	73.19	80.54	7.91	8.85 <sup>a</sup>	1.38 <sup>b</sup>	35.38 <sup>a</sup>
Hoggar	72.09	79.50	7.58	8.21 <sup>a</sup>	1.40 <sup>b</sup>	33.46 <sup>abc</sup>
Sooty	74.50	74.57	7.74	7.57 <sup>a</sup>	1.41 <sup>b</sup>	31.81 <sup>abcd</sup>
Kucuk	73.99	73.89	7.49	8.22 <sup>a</sup>	1.47 <sup>b</sup>	29.96 <sup>bcd</sup>
Oued Zenati	72.19	71.40	7.87	5.59 <sup>b</sup>	1.57 <sup>ab</sup>	28.90 <sup>cd</sup>
Polonicum	75.84	71.18	8.13	5.59 <sup>b</sup>	1.70 <sup>a</sup>	27.14 <sup>d</sup>
<b>Means</b>	<b>73.96</b>	<b>76.96</b>	<b>7.66</b>	<b>7.70</b>	<b>1.47</b>	<b>32.19</b>
<b>LSD<sub>5%</sub></b>	<b>6.83</b>	<b>8.29</b>	<b>0.73</b>	<b>0.91</b>	<b>0.15</b>	<b>3.38</b>

\*TRE : Teneur Relative en Eau, PSF : Poids Spécifique Foliaire, VRG : Vitesse de remplissage des grains et DRG : Durée de remplissage des grains.

### **III.1.3. Poids spécifique foliaire (PSF)**

Aux stades épiaison et remplissage des grains, nos résultats ont montré que les différents traitements hydriques sont significativement différents pour le poids spécifique foliaire. Entre génotypes, le PSF ne diffère significativement qu'au stade remplissage des grains seulement (Tableau III.4). Sur la moyenne des quatre traitements hydriques, les valeurs maximales et minimales du poids spécifique foliaire ont été obtenues aux stades remplissage des grains (7,70 mg/cm<sup>2</sup>) et épiaison (7,66 mg/cm<sup>2</sup>) respectivement (Tableau.III.5).

Du stade épiaison au stade remplissage des grains, le PSF diminue significativement en T<sub>3</sub> (de 7,74 à 6,53 mg/cm<sup>2</sup>). A l'opposé, dans la condition stressée (T<sub>0</sub>), le PSF augmente significativement de 7,28 à 8,43 mg/cm<sup>2</sup> respectivement.

Au niveau des génotypes, nos résultats ont montré que le poids spécifique foliaire d'Oued Zenati (7,87 et 5,59 mg/cm<sup>2</sup> aux stades épiaison et remplissage des grains respectivement) et de Polonicum (8,13 et 5,59 mg/cm<sup>2</sup> aux stades épiaison et remplissage des grains respectivement) a diminué considérablement.

Pour les autres génotypes, le poids spécifique foliaire n'a pas significativement varié. Altar présente le PSF le plus élevé aux stades épiaison (7,91 mg/cm<sup>2</sup>) et remplissage des grains (8,85 mg/cm<sup>2</sup>). Le plus faible PSF a été observé chez Bousselem avec 7,16 mg/cm<sup>2</sup> au stade épiaison et chez Sooty avec 7,57 mg/cm<sup>2</sup> au stade remplissage (Tableau III.6).

### **III.1.4. Remplissage des grains**

La sensibilité du blé au déficit hydrique du sol est particulièrement importante durant la période du remplissage des grains, parce que cette phase de reproduction est très sensible au statut hydrique de la plante (Saeedipour et Moradi, 2011). L'analyse combinée des variances pour la vitesse du remplissage des grains (VRG) et la durée du remplissage des grains (DRG), a indiqué la présence de différences hautement significatives parmi les génotypes et entre traitements hydriques. Concernant l'interaction traitement hydrique x génotypes, aucune différence significative n'a été observée (Tableau.III.4).

Le traitement irrigué T<sub>3</sub> présente une VRG élevée (1,59 mg/g/j) et une courte DRG (30,32 jours). A l'opposé, le traitement pluvial (T<sub>0</sub>) montre une VRG faible (1,44 mg/g/j) et une DRG élevée (33,43 j) (Tableau III.5). A l'exception de Polonicum (1,70 mg/g/j) qui est similaire seulement avec Oued Zenati (1,57 mg/g/j), tous les autres génotypes présentent une

---

similitude pour la VRG qui varie entre un minimum de 1,38 mg/g/j et un maximum de 1,48 mg/g/j observées chez Altar et Bousselem respectivement (Tableau III.6).

Pour la durée du remplissage des grains, une variation génétique élevée a été observée. Polonicum (27,14 j) et Oued Zenati (28,90 j) ont une courte DRG. Mexicali (35,56 j), Altar (35,38 jours) et Bousselem (34,53 j) sont caractérisés par une longue DRG. Wiegand et Cuellar (1981) ont signalé que la vitesse de remplissage des grains est déterminée principalement par les facteurs génétiques et la durée de remplissage des grains par les facteurs environnementaux.

Sous les conditions de stress hydrique, Blum (1998) a suggéré qu'une courte durée de remplissage des grains est un caractère d'esquive du stress terminal tandis qu'une longue durée est caractéristique d'une plus grande remobilisation des réserves du chaume pendant le remplissage des grains.

### III.1.5. Teneur en chlorophylle des feuilles

La teneur en chlorophylle est un facteur important dans la détermination du taux de la photosynthèse et de la production de la matière sèche (Ghosh *et al.*, 2004). Les résultats de cette étude ont révélé qu'en début d'épiaison, à la floraison et au début du remplissage des grains, les traitements hydriques sont significativement différents pour la teneur en chlorophylle de la feuille étandard. Un effet génotypique significatif a été observé dans tous les stades de croissance (du stade gonflement au stade remplissage des grains). L'interaction traitement x génotype est significative, à la fin de l'épiaison et au début du remplissage des grains (Tableau III.7).

**Tableau III.7 :** Carré moyen de l'analyse combinée de la variance pour la teneur en chlorophylle

	Carré Moyen							
	GOF	DEP	MEP	FEP	FLO	CRG	MRG	FRG
Traitement hydrique	19ns	78***	15ns	1ns	42*	369***	10ns	41ns
Génotype	192***	172***	137***	78***	90***	116***	92***	84***
Traitement *Génotype	14ns	9ns	13ns	17*	13ns	33***	15ns	12ns
CV (%)	7.42	6.14	7.30	6.22	6.86	6.67	7.12	8.47

GOF : Gonflement ; DEP : Début d'épiaison ; MEP : Milieu d'épiaison ; FEP : Fin d'épiaison ; FLO : Floraison ; CRG : Début du remplissage des grains ; MRG : Milieu remplissage des grains ; FRG : Fin remplissage des grains. ns, \*, \*\*, \*\*\* : non significatif et significatif au seuil 5, 1 et 0.1%.

Les valeurs moyennes les plus élevées, de la teneur en chlorophylle de la feuille drapeau, ont été observées au milieu des stades épiaison et remplissage des grains, avec 51,54

et 51,61 unités SPAD, respectivement (Tableau III.8). Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées au stade gonflement (47,75) et au début du remplissage des grains (49,96). A tous les stades phénologiques, Dukem, Mexicali et Waha ont été caractérisés par des activités photosynthétiques élevées. La teneur en chlorophylle de leurs feuilles a varié de 53,19 à 55,02 unités SPAD. A l'opposé, du stade gonflement jusqu'à la fin de l'épiaison, Bousselem, Oued Zenati et Polonicum ont enregistré de faibles valeurs, variant ; de 41,42 à 49,32 unités SPAD. Chez Polonicum la teneur en chlorophylle a augmenté au stade floraison, alors que, pour Oued Zenati elle augmente en plein stade remplissage des grains (Tableau.III.8). Les autres géotypes ont montré des valeurs moyennes en teneur en chlorophylle de la feuille étandard et qui a varié entre 49,23 et 51,77 unités SPAD obtenus par Kucuk et Sooty, respectivement.

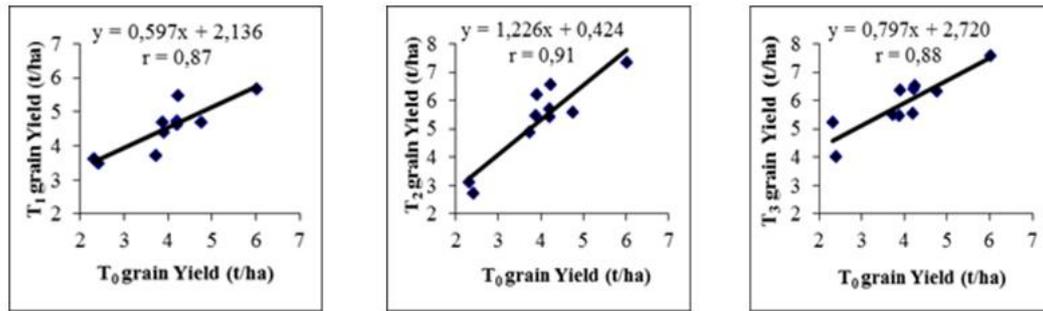
**Tableau III.8** : Valeurs moyennes de la teneur en chlorophylle (unité SPAD).

Géotype	GOF	DEP	MEP	FEP	FLO	CRG	MRG	FRG
Mexicali	53,40 <sup>a</sup>	55,25 <sup>ab</sup>	55,47 <sup>ab</sup>	54,76 <sup>a</sup>	53,09 <sup>ab</sup>	55,08 <sup>a</sup>	55,45 <sup>a</sup>	54,15 <sup>ab</sup>
Waha	52,15 <sup>a</sup>	54,30 <sup>ab</sup>	54,05 <sup>abc</sup>	53,32 <sup>ab</sup>	52,76 <sup>abc</sup>	51,46 <sup>bc</sup>	53,58 <sup>abc</sup>	53,88 <sup>ab</sup>
Dukem	51,67 <sup>a</sup>	56,35 <sup>a</sup>	56,50 <sup>a</sup>	54,46 <sup>ab</sup>	56,37 <sup>a</sup>	53,33 <sup>ab</sup>	54,94 <sup>ab</sup>	56,51 <sup>a</sup>
Altar	48,64 <sup>d</sup>	52,16 <sup>bc</sup>	52,34 <sup>abc</sup>	51,65 <sup>abcd</sup>	50,81 <sup>bc</sup>	51,06 <sup>bc</sup>	49,86 <sup>cde</sup>	50,63 <sup>bc</sup>
Sooty	48,07 <sup>b</sup>	52,14 <sup>bc</sup>	52,81 <sup>abc</sup>	52,86 <sup>abc</sup>	52,64 <sup>abc</sup>	50,96 <sup>bc</sup>	53,10 <sup>abc</sup>	51,58 <sup>bc</sup>
Hoggar	47,93 <sup>b</sup>	52,22 <sup>bc</sup>	50,59 <sup>cd</sup>	49,60 <sup>cde</sup>	50,29 <sup>bc</sup>	47,82 <sup>cde</sup>	51,50 <sup>abcd</sup>	50,96 <sup>bc</sup>
Kucuk	47,20 <sup>d</sup>	49,84 <sup>c</sup>	51,67 <sup>bc</sup>	50,81 <sup>bcde</sup>	48,56 <sup>cd</sup>	44,89 <sup>e</sup>	50,84 <sup>bcd</sup>	50,02 <sup>bc</sup>
Polonicum	43,65 <sup>c</sup>	46,94 <sup>d</sup>	47,26 <sup>d</sup>	48,46 <sup>de</sup>	50,87 <sup>bc</sup>	49,28 <sup>cd</sup>	48,26 <sup>de</sup>	49,34 <sup>bc</sup>
Bousselem	43,33 <sup>c</sup>	46,17 <sup>d</sup>	47,21 <sup>d</sup>	47,40 <sup>e</sup>	46,40 <sup>d</sup>	46,12 <sup>de</sup>	46,85 <sup>e</sup>	47,39 <sup>c</sup>
Oued Zenati	41,42 <sup>c</sup>	45,87 <sup>d</sup>	47,52 <sup>d</sup>	49,32 <sup>cde</sup>	49,87 <sup>bc</sup>	49,56 <sup>bcd</sup>	51,71 <sup>abcd</sup>	50,57 <sup>bc</sup>
<b>Moyenne</b>	<b>47,75</b>	<b>51,12</b>	<b>51,54</b>	<b>51,27</b>	<b>51,17</b>	<b>49,96</b>	<b>51,61</b>	<b>51,50</b>
LSD <sub>5%</sub>	2,76	2,77	3,03	2,6	2,84	2,72	2,95	3,53

GOF : Gonflement ; DEP : Début d'épiaison ; MEP : Milieu d'épiaison ; FEP : Fin d'épiaison ; FLO : Floraison ; CRG : Début du remplissage des grains ; MRG : Milieu remplissage des grains ; FRG : Fin remplissage des grains. Moyennes suivies par la (ou les) lettre(s) ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

### III.1.6 Relation entre les caractères

Les rendements en grains obtenus en conditions irriguées ont été significativement et positivement corrélés avec le rendement en grains de la condition pluviale (Figure III.2) suggérant qu'un haut potentiel de rendement en condition optimale peut résulter d'un rendement amélioré en condition stressée. L'une des raisons principales de la faible amélioration du blé dans les environnements semi-arides est le peu de connaissance sur les relations entre le rendement en grains et ces composantes et les changements des effets de compensation en conditions du stress hydrique.



**Figure III.2 :** Corrélation entre le rendement en grains du traitement pluvial ( $T_0$ ) et les traitements irrigués ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ )

Dans la présente étude, et sur la base de la moyenne des quatre traitements hydrique, les résultats indiquent que le rendement en grains est corrélé positivement et significativement avec : le nombre d'épis/m<sup>2</sup> ( $r = 0,69$ ) et le nombre de grains/m<sup>2</sup> ( $r = 0,70$ ) (Tableau. III.9). Nos résultats sont en concordance avec nombreuses études qui ont révélés l'impact positif de l'augmentation du nombre d'épis/m<sup>2</sup> sur le rendement (Calderini *et al.*, 1995 ; Garcia del Moral *et al.*, 2003).

En traitement pluvial ( $T_0$ ), aucune corrélation significative n'a été observée entre le rendement en grains et le nombre de grains/épi ; mais en traitements irriguées, une corrélation positive a été observée. Cartelle *et al.*, (2006) ont rapporté que le poids des grains est une composante majeure contribuant à la variation du rendement, surtout en régions méditerranéennes où le poids des grains est fréquemment exposé aux stress terminaux affectant la croissance des grains. Nos résultats ont montré une relation positive entre le rendement en grains et le PMG en  $T_0$ ,  $T_1$  et  $T_2$ , par contre, en bonne condition hydrique aucune association n'a été observée entre le rendement en grains et le PMG.

**Tableau III.9 :** Coefficient de corrélation entre le rendement en grains et les caractères mesurés

	NE/m <sup>2</sup>	NG/m <sup>2</sup>	NG/E	PMG	DJE	VRG	DRG	TREép	TRErg	PSFép	PSFrg
<b>Traitements combinés</b>	0.69*	0.70*	0.49	0.15	-0.71*	-0.60	0.81*	0.13	0.79*	-0.79*	0.73*
<b>T<sub>0</sub></b>	0.50	0.29	-0.08	0.26	-0.53	-0.79*	0.80*	0.43	0.57	-0.79*	0.71*
<b>T<sub>1</sub></b>	0.52	0.55	0.43	0.27	-0.69*	-0.09	0.49	0.42	0.41	-0.50	0.65*
<b>T<sub>2</sub></b>	0.63*	0.83*	0.55	0.30	-0.66*	-0.56	0.69*	-0.23	0.78	-0.52	0.87*
<b>T<sub>3</sub></b>	0.84*	0.79*	0.44	-0.06	-0.58	0.10	0.00	-0,05	0.25	0.35	0.16

NE/m<sup>2</sup> : Nombre d'Epis/m<sup>2</sup>, NG/m<sup>2</sup> : Nombre de Grains/m<sup>2</sup>, NG/E : Nombre de Grains/Epi, PMG : Poids de 1000 grains, DJE : Degré jour épiaison, VRG : Vitesse de remplissage du grain, DRG : Durée du remplissage des grains, TREép : Teneur relative en eau à l'épiaison, TRErg : Teneur relative en eau au remplissage, PSFép : Poids spécifique foliaire à l'épiaison et PSFrg : Poids spécifique foliaire au remplissage \* Significatif au seuil de 5%.

Chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.), le rendement en grains maximal résulte de l'équilibre optimal entre le nombre d'épis par unité de surface, le nombre de grains/épi et le poids des grains (Prystupa *et al.*, 2004).

Concernant l'effet génotypique, et pour l'ensemble des traitements hydrique, les résultats montrent que chaque génotype est caractérisé par une meilleure performance pour une des composantes du rendement. Les meilleurs génotypes en termes de rendement en grains sont Bousselem, Mexicali et Dukem qui présentent une similitude en valeur pour le peuplement épi. Bousselem se caractérise par un PMG élevé, une faible fertilité de l'épi et un faible nombre de grain par unité de surface. Mexicali est caractérisé par un PMG élevé et un nombre de grains/épi nombre et de grains/m<sup>2</sup> moyens comparé à Dukem qui a un faible PMG mais un nombre élevé de grains/épi et de grains/m<sup>2</sup>.

Slafer et Rawson (1994) indiquent qu'un faible poids des grains associé à un nombre élevé de grains/m<sup>2</sup> n'est pas seulement dû à une faible quantité d'assimilats par grain, mais, c'est le résultat d'un nombre élevé de grains/épi avec un faible potentiel du poids du grain. Selon Freeze et Bacon (1990), ces composantes du rendement ont une action interdépendante et sont en mesure de se compenser les unes les autres afin de stabiliser le rendement en fonction du changement des conditions environnantes.

Etant donné que, la teneur relative en eau est plus facile et moins coûteuse à mesurer, elle représente un critère plus approprié pour l'évaluation de la tolérance à la sécheresse par rapport au potentiel hydrique foliaire (Merah, 2001). Il a été également rapporté que la TRE diminue quand le stress dû à la sécheresse augmente (Halder et Burrage, 2003).

Egalement, certains résultats ont montré qu'il y a une variation génétique significative en TRE du blé avec une haute héritabilité, ce qui fait que la TRE peut être utilisée comme outils de criblage de la sécheresse (Schonfeld *et al.*, 1988).

Nos résultats indiquent qu'en moyenne des quatre traitements hydriques, au stade remplissage des grains, le rendement en grains a été positivement corrélé à la teneur relative en eau ( $r = 0,79$ ) et au poids spécifique ( $r = 0,73$ ). Par contre, au stade épiaison, le rendement en grains a été fortement associé au PSF mais de manière négative ( $r = -0,79$ ).

---

Pour les génotypes, l'ANOVA n'a pas indiqué une différence significative pour la TRE, lorsque elle est mesurée aux stades épiaison et remplissage des grains et de même pour le PSF au stade épiaison. Mais au stade du remplissage des grains, quand le stress terminal se manifeste, les génotypes différent significativement pour le PSF. Donc, Oued Zenati et Polonicum, caractérisés par un faible rendement en grains, sont également caractérisés par un faible PSF ; 5,59 mg/cm<sup>2</sup> comparés aux génotypes performants dont leur PSF varie de 7,57 à 8,85 mg/cm<sup>2</sup> (Tableau III.6).

Egalement, de l'épiaison à la fin du remplissage des grains, nos résultats ont indiqué que la teneur en chlorophylle a une corrélation positive, avec la durée de remplissage des grains (DRG) et négative avec les degrés jours à l'épiaison (DJE). La teneur en chlorophylle s'associe positivement avec la TRE et le PSF quand ils sont mesurés au stade remplissage des grains, mais négativement quand ils sont mesurés au stade épiaison, (Tableau III.10).

**Tableau III.10** : Coefficient de corrélation entre la teneur en chlorophylle à différents stades et les caractères mesurés

	<b>GOF</b>	<b>DEP</b>	<b>MEP</b>	<b>FEP</b>	<b>FLO</b>	<b>CRG</b>	<b>MRG</b>	<b>FRG</b>
<b>Rdt</b>	0.46	0.40	0.36	0.21	-0.02	0.09	0.05	0,12
<b>TREép</b>	-0.35	-0.26	-0.30	0.16	-0.37	-0.29	-0.16	-0,54
<b>TRErg</b>	0.33	0.45	0.41	0.58	0.39	0.46	0.40	0.11
<b>PSFép</b>	-0.38	-0.35	-0.28	-0.15	0.01	-0.22	-0.24	-0.21
<b>PSFrg</b>	0.66	0.59	0.48	0.27	0.12	0.41	0.29	0.37
<b>VRG</b>	-0.38	-0.40	-0.39	-0.21	-0.13	-0.24	-0.40	-0.37
<b>DRG</b>	0.28	0.33	0.25	0.15	0.01	0.14	0.23	0.19
<b>DJE</b>	-0.79*	-0.74*	-0.61*	-0.42	-0.38	-0.65*	-0.50	-0.53

GOF : Gonflement ; DEP : Début d'épiaison ; MEP : Milieu d'épiaison ; FEP : Fin d'épiaison ; FLO : Floraison ; CRG : Début du remplissage des grains ; MRG : Milieu remplissage des grains ; FRG : Fin remplissage des grains. Rdt : rendement en grains, TREép : Teneur relative en eau à l'épiaison, TRErg : Teneur relative en eau au remplissage, PSFép : Poids spécifique foliaire à l'épiaison et PSFrg : Poids spécifique foliaire au remplissage, VRG : Vitesse de remplissage du grain, DRG : Durée du remplissage des grains, DJE : Degrée jour épiaison. Significatif au seuil de 5% (P<0.05.)

### III.2. Evaluation du Bilan Hydrique par le modèle *BUDGET*

#### III.2.1 Dans le site de Béni Fouda

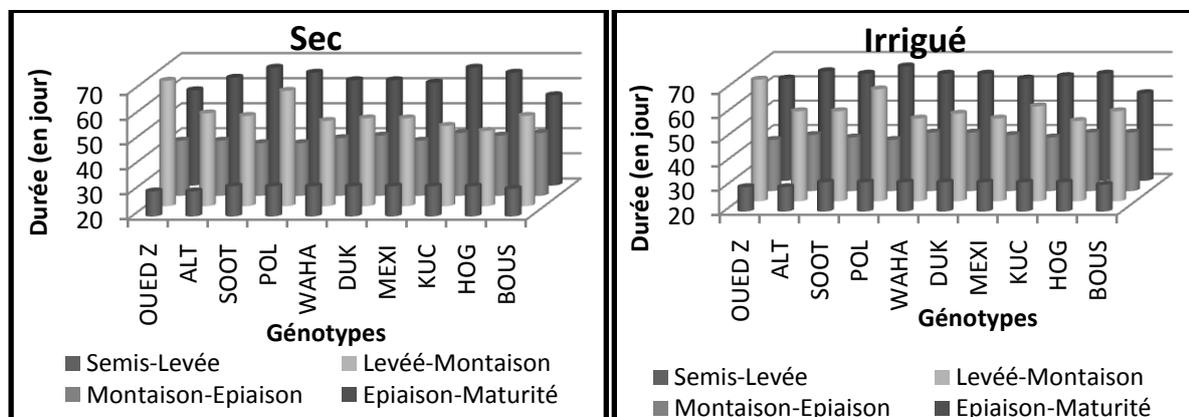
##### III.2.1.1. Aspects phénologiques

Dans les deux conditions hydriques (pluviale et irriguée), la durée du cycle de croissance ainsi que les différentes phases phénologiques, de l'ensemble des géotypes, sont assez semblables. Le cycle de croissance dure en moyenne 195 et 196 jours dans le traitement sec et irrigué respectivement. L'examen des résultats des phases phénologique montre que, la phase semis-levée est la plus courte. En moyenne, elle s'étale sur 32 j dans les deux traitements hydriques. Ensuite, la phase levée-montaison, plus longue, enregistre 57 et 58 j. Suivie de la phase montaison- épiaison, moins longue et qui dure en moyenne 43 j. Enfin, la phase épiaison-maturité qui est la plus longue, s'étale en moyenne sur 63 j (Tableau III.11).

**Tableau III.11** : Durée moyenne (jour) des phases phénologiques dans le site de Béni Fouda.

Traitement hydrique	Semis-Levée	Levée-Montaison	Montaison-Epiaison	Epiaison-Maturité	Cycle de croissance
T <sub>0</sub>	32	57	43	63	195
T <sub>1</sub>	32	58	43	63	196

Sur le plan génotypique et dans les deux conditions hydriques, on remarque qu'Oued Zenati et Polonicum se caractérisent, par une phase levée-montaison plus longue. En moyenne, elle dure entre 71 et 66 jours, en régime sec et 70 et 66 j en régime irrigué respectivement. En revanche, Hoggar, avec 50 et 53 j, enregistre les plus courtes durées, en traitement irrigué et sec respectivement (Figure III.3).



**Figure III.3** : durée des phases phénologiques dans le site de Béni Fouda.

Durant la phase montaison-épiaison, les résultats montrent que l'écart entre géotypes n'est pas assez grand. En présence comme en absence de stress hydriques, cette phase se déroule en moyenne entre un minimum de 41 j, noté chez Sooty, Oued Zenati et Polonicum, et un maximum de 45 j observé chez Bousselem et Kucuk.

Enfin, pour la phase épiaison-maturité une variation assez élevée est observée. L'écart entre géotypes est de 11 j. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées chez Sooty (67 j) et Kucuk (67 j), en condition pluviale ( $T_0$ ) et Polonicum (67 j) en condition irriguée ( $T_1$ ). Les valeurs les plus faibles sont observées chez Bousselem (56 j) dans les deux traitements.

La décomposition de la dernière phase de croissance (Epiaison-maturité) fait ressortir une forte variation dans la durée des différents stades composant cette phase, en régime sec et irrigué (Figure III.4 et III.5).

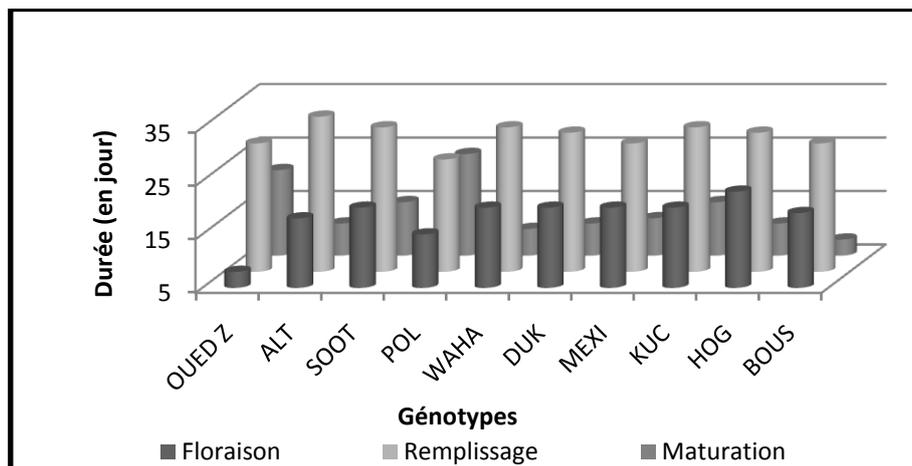


Figure III.4 : Décomposition de la phase épiaison-maturité du régime sec à Béni fouda.

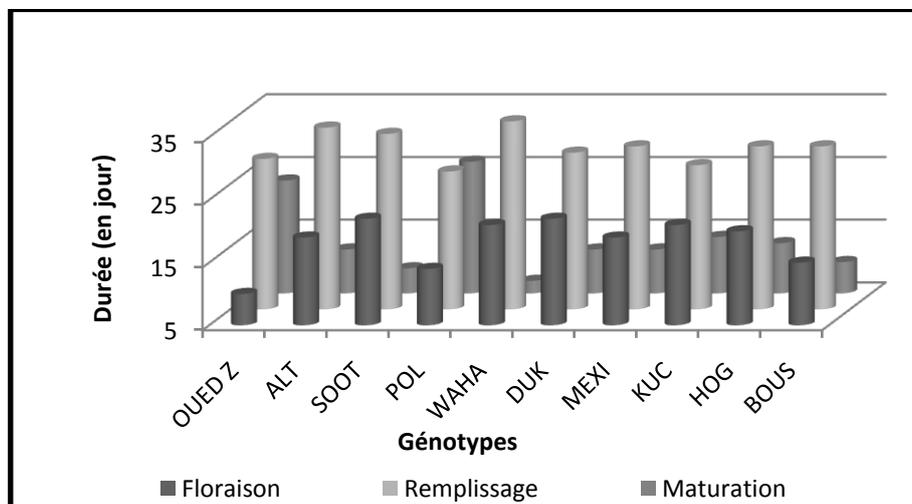


Figure III.5 : Décomposition de la phase épiaison-maturité du régime irrigué à Béni fouda.

---

A titre d'exemple, dans le régime sec, la floraison d'Oued Zenati se déroule sur 8 jours seulement, alors que celle de Hoggar est de 23 j. Dans le traitement irrigué, ce stade s'étale sur ; 10 j pour Oued Zenati et 22 j pour Dukem et Sooty.

De même pour la maturation. Oued Zenati prend plus de temps pour accomplir ce stade soit ; 21 et 23 j dans T<sub>0</sub> et T<sub>1</sub> respectivement. En revanche, ce stade est plus court chez Bousselem (8 j) et Waha (7 j) dans T<sub>0</sub> et T<sub>1</sub> respectivement.

Enfin, on note que Polonicum prend moins de temps pour remplir ses grains soit ; 26 et 27 jours dans T<sub>0</sub> et T<sub>1</sub> respectivement. Alors que, dans les deux traitements hydriques, Altar (34j) exploite plus de temps pour terminer ce stade. On peut conclure, qu'il existe une grande variabilité génétique à l'échelle phénologique au sein de ce groupe de génotype.

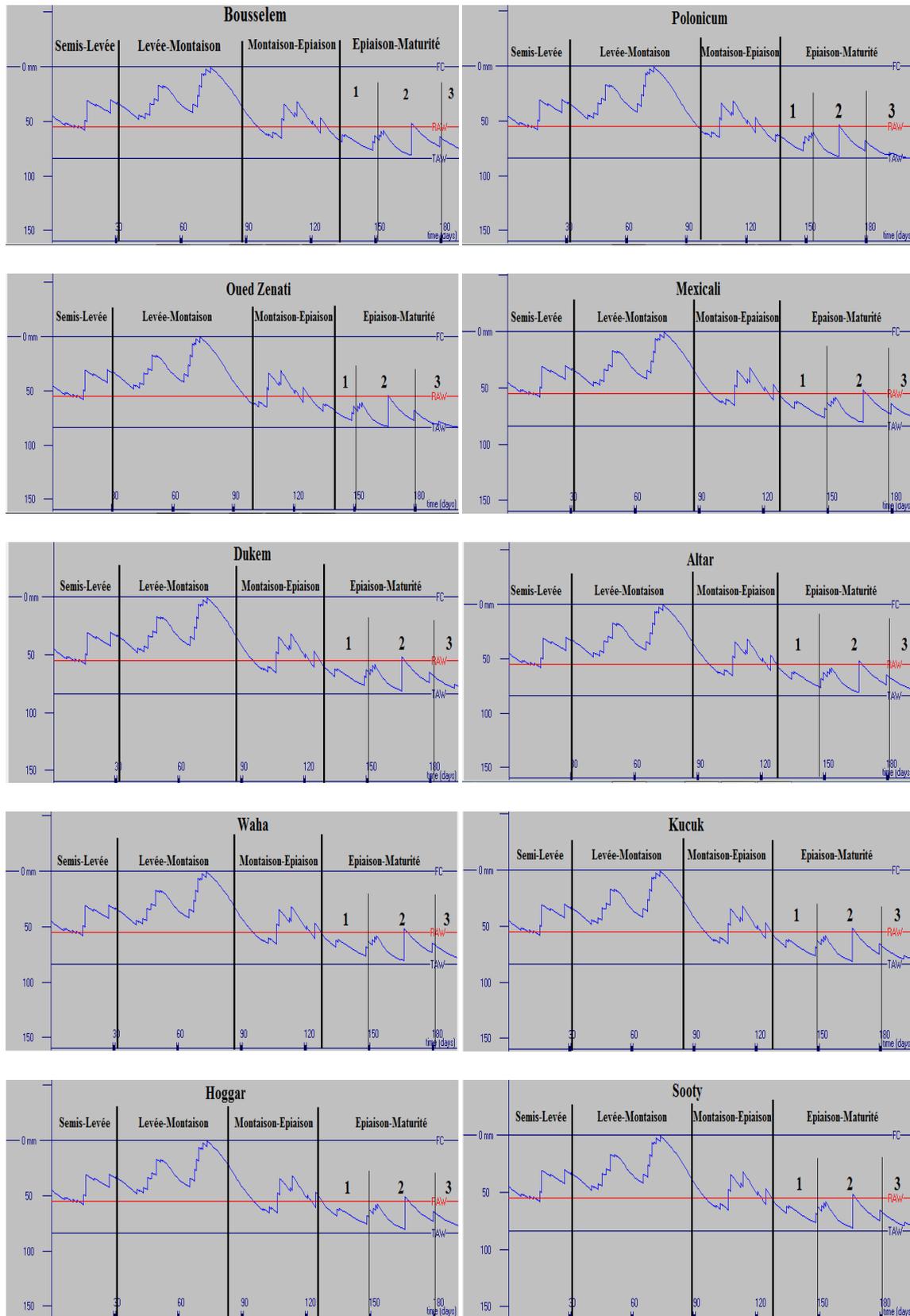
### III.2.1.2. Simulation de la réserve hydrique du sol et de l'évapotranspiration.

Dans le traitement témoin (T<sub>0</sub>), l'examen des résultats montre qu'à l'échelle du cycle de croissance, de l'ensemble des génotypes, les courbes de variation de la réserve hydrique du sol présentent 2 phases de déficit hydrique (Figure III.6). La première phase est située au début de la phase montaison-épiaison, chez Oued Zenati et Polonicum et au milieu de cette phase pour le reste des génotypes. La seconde phase de stress prend effet vers la fin de la montaison et s'étale à la maturité complète, chez Bousselem, Oued Zenati et Polonicum. Pour les autres génotypes, elle se manifeste du début épiaison à la maturité complète.

Tout au long du cycle cultural, la simulation du bilan par le modèle *BUDGET* ne montre pas de différence entre l'évaporation potentielle et réelle du sol du traitement en sec. Les valeurs moyennes maximales de l'évaporation potentielle et réelle ont été enregistrées dans les parcelles de Polonicum avec 97 mm alors que, les minimas sont signalées dans parcelles de Bousselem et Hoggar ; 85 mm. L'évaporation des parcelles des autres génotypes, varie entre un minimum de 86 mm et un maximum de 96 mm enregistrés chez Mexicali et Oued Zenati respectivement (Tableau III.12). Ces résultats indiquent que, le stress n'est pas dû à un manque d'évaporation du sol, mais à un déficit de transpiration des génotypes.

**Tableau III.12** : Comparaison entre l'évaporation potentielle (E<sub>pot</sub>) et réelle (E<sub>réel</sub>) du cycle de croissance dans le traitement sec (T<sub>0</sub>) du site de Béni Fouda.

Paramètre	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
E <sub>pot</sub> (mm)	95,9	86,1	89,8	97,5	87	88,3	86,8	88,7	85,6	85,5	<b>89,1</b>
E <sub>réel</sub> (mm)	95,9	86,1	89,8	97,5	87	88,3	86,8	88,7	85,6	85,5	<b>89,1</b>



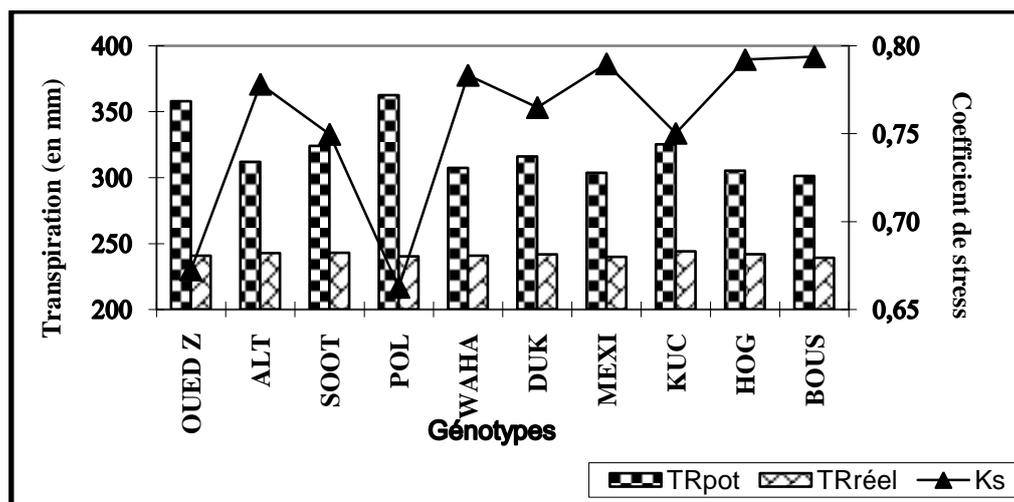
\* FC : capacité au champ, TAW : réserve hydrique utile, RAW : réserve facilement utilisable.

\*\*1,2 et 3 : Stades floraison, remplissage et maturation respectivement.

**Figure III.6 :** Variation de la réserve hydrique du sol, à l'échelle du cycle cultural, dans le traitement sec du site de Béni Foua.

En effet, à l'échelle du cycle cultural, les résultats indiquent une différence nette entre la transpiration potentielle et réelle des génotypes cultivés sans irrigation. La transpiration potentielle moyenne, de l'ensemble des génotypes est de ; 321 mm, alors que leurs transpiration réelle est de ; 241 mm. Ceci engendre un coefficient de stress moyen de 0,75.

Potentiellement, Polonicum et Oued Zenati transpirent plus, avec 362 et 357 mm respectivement. Alors que, réellement ils ne transpirent que 240 mm respectivement. Par conséquent ce sont les génotypes les plus stressés. Ils enregistrent un coefficient de stress ( $K_s$ ) respectif de ; 0,66 et 0,67. Bousselem et Mexicali enregistrent la plus faible transpiration potentielle, soit ; 310 et 303 mm respectivement. Mais également, ils se caractérisent par une faible transpiration réelle soit ; 239 mm respectivement. De ce fait, ce sont les génotypes les moins stressés. Leurs  $K_s$  est de 0,79 respectivement. Pour les autres génotypes, le coefficient de stress varie entre un minimum de 0,75 chez Sooty et Kucuk et un maximum de 0,78 chez Waha (Figure III.7).



**Figure III.7 :** Transpiration potentielle et réelle et coefficient de stress à l'échelle du cycle de croissance dans le traitement sec ( $T_0$ ) du site de Béni Fouda.

L'examen du bilan hydrique, de la première phase de stress hydrique, montre que les différents paramètres du bilan sont très rapprochés entre génotypes.

Cette phase de stress est assez courte et moins intense comparativement au stress hydrique globale de cycle de croissance. En moyenne, elle dure 10 jours. Les génotypes ont une transpiration potentielle moyenne de 18,1 mm pour une transpiration réelle moyenne de 14,4 mm, soit un déficit de transpiration de 3,7 mm. Ceci engendre un coefficient de stress moyen de l'ordre de 0,80 (Tableau III.13).

---

En revanche, la deuxième phase de stress hydrique se caractérise par des paramètres hydriques très différents. La durée moyenne de cette phase est de 70 j. La durée la plus longue est enregistrée chez Polonicum et Oued Zenati avec 80 et 77 j respectivement. Chez Bousselem et Mexicali, cette phase est la moins longue, avec 64 et 66 j respectivement. Pour le reste des génotypes, cette phase de stress s'étale entre 67 j observée chez Waha et Hoggar et 72 j enregistrée par Sooty et Kucuk (Tableau III.13).

Les résultats indiquent que le stress hydrique de cette phase est plus intense ( $K_s = 0,54$ ) comparativement à la précédente phase ( $K_s = 0,80$ ). Avec un  $K_s = 0,59$ , Bousselem, Hoggar et Mexicali sont les génotypes les moins stressés. Tandis que, Polonicum ( $K_s = 0,43$ ) et Oued Zenati ( $K_s = 0,44$ ) sont les plus stressés. On note que, l'intensité du stress hydrique, chez Sooty et Kucuk est similaire ( $K_s = 0,54$ ). Chez Altar, Waha et Dukem, l'intensité du stress est modérée comparativement aux autres génotypes, leur  $K_s$  varie entre 0,56 et 0,58.

**Tableau III.13** : Paramètres du bilan hydrique de la 1<sup>ère</sup> et de la 2<sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement sec du site de Béni Fouda.

1 <sup>ère</sup> phase de stress											
Paramètre*	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
<b>T<sub>P</sub> (mm)</b>	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,2	<b>18,1</b>
<b>T<sub>R</sub> (mm)</b>	14,6	14,4	14,4	14,6	14,3	14,3	14,3	14,4	14,3	14,4	<b>14,4</b>
<b>Durée (jour)</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	<b>10,0</b>
<b>D<sub>T</sub> (mm)</b>	3,5	3,7	3,7	3,5	3,8	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	<b>3,7</b>
<b>K<sub>s</sub></b>	0,81	0,80	0,80	0,81	0,79	0,79	0,79	0,80	0,79	0,79	<b>0,80</b>
2 <sup>ème</sup> phase de stress											
	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	
<b>T<sub>P</sub> (mm)</b>	203	152,5	166,6	208,3	149,3	158,3	145,9	166,6	146	142,6	<b>163,9</b>
<b>T<sub>R</sub> (mm)</b>	89,6	87,5	89,6	89,9	86,8	88,1	86,2	89,6	86,8	84,7	<b>87,9</b>
<b>Durée (jour)</b>	77	68	72	80	67	69	66	72	67	64	<b>70,2</b>
<b>D<sub>T</sub> (mm)</b>	113,4	65	77	118,4	62,5	70,2	59,7	77	59,2	57,9	<b>76,0</b>
<b>K<sub>s</sub></b>	0,44	0,57	0,54	0,43	0,58	0,56	0,59	0,54	0,59	0,59	<b>0,54</b>

\* T<sub>P</sub> : transpiration potentielle, T<sub>R</sub> : transpiration réelle, D<sub>T</sub> : déficit de transpiration, K<sub>s</sub> : coefficient de stress.

Les résultats montrent que le stress hydrique terminal, observé dans T<sub>0</sub>, n'est pas imputé à une différence génotypique dans la transpiration réelle. Mais, il est fortement lié à une variabilité dans la transpiration potentielle des génotypes. En effet, la transpiration réelle maximale est de 89 mm, enregistrée chez Oued Zenati, Sooty, Polonicum et Kucuk respectivement. Alors que, la transpiration réelle minimale, qui est de 84 mm, est signalée chez Bousselem, soit ; un écart de transpiration génotypique de près de 5 mm seulement (Tableau III.13).

Par contre, pour la transpiration potentielle, on note une grande variation génotypique. L'écart génotypique maximal de transpiration potentielle est de 66 mm, observé entre Polonicum (208 mm) et Bousselem (142 mm). De ce fait, les génotypes qui possèdent une forte transpiration potentielle, se caractérisent par un déficit de transpiration très élevée, tels que Polonicum et Oued Zenati, avec  $D_T = 118$  et  $113$  mm respectivement. Alors que, les génotypes à faible transpiration potentielle, comme Bousselem, Mexicali, Hoggar, et Waha réduisent considérablement le déficit de transpiration, soit un  $D_T = 58, 59, 60$  et  $62$  mm respectivement.

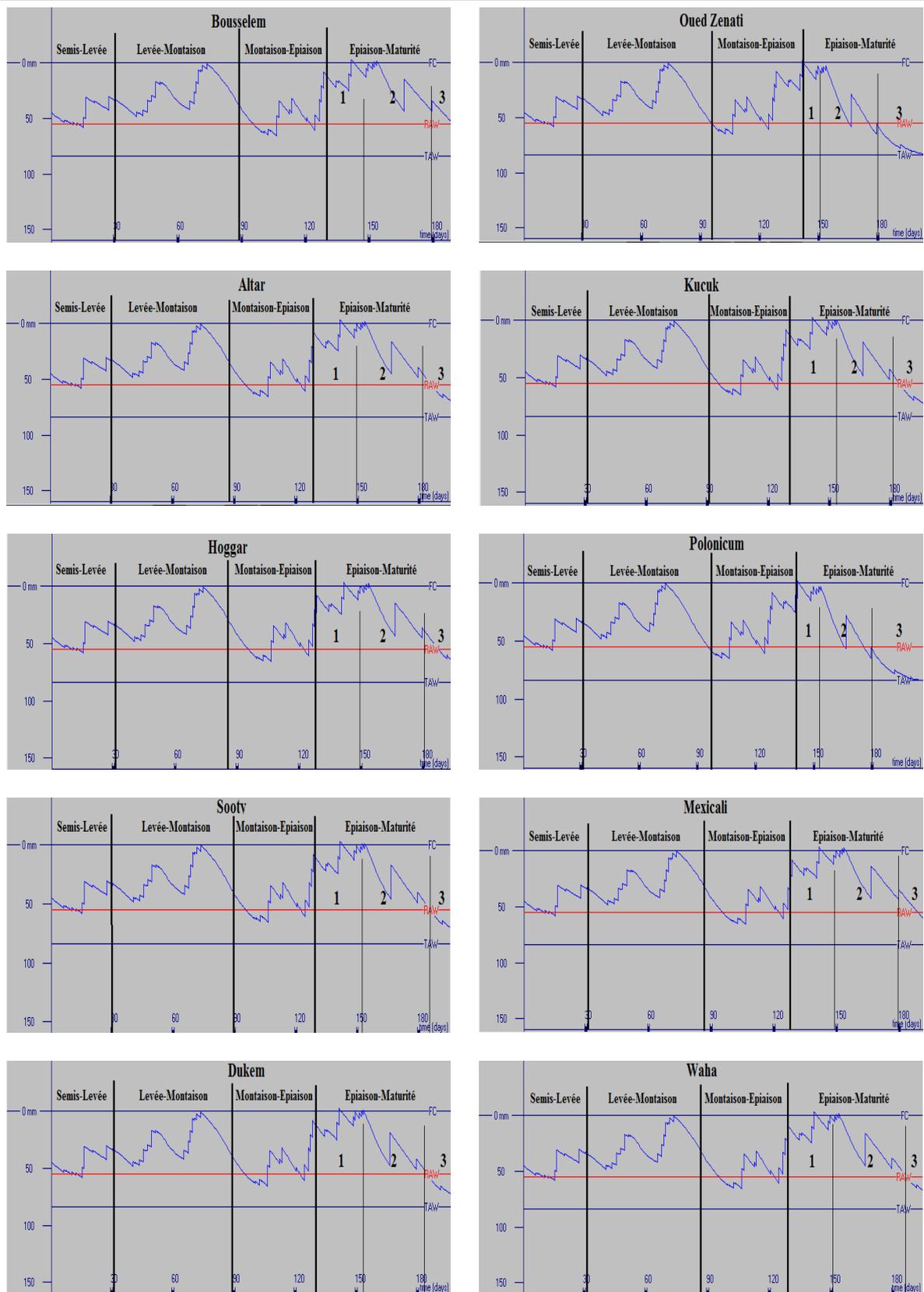
Comme dans les parcelles conduites en sec, au niveau des parcelles irriguées ( $T_1$ ), la simulation du bilan ne fait pas ressortir de différence entre l'évaporation potentielle et réelle du sol. La valeur moyenne de l'évaporation potentielle et réelle est de 90 mm. Les parcelles de Polonicum (98 mm) et de Bousselem (85 mm) sont, respectivement, les plus et les moins exposées à l'évaporation (Tableau III.14).

**Tableau III.14** : Comparaison entre l'évaporation potentielle ( $E_{pot}$ ) et réelle ( $E_{réel}$ ) du cycle de croissance dans le traitement irrigué ( $T_1$ ) du site de Béni Fouda.

Paramètre	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
$E_{pot}$ (mm)	96,3	87,6	89,8	98,4	88,4	90,1	87	91	87,6	85,7	<b>90,2</b>
$E_{réel}$ (mm)	96,3	87,6	89,8	98,4	88,4	90,1	87	91	87,6	85,7	<b>90,2</b>

Les résultats montrent que l'apport de l'irrigation, au stade gonflement et épiaison, élève la réserve hydrique du sol à la capacité au champ, et diminue sensiblement la fréquence, la durée et l'intensité du stress hydrique, pour chaque génotype mais de manière différente (Figure III.8).

---



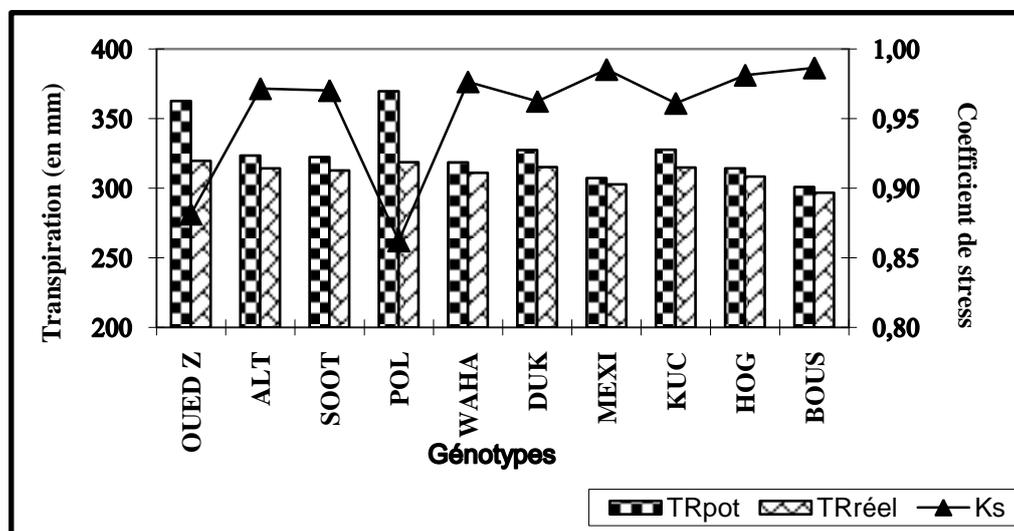
\* FC : capacité au champ, TAW : réserve hydrique utile, RAW : réserve facilement utilisable.

\*\*1,2 et 3 : Stades floraison, remplissage et maturation respectivement.

**Figure III.8 :** Variation de la réserve hydrique du sol, à l'échelle du cycle cultural, dans le traitement irrigué (T<sub>1</sub>) du site de Béni Fouda.

Dans le traitement irrigué ( $T_1$ ), la transpiration potentielle, de l'ensemble des génotypes, n'est pas assez différente de celle du traitement en sec ( $T_0$ ). L'écart n'est que de 6 mm. Par contre, pour la transpiration réelle, on constate qu'elle est bien plus élevée dans  $T_1$  comparativement à  $T_0$ . L'écart de transpiration entre les deux traitements est assez élevé, soit ; 70 mm. Ce qui montre l'effet positif de l'irrigation sur la transpiration réelle des génotypes.

En effet, à l'échelle du cycle de croissance et en milieu favorable ( $T_1$ ), Polonicum et Oued Zenati sont potentiellement et réellement les génotypes qui transpirent le plus. Ils détiennent une transpiration potentielle de 369 et 362 mm respectivement et une transpiration réelle de 318 et 319 mm respectivement. A l'opposé, Bousselem et Mexicali possèdent la plus faible transpiration potentielle ; 300 et 307 mm respectivement et réelle ; 296 et 302 mm respectivement. Mais, on constate que l'écart entre la transpiration potentielle et réelle, chez ces deux génotypes, qui est de 4 mm respectivement, est moins important que chez Oued Zenati et Polonicum qui est de 43 et 51 mm respectivement. La simulation montre que Polonicum ( $K_s = 0,86$ ) et Oued Zenati ( $K_s = 0,88$ ) sont plus stressés que Bousselem ( $K_s = 0,98$ ) et Mexicali ( $K_s = 0,98$ ). Les autres génotypes ont un  $K_s$  variant entre 0,96 et 0,97 (Figure III.9).



**Figure III.9 :** Transpiration potentielle et réelle et coefficient de stress à l'échelle du cycle de croissance dans le traitement Irrigué ( $T_1$ ) du site de Béni Fouada.

L'examen du bilan hydrique, de la première phase de stress, située en début de la phase montaison, montre qu'elle est similaire à celle observée dans  $T_0$ . Les différents paramètres du bilan hydrique sont presque semblables entre génotypes. Elle est assez courte (10 j) et moins intense ( $K_s = 0,80$ ) comparativement au cycle de croissance. La transpiration

potentielle moyenne est de 18,1 mm pour une transpiration réelle moyenne de 14,4 mm, soit un déficit de transpiration moyen de 3,7 mm (Tableau III.15).

Les résultats indiquent que l'irrigation a influencé considérablement la durée et l'intensité du stress de la 2<sup>ème</sup> phase par rapport à celle du traitement témoin (T<sub>0</sub>). Ils indiquent qu'elle a été retardée jusqu'à la fin du cycle cultural soit ; au stade maturation (Figure : III.8). En moyenne, elle dure seulement 10 j. Elle se caractérise par des transpirations, potentielle et réelles plus faibles que celles de T<sub>0</sub>, Avec des valeurs moyennes de ; 23,3 et 11,5 mm respectivement, soit un déficit de transpiration moyen de 11,8 mm et un K<sub>s</sub> moyen de 0,68.

Sur le plan génotypique, les résultats indiquent que Bousselem, et d'un degré moindre Mexicali, Hoggar et Waha, ont accompli leur fin de cycle de croissance sans subir aucun stress. Contrairement à Polonicum et Oued Zenati qui ont subit un stress de la fin du stade remplissage des grains jusqu'à la maturité complète, avec une durée de stress de 29 et 26 j respectivement, pour un déficit de transpiration de 47 et 39 mm respectivement, et un coefficient de stress de 0,36 et 0,40 respectivement. Chez les autres génotypes, l'effet du stress est assez minime. Il se manifeste au stade remplissage des grains. Sa durée varie entre un minimum de 8 j et maximum de 10 j, pour un déficit de transpiration qui oscille en 3,1 et 8,5 mm enregistrés chez Mexicali, Dukem, Sooty et Kucuk respectivement (Tableau : III.15).

**Tableau III.15** : Paramètres du bilan hydrique de la 1<sup>ère</sup> et de la 2<sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement irrigué du site de Béni Fouda.

1 <sup>ère</sup> phase de stress (pleine montaison)											
Paramètre*	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
T <sub>P</sub> (mm)	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,2	<b>18,1</b>
T <sub>R</sub> (mm)	14,6	14,4	14,5	14,6	14,3	14,4	14,3	14,5	14,3	14,4	<b>14,4</b>
Durée (jour)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	<b>10,0</b>
D <sub>T</sub> (mm)	3,5	3,7	3,6	3,5	3,8	3,7	3,8	3,6	3,8	3,7	<b>3,7</b>
K <sub>s</sub>	0,81	0,80	0,80	0,81	0,79	0,80	0,79	0,80	0,79	0,79	<b>0,80</b>
2 <sup>ème</sup> phase de stress (Fin montaison-maturité)											
	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
T <sub>P</sub> (mm)	64,3	16,2	16,2	73	11,7	20,9	1,8	20,9	7,5	0	<b>23,3</b>
T <sub>R</sub> (mm)	25,5	11,3	10,9	26,1	8,6	12,9	1,6	12,4	6	0	<b>11,5</b>
Durée (jour)	26	8	8	29	6	10	1	10	4	0	<b>10,2</b>
D <sub>T</sub> (mm)	38,8	4,9	5,3	46,9	3,1	8	0,2	8,5	1,5	0	<b>11,8</b>
K <sub>s</sub>	0,40	0,70	0,67	0,36	0,74	0,62	0,89	0,59	0,80	1,00	<b>0,68</b>

\* T<sub>P</sub> : transpiration potentielle, T<sub>R</sub> : transpiration réelle, D<sub>T</sub> : déficit de transpiration, K<sub>s</sub> : coefficient de stress.

### III.2.2 Dans le site de Sétif

#### III.2.2.1. Aspects phénologiques

Les résultats montrent que le cycle de croissance ainsi que les phases phénologiques, de l'ensemble des génotypes, ne diffèrent pas beaucoup, en passant du traitement témoin ( $T_0$ ) vers le traitement irrigué ( $T_1$ ). La durée moyenne du cycle de croissance est de ; 174 et 176 j dans le traitement sec et irrigué respectivement. L'analyse des résultats de la succession des phases phénologiques montre que, la phase semis-levée est la plus courte. En moyenne, elle s'étale sur 29 j dans les deux traitements hydriques. Ensuite, La phase levée-montaison, plus longue enregistre 56 j. Suivie de la phase montaison-épiaison, moins longue et qui dure en moyenne 42 j. Enfin, la phase épiaison-maturité qui est la plus longue, elle s'étale en moyenne sur 49 et 47 j en condition favorable et défavorable (Tableau III.16).

**Tableau III.16** : Durée moyenne des phases phénologiques dans le site de Sétif.

Traitement hydrique	Semis-Levée	Levée-Montaison	Montaison-Epiaison	Epiaison-Maturité	Cycle de croissance
$T_0$	29	56	42	47	174
$T_1$	29	56	42	49	176

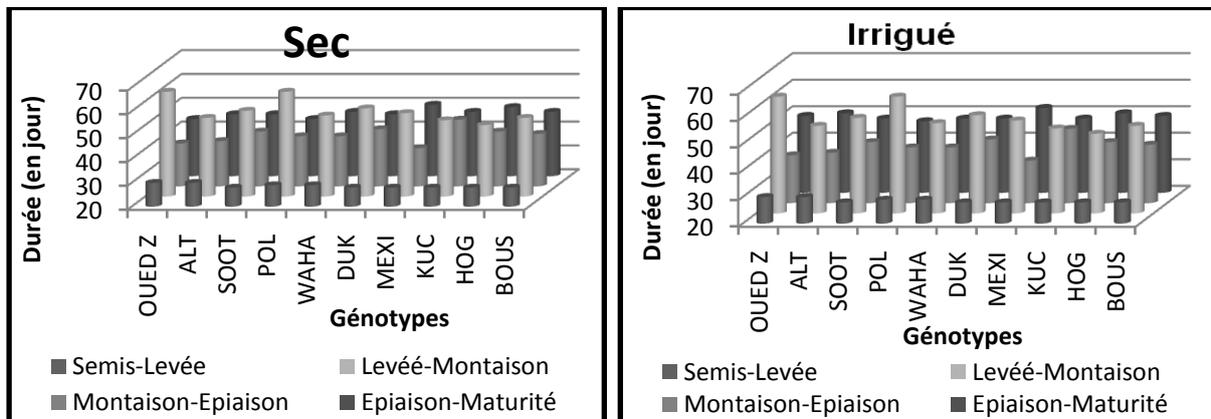
En condition favorable ou défavorable, Oued Zenati et Polonicum se caractérisent par une phase levée-montaison plus longues En moyenne, elle dure 64 jours. Contrairement à Hoggar (50 j) et Kucuk (52 j) qui enregistrent les plus courtes durées, tant en traitement irrigué que sec (Figure III.10).

Les résultats on montré que la phase montaison-épiaison, s'est déroulée de manière identique dans chaque traitement hydrique, mais avec une variabilité génotypique assez prononcée. En effet, l'écart entre génotypes, pour la durée de cette phase, est assez important. En  $T_0$  comme en  $T_1$ , Mexicali réalise la plus courte durée, soit ; 36 j. En parallèle, Kucuk, avec 48 jours, détient la plus longue durée pour cette phase. Soit un écart de 12 j entre ces deux génotypes.

Pour la durée de la phase épiaison-maturité, les résultats ont indiqué qu'elle est plus longue chez Mexicali qui enregistre 50 et 52 j dans  $T_0$  et  $T_1$  respectivement. En revanche, chez Polonicum, cette phase est plus courte, soit ; 44 et 47 j enregistrés dans  $T_0$  et  $T_1$  respectivement. La différence entre génotypes, pour la durée de cette phase, n'est pas assez

---

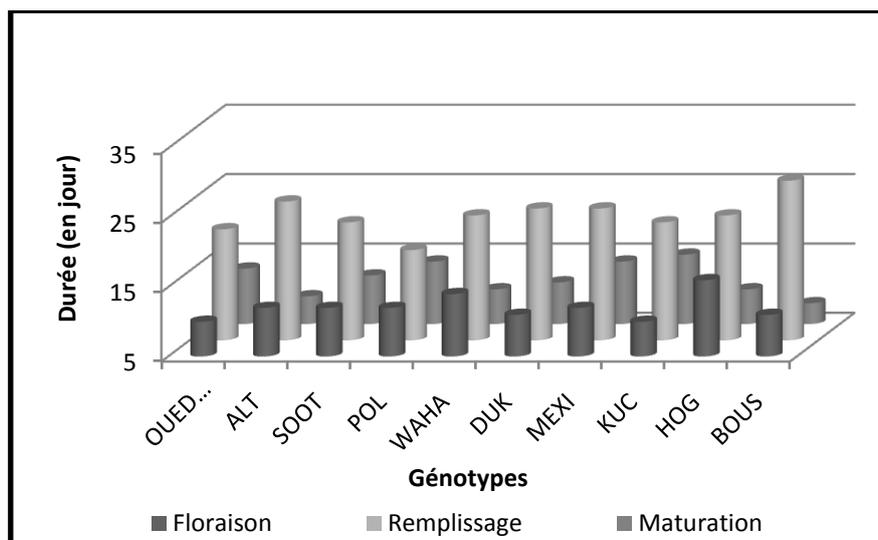
importante ; 6 et 5 j dans T<sub>0</sub> et T<sub>1</sub> respectivement, comparativement au site de Béni Fouada, où on a enregistré un écart de 11 jours.



**Figure III.10 :** Durée des phases phénologiques dans le site de Sétif.

L'examen des différents stades composant la phase de croissance ; Epiaison-maturité, fait ressortir une diversité génotypique très remarquable.

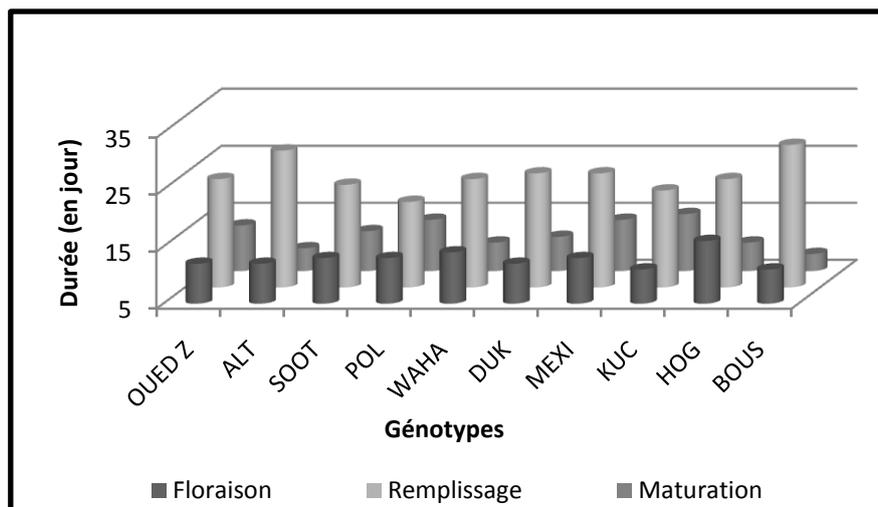
Dans le traitement en sec (T<sub>0</sub>), la durée de la floraison d'Oued Zenati et Kucuk dure, seulement 10 j, alors que, celle de Hoggar prend 16 j. On note que, Bousselem et Altar se caractérisent par la plus longue durée de remplissage qui est de 28 et 25 j respectivement, mais aussi par une courte durée de maturation soit ; 8 et 9 j respectivement. En parallèle, Polonicum enregistre la plus faible valeur pour la durée du remplissage soit ; 18 j et Kucuk marque la valeur la plus élevée pour la durée du stade maturation soit ; 15 j (Figure III.11).



**Figure III.11 :** Décomposition de la phase épiaison-maturité dans le traitement en sec du site de Sétif.

Dans le traitement irrigué, les résultats ont montré que la durée de la phase épiaison-maturité est semblable chez Hoggar et Altar soit ; 50 j. Mais, au niveau des stades phénologiques composant cette phase, on observe des différences génotypiques avérées. Chez Hoggar, les stades floraison et remplissage durent 16 et 24 j respectivement, alors que chez Altar, ils s'étalent sur 12 et 29 j respectivement.

En revanche, entre Bousselem et Oued Zenati qui ont aussi, la même durée pour la phase épiaison-maturité, soit ; 49 j, la différence se situe au niveau de la durée des stades remplissage et maturation. En effet, chez Bousselem, ces deux derniers stades s'étalent sur 30 et 8 j respectivement, alors que, chez Oued Zenati, ils sont réalisés sur 24 et 13 j. Les mêmes résultats sont constatés chez Sooty, Waha, Dukem et Kucuk. La durée de leur phase épiaison-maturité est semblables (48 j) mais, présentant des durées différentes, pour les stades ; floraison, remplissage et maturation (Figure III.12). A la lumière de ces résultats, il semble qu'il existe une grande variabilité entre ces génotypes, à l'échelle phénologique.



**Figure III.12 :** Décomposition de la phase épiaison-maturité dans le traitement irrigué du site de Sétif.

### III.2.2.2. Simulation de la réserve hydrique du sol et de l'évapotranspiration.

Contrairement au bilan hydrique du site expérimental de Béni Fouda, celui de Sétif présente un stress hydrique plus fréquent et touche toutes les phases phénologiques composant le cycle de croissance de l'ensemble des génotypes.

En effet, dans les parcelles témoins ( $T_0$ ), les résultats montrent que les courbes de variation de la réserve hydrique du sol présentent 4 phases de déficit hydrique. La première se

---

manifeste au cours de la phase semis-levée, la seconde se déroule, entre la fin levée-montaison et début montaison-épiaison, la troisième s'étale de la fin montaison-épiaison jusqu'au début épiaison-maturité et la quatrième phase de stress hydrique coïncide avec le milieu de la phase phénologique épiaison-maturité et dure jusqu'à la récolte des génotypes (Figure III.13).

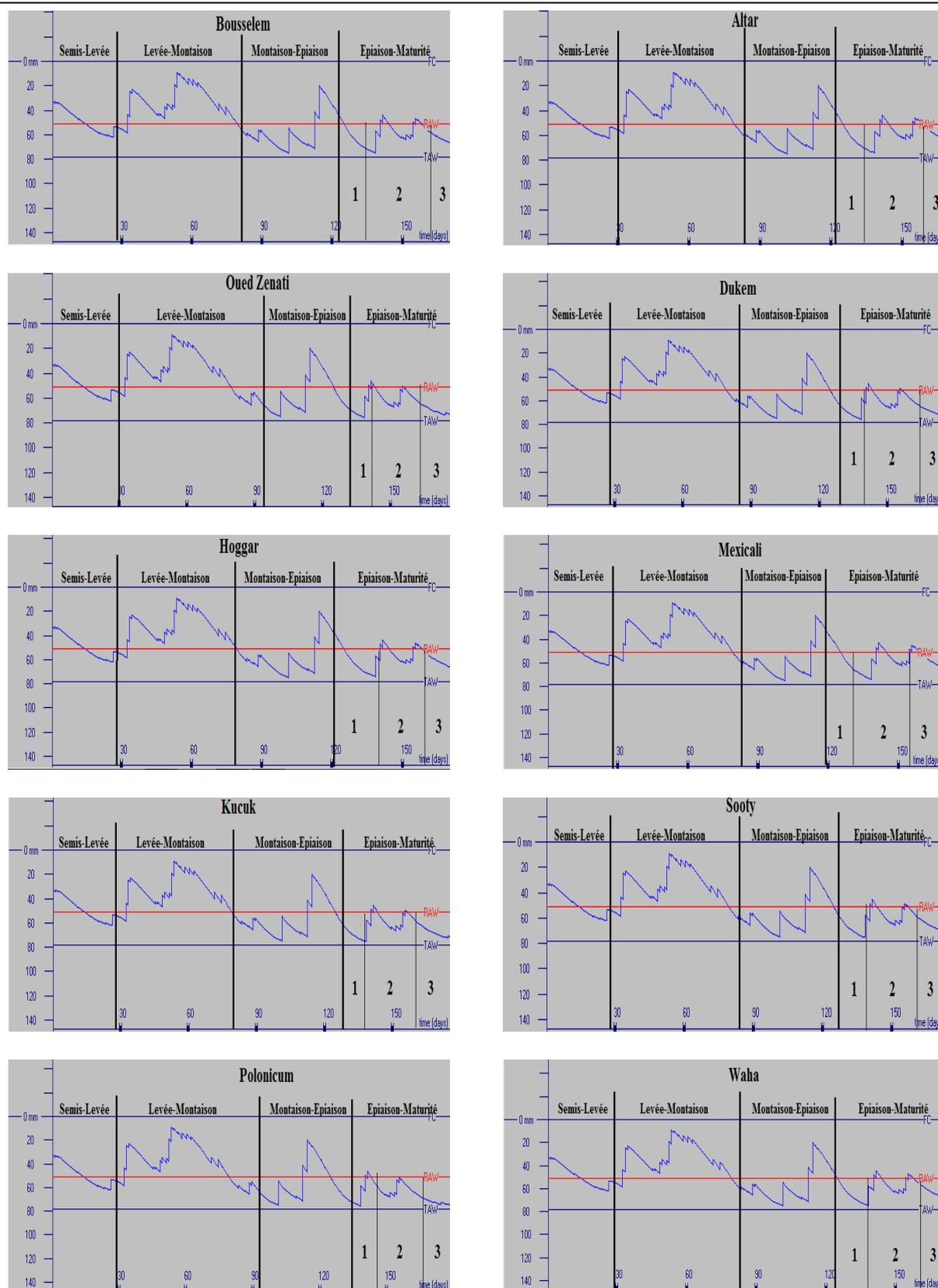
Dans les parcelles irriguées ( $T_1$ ), les résultats montrent que les paramètres du bilan hydriques des deux premières phases de stress sont identiques à celle des parcelles témoins (Figure III.14). Ceci peut s'expliquer par le fait que, les deux traitements ont été conduits de manière analogue jusqu'à l'épiaison ou l'apport d'irrigation différencie les paramètres du bilan hydrique des deux traitements. En revanche, le bilan hydrique des deux dernières phases de stress est très différent comparativement à celui du traitement témoin. Aussi, on signale que l'irrigation abaisse le déficit hydrique et écourte sa durée durant la troisième phase. Alors que, pour la quatrième phase de stress, elle est carrément annulée pour la plus part des génotypes.

Comme dans le site de Béni Fouda, la simulation du bilan hydrique du site de Sétif, par le modèle *BUDGET*, ne montre pas de différence entre l'évaporation potentielle et réelle du sol, en régime sec ou irrigué.

Les valeurs maximales de l'évaporation potentielle et réelle ont été enregistrées dans les parcelles d'Oued Zenati et de Polonicum avec 99 mm dans le traitement sec et 100 et 101 mm, respectivement dans régime irrigué. Alors que, les parcelles qui ont été moins exposées à l'évaporation sont celles de Bousselem et Hoggar, avec 89 et 87 mm dans  $T_0$  et  $T_1$  respectivement (Tableau III.17). Donc il semble que, le stress hydrique n'est pas le résultat d'un manque d'évaporation du sol, mais dû à un déficit de transpiration des génotypes.

**Tableau III.17** : Comparaison entre l'évaporation potentielle ( $E_{pot}$ ) et réelle ( $E_{réel}$ ) du cycle de croissance du site de Sétif.

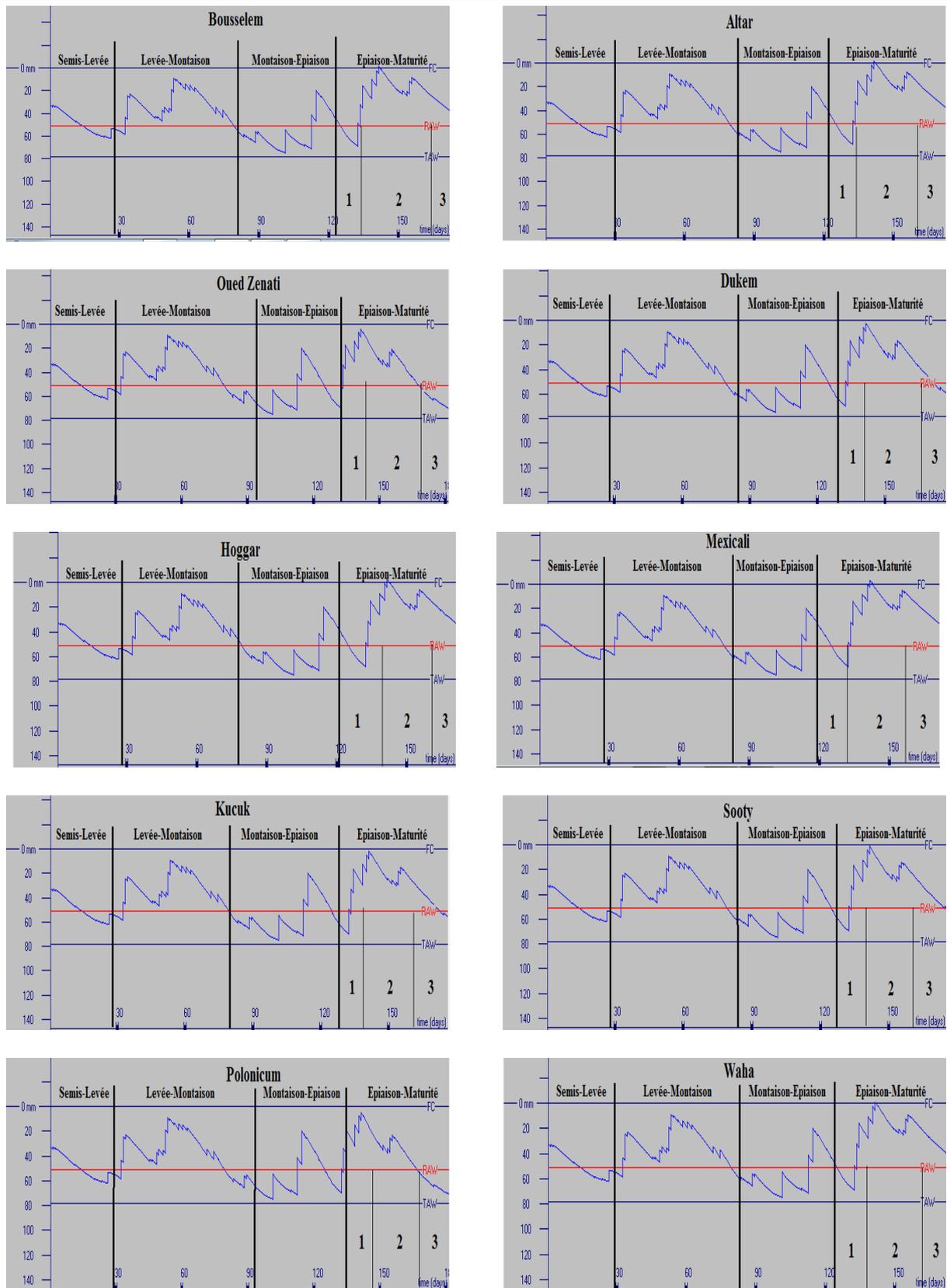
	Paramètre	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
$T_0$	$E_{pot}$ (mm)	99,4	90,8	91,5	99	91	92,9	88,7	90,8	87,3	88,7	<b>92,0</b>
	$E_{réel}$ (mm)	99,4	90,8	91,5	99	91	92,9	88,7	90,8	87,3	88,7	<b>92,0</b>
$T_1$	$E_{pot}$ (mm)	101	92,1	92,2	100,2	91,3	93,7	89,4	91,2	87,7	89,4	<b>92,9</b>
	$E_{réel}$ (mm)	101	92,1	92,2	100,2	91,3	93,7	89,4	91,2	87,7	89,4	<b>92,9</b>



\* FC : capacité au champ, TAW : réserve hydrique utile, RAW : réserve facilement utilisable.

\*\* 1,2 et 3 : Stades floraison, remplissage et maturation respectivement.

**Figure III.13 :** Variation de la réserve hydrique du sol, à l'échelle du cycle cultural, dans le traitement sec ( $T_0$ ) du le site de Sétif



FC : capacité au champ, TAW : réserve hydrique utile, RAW : réserve facilement utilisable.

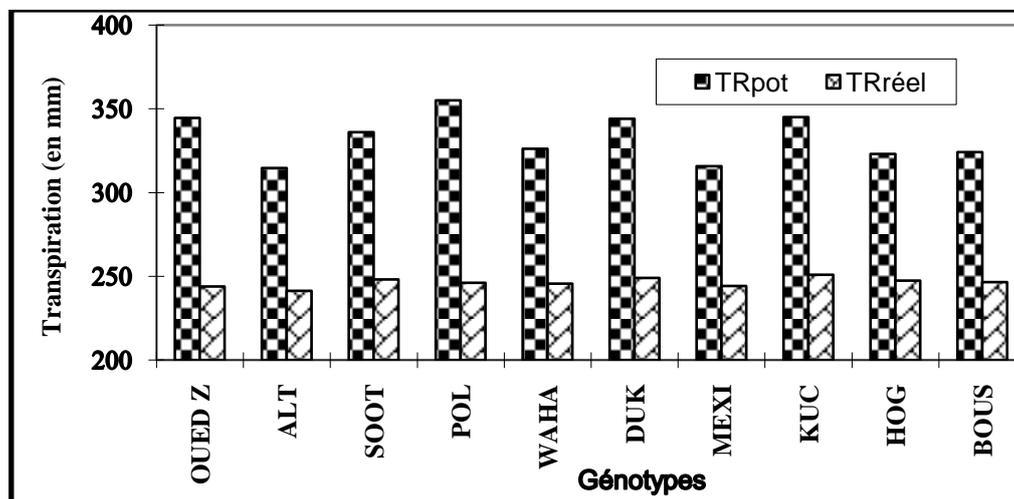
\*\*1,2 et 3 : Stades floraison, remplissage et maturation respectivement.

**Figure III.14:** Variation de la réserve hydrique du sol, à l'échelle du cycle cultural, dans le traitement irrigué ( $T_1$ ) du le site de Sétif

En effet, à l'échelle du cycle cultural, les résultats indiquent une grande différence entre la transpiration potentielle et réelle des génotypes. Dans  $T_0$ , les transpirations, potentielle et réelle, moyennes sont de ; 333 et 246 mm respectivement. Ceci engendre un coefficient de stress moyen de 0,74, qui est presque équivalent à celui enregistré dans les mêmes conditions du site de Béni Fouda ( $K_s = 0,75$ ).

La simulation du bilan hydrique, du site expérimental de Sétif, fait ressortir un effet positif de l'irrigation supplémentaire sur la transpiration réelle des génotypes, conduisant à une diminution de l'intensité du stress hydrique global. En effet, dans le traitement irrigué, la transpiration potentielle moyenne (340 mm) ne diffère pas beaucoup comparativement au traitement sec. Par contre, la transpiration réelle moyenne (285 mm) augmente sensiblement par rapport à celle de  $T_0$ . Le stress hydrique de  $T_1$  ( $K_s = 0,84$ ) diminue en moyenne de 10% comparativement à  $T_0$  ( $K_s = 0,75$ ).

Quelques soient les conditions hydriques, Altar et Mexicali enregistrent les plus faibles valeurs de transpiration Potentielle et qui sont de 315 et 316 mm, respectivement dans  $T_0$  et 325 et 321 mm, respectivement dans  $T_1$ . Les génotypes à forte transpiration potentielle sont ; Polonicum, Oued Zenati, Dukem et Kucuk. Cette dernière varie entre 344 et 355 mm dans  $T_0$  et 348 et 365 mm dans  $T_1$  (Figures III.15 et III.16).



**Figure III.15 :** Transpiration potentielle et réelle à l'échelle du cycle de croissance dans le traitement sec ( $T_0$ ) du site de Sétif.

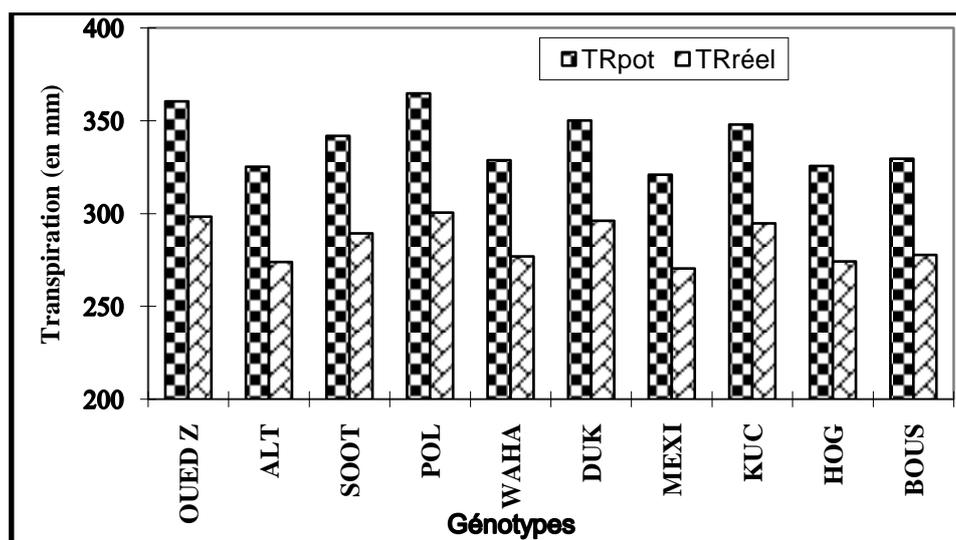


Figure III.16 : Transpiration potentielle et réelle à l'échelle du cycle de croissance dans le traitement irrigué ( $T_1$ ) du site de Sétif.

Les résultats indiquent qu'Altar dans  $T_0$  et Mexicali dans  $T_1$  possèdent les plus faibles valeurs de transpiration réelle, soit ; 241 et 270 mm respectivement. D'un autre coté, Kucuk dans  $T_0$  et Polonicum dans  $T_1$  se caractérisent par les plus fortes transpirations réelles, avec 251 et 301 mm respectivement.

Dans  $T_0$ , le déficit de transpiration moyen de l'ensemble des génotypes est équivalent à 86 mm avec un coefficient de stress variant entre 0,69 et 0,77 (Tableau III.18). Les génotypes les plus stressés sont : Polonicum ( $K_s = 0,69$ ), Oued Zenati ( $K_s = 0,71$ ) et Dukem ( $K_s = 0,72$ ). Alors que, les génotypes qui ont subit moins de stress sont : Altar ( $K_s = 0,77$ ), Mexicali ( $K_s = 0,77$ ) et Hoggar ( $K_s = 0,77$ ). Dans  $T_1$ , le déficit de transpiration est de 54 mm soit une réduction de 37 % par rapport au traitement témoin. Le coefficient de stress moyen, qui est de 0,84, présente une faible fluctuation, entre génotypes. Il varie entre 0,82 et 85.

Tableau III.18 : Comparaison entre le coefficient de stress ( $K_s$ ) et le Déficit de transpiration ( $D_T$ ) du traitement sec ( $T_0$ ) et irrigué ( $T_1$ ) à l'échelle du cycle de croissance du site de Sétif.

	Paramètre*	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
$T_0$	$K_s$	0,71	0,77	0,74	0,69	0,75	0,72	0,77	0,73	0,77	0,76	<b>0,74</b>
	$D_T$ (mm)	100,6	73,3	87,9	108,9	80,5	95	71,5	94,1	75,6	77,6	<b>86,5</b>
$T_1$	$K_s$	0,83	0,84	0,85	0,82	0,84	0,85	0,84	0,85	0,84	0,84	<b>0,84</b>
	$D_T$ (mm)	62,1	51,3	52,5	64,2	51,8	54	50,5	53,2	51,4	51,8	<b>54,3</b>

\*  $D_T$ : déficit de transpiration,  $K_s$ : coefficient de stress.

L'examen du bilan hydrique, selon les différentes phases de stress, montre que les paramètres de la première phase sont similaires entre  $T_0$  et  $T_1$  (Tableau III.19). Cette phase de

stress dure 18 jours et présente un  $K_s$  égale à 0,79, pour tous les génotypes. Les résultats indiquent que le stress apparaît juste après la germination des graines et se termine avec la levée (Figures III.13 et III.14). Cette phase de stress ne semble pas avoir d'incidence sur la culture, vu que le déficit de transpiration est très minime, soit ; 0,9 mm en moyenne seulement (Tableau III.19). Ceci est due à une faible transpiration potentielle et réelle et qui sont, en moyenne, de 4,6 et 3,7 mm respectivement. Ces résultats s'expliquent, par le fait que besoins en eau des génotypes durant cette phase sont faibles et ils dépendent plus sur leurs réserves internes (de la graine) que sur les apports externes (environnement de culture).

La deuxième phase de stress coïncide avec la fin du stade tallage et s'étale au début du stade montaison. Les résultats du bilan font ressortir une ressemblance entre génotypes. Cette séquence de stress présente une similitude parfaite entre  $T_0$  et  $T_1$  (Figures III.13 et III.14). Sa durée, qui est de 32 j, est plus longue que la première (18 j). Le déficit de transpiration est plus prononcé ;  $D_T = 42,5$  mm en moyenne et le stress hydrique est plus intense ;  $K_s = 0,52$  en moyenne (Tableau III.19).

**Tableau III.19** : Paramètres du bilan hydrique de la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement sec et irrigué du site de Sétif.

1 <sup>ère</sup> phase de stress (Semis-levée)											
Paramètre*	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
<b>T<sub>P</sub> (mm)</b>	4,3	4,3	4,8	4,4	4,5	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	<b>4,6</b>
<b>T<sub>R</sub> (mm)</b>	3,4	3,4	3,8	3,5	3,5	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	<b>3,7</b>
<b>Durée (jour)</b>	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	<b>18</b>
<b>D<sub>T</sub> (mm)</b>	0,9	0,9	1	0,9	1	1	1	1	1	1	<b>0,97</b>
<b>K<sub>s</sub></b>	0,79	0,79	0,79	0,80	0,78	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	<b>0,79</b>
2 <sup>ème</sup> phase de stress (Fin levée-montaison et début montaison-épiaison)											
	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	
<b>T<sub>P</sub> (mm)</b>	87,4	87,9	88	87,5	88	87,9	87,9	88	88	87,9	<b>87,9</b>
<b>T<sub>R</sub> (mm)</b>	45,4	45,4	45,4	45,5	45,3	45,4	45,3	45,2	45,1	45,3	<b>45,3</b>
<b>Durée (jour)</b>	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	<b>32,0</b>
<b>D<sub>T</sub> (mm)</b>	42	42,5	42,6	42	42,7	42,5	42,6	42,8	42,9	42,6	<b>42,5</b>
<b>K<sub>s</sub></b>	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,52	0,52	0,51	0,51	0,52	<b>0,52</b>

\* T<sub>P</sub> : transpiration potentielle, T<sub>R</sub> : transpiration réelle, D<sub>T</sub> : déficit de transpiration, K<sub>s</sub> : coefficient de stress.

Les résultats montrent que la troisième phase de stress, dans le traitement en sec, apparaît dès la fin de la montaison et s'étale sur 15 j pour se terminer à la fin de la floraison (Figures III.13). Les génotypes présentent un déficit de transpiration moyen de 23 mm et un coefficient de stress moyen de 0,48 (Tableau III.20). Mexicali se caractérise par le plus faible déficit de transpiration (18,5 mm), qui est la conséquence d'une faible transpiration potentielle (36,9 mm) et réelle (18,4 mm). En parallèle, Polonicum détient le déficit de

transpiration le plus élevé (22,3 mm) et de ce fait, il est parmi les génotypes les plus stressés ( $K_s = 0,45$ ). L'apport de l'irrigation à l'épiaison ( $T_1$ ) écourte considérablement cette phase de stress (Figures III.14). Par rapport à  $T_0$ , la durée du stress est réduite à 7 j, le déficit de transpiration à 8 mm et le coefficient de stress à 0,63.

**Tableau III.20** : Paramètres du bilan hydrique de la 3<sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement sec et irrigué du site de Sétif.

Traitement sec ( $T_0$ )											
Paramètre*	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
$T_P$ (mm)	48,4	41,4	45,3	49,3	43,1	46,7	36,9	46,2	41,2	42,3	<b>44,1</b>
$T_R$ (mm)	22	20,7	21,2	22,3	20,9	21,6	18,4	21,4	20,9	20,8	<b>21,0</b>
Durée (jour)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	<b>15,0</b>
$D_T$ (mm)	26,4	20,7	24,1	27	22,2	25,1	18,5	24,8	20,3	21,5	<b>23,1</b>
$K_s$	0,45	0,50	0,47	0,45	0,48	0,46	0,50	0,46	0,51	0,49	<b>0,48</b>
Traitement irrigué ( $T_1$ )											
	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	
$T_P$ (mm)	23,5	20,8	22,5	23,5	21,4	23	17	22,8	20,5	21,1	<b>21,6</b>
$T_R$ (mm)	14,6	13,5	14	14,6	13,7	14,3	10,9	14,1	13,5	13,6	<b>13,7</b>
Durée (jour)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	<b>7,0</b>
$D_T$ (mm)	8,9	7,3	8,5	8,9	7,7	8,7	6,1	8,7	7	7,5	<b>7,9</b>
$K_s$	0,62	0,65	0,62	0,62	0,64	0,62	0,64	0,62	0,66	0,64	<b>0,63</b>

\*  $T_P$  : transpiration potentielle,  $T_R$  : transpiration réelle,  $D_T$  : déficit de transpiration,  $K_s$  : coefficient de stress.

L'examen du bilan hydrique de la quatrième phase de stress, dans le traitement sec ( $T_0$ ), montre qu'elle se manifeste à partir du stade de remplissage des grains et se poursuit jusqu'à la fin du cycle de croissance des génotypes (Figure III.13). En moyenne, elle dure 24 jours. Sur le plan génotypique, les durées les plus longues sont enregistrées chez Polonicum, Oued Zenati, Dukem et Kucuk, avec 33, 30, 28 et 27 j respectivement. Ces génotypes sont les plus stressés. Leur déficit de transpiration se situe entre 38 et 24 mm et leur coefficient de stress varie entre 0,48 et 0,54. A l'opposé, Mexicali, Altar et Hoggar sont les moins stressés. Leurs coefficients de stress sont compris entre 0,72 et 0,68, un déficit de transpiration ne dépassant pas les 10 mm et une durée de stress allant de 17 à 19 j (Tableau III.21).

**Tableau III.21** : Paramètres du bilan hydrique de la 4<sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement sec du site de Sétif.

Traitement sec ( $T_0$ )											
Paramètre*	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	Moyenne
$T_P$ (mm)	64	29,4	46,3	73,8	40,4	56,6	29,2	54,1	33,4	33,8	<b>46,1</b>
$T_R$ (mm)	33,6	21	27	35,7	27	31,3	20,9	29,4	22,8	22,4	<b>27,1</b>
Durée (jour)	30	17	24	33	22	28	19	27	19	19	<b>23,8</b>
$D_T$ (mm)	30,4	8,4	19,3	38,1	13,4	25,3	8,3	24,7	10,6	11,4	<b>19,0</b>
$K_s$	0,53	0,71	0,58	0,48	0,67	0,55	0,72	0,54	0,68	0,66	<b>0,61</b>

\*  $T_P$  : transpiration potentielle,  $T_R$  : transpiration réelle,  $D_T$  : déficit de transpiration,  $K_s$  : coefficient de stress.

Les résultats indiquent que l'irrigation, au stade épiaison, a influencé significativement cette phase de stress. En effet, dans le traitement irrigué ( $T_1$ ), on constate que le stress hydrique est palier pour la majorité des génotypes. Seulement, Polonicum, Oued Zenati, Dukem et Kucuk ont subi un stress hydrique terminal. Aussi, on note que ce stress est situé en fin de cycle de croissance, soit au cours de la maturation. On remarque que, chez Kucuk et Dukem le stress ne dure que 2 et 5 j, respectivement et le déficit de transpiration ne dépasse pas 1,3 mm (Tableau III.22). Chez Polonicum et Oued Zenati, le déficit de transpiration est de 11,7 et 9,6 mm, respectivement pour une durée de 13 et 11 j respectivement.

**Tableau III.22** : Paramètres du bilan hydrique de la 4<sup>ème</sup> phase de stress hydrique dans le traitement irrigué du site de Sétif.

	Traitement irrigué ( $T_1$ )										
	O Z	ALT	SOOT	POL	WAHA	DUK	MEXI	KUC	HOG	BOUS	
$T_P$ (mm)	21,5	--	--	25,8	--	6,9	--	3,3	--	--	<b>14,4</b>
$T_R$ (mm)	11,9	--	--	14,1	--	5,6	--	3	--	--	<b>8,7</b>
Durée (jour)	11	--	--	13	--	5	--	2	--	--	<b>7,8</b>
$D_T$ (mm)	9,6	--	--	11,7	--	1,3	--	0,3	--	--	<b>5,7</b>
$K_s$	0,55	--	--	0,55	--	0,81	--	0,91	--	--	<b>0,7</b>

\*  $T_P$  : transpiration potentielle,  $T_R$  : transpiration réelle,  $D_T$  : déficit de transpiration,  $K_s$  : coefficient de stress.

### III.2.3. Performance pour le rendement en grains

En condition pluviale ou irriguée et que se soit au niveau du site expérimentale de Béni Fouda ou bien de Sétif, les résultats d'analyse de la variance ont montré des différences hautement significative ( $P < 0.01$ ) entre génotypes (Tableau III.23).

**Tableau III.23** : Moyennes des carrés des écarts de l'analyse de la variance du rendement en grains faite par site et sur chaque traitement hydrique.

Site	Traitement	Bloc	Carré moyen	
			Génotype	Résiduelle
Béni Fouda	$T_0$	0.198 ns	3.418*	0.693
	$T_1$	0.305 ns	2.802*	0.225
Sétif	$T_0$	0.052 ns	1.482*	0.068
	$T_1$	0.723 ns	1.227*	0.293

ns, \* : non significative et significative au seuil 1% respectivement.

En moyenne, le site de Sétif est plus favorable que celui de Béni fouda. Le rendement obtenu à Sétif (moyenne des 2 traitements) qui est de 5.23 t.ha<sup>-1</sup> est plus élevé comparativement à celui de Béni Fouda (4.92 t.ha<sup>-1</sup>).

Dans chaque site expérimental, les génotypes s'expriment mieux en condition favorable que défavorable. En régime irrigué, le rendement moyen en grains est presque similaire dans les deux sites ; 5.88 et 5.90 à Béni Fouda et Sétif respectivement (Tableau III.24). En revanche, en régime sec, la performance des génotypes est moyennement plus élevée à Sétif (4.57 t.ha<sup>-1</sup>) qu'à Béni Fouda (3.96 t.ha<sup>-1</sup>).

**Tableau III.24** : Rendement en grains (t.ha<sup>-1</sup>) fait par site et pour chaque traitement hydrique.

Génotype	Béni fouda		Sétif	
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>
Bousselem	6.01 <sup>a</sup>	7.58 <sup>a</sup>	5.31 <sup>a</sup>	6.52
Dukem	4.76	6.32	4.05	5.65
Mexicali	4.24	6.51	4.39	6.81 <sup>a</sup>
Waha	4.22	6.40	5.59 <sup>a</sup>	6.34
Altar	4.20	5.53	4.65	5.28
Hoggar	3.90	6.36	5.12	6.06
Sooty	3.88	5.46	4.44	5.79
Kucuk	3.72	5.49	3.53 <sup>c</sup>	6.41
Oued Zenati	2.41 <sup>c</sup>	3.99 <sup>d</sup>	3.59 <sup>e</sup>	4.82 <sup>c</sup>
Polonicum	2.31 <sup>c</sup>	5.2	5.02	5.31
<b>Moyenne</b>	3.96	5.88	4.57	5.90
<b>LSD<sub>1%</sub></b>	1.95	1.11	0.61	1.27

Au niveau des génotypes, quelque soit la condition hydrique, on constate qu'Oued Zenati est le génotype le moins performant. Son rendement varie de 2.41 à 3.59 t.ha<sup>-1</sup> en condition sèche et de ; 3.99 à 4.82 t.ha<sup>-1</sup> en condition irriguée. A l'opposé, Bousselem enregistre les meilleures performances. Mais, son rendement en grains est potentiellement plus élevé à Béni Fouda qu'à Sétif. En condition de stress hydrique, son rendement en grains diminue de 6.01 t.ha<sup>-1</sup> (à Béni fouda) à 5.31 t.ha<sup>-1</sup> (à Sétif). Par contre, en absence de stress hydrique (traitement irrigué), son rendement en grains augmente de 6.52 t.ha<sup>-1</sup> (à Sétif) à 7.58 t.h<sup>-1</sup> à (Béni Fouda).

On note aussi, que dans le site de Sétif, le génotype Waha (5.59 t.h<sup>-1</sup>) est très performant en condition de stress. Alors que Mexicali (6.81 t.ha<sup>-1</sup>) s'extériorise mieux en condition favorable. Aussi, il est à noter que Polonicum (2.31 t.ha<sup>-1</sup>), dans le site de Béni Fouda et en régime sec, possède le rendement le plus faible. Mais, il l'améliore sensiblement dans le site de Sétif soit ; 5.2 t.ha<sup>-1</sup> qui est supérieure à la moyenne génotypique dans les mêmes conditions.

### III.2.4 Relation entre les stades phénologiques et le stress hydrique

L'examen des coefficients de corrélations fait ressortir des relations très étroites entre le coefficient de stress ( $K_s$ ), d'une part, et les stades phénologiques.

Dans les deux sites expérimentaux, le coefficient de stress hydrique ( $K_s$ ) est corrélé négativement et significativement avec la durée du cycle de croissance, en condition sèche ( $T_0$ ) et en condition irriguée (Tableau III.25). On note aussi, une corrélation négative et hautement significative entre  $K_s$  et la durée de la maturité dans  $T_0$  ( $r = -0.97$ ) et  $T_1$  ( $r = -0.94$ ). En revanche, la durée du remplissage est associée positivement au coefficient de stress. Dans le site de Béni Fouda, la durée de la floraison est associée de manière positive et significative avec  $K_s$  dans  $T_0$  (0.81) et  $T_2$  (0.72), alors que dans le site de Sétif, la relation est positive en condition de stress (0.48) et presque neutre dans les conditions favorables (-0.05).

Sur la base de ces résultats, Il semble que les génotypes les plus tolérants au stress hydrique sont ceux qui se caractérisent par un cycle végétatifs court, une épiaison précoce, une longue phase de floraison et de remplissage des grains et une maturité précoce. Semcheddine (2008 ; 2012) et Maamri (2011) signalent que les génotypes à cycle de croissance court et à épiaison précoce donnent des rendements plus élevés comparativement aux génotypes à cycle de croissance long et à épiaison tardive.

**Tableau III.25 :** Coefficient de corrélation entre le coefficient de stress hydrique ( $K_s$ ) et la durée des stades phénologiques post épiaison.

Site	Traitement	Cycle de croissance	Floraison	Remplissage	Maturité
Béni Fouda	$T_0$	-0.97**	0.81**	0.57	-0.97**
	$T_1$	-0.95**	0.72*	0.62	-0.94**
Sétif	$T_0$	-0.98**	0.48	0.75**	-0.54
	$T_1$	-0.70*	-0.05	0.37	-0.29

\*, \*\* : significative au seuil 5 et 1%.

### III.2.5 Effet du stress hydrique sur le rendement

L'examen des résultats montre que le rendement en grains des génotypes s'associe linéairement avec leurs coefficients de stress dans chaque site expérimental et pour chaque traitement hydrique (Figure III.17 et III.18).

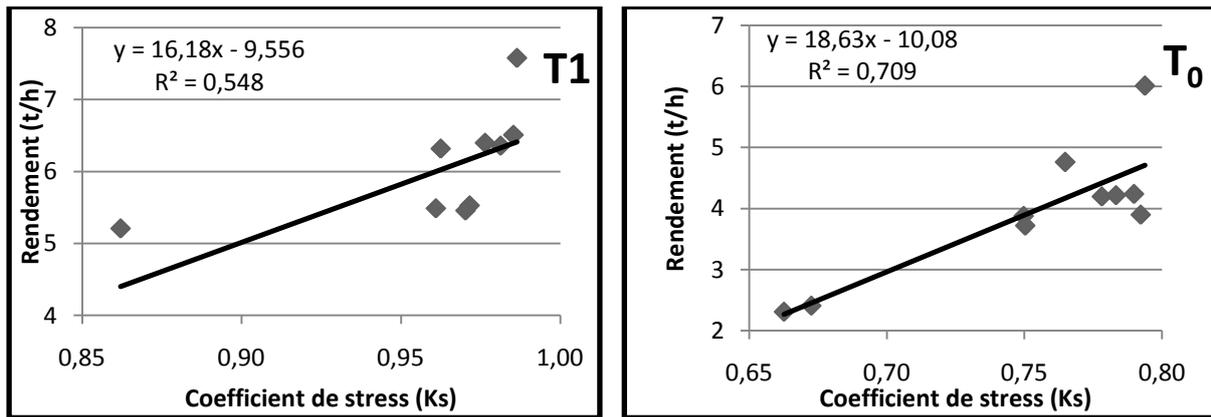


Figure III.17: Relation entre le rendement et le coefficient de stress dans le site de Béni Fouada

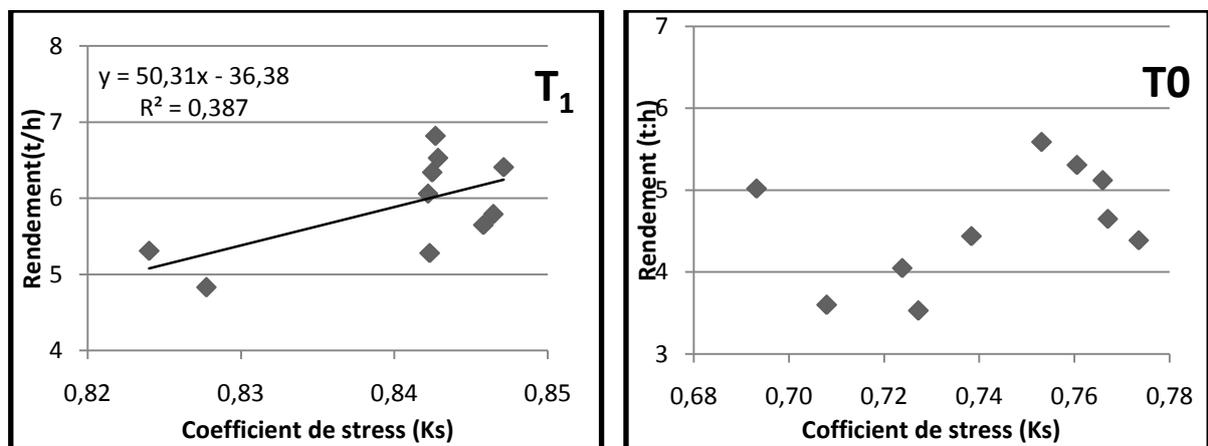


Figure III.18 : Relation entre le rendement et le coefficient de stress dans le site de Sétif

Dans le site de Béni Fouada, une corrélation positive et hautement significative est observée, entre le rendement en grains et le coefficient de stress, dans le traitement pluvial (T<sub>0</sub>) et irrigué (T<sub>1</sub>) avec  $r = 0.84$  et  $0.74$  respectivement (Tableau III.26). De même, dans le site de Sétif, le rendement est corrélé, positivement avec le coefficient de stress, soit  $r = 0.41$  et  $0.63$  dans T<sub>0</sub> et T<sub>1</sub>. Ces résultats confirment que les génotypes moins stressés tels que Bousselem, Mexicali et Hoggar donnent des rendements significativement élevés comparativement aux génotypes plus stressés à savoir Oued Zenati et Polonicum. Ces résultats corroborent ceux de Semcheddine (2008 ; 2012) et Rouabhi (2008) qui ont montré que les génotypes à cycle végétatif long subissent plus de stress que les génotypes précoces.

Tableau III.26 : Coefficient de corrélation entre le rendement et le coefficient de stress

Traitement	Béni Fouada	Sétif
T <sub>0</sub>	0.84**	0.52 <sup>ns</sup>
T <sub>1</sub>	0.74**	0.63*

ns, \*, \*\* : non significatif et significatif au seuil 5 et 1% respectivement

### III.2.6. Validation du modèle *BUDGET* à travers la méthode gravimétrique

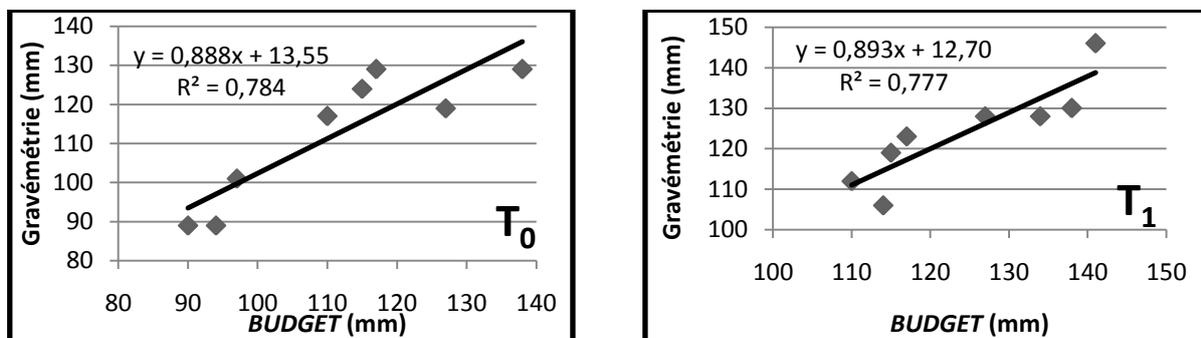
La comparaison entre, la variation de la réserve hydrique du sol, mesurée par la méthode gravimétrique et simulée par le logiciel *BUDGET*, montre une grande similitude entre les deux techniques. Ceci est suggéré par les coefficients de détermination, très élevés, obtenus dans le modèle de la régression linéaire (Figure III.19 et III.20).

Dans le site de Béni Fouda, les valeurs des coefficients de corrélation, entre les méthodes de simulation et gravimétrique sont ;  $r = 0.84$  et  $0.88$  dans le traitement pluvial ( $T_0$ ) et irrigué ( $T_1$ ) respectivement. Aussi, dans le site de Sétif les coefficients de corrélation entre les deux méthodes sont de l'ordre de ;  $0.89$  et  $0.76$ .

Ces résultats sont accord avec les travaux de Raes *et al.*, (2006) qui ont trouvé des relation linéaires, entre la teneur en eau du sol, mesurée par gravimétrie et simulée par le modèle *BUDGET*, en Tunisie (chez le blé) et en Burkina Faso (chez le maïs), dans différentes conditions hydrique et sur plusieurs années.

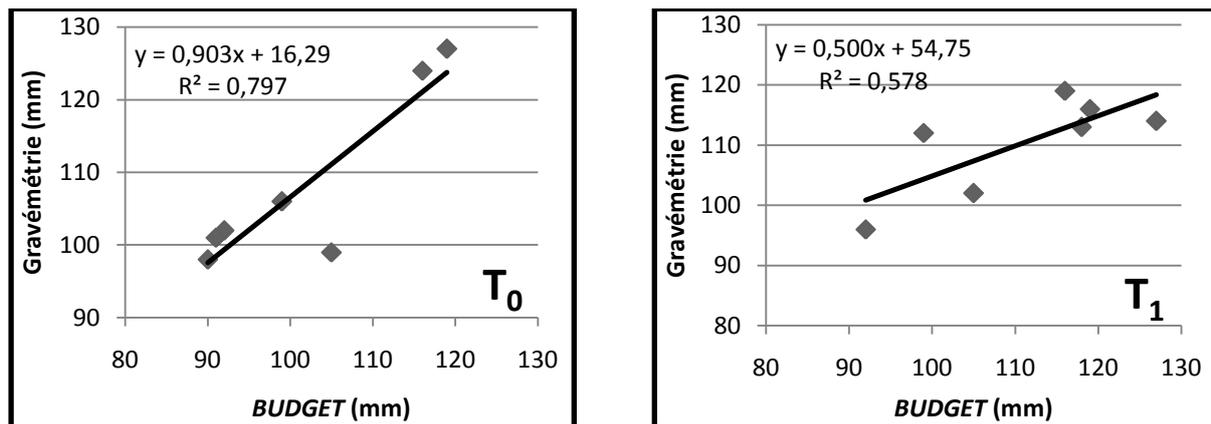
Aussi, Rouabhi *et al.*, (2013), avec le même groupe de génotypes cultivé dans la commune d'Ain Abessa (Sétif, Algérie) et Guendouz (2010) dans la commune de Sétif ont trouvé une corrélation hautement significative, entre les valeurs de l'humidité du sol obtenues, par la méthode gravimétrique et simulée par *BUDGET*. De même, Wellens et Compaore (2004), dans leur expérimentation chez le maïs et le sorgho et Kenjabaev *et al.*, (2013) chez une culture de coton, cultivé en sec et en irrigué, ont trouvé des corrélations significatives entre ces deux techniques.

La très forte corrélation, positive et significative, entre ces deux techniques, laisse penser que, le logiciel *BUDGET* peut servir comme outils pour l'élaboration du bilan et la prédiction du stress hydrique dans les conditions semi arides des hautes plaines Sétifiennes.



**Figure III.19 :** Relation entre la variation de la réserve hydrique du sol mesurée par gravimétrie et simulée par le logiciel *BUDGET* dans le site de Béni Fouda.

---



**Figure III.20 :** Relation entre la variation de la réserve hydrique du sol mesurée par gravimétrie et simulée par le logiciel *BUDGET* dans le site de Sétif.

### III.3. Evaluation de tolérance à la sécheresse par les méthodes non paramétriques

#### III.3.1. Variation du rendement intra et inter-milieu

Les résultats d'analyse de la variance (Tableau III.27), du rendement en grains faite par traitement hydrique et pour chaque site expérimental fait ressortir un effet génotypique hautement significatif ( $p < 0.01$ ). Ces résultats suggèrent l'existence de la variabilité génotypique exploitable par site.

**Tableau III.27.** Analyse de la variance du rendement en grains de chaque traitement hydrique.

Source de variation	ddl	Carré moyen							
		Béni fouda				Sétif		Ain Arnat	
		T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>
<b>Blocs</b>	2	0.198ns	0.080ns	0.628ns	0.305ns	0.052ns	0.723ns	0.090ns	0.226ns
<b>Génotype</b>	9	3.418*	1.620*	6.171*	2.802*	1.482*	1.227*	2.581*	3.456*
<b>Erreur</b>	18	0.693	0.220	0.458	0.225	0.068	0.293	0.104	0.250
<b>Totale</b>	29	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>CV (%)</b>		20.99	10.42	12.80	8.06	5.74	9.17	6.48	8.22

ns et \* : non significative et significative au seuil de 1% respectivement.

L'examen des moyennes du rendement en grains, fait par traitement hydrique, indique des différences de performances entre génotypes, suggérant la possibilité d'une sélection efficace comme le suggère Adjabi, (2011).

En effet, chaque traitement hydrique se spécifie par un groupe de génotypes performants qui le caractérise. Sur les huit traitements hydriques, seul Oued Zenati ne figure pas parmi les génotypes les plus performants. Le reste des génotypes se classe, au moins une

fois, parmi les plus performants, en se positionnant à la tête de classement. Ainsi, Polonicum, Kucuk et Sooty, se classent parmi les génotypes les plus performants un traitement hydrique sur huit, alors que Bousselem y figure par sept fois. Aussi, on note que Mexicali tient la première place par six, fois, Waha et Hoggar par cinq fois, Dukem par trois fois et Altar par deux fois (Tableau. III.28).

Ces résultats indiquent que parmi les 10 génotypes étudiés, 9 génotypes, se caractérisent par un potentiel de rendement qui les classe comme les plus performants. Sauf que l'ordre de classement est lié au traitement hydrique considéré. Ceci qui veut dire que dans le processus de sélection, certains génotypes sont éliminés parce qu'ils ont été évalués dans des environnements qui ne leur sont pas favorables et non pas parce qu'ils ne possèdent pas le potentiel de rendement souhaité. Ainsi la sélection du génotype, dont le rendement intersites ou intra-site est stable, est une sélection pour la tolérance et l'adaptation.

**Tableau III.28 :** Rendement en grains moyen fait par traitement hydrique et combinant l'ensemble des traitements hydriques.

Génotype	Béni fouda				Sétif		Ain Arnat		Moyenne
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	
Bousselem	<u>6.01<sup>a</sup></u>	<u>5.68<sup>a</sup></u>	<u>7.35<sup>a</sup></u>	<u>7.58<sup>a</sup></u>	<u>5.31<sup>a</sup></u>	<u>6.52<sup>ab</sup></u>	5.73 <sup>b</sup>	<u>7.61<sup>a</sup></u>	<u>6.47<sup>a</sup></u>
Dukem	<u>4.76<sup>ab</sup></u>	<u>4.70<sup>abc</sup></u>	5.57 <sup>b</sup>	6.32 <sup>bc</sup>	4.05 <sup>de</sup>	<u>5.65<sup>abc</sup></u>	5.37 <sup>b</sup>	6.03 <sup>cd</sup>	<u>5.30<sup>cd</sup></u>
Mexicali	<u>4.24<sup>abc</sup></u>	<u>5.46<sup>ab</sup></u>	<u>6.54<sup>ab</sup></u>	<u>6.51<sup>ab</sup></u>	4.39 <sup>d</sup>	<u>6.81<sup>a</sup></u>	4.35 <sup>cd</sup>	<u>6.99<sup>abc</sup></u>	<u>5.66<sup>bc</sup></u>
Waha	<u>4.22<sup>abc</sup></u>	<u>4.61<sup>abc</sup></u>	<u>5.68<sup>ab</sup></u>	6.40 <sup>b</sup>	<u>5.59<sup>a</sup></u>	<u>6.34<sup>ab</sup></u>	5.03 <sup>bc</sup>	6.39 <sup>bcd</sup>	<u>5.53<sup>bc</sup></u>
Altar	<u>4.20<sup>abc</sup></u>	<u>4.72<sup>abc</sup></u>	5.40 <sup>b</sup>	5.53 <sup>bc</sup>	4.65 <sup>bcd</sup>	5.28 <sup>bc</sup>	3.85 <sup>d</sup>	6.32 <sup>bcd</sup>	<u>4.99<sup>de</sup></u>
Hoggar	3.90 <sup>bc</sup>	4.40 <sup>bc</sup>	<u>6.20<sup>ab</sup></u>	6.36 <sup>b</sup>	<u>5.12<sup>ab</sup></u>	<u>6.06<sup>abc</sup></u>	<u>6.85<sup>a</sup></u>	<u>7.42<sup>ab</sup></u>	<u>5.79<sup>b</sup></u>
Sooty	3.88 <sup>bc</sup>	4.68 <sup>bc</sup>	5.45 <sup>b</sup>	5.46 <sup>bc</sup>	4.44 <sup>cd</sup>	<u>5.79<sup>abc</sup></u>	4.42 <sup>cd</sup>	5.21 <sup>de</sup>	<u>4.91<sup>de</sup></u>
Kucuk	3.72 <sup>bc</sup>	3.72 <sup>c</sup>	4.89 <sup>b</sup>	5.49 <sup>bc</sup>	3.53 <sup>e</sup>	<u>6.41<sup>ab</sup></u>	5.63 <sup>b</sup>	5.63 <sup>de</sup>	<u>4.87<sup>e</sup></u>
Oued Zenati	2.41 <sup>c</sup>	3.48 <sup>c</sup>	2.71 <sup>c</sup>	3.99 <sup>d</sup>	3.59 <sup>e</sup>	4.82 <sup>c</sup>	4.01 <sup>d</sup>	4.59 <sup>e</sup>	<u>3.70<sup>g</sup></u>
Polonicum	2.31 <sup>c</sup>	3.63 <sup>c</sup>	3.10 <sup>c</sup>	5.21 <sup>c</sup>	<u>5.02<sup>abc</sup></u>	5.31 <sup>bc</sup>	4.56 <sup>cd</sup>	4.64 <sup>e</sup>	<u>4.22<sup>f</sup></u>
<b>Moyenne</b>	<b>3.96<sup>d</sup></b>	<b>4.50<sup>c</sup></b>	<b>5.28<sup>b</sup></b>	<b>5.88<sup>a</sup></b>	<b>4.57<sup>c</sup></b>	<b>5.90<sup>a</sup></b>	<b>4.98<sup>b</sup></b>	<b>6.08<sup>a</sup></b>	<b>5.14</b>
<b>LSD<sub>1%</sub></b>	1.95	1.10	1.59	1.11	0.61	1.27	0.75	1.17	0.40

Le changement de l'ordre de classement des génotypes, selon les différents traitements hydriques, est confirmé par l'analyse de la variance du rendement en grains, effectuée sur l'ensemble des traitements hydriques des trois sites expérimentaux, qui indique une différence hautement significative entre génotypes, entre traitements hydriques et une très forte interaction génotype x traitement hydrique (Tableau III.29).

**Tableau III.29.** Analyse de la variance du rendement combinant les 8 traitements hydriques.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F <sub>obs</sub>
<b>Blocs</b>	2	0.1436743	0.49348ns
<b>Traitement hydrique</b>	7	17.911343	61.52031*
<b>Génotype</b>	9	14.478547	49.72964 *
<b>Traitement x Génotype</b>	63	1.1831752	4.0638665*
<b>Erreur</b>	158	0.2911452	--
<b>Totale</b>	239	--	--
<b>CV (%)</b>		10.47	--

ns et \* : non significative et significative au seuil de 1% respectivement.

En effet, la valeur d'un génotype ne dépend pas seulement de son potentiel génétique mais également de sa capacité à maintenir, à un niveau acceptable, ses performances sous différents environnements.

Les résultats d'analyse de la variance combinée suggèrent que le modèle additif n'est pas adapté pour traiter ces résultats, comme le mentionnent Samonte *et al.*, (2005). Il faut, soit, recourir à des modèles linéaires ou multiplicatifs comme le suggèrent De Lacy *et al.*, (1996) ; soit utiliser les méthodes non paramétriques, basées sur le calcul des indices, comme le préconisent Sabaghnia *et al.*, (2006). En effet, la présence d'une interaction significative signifie que la sélection est à faire par environnement ou bien par groupe d'environnements similaires où l'interaction est non significative, comme le fait remarquer Adjabi, (2011).

### III.3.2. Evaluation des indices de tolérance

Les résultats d'analyse de la variance, des indices de tolérance, ne montrent pas de différence significative, entre génotypes pour les indices S, TOL et YSI. En revanche, une différence génotypique hautement significative est observée pour le reste des indices (Tableau III.30). Ceci suggère la possibilité d'utiliser les indices représentant une variation significative pour évaluer la tolérance à la sécheresse chez les dix génotypes étudiés.

**Tableau III.30.** Analyse de la variance des indices de tolérance au stress.

Source de variation	ddl	S	MP	TOL	STI	GMP	YSI	HMP
<b>Blocs</b>	2	0.034ns	0.105ns	0.428ns	0.008ns	0.069ns	0.004ns	0.053ns
<b>Génotype</b>	9	0.290ns	3.099*	1.353ns	0.227*	3.190*	0.035ns	3.311*
<b>Erreur</b>	18	0.165	0.201	1.085	0.026	0.277	0.020	0.376
<b>Totale</b>	29							

ns et \* = non significative et significative au seuil de 1% respectivement. SSI = indice de la sensibilité à la contrainte, P = indice de la supériorité génotypique, MP = Moyenne des performances, TOL = Tolérance du stress, STI = Indice de tolérance du stress, GMP = moyenne géométrique des performances, YSI = indice du stress du rendement, HMP = moyenne harmonique des rendements.

### III.3.2.1 Les indices S, TOL et YSI

L'indice TOL est indicateur de la minimisation de la perte de rendement entre milieu favorable et contraignant, et YSI mesure la stabilité du rendement, entre ces deux milieux, pour un génotype donné. Alors que, l'indice S mesure la diminution du rendement du génotype, en passant du milieu favorable au milieu défavorable, comparativement à la diminution moyenne observée pour le groupe des génotypes évalués. Le génotype qui minimise cette réduction est plus tolérant au stress. Donc, les génotypes aux faibles valeurs S, TOL et à valeur élevée pour YSI sont tolérants à la contrainte hydrique.

En effet, la différence du rendement entre le milieu défavorable (représenté par le traitement hydrique en sec du site de Béni Fouda) et le milieu favorable (représenté par le site irrigué d'Ain Arnat) est de 2.12 t ha<sup>-1</sup>. La contrainte hydrique réduit le potentiel de rendement de 65%. S varie de 0.56 à 1.44, TOL oscille entre 1.27 et 3.52 et YSI fluctue entre un minimum de 0.50 et un maximum de 0.80 (Tableau.III.31).

**Tableau III. 31. :** Valeurs des indices de tolérance au stress des différents génotypes

Génotypes	Ys	Yf	S	MP	TOL	STI	GMP	YSI	HMP	b
Oued Zenati	2,41	4,60	1,37	3,50	2,19	0,30	3,31	0,52	3,14	0,82
Altar	4,20	6,32	0,95	5,26	2,12	0,71	5,15	0,67	5,04	0,82
Sooty	3,88	5,22	0,74	4,55	1,34	0,55	4,49	0,74	4,44	0,75
Polonicum	2,31	4,65	1,44	3,48	2,33	0,29	3,28	0,50	3,09	0,94
Waha	4,22	6,40	0,93	5,31	2,18	0,72	5,16	0,68	5,02	1,02
Dukem	4,76	6,03	0,56	5,39	1,27	0,77	5,33	0,80	5,27	0,83
Mexicali	4,24	7,00	1,13	5,62	2,76	0,80	5,43	0,61	5,26	1,34
Kucuk	3,72	5,63	0,97	4,68	1,91	0,57	4,57	0,66	4,47	1,22
Hoggar	3,90	7,42	1,34	5,66	3,52	0,77	5,33	0,53	5,03	1,32
Bousselem	6,01	7,62	0,62	6,82	1,60	1,25	6,74	0,78	6,66	0,93
<b>Moyenne</b>	<b>3,97</b>	<b>6,09</b>	<b>1,00</b>	<b>5,03</b>	<b>2,12</b>	<b>0,67</b>	<b>4,88</b>	<b>0,65</b>	<b>1,44</b>	<b>1,00</b>
<b>LSD<sub>1%</sub></b>	<b>1.95</b>	<b>1.17</b>	<b>0.95</b>	<b>1.05</b>	<b>2.44</b>	<b>0.37</b>	<b>1.23</b>	<b>0.33</b>		<b>--</b>

SSI = indice de la sensibilité à la contrainte, P = indice de la supériorité génotypique, MP = Moyenne des performances, TOL = Tolérance du stress, STI = Indice de tolérance du stress, GMP = moyenne géométrique des performances, Ys = rendement en milieu stressant, YSI = indice du stress du rendement, HMP = moyenne harmonique des rendements, Rp = rendement en milieu irrigué.

L'indice S et TOL sont significativement et positivement corrélés ensemble ( $r = 0.77$ ). Aussi YSI est corrélé avec S et TOL mais, de manière négative ( $r_{S-YSI} = -1.00$  et  $r_{TOL-YSI} = -0.77$ ) (Tableau III.32). Les résultats montrent que Bousselem, Dukem et Sooty ont les plus faibles valeurs pour S et TOL et les fortes valeurs pour YSI. A l'opposé, Oued Zenati, Polonicum et Hoggar enregistrent les valeurs les plus élevées de S et TOL et les valeurs les

plus basses pour YSI. Cela suppose que ces indices apportent le même type d'information, en ce qui concerne la tolérance au stress par le biais de la réduction du rendement entre milieu favorable et défavorable. Les indices S et YSI sont significativement corrélés au rendement du milieu favorable ( $r_{S-Yf} = -0.81$  et  $r_{YSI-Yf} = 0.81$ ) et pas de manière significative avec le milieu stressé ( $r_{S-Ys} = -0.32$  et  $r_{YSI-Ys} = 0.32$ ). Pour l'indice TOL, sa relation avec les deux milieux n'est pas significative. Ces résultats indiquent que les indices S et YSI sont aptes à identifier, de manière significative, les génotypes qui tolèrent le stress en milieu favorable et pas de manière significative, dans le milieu contraignant. Il semble que la tolérance au stress est acquise en faveur du potentiel de rendement. Notre travail est en contradiction avec celui de Guendouz (2014), dont les résultats, sur le même groupe de génotypes que le notre, ont montré que l'indice S et YSI sont corrélés négativement et positivement au rendement du milieu contraignant, respectivement, et positivement et négativement au rendement du milieu favorable, respectivement. Aussi, Nos résultats ne sont pas en accord avec ceux de Adjabi (2011) qui a trouvé que les valeurs de S et YSI sont positivement et négativement, respectivement, liées au rendement du milieu favorable, mais pas à ceux du milieu contraignant. Ni avec ceux de Roseille et Hamblin (1981), qui mentionnent que la sélection de faibles valeurs S réduit du potentiel de rendement dans les environnements favorables.

**Tableau III.32** : Coefficients de corrélation entre les indices de tolérance au stress et les rendements

	Yf	Ys	S	MP	TOL	STI	GMP	YSI	HMP	b
<b>Yf</b>	<b>1</b>									
<b>Ys</b>	0,80**	<b>1</b>								
<b>S</b>	-0,81**	-0,32ns	<b>1</b>							
<b>MP</b>	0,95**	0,95**	-0,59ns	<b>1</b>						
<b>TOL</b>	-0,31ns	0,32ns	0,77**	0,01ns	<b>1</b>					
<b>STI</b>	0,97**	0,90**	-0,63*	0,99**	-0,09ns	<b>1</b>				
<b>GMP</b>	0,97**	0,92**	-0,65*	1,00**	-0,07ns	0,99**	<b>1</b>			
<b>YSI</b>	0,81**	0,32ns	-1,00**	0,59ns	-0,77**	0,63*	0,65*	<b>1</b>		
<b>HMP</b>	0,98**	0,89**	-0,70*	0,99**	-0,14ns	0,99**	1,00**	0,70*	<b>1</b>	
<b>b</b>	0,05ns	0,51ns	0,37ns	0,30ns	0,73*	0,20ns	0,24ns	-0,37ns	0,19ns	<b>1</b>

ns, \*et \*\* : non significatif et significatif au seuil 5 et 1% respectivement.

### III.3.2.2 Les indices MP, GMP, HMP et STI

Les indices MP, GMP et HMP font référence à la productivité entre milieu favorable et défavorable pour un génotype donné. Alors que, l'indice STI mesure l'intensité du stress entre ces deux milieux. En sélection, les valeurs élevées de ces indices sont les plus désirables. Ces indices identifient Oued Zenati et Polonicum comme les moins productifs et les plus

susceptibles au stress. Leurs indices respectifs sont : 3.50 et 3.48 pour MP, 3.31 et 3.28 pour GMP, 3.14 et 3.09 pour HMP et 0.30 et 0.39 pour STI. En revanche, Bousselem, Hoggar et Mexicali sont les plus productifs, leur indice MP varie entre 6.82 et 5.66. Les indices GMP et HMP désignent Bousselem et Mexicali comme plus productif et performants, sur l'ensemble du milieu favorable et défavorable. Alors que, l'indice STI les qualifie comme moins susceptibles au stress (Tableau.III.31).

Les valeurs intermédiaires peuvent, cependant, identifier des génotypes moyennement tolérants dont les performances sont en dessus de la moyenne. Les génotypes Dukem, Waha et Altar peuvent être considérés comme moyennement tolérants.

Ces indices sont hautement et significativement corrélés entre eux et entre le rendement du milieu défavorable ( $r_{Ys-MP} = 0.95$ ,  $r_{Ys-STI} = 0.97$ ,  $r_{Ys-GMP} = 0.97$  et  $r_{Ys-HMP} = 0.98$ ) et le rendement du milieu favorable ( $r_{Yf-MP} = 0.90$ ,  $r_{Yf-STI} = 0.97$ ,  $r_{Yf-GMP} = 0.92$  et  $r_{Yf-HMP} = 0.89$ ) (Tableau.III.32). Ces indices apportent relativement le même type d'informations en ce qui concerne la performance de rendement et la tolérance au stress.

Nos résultats sont en accord avec les travaux de plusieurs auteurs qui font référence à des relations positives entre les rendements des environnements favorables et défavorables et les indices MP, GMP, HMP et STI.

Ainsi, chez des génotypes de blé dur ou tendre, cultivés en serre ou en plein champ et en conditions pluviale et irrigué, Talebi *et al.*, (2009), Khakwani *et al.*, (2011), Ahmadizadeh *et al.*, (2012) et Sayyah *et al.*, (2012), signalent l'existence de corrélations positives et significatives entre le rendement en grains du milieu contraignant et favorable et entre les indices ; MP, GMP et STI.

Aussi, chez 9 hybrides de maïs, testés en milieux favorable (irrigué) et défavorable (sec), Tarabideh *et al.*, (2014) ont trouvé des corrélations significatives et positives entre le rendement en grains des deux milieux, d'un côté et de l'autre côté avec les indices ; HMP, MP, GMP et STI.

### III.3.3. Typologie génotypique

La matrice des coefficients de corrélation indique des tendances de similitude entre les différents indices étudiés. Les relations existantes entre les différents indices sont étudiées grâce à une analyse en composantes principales réalisée à partir des valeurs prises par les indices de tolérances des génotypes (Figure III.21).

Les deux premières composantes principales expliquent 99.59% (86.92 et 12.67% pour les facteurs 1 et 2 respectivement) de la variation totale (Tableau III.33). Ceci suggère que toute la variation peut être expliquée, uniquement par les deux premiers facteurs.

**Tableau III.33** : Coefficients de corrélation entre les indices de tolérance et les facteurs de l'ACP

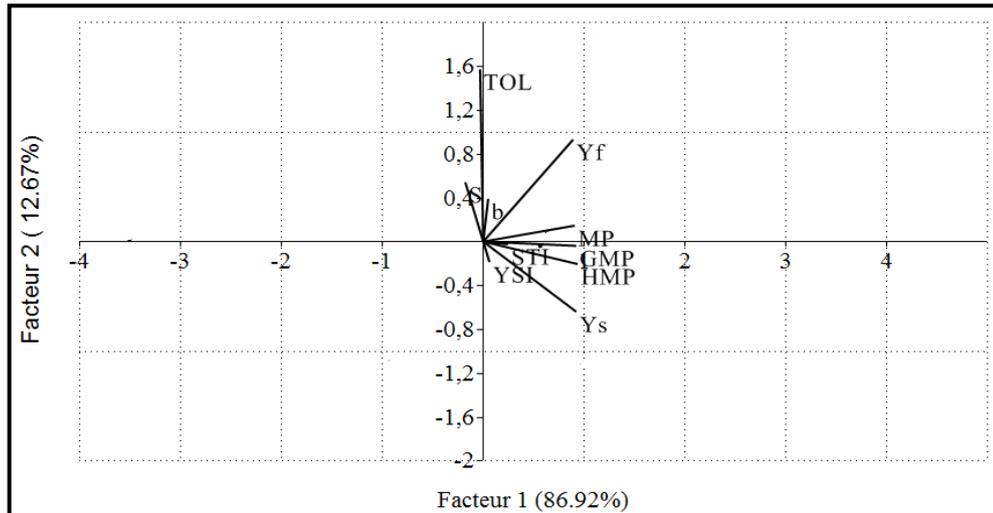
	<b>Composante</b>	<b>Facteur 1</b>	<b>Facteur 2</b>
	<b>Proportion de la variation totale (%)</b>	<b>86,92</b>	<b>12,67</b>
<b>variables</b>	<b>Ys</b>	0,967	-0,256
	<b>Yf</b>	0,929	0,371
	<b>S</b>	-0,639	0,741
	<b>MP</b>	0,998	0,061
	<b>TOL</b>	-0,052	0,998
	<b>STI</b>	0,989	-0,037
	<b>GMP</b>	1,000	-0,016
	<b>YSI</b>	0,641	-0,740
	<b>HMP</b>	0,996	-0,083
	<b>b</b>	0,251	0,763

Le biplot des variables (Figure III.21) groupe les indices selon le degré de similitude en ce qui concerne l'information apporté au sujet de la tolérance vis à vis des stress et le potentiel de rendement en grains.

L'axe principal 1 (PCA1) peut être qualifié comme axe de potentiel de rendement, de tolérance et de stabilité parce qu'il est hautement et positivement corrélé au rendement des deux milieux favorable (Yf) et défavorable (Ys), aux indices de productivité MP, GMP et HMP et aux indices STI et YSI. La tolérance, dans ce cas présent, reflète la stabilité agronomique.

En revanche, l'axe principal 2 (PCA2), regroupe le rendement en milieu favorable (Yf) avec les indices S et TOL qui s'oppose, sur le même axe, au rendement de milieu stressé (Ys) et à l'indice YSI.

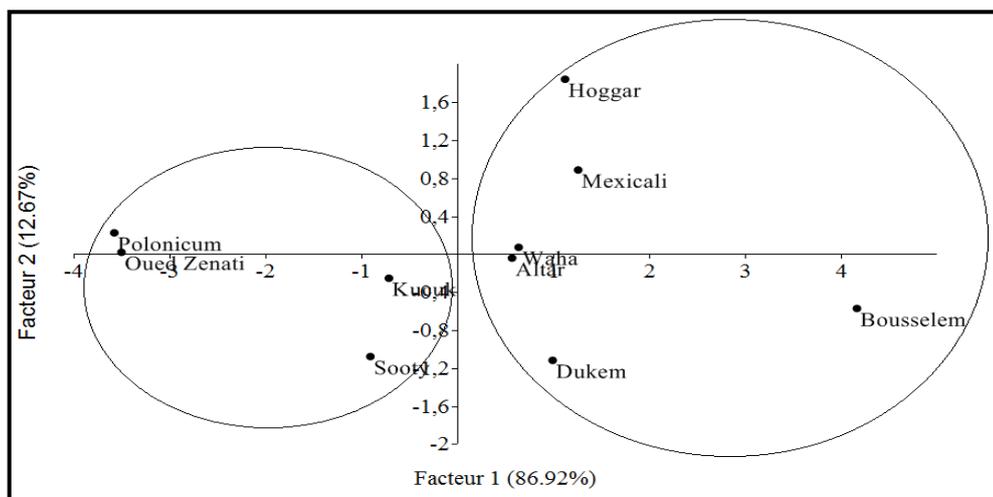
---



**Figure III.21.** Projection des indices de tolérance selon les 2 axes principaux.

Le biplot des individus (Figure III.22) groupe les génotypes selon leur degré de similitude, sur la base des indices de tolérance au stress et selon leur potentiel de rendement.

Tout au long de l'axe 1, se regroupent les génotypes qui ont un potentiel de rendement élevé et qui tolèrent le stress. Il s'agit de ; Bousselem, Dukem, Mexicali, Waha, Altar et Hoggar. Par opposition, sur le même axe, se regroupent les génotypes ; Oued Zenati, Polonicum, Sooty et Kucuk, qui se caractérisent par un faible potentiel de rendement et qui sont sensibles au stress. L'axe 2 identifie Mexicali et Hoggar comme Tolérants et performants en milieu favorable, contrairement à Bousselem, Dukem et Sooty, qui les désignent comme tolérants mais performant en milieu défavorable.

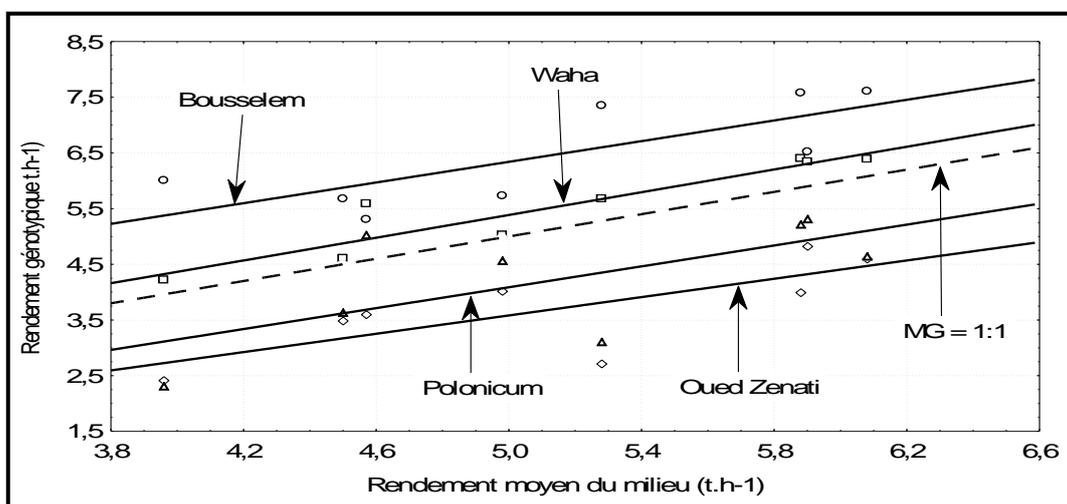


**Figure III.22.** Similitude des génotypes selon le potentiel du rendement et les indices de tolérances au stress.

Le sélectionneur, dans sa quête pour l'adaptation à la sécheresse, est toujours à la recherche, d'un idiotype à savoir ; génotype à fort potentiel de rendement et mieux encore, stable. Il s'agit donc, de génotype performant en environnement favorable mais aussi, en milieu défavorable de la région ciblée par la sélection, surtout si cette région est assujettie à une variation spatio-temporelle (année ou milieu) du stress.

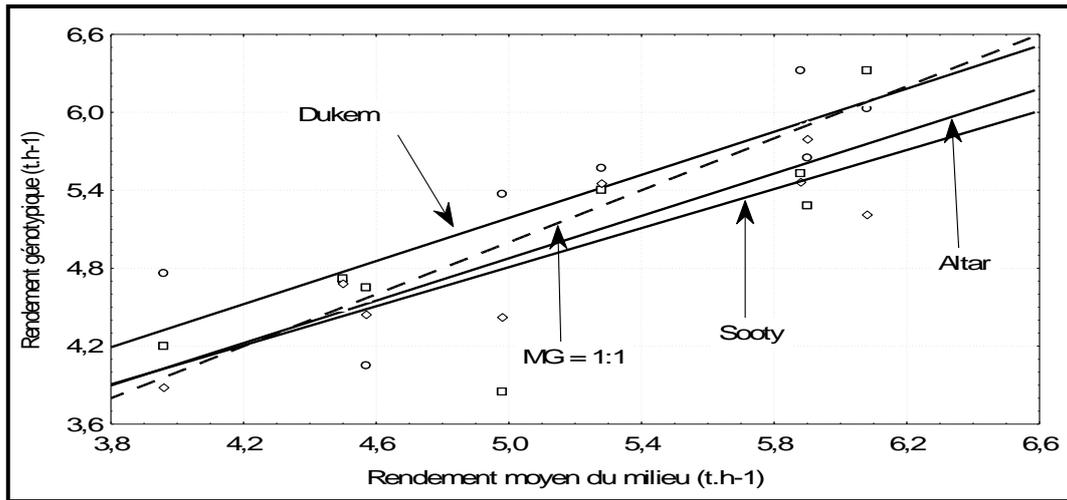
L'étude des performances de rendement sur l'ensemble des trois sites expérimentaux (Béni Fouda, Sétif et Ain Arnat) et pour tous les traitements hydriques (8 traitements), à travers l'analyse des courbes de tendance du rendement de chaque génotype, relativement à la courbe des moyennes de rendement de l'ensemble des génotypes, fait ressortir une très forte variabilité génotypique pour la performance et la stabilité du rendement.

En termes de similitude de la stabilité du rendement, Bousselem, Waha, Polonicum et Oued Zenati sont les génotypes les plus stables (Figure III.23). Mais, on note que Bousselem et Waha sont des génotypes performants en condition favorable et défavorable, ils appartiennent au groupe 'A', alors que Polonicum et Oued Zenati ne performent dans aucun milieu, ils appartiennent au groupe 'D'. Alors que le reste des génotypes est considéré comme instable.

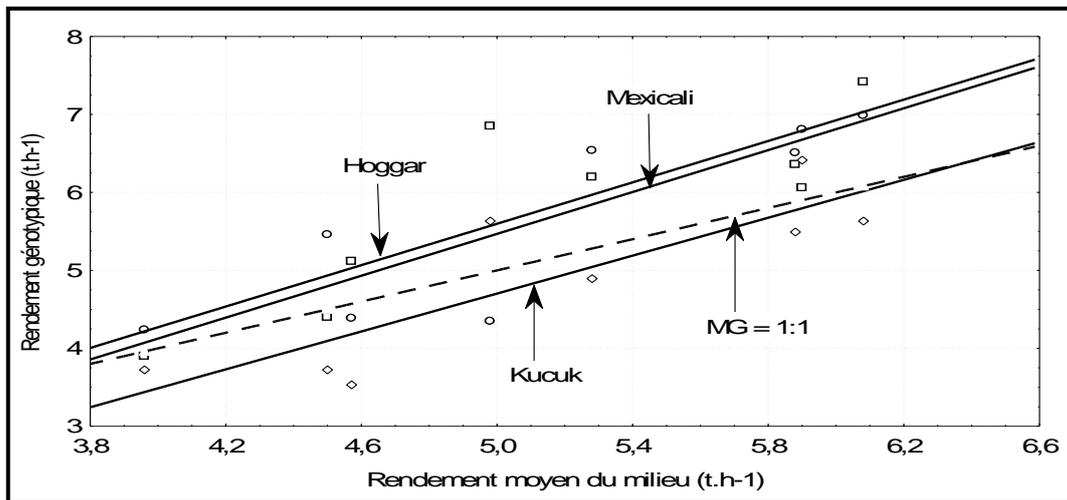


**Figure III. 23** : Tendence des performances et de stabilité des génotypes du groupe 'A et D'

En effet, les résultats (Figure III.24) montrent que Dukem, Altar et Sooty valorisent le milieu défavorable mais avec des performances faibles en milieu favorable, ils appartiennent au groupe 'C'. Mexicali et Hoggar sont très performants en milieu favorable mais valorisent aussi le milieu stressé, ainsi que Kucuk, moins performant dans le milieu contraignant et qui a tendance à être performant en condition favorable, ces génotypes appartiennent au groupe 'B' (Figure III.25)



**Figure III. 24 :** Tendance des performances et de stabilité des génotypes du groupe 'C'



**Figure III. 25 :** Tendance des performances et de stabilité des génotypes du groupe 'B'

## **Conclusion**

La culture du blé dur au niveau de la zone des hautes plaines est confrontée à plusieurs contraintes abiotiques qui sont les causes principales de la faiblesse des rendements et l'irrégularité de la production (Mekhlouf, 2009). Dans cette zone, la sélection de génotypes, de blé dur tolérants et performants, est un objectif important dans les programmes de sélection (Oulmi *et al.*, 2014). Dans de tels environnements, les essais multi-sites et multi-saisons sont généralement conduits pour analyser l'amplitude de l'interaction génotype x environnement rencontrée (Adjabi *et al.*, 2007).

La production du blé dur, en conditions défavorables, peut être augmentée par une amélioration génétique ou par une meilleure maîtrise des techniques culturales.

L'adoption d'une nouvelle technique en zone de stress est limitée surtout par l'attitude négative des agriculteurs qui ne voient toujours que les charges que cela encourt (Benbelkacem, 1997).

L'adoption de nouveaux cultivars mieux adaptés aux conditions défavorables est mieux acceptée par les agriculteurs, parce qu'elle ne coûte pas chère et représente la technologie la plus facile à transférer (Ceccarelli et Grando, 1989).

Mais, il est difficile de faire un progrès quelconque, lorsque les stress qui entravent la croissance de la plante augmentent en fréquence et en intensité, et surtout, lorsqu'ils sont imprévisibles parce qu'ils sont de nature intermittente, pouvant se manifester à n'importe quel stade de développement du blé dur. Néanmoins, la nature a doté la plante de mécanismes qui lui permettent de tolérer les stress prévalant, à des degrés variables. L'exploitation de cette diversité peut déboucher sur une meilleure adaptation au milieu associée à la régularité des rendements.

Les résultats de cette étude montrent que le stress hydrique réduit le rendement en grains du blé dur et affecte toutes les composantes du rendement chez tous les génotypes étudiés. Ceci est confirmé par les résultats obtenus par comparaison entre, les parcelles conduites en sec et celles conduites en irrigué.

En effet, dans les trois sites expérimentaux, l'irrigation au stade épiaison augmente significativement le rendement en grains entre 22 à 48%.

---

Dans le site expérimental de Béni Fouda, le déficit hydrique au stade gonflement diminue significativement le peuplement et la fertilité des épis. Parmi les génotypes étudiés, Bousselem est le plus performant pour le rendement en grains et le poids de mille grains ; Dukem, Mexicali, Waha et Hoggar présentent un nombre plus élevé d'épis/m<sup>2</sup> tandis que Sooty a un nombre élevé de grains par épi. Malgré un PMG élevé, Oued Zenati et Polonicum sont les génotypes qui ont donné le plus faible rendement, ils se caractérisent par un faible nombre ; d'épis/m<sup>2</sup>, de grains/m<sup>2</sup> et de grains/épi.

Les résultats montrent que le rendement en grains présente des corrélations significatives et positives avec le nombre d'épis/m<sup>2</sup>, le nombre de grains/m<sup>2</sup>, la durée de remplissage des grains, la teneur relative en eau et le poids spécifique foliaire, mesuré au stade de remplissage des grains.

Cependant, on a enregistré des corrélations significatives et négatives avec les degrés-jours à l'épiaison et avec le poids spécifique foliaire, mesuré au stade épiaison. Egalement, la teneur en chlorophylle, mesuré à différents stades de croissance a montré une corrélation négative avec les degrés-jours à l'épiaison.

Ces résultats indiquent que les génotypes qui se caractérisent par un cycle végétatif court, une précocité à l'épiaison, une longue durée de remplissage des grains, une teneur élevée en chlorophylle, une forte teneur relative en eau et un faible poids spécifique de la feuille étendard, de bons peuplement d'épis et un nombre élevé de grains par unité de surface, sont les plus performants pour le rendement grain.

A travers ces constats, Il est probable, que les génotypes précoces arrivent à esquivier le stress hydrique de fin de cycle tout en étant plus tolérants à la sécheresse grâce à leur potentiel hydrique élevé qui leurs confer une meilleure activité photosynthétique et une plus grande remobilisation des assimilâts du chaume vers le puits comme le suggère Blum (1998).

En effet, les résultats acquis en matière d'amélioration génétique pour la tolérance à la sécheresse montre les difficultés de sélectionner pour le rendement, ce qui a conduit les chercheurs à développer des approches plus analytiques et plus explicatives basées sur le principe de caractères phéno-morpho-physiologiques de tolérance à la sécheresse chez les variétés productives. Cette dernière approche montre que l'utilisation de ces caractères, comme critères de sélection indirecte dans les programmes d'amélioration génétique, peut être considérée comme une approche efficace (Hafsi, 2001).

---

Les résultats obtenus à travers la simulation du bilan hydrique par le modèle *BUDGET* montrent que le stress hydrique peut se manifester à n'importe quel stade de croissance des génotypes avec des occurrences, des durées et des intensités très variables. A travers cette simulation, on note que :

- Il existe une grande variabilité génétique à l'échelle phénologique au sein de ce groupe de génotypes surtout pour les stades épiaison et floraison.
- Quelque soit l'environnement, le déficit hydrique n'est pas dû à un manque d'évaporation du sol, mais à un déficit de transpiration des génotypes.
- Le stress hydrique terminal a le plus d'impact sur le rendement en grains.
- En milieu favorable ou défavorable, Polonicum et Oued Zenati sont potentiellement et réellement qui transpirent le plus. Alors que, Bousselem et Mexicali possèdent la plus faible transpiration potentielle et réelle. Mais, l'écart entre transpiration potentielle et réelle, chez ces derniers, est moins important comparativement aux premiers génotypes.
- La très forte corrélation, positive et significative entre la réserve hydrique du sol mesurée par la technique gravimétrique et de simulation, laisse penser que, le logiciel *BUDGET* peut servir comme outils pour l'élaboration du bilan hydrique et la prédiction du stress hydrique (fréquences, durées, intensités).

En région semi aride des hautes plaines Sétifiennes, l'utilisation des méthodes non paramétriques, en sélection, pour la tolérance à la sécheresse chez le blé dur, a fait l'objet de nombreux travaux (Benmahammed *et al.*, 2010 ; Adjabi, 2011 ; Guendouz *et al.*, 2012<sup>b</sup> et 2012<sup>c</sup>).

Concernant nos résultats sur l'évaluation de la tolérance à la sécheresse à travers l'utilisation des indices liés à la contrainte hydrique, l'analyse de la variance, a montré des différences hautement significatives, entre génotypes pour les indices de ; la sensibilité à la contrainte hydrique (STI), la productivité moyenne (MP), la moyenne géométrique de la productivité (GMP) et la moyenne harmonique de productivité (HMP), ceci suggère la possibilité de les utiliser pour évaluer la tolérance à la sécheresse chez les génotypes de blé dur.

---

MP, GMP et HMP, qui mesurent la productivité des milieux favorable et contraignant et l'indice STI qui mesure l'intensité du stress entre ces deux environnements, sont hautement et significativement corrélés entre eux et entre le rendement du milieu favorable et défavorable. Il semble donc, qu'ils apportent relativement le même type d'informations en ce qui concerne la performance de rendement et la tolérance au stress.

L'étude typologique, basée sur ces indices, identifient Bousselem, Hoggar et Mexicali comme performants et tolérants à la sécheresse comparativement à Oued Zenati et Polonicum, moins productifs et plus susceptibles au stress. Les géotypes Dukem, Waha et Altar sont moyennement tolérants dont les performances sont en dessus de la moyenne.

Le recours à l'étude de la stabilité des performances est un moyen qui permet de classer les géotypes selon leurs degrés de stabilité et de performance (Benmahammed *et al.*, 2010).

Ainsi, nos résultats d'étude de la stabilité et de la performance du rendement en grains, obtenus sur la base des performances de chaque géotypes, dans chaque traitement hydrique et pour l'ensemble des sites expérimentaux, ont permis de distinguer :

- Bousselem et Waha comme géotypes stables et performants quelque soit l'environnement.
- Polonicum et Oued Zenati comme géotypes stables et non performants quelque soit l'environnement.
- Dukem, Altar et Sooty comme géotypes instables avec une tendance à être performants en milieu défavorable qu'en milieu favorable,
- Mexicali, Hoggar ainsi que Kucuk, comme géotypes instables et performants en milieu favorable tout en valorisant le milieu contraignant.

Ce travail a permis de décrire le comportement d'un groupe de géotypes vis-à-vis de la tolérance à la sécheresse, à travers quelques critères phéno-morpho-physiologiques et agronomiques et de faire une typologie génotypique sur la base de la performance et de la stabilité du rendement en grains. La connaissance des milieux est très importante pour comprendre l'adaptation. L'utilisation du modèle de simulation du bilan hydrique a permis de mieux caractériser la variable hydrique. Pour conclure, on peut dire que ces premiers résultats peuvent contribuer à l'enrichissement des connaissances dans ce domaine de recherche.

---

## Références

### **-A-**

1. **Acevedo**, E. 1991. Improvement of winter cereal crops in Mediterranean environments. Use of yield, morphological and physiological traits. In Acevedo, E. (ed): Physiology-Breeding of Winter Cereals for Stressed Mediterranean Environments. Le Colloque No. 55, pp 273–305, INRA, Paris.
2. **Adjabi**, A. 2011. Etude de la tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux stress abiotiques sous climat méditerranéen. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. ENSA, El-Harrach, Alger, 130 p.
3. **Adjabi**, A, Bouzerzour H, Benmahammed, A. 2013. Stability Analysis of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Grain Yield. Journal of Agronomy. 13 (3) : 131-139.
4. **Adjabi**, A, Bouzerzour H, Lelarge C, Benmahammed, A, Mekhlouf A, Hanachi A, 2007. Relationships between grain yield performance, temporal stability and carbon isotope discrimination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under Mediterranean conditions, Journal of Agronomy, 6 (2) : 294-301.
5. **Ahmadizadeh**, M., Valizadeh, M., Shahbazi, H., Nori, A. 2012. Behavior of durum wheat genotypes under normal irrigation and drought stress conditions in the greenhouse. African Journal of Biotechnology. 11(8) : 1912-1923.
6. **Akıncı**, Ş., Lösel, D.M. 2012. Plant water-stress response mechanisms, water stress," I. Md. and M. Rahman, Eds., Water Stress, Intech Europe, 15-42.
7. **Aldesuquy**, H.S., Ibraheem, F.I., Gahnem, H.E. 2014. Comparative Morpho-Biochemical Responses of Wheat Cultivars Sensitive and Tolerant to Water Stress. Journal of Stress Physiology & Biochemistry, 10(2) : 168-189.
8. **Al Hakimi**, A. 1992. Evolution de la variabilité génétique des caractères d'adaptation à la sécheresse chez les espèces primitive (sauvages et cultivées) de blé tétraploïde. Thèse DEA Montpellier, 186p.
9. **Allen**, R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation & Drainage Paper No. 56. Rome, Italy. 300 p.
10. **Almeselmani**, M., Abdullah, F., Hareri, F., Naaesan, M., Ammar, M. A., Zuher Kanbar, O. 2011. Effect of Drought on Different Physiological Characters and Yield Component in Different Varieties of Syrian Durum Wheat. Journal of Agricultural Science, 3(3) : 127-133. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v3n3p127>
11. **Amokrane**, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Djekoun, A. 2002. Caractérisation des variétés locales, syriennes et européennes de blé dur évaluées en zone semi-aride d'altitude. Sciences et Technologie, numéro spécial D, 33-38.
12. **Annichiarico**, 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. Agro. 24:70-81.
13. **Anonyme**, 2004. [http://hypergeo.free.fr/article.php3?id\\_article=29](http://hypergeo.free.fr/article.php3?id_article=29).
14. **Anonyme**, 2013. Marché du blé dur : Analyses et perspectives. Marché du blé dur > Monde, Europe, France. Les études de France Agri Mer. 48 p.
15. **Araus**, J.L., Alegre, L., Ali Dib, T., Benlaribi, M., Monneveux, P. 1991. Epidermal and stomatal conductance in seedlings of durum wheat landraces and varieties. In: Physiology Breeding of winter cereals for stressed Mediterranean environments. Les colloques 55, 225-242.
16. **Araus**, J.L., Villegas, D., Aparicio, N., Garcia del Moral, J.L.F., El Hani, S., Rharrabti, Y., Ferrio, J.P., Royo, C. 2003. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions. Crop Science 43 : 170–180.
17. **Arles**, Mas.Gand. 1986. Blé dur, ABADD, ITCF. In Madi S., Louaïl, K. 1995. Comportement de trois variétés locales et améliorées de blé dur (*Triticum durum* Desf.) vis à vis d'une irrigation d'appoint dans les hautes plaines Sétifiennes. Mémoire d'ingénieur d'Etat UFA Sétif.
18. **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. Science et changements planétaires / Sécheresse. 17(4) : 499-505.

### **-B-**

19. **Bahieldin**, A., Mahfouz, H.T., Eissa, H. F., Saleh, O. M., Ramadan, A. M., Ahmed, I. A., Madkour, M. A. 2005. Field evaluation of transgenic wheat plants stably expressing the HVA1 gene for drought tolerance. Physiologia Plantarum, 123 : 421-427. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00470.x>
20. **Bahlouli**, F., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Hassous, K.L. 2005. Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi arid conditions. Pakistan Journal of Agronomy 4:360-365.
21. **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. Biotechnol. Agron. Soc. Environ, 12(1) : 31-39.
22. **Barrs**, H. D., Weatherley, P. E. 1962. Re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. Australian Journal of Biological Sciences, 24 : 519-570.

23. **Belhassen, E., This, D., Monneveux, P.** 1995. L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. Cahiers Agricultures. 4 : 251 – 61.
  24. **Ben Naceur, M., Gharbi, M.S., Paul, R.** 1999. L'amélioration variétale et les autres actions contribuant à la sécurité alimentaire en Tunisie en matière de céréales. Sécheresse ; 10 : 27-33.
  25. **Benbelkacem, A., Saldi, F., Brinis, L.** 1993. La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie. In « Option Méditerranéenne », Série A : séminaire de blé dur dans la région méditerranéenne. N°22 DIPONZO N., KAAN F., NACHIT M., Ed. : CIHEAM. Espagne. 17-19 Novembre 1993. 271 p.
  26. **Benbelkacem, A.** 1997. Etude de l'adaptation variétale des céréales cultivées en Algérie sous différente condition agroclimatiques. Céréaliculture. 31 : 17-31.
  27. **Bencherif, S.** 2011. L'élevage pastoral et la céréaliculture dans la steppe algérienne. Évolution et possibilités de développement. Thèse de doctorat. L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech). 294 p.
  28. **Benlaribi, M., Monneveux, P., Grignac, P.** 1991. Etude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur. Agronomie 10 : 305-322.
  29. **Benmahammed, A., Djekoune, A., Bouzerzour, H., Hassous, K.L.** 2005. Genotype x year interaction of barley grain yield and its relationship with plant height, earliness and climatic factors under semi-arid growth conditions. Dirasat, Agricultural Sciences 32 : 239-247.
  30. **Benmahammed, A., Nouar, H., Haddad, L., Laala, Z., Oulmi, A., Bouzerzour, H.** 2010. Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2010 14(1) : 177-186
  31. **Bensemmane, L.** 2004. Contribution à l'étude de la cinétique d'accumulation et répartition de la matière sèche chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Mémoire de magister, Faculté des sciences, UFA Sétif, 80p.
  32. **Bernard, R.** 2006. L'eau et la vie. (éd).Dauphin. Paris : 13-59.
  33. **Black, M.** 1970. Drying and the onset of germinability in developing wheat grains cereal.res-commun 8:151-156.
  34. **Blady, C.** 1993. Effets du climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en méditerranée occidentale. Relationships with osmotic potential, carbon isotop ratio and grain yield. In tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale. (Monneveux, P & Benselam, M. eds.). Colloque 55 : 83-99 INRA ed , Paris.
  35. **Blaney, H.F., Criddle, W.D.** 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conserv. Serv. SCS-TP96. 44 p.
  36. **Blum, A.** 1988. Plant Breeding for Stress Environments. CRC. Press Inc. Florida, USA. 223 p.
  37. **Blum, A.** 1989. Osmotic adjustment and growth of barley genotypes under drought stress. Crop Sci . 29 : 230-233.
  38. **Blum, A.** 1996. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. Plant Growth Regulation, 20 : 135-148.
  39. **Blum, A.** 1998. Improving wheat grain yield under stress by stem reserve mobilization. Euphytica, 100 : 77-83.
  40. **Blum, A.** 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential – are they compatible, dissonant, or mutually exclusive. Aust. J. Agric. Res. 56 : 1159–1168.
  41. **Bolot, S., Abrouk, M., Masood-Quraishi, U., Stein, N., Messing, J., Feuillet, C., Salse, J.** 2009. The 'inner circle' of the cereal genomes. Current opinion in plant biology, 12(2) :119–125.
  42. **Bonjean, A., Picard, E.** 1991. Les céréales à paille. Origine-histoire-économie-sélection. Ligugé ; Poitiers : Aubin imprimeur.
  43. **Bootsma, A., Boisvert, J.B., Dejong, R. Baier, W.** 1996. La sécheresse et l'agriculture canadienne. Sécheresse. 277 - 285.
  44. **Bos, M.G.** 1985. Summary of ICID definitions on irrigation efficiencies. In : Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11-14 septembre 1984. Paris : Institut national de la recherche agronomique, 889-99.
  45. **Bousslama, M., Schapaugh, W.T.** 1984. Stress tolerance in soybean. Part 1 : evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. Crop Sci. 24 : 933–937.
  46. **Boutfirass, M., Karrou, M., El-Mourid, M.** 1994. Irrigation supplémentaire et variétés de blé dans les zones semi-arides du Maroc. Dans : Actes de la Conférence sur les Acquis et Perspectives de la Recherche Agronomique dans les Zones Arides et Semi-arides du Maroc, (éds), Rabat, 24-27 mai 1994.
  47. **Bouthiba, A., Debaeke, P.** 2009. Besoins en eau de différentes variétés de blé dur en conditions semi-Arides. Symposium international "Agriculture durable en région méditerranéenne (AGDUMED), Rabat, Maroc, 14-16 Mai 2009. 188-195.
-

48. **Bouzerzour, H.** 1998. Sélection pour le rendement, la précocité à l'épiaison et la biomasse aérienne chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semis aride. Thèses Doctorat d'Etat, Université Mentouri Constantine, Algérie.
49. **Bouzerzour, H., Dekhili M.** 1995. Heritability, gain from selection and genetic correlation for grain yield of barley grown in two contrasting environments. *Field Crop Research* 41:173-178.
50. **Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Makhoulouf, A., Harzallah, D.** 1998. Evaluation de quelques techniques de sélection pour la tolérance au stress chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride d'altitude. *Céréaliculture*. 33 : 27-33.
51. **Boyer, J.S.** 1982. Plant productivity and environment. *Sci, New series*. 218 : 443-448.
52. **Brinis, L.** 1995. Effet du stress hydrique sur quelques mécanismes morpho physiologiques et biochimiques de traits d'adaptation et déterminisme génétique chez le blé dur (*Triticum.durum* Desf.). Doctorat d'Etat en Sciences. Département de Biologie végétale, Institut des Sciences de la Nature, Université de Annaba, 156 p.
53. **Brochet, P., Gerbier, N.** 1974. L'évapotranspiration. Aspect agro météorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie n°65 de la Météorologie Nationale ; 95 p.

**-C-**

54. **Calderini, D. F., Dreccer, M. F., Slafer, G. A.** 1995. Genetic improvement in wheat yield and associated traits. A re-examination of previous results and the latest trends. *Plant Breeding*, 114 : 108-112.
55. **Cao, W., Moss, D. N.** 1989<sup>a</sup>. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci*, 29 : 1018-1021.
56. **Cao, W., Moss, D. N.** 1989<sup>b</sup>. Day length effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci*, 29 : 1021-1025.
57. **Cartelle, J., Pedro, A., Savin, R., Slafer, G.A.** 2006. Grain weight responses to post-anthesis spikelet-trimming in an old and a modern wheat under Mediterranean conditions. *Europ. J. Agronomy*, 25 : 365-371.
58. **Ceccarelli, S., Grando, S.** 1989. Efficiency of empirical selection under stress conditions in barley. *Journal of Genetic Breeding*. 43: 25-31.
59. **Chang, J.H.** 1965. Étude de l'évapotranspiration et du bilan hydrique. *Erdkunde Dtsch* ; 19 : 41-150.
60. **Charles, M.** 2010. Évolution des génomes du blé (genres *Aegilops* et *Triticum*) au sein des *Poaceae*. Dynamique rapide de l'espace occupé par les éléments transposables et conservation relative des gènes. Thèse de Doctorat en sciences de l'université d'Évry-Val d'Essonne. France 149 p.
61. **Chen, F., Dudhia J.** 2001. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I. Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129: 569-585.
62. **Chenafi, H., Bouzerzour, H., Aidaoui, A., Saci, A.** 2006. Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. *Asian Journal Plant Sci.*, 5 : 854-860.
63. **Chennafi, H., Bouzerzour, H. Aidaoui, A.** 2008. Positionnement des exigences en eau de la culture du blé avec l'avènement du déficit climatique en milieu semi-aride des Hautes Plaines Sétifiennes (Algérie). In : *Proceedings of the 5th international conference on land degradation*. Valenzanos, Bari, Italy. 18-22 Septembre 2008 : 56-62.
64. **Choisnel, E.** 1992. L'analyse spatiale du bilan hydrique en agroclimatologie. *La Météorologie* ; 8e série : 31-42.
65. **Colombani, J., Lamagat J. P., Thibaux, J. P.** 1973. Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la methode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *hydrol. Sci. J.*, 18: 197-235.
66. **CoStat**, 2008. Version 6.400 copyright<sup>(c)</sup> 1998-2008 cohort software 798 lighthouse Ave .PMB320, Mentery CA, 93940, USA.
67. **Curtis, B.C.** 2002. Wheat in the world. In Curtis, B.C., Rajaram, S., Macpherson, H.G. eds, *Bread wheat improvement and Production*. 567 p.

**-D-**

68. **Damagnez, J.** 1975. Economie de l'eau en zone aride : utilisation des eaux de surface. Le développement des zones arides. *Options Méditerranéennes* ; n. 28. Paris : CIHEAM. 35-41.
  69. **De Lacy, I.H., Basford, K.E., Cooper, M., Bull, G.K., Mc Loren, C.G.** 1996. Analysis of multi-environment data. An historical perspective. In : M. Cooper & G.L. Hammer, Eds. *Plant adaptation and crop improvement*, .39-124, Wallingford, U.K., CABI.
  70. **Debaeke<sup>a</sup>, P., Cabelguenne, M., Casals, M.L., Puech, J.** 1996. Élaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d'un modèle de simulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydrique et azotée variées : Epic phase-blé. *Agronomie* ; 16 : 25-46.
-

71. **Debaeke<sup>b</sup>**, 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.
72. **Dencic**, S., Kastori, R., Kobiljski, B., Duggan, B. 2000. Evaluation of grain yield and its components in wheat cultivars and landraces under near optimal and drought conditions. *Euphytica*. 113 : 43-52.
73. **Denge**, X. P., Shan, L., Inanaga, S., Inoue, M. 2005. Water saving approaches for improving wheat production. *J. Sci. Food Agric*. 85 : 1379-1388.
74. **Deumier**, J. 1987. Bilan de quelques années d'irrigation du blé. *Perspectives agricoles*. n° 114.
75. **Diamond**, J. 2002. Evolution, consequences and future of plant and animal domestication. *Nature*, 418(6898) :700-707.
76. **Doorenbos**, J., Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. No. 33. Rome, Italy
77. **Dyer**, J.A. 1984. Monitoring drought for grazing land management's. *J Soil Water Conserv* ; 39 : 176-8.

**-E-**

78. **Eagleman**, J.R. 1967. Pan Evaporation, Potential and Actual Evapotranspiration. *J. Appl. Meteor*. 6 : 482-488.
79. **Ehdaie**, B., Alloush, G.A., Madore, M. A., Waines, J.G. 2006. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat : I. Postanthesis changes in internode dry matter. *Crop Sci*. 46 : 735-746.
80. **El Madidi**, S., Zivy, M. 1993. Variabilité génétique des protéines de choc thermique et thermo-tolérance chez le blé. in : *Le progress génétique passe-t-il par le repérage et l'inventaire des genes*. Ed AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. 173-181.
81. **Erchidi**, A. E., Benbella, M., Talouizte, A. 2003. Croissance du grain chez neuf cultivars de blé dur. Zaragoza: CIHAM-IAMZ, 2000, pp. 137-140, Série A.

**-F-**

82. **FAO**, 1992<sup>a</sup>. Besoin en eau des cultures. *Bulletin d'irrigation et de drainage*, N° 24, FAO. Eds, Rome. 120 p.
83. **FAO**, 1992<sup>b</sup>. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management by M. Smith. *FAO Irrigation and Drainage Paper* No. 26. Rome.
84. **FAO**, 2005. L'irrigation en Afrique en chiffres. Algérie. *Enquête AQUASTAT*, 11 p.
85. **FAO**, 2012. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
86. **Fernandez**, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In : Kuo, C.G. (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress*, Publication, Tainan, Taiwan.
87. **Finlay**, K.W., Wilkinson, G.N. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding program. *Aust. J. Agric. Res.*, 14 : 742-754.
88. **Fischer**, R.A, Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivar. Grain yield responses. *Aus J. Agr. Res* 29 : 897-912.
89. **Fischer**, R.A. 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.
90. **Fokar**, M., Nguyen, H.T., Blum, A. 1998. Heat tolerance in spring wheat Grain filling. *Euphytica* 104 : 9-15.
91. **Fraquin**, P. 1973. Analyse agroclimatique en régions tropicales. Méthode des intersections et période fréquentielle de végétation. *Agron Trop* ; 6-7 : 665-82.
92. **Freeze**, D. M., Bacon, R. K. 1990. Row-spacing and seeding rate effects on wheat yields in the Mid-South. *J. Prod. Agric*. 3 : 345-348.

**-G-**

93. **Gadsden**, H., Rodríguez, J.A., Muñoz, C., Núñez, D., Hinojosa, O. 2003. Monitoring Drought in Chihuahua. UNAM, México. *Voices of Mexico*. ; 63 : 101-8.
  94. **Garcia del Moral**, L., Rharrabti, Y., Villegas, D., Royo, C. 2003. Evaluation of Grain Yield and Its Components in Durum Wheat under Mediterranean Conditions: An Ontogenic Approach. *Agronomy Journal*. 95 : 266-274.
  95. **Gardner**, F.P., Pearce, R.B., Michell, R.L. 1985. *Physiology of crop plants*. Ames (Iowa, États-Unis): Iowa State University Press, 336 p.
  96. **Gate**, P. 1995. *Ecophysiologie du Blé, de la Plante à la Culture*. Editions technique et documentation, Lavoisier, Paris Cachan, 351 p.
  97. **Ghosh**, P. K., Ramesh, P., Bandyopadhyay, K. K., Tripathi, A. K., Hati, K. M., Misra, A. K. 2004. Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping systems in
-

vertisols of semi-arid tropics. II. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. Bioresour. Technol. 95 : 85-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.012>

98. **Golestani** Araghi, S., Assad, M. T. 1998. Evaluation of four screening techniques for drought resistance and their relationship to yield reduction ratio in wheat. Euphytica. 103(3) : 293-299. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018307111569>
99. **Gooding**, M.J., Davies, W.P., Thompson, A.J., Smith, S.P. 1993. The challenge of achieving breadmaking quality in organic and low input wheat in the UK - A review. Aspects of Applied Biology. 36: 189-198.
100. **Gottman**, J. 1979. A Geography of Europe. 588 p., New York, Holt, Rinehart and Wiston.
101. **Grieu**, P., Maury, P., Debaeke, P., Sarrafi, A.2008. Améliorer la tolérance à la sécheresse du tournesol : apports de l'écophysiologie et de la génétique. Innovations Agronomiques. 2: 37-51.
102. **Guendouz**<sup>a</sup>, A., Guessoum, S., Maamari, K., Hafsi, M. 2012. Predicting the efficiency of using the RGB (Red, Green and Blue) reflectance for estimating leaf chlorophyll content of Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi arid conditions. American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture. 6(2) : 102-106.
103. **Guendouz**<sup>b</sup>, A., Guessoum, S., Maamari, K., Hafsi, M. 2012. The Effect of Supplementary Irrigation on Grain Yield, Yield Components and Some Morphological Traits of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Cultivars. Advances in Environmental Biology. 6(2) : 564-572.
104. **Guendouz**<sup>c</sup>, A., Guessoum, S., Maamari, K., Hafsi, M. 2012. The effect of supplementary irrigation on Reflectance at Red and Blue and its relationships with grain yield, Chlorophyll content, Senescence parameters and Drought resistance indices in Durum Wheat (*Triticum durum* Desf) cultivars. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology. 5(2): 151-159.
105. **Guyomard**, H. 2009. « Nourrir la planète de façon durable est possible, à condition que... », Politique étrangère, 2009/2 Été, p. 291-303. DOI : 10.3917/pe.092.0291. <http://www.cairn.info/revue-politique-etrangere-2009-2-page-291.htm>

#### -H-

106. **Haddad**, L. 2009. Contribution à l'étude de la stabilité des rendements du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Mémoire de Magister, UFA Sétif. 70 p.
  107. **Hadjichristodoulou**, A. 1985. Stability of Performance of Cereals in Low- Rain fall Areas as Related to Adaptive Traits. Drought Tolerance in Winter Cereals Proceedings of an International Workshop, 27-31 October, Capri, Italy, 191-199.
  108. **Hafsi**, M. 2001. Adaptation du blé dur dans les conditions des hautes plaines Sétifiennes. Thèse de doctorat d'Etat ès-sciences. Faculté des sciences, UFAS, Sétif, Algérie, 80 p.
  109. **Hafsi**, M., Hadji, A., Semcheddine, N., Rouabhi, A d Djekoun, A. 2009. Selection for greater agronomic water use efficiency in wheat using carbon isotope discrimination in Algeria. Sciences et Technologie C. 29 : 63-71.
  110. **Hafsi**, M., Hadji, A., Guendouz, A., Maamri, K. 2013. Relationship Between Flag Leaf Senescence and Grain Yield in Durum Wheat Grown Under Drought conditions. Journal of Agronomy. 12(2) : 69-77.
  111. **Hakimi**, A. 1992. Evolution de la variabilité génétique des caractères d'adaptation à la sécheresse chez les espèces primitive (sauvages et cultivées) de blé tétraploïde. Thèse DEA Montpellier. France 186 p.
  112. **Halder**, K., Burrage, S. 2003. Drought stress effects on water relations of rice grown in nutrient film technique. Pak. J. Biol. Sci. 6(5) : 441- 444. <http://dx.doi.org/10.3923/pjbs.2003.441.444>
  113. **Halitim**, S. 2006. Contribution à l'étude de la réserve utile en eau des sols des cédras dans les Aurès : influences des facteurs édaphiques. Mémoire de Magister, Dépt, Agr. Fac, Sci. UHL, Batna, 70 p.
  114. **Hammer**, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. Palaeontologia Electronica. 4(1): 9 p.
  115. **Hamon**, S. 2007. L'amélioration de la résistance à la sécheresse peut-elle être basée sur les méthodes de sélection traditionnelle et/ ou sur les méthodes biotechnologiques modernes. Possibilités et limites respectives. Acte des JSIRAUF, Hanoi, 6-9. Montpellier, France.
  116. **Hargas**, H. 2002. Caractères adaptatifs et stabilité des rendements en grain du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous climat méditerranéen. Thèse de Magister, INA, El Harrach, Alger. 70 p.
  117. **Hargreaves**, G.H. and Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Division. 108 (IR3) : 225-230.
  118. **Hauchinal**, R. R., Tandon J.P., Salimath P.M. 1993. Variation and adaptation of wheat varieties to heat tolerance in Peninsular India. Saunders, DA. and Hettel GP. Eds, wheat in heat stressed environments, irrigated, dry areas and rice-wheat farming systems, Mexico, D. F., Cimmyt. 175-183.
-

119. **Hazmoune**, T. 2000. Etude comparée de l'appareil racinaire de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). 1<sup>er</sup> Symposium International sur la filière blé. Enjeux et Stratégie du 07 au 09 fév. Alger. 181-185.
120. **Hendry**, A.P., Kinnison, M.T. 2001. An introduction to microevolution: rate, pattern, process. *Genetica*, 112-113, 1-8.
121. **Hervieu**, B., Capone, R., Abis, S. 2006. L'enjeu céréalier en méditerranée. Les notes d'analyse du CIHEAM N°9, 1-13.
122. **Hossein**, A.B.S., Sears, A.G., Cox, T.S., Paulsen, G.M. 1990. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. *Crop Sci.* 30: 622-627.
123. **Hurd**, E.A., 1974. Phenotype and drought tolerance in wheat. *Agric Meterol.* 19: 39-55.

**-I-**

124. **Inoue**, T., Inanaga, S., Y. Sugimoto, An, P. & Eneji, A. E. 2004. Effect of drought on ear and flag leaf photosynthesis of two wheat cultivars differing in drought resistance. *Photosynthetica.* 42 : 559-565.

**-J-**

125. **Jackson**, P., Robertson, M., Cooper, M., Hammer, G.L. 1996. The role of physiological understanding in plant breeding: From a breeding perspective. *Field Crops Res.* 49(1) : 11-37.
126. **Jacquart**, C., Choisnel, E. 1995. "Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisable en agrométéorologie", *La Météorologie.* 8(9) : 29-44.
127. **Jamagne**, M., Bétrémieux, R., Bégon, J.C., Mori, A. 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information.* 627-641.
128. **Jonard**, P. Koller J. 1950. Les facteurs de la productivité chez le blé. Résultats obtenus en 1948 et 1949. *Ann. Am. Plant.* 2: 256-276.
129. **Jones**, H.G., Flowers, T.J., Jones, M.B. 1989. *Plants Under Stress.* Univ. Cambridge.
130. **Jones**, M.M., Rawson, H.M. 1979. Influence of rate of development of leaf water deficits upon photosynthesis, leaf conductance, water use efficiency, and osmotic potential in sorghum. *Physiologia Plantarum.* 45 : 103-111.

**-K-**

131. **Kang**, S., Zhang, L., Ling, Y., Hu, X., Cai, H., Gu, B. 2002. Effect of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the loess plateau of china. *Agricultural Water Management.* 55(3) : 203-216.
132. **Karrou**, M., El hanfid, R., Smith, D.H., Samir, K. 1998. Physiological attributes associated with early-season drought resistance in spring durum wheat cultivars. *Can. J. Plant Sci.* 78 : 227-237.
133. **Kauss**, H. 1977. Biochemistry of regulation. In *NORTHCOTE* (Ed): International Review of Biochemistry. 2 : 119-139.
134. **Kellogg**, EA. 2001. Evolutionary history of the grasses. *PlantPhysiol.* 125:1198-1205.
135. **Kenjabaev**, Sh., Forkutsa, I., Bach, M., Frede, H.G. 2013. Performance evaluation of the BUDGET model in simulating cotton and wheat yield and soil moisture in Fergana valley. *Center for International Development and Environmental Research.* 1-15.
136. **Khakwani**, A., Dennett, M.D., Munir, M. 2011. Drought tolerance screening of wheat varieties by inducing water stress conditions. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 33 (2) : 135-142.
137. **Kiliç**, H., Yağbasanlar, T. 2010. The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) cultivars. *Not Bot Hort Agrobot.* 38(1) : 164-170.
138. **Kirby**, E.J.M., Sprink, J.H., Frost, D.L., Sylvester-Bradley, R., Scott, R.K., Foulkes, M.J., Evans, E.J. 1999. A study of wheat development in the field: analysis by phases. *European Journal of Agronomy.* 11: 63-82.
139. **Kobata**, T., Palta, J.A., Turner, N.C. 1992. Rate of development of postanthesis water deficits and grain filling of spring wheat. *Crop Science.* 32: 1238-1242.

**-L-**

140. **Laala**, Z., Oulmi, A., Saraoui, T., Haddad, L., Nouar, H., Benmahammed, A., Bouzerzour, H. 2009. *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur.* 1(4) : 55-68.
141. **Laberche**, J-C. 2004. La nutrition de la plante In *Biologie Végétale.* Dunod. 2e (éd). Paris: 154 -163.
142. **Leclerc**, J.C. 1999. *Ecophysiologie végétale.* Publication de l'université de Saint Etienne. Paris: 283 p.
-

143. **Leisz**, D.R. 1982. Concern and cost of managing Mediterranean-type ecosystems. Proceedings of the Symposium on Dynamics and management of Mediterranean-type ecosystems (22-26 juin 1981, San Diego, Californie), p. 3-5, USDA Forest Service, General Technical Report, PSW-58.
144. **Levitt**, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. I-Chilling, freezing and high temperature. Academic Press., New York, USA, 607 p.
145. **Lonbani**, M., Arzani, A. 2011. Morpho-physiological traits associated with terminal drought-stress tolerance in triticale and wheat. *Agronomy Research* 9 (1-2), 315-329.

**-M-**

146. **Maamri**, K. 2011. Stabilité du critère de la discrimination du carbone isotopique en relation avec le poids spécifique de la feuille drapeau chez quelques variétés de blé dur cultivées en milieu semi aride. Mémoire de magister. Faculté SNV. UFA, Sétif. 75 p.
147. **Madhava Rao** K.V., Raghavendra, A.S., Janardhan Reddy, K. 2006. Printed in the Netherlands. Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. Springer: 1-14.
148. **MADR**. 2012. Statistiques agricoles. Direction des Services Agricoles de la Wilaya de Sétif.
149. **Markwell**, J., Osterman J. C., & Mitchell, J. L. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 46, 467-472. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00032301>
150. **Martre**, P. 1999. Architecture hydraulique d'une talle de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb). Implication pour les relations entre la transpiration et l'expansion foliaire. Thèse de Doctorat. 131 p.
151. **McKee**, T., Doesken, N., Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eight Conference on Applied Climatology, Anaheim (California), 17-22 January.
152. **Mekhlouf**, A. 2009. Etude de la variabilité génétique du blé dur (*Triticum durum*, Desf), pour la tolérance au froid. Thèse de Doctorat es Science. INA, Algérie. 131 p.
153. **Mekhlouf**, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Hadj Sahraoui, A., Harkati, N. 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse*. 17(4) : 507-13.
154. **Merabet**, B.A., Boutiba, A. 2005. L'irrigation de complément du blé dur. Influence de la nature du matériel végétal et de la variabilité climatique interannuelle dans une plaine semis aride d'Algérie. *Sciences & Technologie C*. 23 : 72-79.
155. **Monneveux**, P., This, D. 1997. La génétique aux problèmes de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse : espoirs et difficultés. *Sécheresse*. 1(8) : 29-37.
156. **Monneveux**, P. 1991. Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver ? Amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris. 165-186.
157. **Morgan**, J.M., Hare, P.A., Feletcher, R.J. 1986. Genetic variation in asmoregulation in bread in durum wheats and its relationship to grain yield in arrange of field environments. *Aust.J.gric.Res.* 37 : 449-457.
158. **Mouhouche**, B., Boulassel, A. 1997. Gestion rationnelle des irrigations de compléments des cultures de légumineuses alimentaires et de céréales. *Recherche Agronomique, Revue semestrielle N° 01 Octobre 1997*. INRA d'Algérie.

**-N-**

159. **Nemmar**, M. 1980. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) et chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) : étude de l'accumulation de la proline sous l'effet du stress hydrique. thèse D.A.A. ENSA. Montpellier. France. 65 p.
160. **Nouar**, H., Bouzerzour, H., Haddad, L., Menad, A., Hazmoune, T., Zerargui, H. 2012. Genotype x Environment Interaction Assessment in Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) using AMMI and GGE Models. *Advances in Environmental Biology*. 6(11) : 3007-3015.

**-O-**

161. **Ollier**, C., Poirée, M. 1981. Irrigation, les réseaux d'irrigation théorie, technique et économie des arrosages. 5ème .Ed Erolles. Paris. 503 p.
162. **O'toole**, J.C., Cruz, R.T. 1980. Response of leaf water potential, stomatal resistance and leaf rolling to water stress. *Plant Physiol*. 51: 993-997.
163. **Oulmi**, A., Benmahammed, A., Laala, Z., Adjabi, A., Bouzerzour, H. 2014. Response to plant breeding on the basis of the canopy temperature of F5 lines derived from the F2 of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under semi-arid high plains eastern conditions. *International Journal of Agronomy and Plant Production*. 5 (1) : 20-30.

**-P-**

---

164. **Pédelaborde**, P. 1968. Les bilans hydriques. Cahiers de géographie du Québec. 12 : 5-23.
165. **Peña**, R.G. 2002. Wheat for bread and other food In BC Curtis, S Rajaram, HG Macpherson, eds, Bread wheat improvement and Production, volhttp://www.fao.org/. 567 p.
166. **Penman**, H. L. 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." Proc. Roy. Soc. London, A193 : 120-146.
167. **Penman**, H.L. 1963. Vegetation and hydrology. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 125 p.
168. **Pesci**, P., Beffagna, A. 1984. Inhibiting effect of fusicoccin on abscisic acid induced proline accumulation in barley leaves. Plant Sci. Letters. 37: 7-12.
169. **Prystupa**, P., Savin, R., Slafer, G.A. 2004. Grain number and its relationship with dry matter, N and P in the spikes at heading in response to N × P fertilization in barley. Field Crops Res. 90 : 245-254.

**-R-**

170. **Raes**, R. 2000. Logiciel Et<sub>0</sub> version 1.0, calculation of Reference Evapotranspiration. Faculty of Agriculture and Applied Biological Sciences. Department Land Management, K.U Leuven University, Leuven, Belgium.
171. **Raes**, D. 2004. BUDGET 6.0 - A soil water and salt balance model.- IRRISOFT. K.U. Leuven University (Faculty of Bioscience Engineering). Division of Soil and Water Management. Celestijnenlaan 200 E B-3001 Leuven. Belgium.
172. **Raes**, D., Geerts, S., Kipkorir, E., Wellens, J., Sahli, A. 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. Agricultural Water Management. 81: 335-357.
173. **Rawson**, H.M. 1988. High temperature effect on the development and yield of wheat and practices to reduce deteriorous effects. In conf. On wheat production constraints in tropical environment. Eds klatt. UNDP- Cimmyt. 44-62.
174. **Reddy**, A. R., Chaitanya, K. V., Vivekanandan, M. 2004. Drought induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. Journal of Plant Physiology. 161 : 1189-1202.
175. **Reyes-Gómez**, V.M., López, D.N., Robles, C.A.M, Pineda, J.A.R, Gadsden, H., Ortíz, M.L., Hinojosa de la Garza, O.R., 2006. Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant du Río Conchos (État de Chihuahua, Mexique). Sécheresse. 17(4) : 475-84.
176. **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 d'études et de recherches francophones / Agricultures. 14(4) : 391-7.
177. **Rhoné**, B. 2008. Etude des mécanismes génétiques impliqués dans l'adaptation climatique de populations expérimentale de blé tendre. Thèse de doctorat, Paris Agro Tech. 242 p.
178. **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 : 111-21.
179. **Rizza**, F., Badeck, F.W., Cattivelli, L., Lidestri, O., Di Fonzo, N., Stanca, A. M. 2004. Use of a water stress index to identify barley genotypes adapted to rainfed and irrigated conditions. Crop Sci. 44 : 2127-2137.
180. **Rognon**, P. 1994. "Les conséquences de la sécheresse climatique sur la pédogenèse", Sécheresse. 5(3) : 173-184.
181. **Roseille**, A, Hamblin, J. 1981. Theoretical aspect of selection for yield in stress and non stress environments. Crop Sci., 21: 923-932.
182. **Rouabhi**, A. 2008. Efficacité d'utilisation de l'eau et sélection de variétés de blé dur sous les conditions du climat semi aride. Mémoire de magister. Faculté des sciences. UFA, Sétif. 104 p.
183. **Rouabhi**, A., Hafsi, M., Semcheddine, N., Aissaoui, M.R. 2013. A Simulation of Two Different Sets of Wheat Genotypes Under Semi Arid Climate by Using A Crop Model. Global Journal of Plant Ecophysiology. 3(2): 96-103.

**-S-**

184. **Sabaghnia**, N., Dehghani, H., Sabaghpour, S.H. 2006. Nonparametric methods for interpreting Gx E interaction of lentil genotypes. Crop Sci. 46 : 1100-1106.
185. **Saeedipour**, S., Moradi, F. (2011). Effect of Drought at the Post-anthesis Stage on Remobilization of Carbon Reserves and Some Physiological Changes in the Flag Leaf of Two Wheat Cultivars Differing in Drought Resistance. Journal of Agricultural Science. 3(3) : 81-92. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v3n3p81>
186. **Salse**, J., Bolot, S., Throude, M., Jouffe, V., Piegu, B., Qurashi, U., Calcagno, T., Cooke, R., Delseny, M., Feuillet, C. (2008). Identification and characterization of shared duplications between rice and wheat provide new insight into grass genome evolution. The Plant Cell Online. 20(1) :11.
-

187. **Samba, G.,** Diop, M. 2000. Bilan hydrique dans la région du Pool (République du Congo). Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures. 9(1) : 47-53.
  188. **Samonte, S.O.P.B.,** Wilson, L.T., Mc Clung, A.M., Medley, J.C. 2005. Targeting cultivars on rice growing environment using AMMI and SREG GGE biplot analysis. Crop. Sci. 45 : 2414-2424.
  189. **Sandring, S.,** M.A. Riihimäki, O. Savolainen, Ågren, J. 2007. Selection on flowering time and floral display in an alpine and a lowland population of *Arabidopsis lyrata*. J. Evol. Biol. 20: 558-567.
  190. **Sarda, X.,** Vansuyt, G., Tusch, D., Casse-pierres, F., Lamaze, T. 1992. Les signaux racinaires de la régulation stomatique. In : « Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne : diversité génétique et amélioration variétale ». Colloques INRA. 64 : 75-79.
  191. **Sarkar, A.,** Mogili, T., Chaturvedi, K. 2003. Variability in specific weight in mulberry germplasm and its inheritance pattern. International Journal of Industrial Entomology. 7(1) : 69-73.
  192. **SAS Institute Inc.** 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
  193. **Sayar, R.,** Khemira, H., Kameli, A., Mosbahi, M. 2008. Physiological tests as predictive appreciation for drought tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Agron. Res. 6(1) : 79-80.
  194. **Sayyah, S.S.,** Ghobadi, M., Mansoorifar, S., Zebajadi, A.R. 2012. Evaluation of Drought Tolerant in Some Wheat Genotypes to Post-anthesis Drought Stress. Journal of Agricultural Science. 4(11) : 2012. 248-256.
  195. **Schonfeld, M.A.,** Johnson, R.C., Carver, B. F., Mornhinweg, D.W. 1988. Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. Crop Sci. 28(3) : 526-531. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800030021x>
  196. **Semcheddine, N.** 2008. Utilisation de la discrimination isotopique du carbone comme critère de sélection du blé dur en relation avec le bilan hydrique. Mémoire de magister. Faculté des sciences. UFA, Sétif. 72 p.
  197. **Semcheddine, N.,** Rouabhi, A., Hafsi, M. 2012. Relation de la discrimination isotopique du carbone et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour l'appréciation du comportement de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) cultivées sous climat semi-aride. Communication orale, 1<sup>ère</sup> Journée Scientifique du Département des Sciences Agronomiques. 25 Avril 2012. UFA Sétif 1.
  198. **Semcheddine, N.,** Hafsi, M. 2014. Effect of Supplementary Irrigation on Agronomical and Physiological Traits in Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes. Journal of Agricultural science. 6(9) 184-197.
  199. **Shahryari, R.,** Mollasadeghi, V. 2011. Introduction of two principle components for screening of wheat genotypes under end seasonal drought. Adv. Environ. Biol. 5(3) : 519-522.
  200. **Shao, H.,** Chu, L. J., Manivannan, P., Panneerselvam, R., Shao, M. 2009. Understanding water deficit stress-induced changes in the basic metabolism of higher plants biotechnologically and sustainably improving agriculture and the eco environment in arid regions of the globe. Crit. Rev. Biotechnol. 29 : 131-151.
  201. **Shewry, P.** 2009. Wheat Journal of experimental botany. 60(6) : 15-37.
  202. **Siddique, M.R.B.,** Hamid, A., Islam, M. S. 2000. Drought stress effects on water relations of wheat. Botanical Bulletin Academia Sinica. 41(1) : 35-39.
  203. **Simane, B.,** Struik, P. C., Nachit, M.M., Peacock, J.M. 1993. Ontogenetic analysis of yield components and yield stability of durum wheat in water-limited environments. Euphytica. 71(3) : 211-219.
  204. **Slafer, G. A.,** Rawson, A.M. 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologists and modelers. Aust. J. Plant Physiol. 21 : 393-426.
  205. **Slafer, G.A.,** Araus, J.L., Royo, C., Del Moral, L.F.G. 2005. Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. Ann. Appl. Biol. 146 : 61-70.
  206. **Slageren, M.W.van.** 1994. Wild wheats: a monograph of *Aegilops* L. and *Amblyopyrum* (Jaub & Spach) Eig (Poaceae). Wageningen Agriculture University Papers 1994(7). 513 p.
  207. **Slama, A.** 1996. Effet d'une contrainte hydrique édaphique sur le développement du système racinaire de deux variétés de blé dur. DEA de physiologie végétale, faculté des sciences de Tunis.
  208. **Slama, A.** 2002. Étude comparative de la contribution des différentes parties du plant du blé dur dans la contribution du rendement en grains en irrigué et en conditions de déficit hydrique. Thèse de doctorat en biologie, faculté des sciences de Tunis.
  209. **Stockwell, C.A.,** Hendry, A.P., Kinnison, M.T. 2003. Contemporary evolution meets conservation biology. Trends in Ecology and Evolution. 18 : 94-101.
  210. **Subbarao, G.V.** Johansen, C., Slinkard, A.E., Nageswara, R.C., Saxena, N.P., Chauhan, Y.S. 1995. Strategies for improving drought resistance in grain legume. Crit Rev Plant Sci. 14 : 469-523.
-

211. **StatSoft** France. 1997. STATISTICA pour Windows : StatSoft France - 72, quai des Carrières - 94220 Charenton-le-Pont.

**-T-**

212. **Taheri, S.**, Saba, J., Shekari, F., Abdullah, T. L. 2011. Physiological responses of tolerant spring wheat lines under water stress. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 9(3&4) : 545-551.
213. **Tal, M.**, Rosenthal, I. 1979. Salt tolerance in *Simmondsia chenensis* water balance and accumulation of chloride sodium and proline under low and high salinity. *Ann. Bot.* 34 : 701-708.
214. **Talebi, R.**, Fayaz, F., Naji, A.M. 2009. Effective selection criteria for assessing drought stress tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *General and Applied Plant Physiology*. 35(1-2) : 64-74.
215. **Tarabideh, A.H.**, Farshadfar, M., Safari, H. 2014. Efficiency of screening techniques for evaluation corn (*Zea mays* L.) hybrids under drought conditions. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 7(3) : 107-114.
216. **Tas, S.**, Tas, B. 2007. Some physiological responses of drought stress in wheat genotypes with different ploidity in Turkiye. *World J. Agric. Sci* 3 : 178-183.
217. **Teulat, B.**, Monneveux, P., Wery, J., Borries, C., Souyris, I., Charrier A., This, D. 1997. Relationship between relative water content and growth parameters under water stress in barley: A QTL study. *New Phytology* 137 : 99-107.
218. **Thornthwaite, C. W.** 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograp. Rev.* 38 : 55-94.
219. **Thornthwaite, C.W.**, Mather, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Concerton* (New Jersey) : Drexel Institute of technology. 311 p.
220. **Triboi, E.** 1990. Model d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre (*Triticum aestivum*) en thell. *Agronomie*, 1: 191-200.
221. **Tsimilli-Michael, M.M.**, Pêcheux, R.J., Strasser. 1998. Vitality and stress adaptation of the symbionts of coral reef and temperate foraminifers probed in hospite by the fluorescence kinetics O-J-I-P. *Archs. Sci. Genève*. 51: 205-240.
222. **Turc, L.** 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann Agron.* 12 : 13-51.
223. **Turner, N.C.** 1997. Further progress in crop water relations. *Adv Agron.* 58: 293-338.
224. **Tuzet, A.**, Perrier, A. 1998. "Les besoins en eau des cultures : analyse et applications", in :TIERCELIN JB, TEC & DOC. *Traité d'irrigation*. Paris, Lavoisier. 147-172.

**-V-**

225. **Vachaud, G.**, Vauclin, M., Riou, C., Chabouni, Z. 1985. Evaporation en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes. II: méthodes neutroniques et tensiométriques. *Agronomie*. 3: 267-274.
226. **Van Laere, P.E.** 2003. Mémento de l'irrigation. Collection "Manuels Techniques". Manuel réalisé par ISF avec le soutien de la Direction générale de la Coopération internationale (DGCI). ©Ingénieurs Assistance Internationale - Ingénieurs sans Frontières. Bruxelles - Belgique. 13 p.

**-W-**

227. **Wang, W.X.**, Brak, T., Vinocur, B., Shoseyov, O., Altman, A. 2003. Abiotic resistance and chaprones: possible physiological role of SP1, a stable and stabilising protein from *Populus*. In : Vasil IK (ed), *Plant biotechnology 2000 and beyond*. Kluwer, Dordrecht. 439-443.
228. **Wardlaw, I.F.**, Moncur, L. 1995. The response of wheat to high temperature following anthesis. The rate and duration of kernel filling. *Aust J. Plant physiol.* 22 : 391-397.
229. **Wardlaw, I.F.** 2002. Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment. *Annals of Botany*. 90 : 469-476.
230. **Wellens, J.**, Compaore, N.F. 2004. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation. *Rapport Annuel N° 2*. 179p.
231. **Wheeler, J.H.**, Kostbade, J.T. 1990. *World regional geography*. Saunders College Pub., Philadelphia, Chicago, San Francisco, Tokyo. 744 p.
232. **Wiegand, C. L.**, Cuellar, J.A. 1981. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. *Crop Sci*. 21(1) : 95-101. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X001100010027x>
233. **William, G.**, Hopkins. 2003. *Physiologie végétale*. Edition de bœck université .Paris. 453 p.
234. **Winkel, T.** 1992. Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Peiznisetirm glaiiciirn* (L.) R. Br.) À la sécheresse L'AGRONOMIE TROPICALE. 46(4) : 339-351.
-

235. **Wood**, C.W., Reeves, D.W., Himelrick, D.G. 1993. Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield : Proceedings of the Agronomy Society of New Zealand. 23 : 1-9.

-Y-

236. **Yan**, W., Hunt, L.A. 1998. Genotype-by-environment interaction and crop yield. Plant Breed. Rev. 16 : 135-178.

-Z-

237. **Zadoks**, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Res. 14 : 415-421.

238. **Zhang**, H., Oweis, T. 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. Agricultural Water Management. 38(3) : 195-211. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00069-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00069-9).

239. **Zhang**, Y., Kendy, E., Qiang, Y., Changming, L., Yanjun, S., Hongyong, S. 2004. Effect of soil water deficit on evaporation, crop yield and water use efficiency in the North China plain. Agricultural Water Management. 64(2) : 107-122.

240. قندوز, ع. 2010. علاقة بعض مؤشرات الصورة الرقمية لورقة العلم بفعالية استغلال الماء عند بعض أصناف القمح الصلب (*fseD murud mucitirT*) مذكرة الماجستير جامعة فرحات عباس، سطيف - 1 كلية علوم الطبيعة و الحياة. 82 ص.

241. قندوز, ع. 2014. تقييم علاقة بعض المؤشرات الضوئية و سلوك القمح الصلب ( *Triticum durum* Desf. ) تحت تأثير أنظمة سقي مختلفة. أطروحة دكتوراه العلوم. جامعة فرحات عباس، سطيف - 1 كلية علوم الطبيعة و الحياة. 138 ص.

---

**Annexe 1 : Paramètres climatiques du site expérimental de Béni Fouda**

Jour	Mois	Année	Température minimale (°C)	Température maximale (°C)	Pluviométrie (mm)	Insolation (H/j)	Humidité (%)	Vitesse du vent (m/s)
1	11	2009	6,1	19,9	0	10	75	1,6
2	11	2009	6,4	22,8	0	10,1	71	3,2
3	11	2009	11,9	19	0	9,2	73	3,7
4	11	2009	5,6	22,4	0	10,2	64	4,1
5	11	2009	6,6	16,2	0	1,7	77	3,2
6	11	2009	4,3	10,1	2,7	3,4	88	4,5
7	11	2009	2,5	15	2,8	7,4	83	5,5
8	11	2009	5,4	9,3	2,7	3,6	85	5,3
9	11	2009	0,6	7,4	15	2,6	90	6
10	11	2009	2,3	10,4	3	6,2	88	3,1
11	11	2009	2,2	15,1	0	7,1	78	3,6
12	11	2009	2,4	17,9	0	10,1	77	2,1
13	11	2009	2	19,3	0	9,9	69	2,5
14	11	2009	2,8	19,9	0	8	68	1,6
15	11	2009	4	21,8	0	9,8	65	2
16	11	2009	3,2	21	0	10	63	2,1
17	11	2009	3	22,2	0	9,8	63	2,3
18	11	2009	3	21,9	0	8,7	57	2,3
19	11	2009	4,6	19,6	0	5,4	58	1,3
20	11	2009	5,5	17,8	0	3,7	65	2
21	11	2009	3,3	21,3	0	9,4	70	1,8
22	11	2009	3,4	19,9	0	9,1	63	3
23	11	2009	4,5	17,1	0	8,7	75	2,1
24	11	2009	3,2	15,1	0	6,3	88	2,2
25	11	2009	0,1	19,6	0	9,4	69	2,3
26	11	2009	0,9	18,3	0	7,9	66	2,2
27	11	2009	7,6	18	0	4,3	62	3,6
28	11	2009	4,5	16,8	0	6	69	2,3
29	11	2009	4,4	15	0	7,6	62	5,2
30	11	2009	3,8	9,5	0	1,3	77	5,7
1	12	2009	0,4	6,8	8,5	3,6	91	5,1
2	12	2009	-0,2	9,1	0	2,7	91	2
3	12	2009	0,9	11,5	0	1,2	89	4,6
4	12	2009	4,9	10,5	12	5,2	87	5,2
5	12	2009	4,4	13,8	0	7,6	85	2,7
6	12	2009	0,7	14,1	0	9,4	80	2,1
7	12	2009	0,1	14,6	0	9,5	79	1,8
8	12	2009	0,4	15,3	0	9,3	66	2,5
9	12	2009	1,5	13,8	0	8,7	84	2,2

10	12	2009	3,7	12	0	1,2	85	1,7
11	12	2009	1,3	13,9	0	9,3	82	2,2
12	12	2009	-1,2	13,8	0	9,2	77	1,3
13	12	2009	0,4	13,4	0	3,6	76	2,8
14	12	2009	0,6	11	3	4,8	75	3,3
15	12	2009	0	6,6	2,7	0,2	91	5,8
16	12	2009	-0,8	8,9	0	8,8	84	5,1
17	12	2009	3,9	14,3	0	6,6	80	7,2
18	12	2009	2,5	12	0	4,3	80	4,3
19	12	2009	4,9	9,6	2,7	0	90	5,5
20	12	2009	0,6	6,2	6	3,9	84	2,2
21	12	2009	-2,5	9	0	6,9	77	4,8
22	12	2009	3,4	12,9	0	4,5	71	5,1
23	12	2009	2,8	15,3	0	2,6	76	4,5
24	12	2009	9,5	19,3	0	1,2	75	4,3
25	12	2009	10,6	18,7	0	6,7	76	4,5
26	12	2009	8,7	15	0	2,3	81	5,3
27	12	2009	5,4	11,6	11,8	4	87	5,8
28	12	2009	-1,2	13,9	0	4,8	71	3,6
29	12	2009	7,3	19,1	0	7,1	56	3,3
30	12	2009	3,6	20,3	0	9,3	61	2
31	12	2009	2,8	17	0	9	60	4,2
1	1	2010	5,5	11,9	0	6,1	70	8,1
2	1	2010	0,5	11,6	0	8,3	79	2,6
3	1	2010	-1	15,7	0	9,1	74	2,7
4	1	2010	1,2	16,6	0	7,2	70	2,3
5	1	2010	1,3	13,5	0	6,1	71	5,6
6	1	2010	5,7	11	2	4	88	5,1
7	1	2010	1,1	11,6	1	3,5	82	3,8
8	1	2010	1,8	6,6	0	4,6	82	7,3
9	1	2010	-2,4	2	0	3	84	7,7
10	1	2010	-1,7	5	2	7,3	78	4,7
11	1	2010	-0,4	8,7	0	3,7	81	6
12	1	2010	3,2	10,5	1,5	5,6	87	3,6
13	1	2010	6	11,4	0	9,1	77	6,6
14	1	2010	1	12,9	0	1,9	89	4,5
15	1	2010	2,9	10,1	9,1	4,3	88	8,6
16	1	2010	2,8	10,9	19,3	8,2	77	3
17	1	2010	1,2	14,1	0	6	74	2,2
18	1	2010	1,5	15	0	8,5	81	1,8
19	1	2010	1	12,6	0	7,8	78	2,8
20	1	2010	6	12,6	1,5	3,4	85	3,5
21	1	2010	4,9	10,3	0	6,2	78	3,5

22	1	2010	-2,2	11,6	0	8,1	77	2,3
23	1	2010	-1,4	13	0	4,7	81	2
24	1	2010	2,4	12,5	0	6,5	80	1,8
25	1	2010	0,6	13,3	0	5,5	81	2,3
26	1	2010	6,1	10,4	0	1,2	80	5,8
27	1	2010	3,8	7,9	12	6,7	84	4,2
28	1	2010	-1,5	10,3	0	7,5	84	2,1
29	1	2010	-2	7,2	0	3,4	85	4,3
30	1	2010	1,5	8,6	1	6,7	79	6,2
31	1	2010	-0,7	10,1	0	7,2	78	4,6
1	2	2010	1,3	7,7	0	6,6	82	4,1
2	2	2010	-3,4	9,4	0	9,6	78	2
3	2	2010	-4,2	13,8	0	10	68	2,5
4	2	2010	0,2	13,1	0	7,7	61	3,7
5	2	2010	5,3	15,7	0	8,7	77	4,1
6	2	2010	5,2	13,8	0	9,3	79	5
7	2	2010	0,7	11,5	0	8,4	77	4,6
8	2	2010	-1,1	12	0	0	79	3,6
9	2	2010	5,4	9	4	0,9	91	6,7
10	2	2010	1,2	8	1	6	80	6,3
11	2	2010	0,2	5,5	0	0,8	88	4,8
12	2	2010	-3	5,6	5	3	82	4,8
13	2	2010	-3,5	3,7	0	0	94	2,2
14	2	2010	0,8	8,8	11	2,2	94	2,6
15	2	2010	-0,7	7,2	0	0,1	96	4,2
16	2	2010	4,8	11,5	5,5	3	95	3,5
17	2	2010	7	15	0	9,5	83	6,3
18	2	2010	4,1	17,6	14	6,4	78	5,5
19	2	2010	8,1	14,2	0	3,9	82	8,7
20	2	2010	1,9	9,6	2	7,8	78	5,1
21	2	2010	-1,6	10,7	1	2,3	78	4,1
22	2	2010	3,6	17	0	9,5	80	5,3
23	2	2010	2,9	16,3	0	7,6	83	5,3
24	2	2010	5,3	16,1	0	10,6	81	7,7
25	2	2010	1,2	18,7	0	8,8	75	4
26	2	2010	6,2	17	0	3,9	80	3,5
27	2	2010	4,6	22,8	0	7,7	71	3,8
28	2	2010	9,4	25,8	0	9,1	53	3,2
1	3	2010	9,1	17,1	0	9,8	83	3,2
2	3	2010	2,1	18,4	0	1	79	3
3	3	2010	10,6	18,3	0	8,6	66	7,3
4	3	2010	3,1	15	0	7,2	85	5,3
5	3	2010	1,1	16,3	0	8,5	86	2,2

6	3	2010	7,2	10,7	7,5	0	93	3,7
7	3	2010	4,9	9,7	0	0	92	3,8
8	3	2010	1,5	8,6	10,5	1,6	90	3,3
9	3	2010	1,9	6,5	24	1,3	91	6,3
10	3	2010	-0,8	7,3	2	4,9	87	4,7
11	3	2010	-1,2	10,6	0	8,3	82	3,8
12	3	2010	4,8	9,6	12	0	91	2,7
13	3	2010	1,5	8	0	3	88	4,1
14	3	2010	1,3	7,8	0	6,7	82	3,8
15	3	2010	-2,2	8,4	0	3,8	80	1,8
16	3	2010	-3	13,2	0	10,8	73	3
17	3	2010	-2,1	16,1	0	10,9	64	3
18	3	2010	0,1	16,7	0	10,5	63	3,3
19	3	2010	1,3	20,4	0	10,1	65	2,7
20	3	2010	6,6	22,4	0	9,2	59	2,5
21	3	2010	6,7	18,1	0	3,4	55	3,1
22	3	2010	3,5	20	0	8,3	60	3,5
23	3	2010	5,6	16,9	0	5,3	82	1,3
24	3	2010	6,8	20,7	0	7,7	67	3,3
25	3	2010	11,7	24	0	8,5	47	3,3
26	3	2010	11,3	22,2	0	8,4	65	2,7
27	3	2010	7,4	17,1	0	8,4	80	3,5
28	3	2010	1,8	20,6	0	11	70	2,7
29	3	2010	6,5	24	0	8,6	61	3,6
30	3	2010	5,1	18	0	9,9	65	4,8
31	3	2010	1,4	16,5	0	8,2	73	2,6
1	4	2010	2	17	0	6,2	77	3,5
2	4	2010	0,4	17	0	11,3	72	2,6
3	4	2010	3,5	20,8	0	9,1	64	3,7
4	4	2010	10,7	19,6	0	9,1	59	5,7
5	4	2010	3,1	13,6	0	0,5	75	4
6	4	2010	6,7	17	0	0	67	2
7	4	2010	7,1	21,5	0	4,3	60	2,3
8	4	2010	5	12,9	0	2,4	85	4,1
9	4	2010	2,2	10,6	1,5	1,4	85	4,3
10	4	2010	6,1	15,2	0,25	7,1	80	2,2
11	4	2010	2,8	18,1	0	6,8	76	4,5
12	4	2010	8,6	18,5	4,5	6,6	86	2,2
13	4	2010	6,9	19,9	0,5	8,8	83	2,7
14	4	2010	9,8	23,8	0	9,6	77	3,5
15	4	2010	7,5	22,1	0	8,2	83	2,8
16	4	2010	10,3	21,2	18	7,7	88	3,7
17	4	2010	10,2	19,5	15	6,5	88	3,7

18	4	2010	7,3	15,8	0	5,5	91	2,6
19	4	2010	3,7	17,3	0	11,3	82	2,6
20	4	2010	5	19,9	0	9	81	2,7
21	4	2010	8,8	23,7	0	9,8	66	4,1
22	4	2010	11,6	19,3	3,5	0,7	76	5,6
23	4	2010	9,3	16,1	13	7,6	87	5,1
24	4	2010	5,4	18,1	0	12,7	77	2,7
25	4	2010	5	19,2	0	12,6	78	2,6
26	4	2010	6,2	19	0	11,8	75	2,3
27	4	2010	6	19,5	0	9,3	74	2,2
28	4	2010	6,1	20,8	0	12,6	71	2,7
29	4	2010	7,1	23,4	0	12,1	70	2,8
30	4	2010	8,6	27	2,8	12,4	64	2,5
1	5	2010	11,2	23,6	0	2,5	66	3,3
2	5	2010	12,2	23,2	0	10,6	80	2,5
3	5	2010	11,5	20,6	0	2,6	86	4,7
4	5	2010	5,4	16,1	14	11	80	3,7
5	5	2010	0,5	11,6	0	3,4	78	3,7
6	5	2010	0,9	16,6	0	12,3	71	3,6
7	5	2010	6,6	16	0	3,7	75	3
8	5	2010	2,7	21,5	0	12,6	72	2,8
9	5	2010	7,6	23,9	0	11,2	60	4,1
10	5	2010	11,3	28	0	7,8	55	3,2
11	5	2010	7,7	23,7	0	11,1	65	3,2
12	5	2010	9,1	19,3	0	2,2	69	2,6
13	5	2010	5,6	19,2	0	5	72	2,8
14	5	2010	7,5	10,2	6	0,8	90	4
15	5	2010	3,9	15,9	2	8,1	78	6,6
16	5	2010	1,1	17,5	0	12,1	76	2,7
17	5	2010	3,5	19,9	0	12,5	71	2,8
18	5	2010	1,8	22,4	0	12,8	62	2,3
19	5	2010	5,1	22,8	0	12,7	69	3,2
20	5	2010	3,8	15,7	0	12,6	71	4,1
21	5	2010	2,1	21,5	0	12,6	66	2,7
22	5	2010	6,3	24,1	0	9,4	58	3,5
23	5	2010	11	16,3	0	0,9	90	2,3
24	5	2010	6,8	19,4	0	12,5	76	3,6
25	5	2010	5,2	25,6	0	12,4	71	2,5
26	5	2010	9,5	25,1	0	6,8	59	4,7
27	5	2010	17,8	22,7	0	1	55	4,6
28	5	2010	10,8	22,2	45	3,5	85	2,7
29	5	2010	11,8	16,5	4	2,4	89	4,6
30	5	2010	10,8	19,9	0	11,9	70	7,2

31	5	2010	8,4	24,6	0	11,4	66	3,6
1	6	2010	10,9	26	0	12,1	62	4,5
2	6	2010	11,1	29,2	0	10,5	60	3,8
3	6	2010	12,6	29,5	0	11,1	57	3,2
4	6	2010	13,3	26,7	0	12,8	60	2,8
5	6	2010	9,9	28,9	0	12,5	58	3
6	6	2010	13	30,8	0	10,6	51	3,3
7	6	2010	15,9	29,1	0	11,7	49	2,8
8	6	2010	13,3	33,7	0	12,3	49	2,5
9	6	2010	16,7	36	0	8,7	42	4,7
10	6	2010	16,5	36	0	11,6	44	4,5
11	6	2010	13,3	30,3	0	12,4	65	4,3
12	6	2010	12	30	0	12,3	56	3,7
13	6	2010	14,4	28,3	0	9,2	65	3,6
14	6	2010	15,8	27,7	0	2,7	63	6,5
15	6	2010	11,2	21,4	29	8,3	84	3
16	6	2010	12,6	28,7	0	10,7	67	4,8
17	6	2010	13,5	32,1	0	12	66	4,5
18	6	2010	13,9	25,3	0	12,9	68	4
19	6	2010	11,1	21,8	0	6,2	63	4,3
20	6	2010	9	24,7	0	11,8	65	5
21	6	2010	6,2	23,3	0	12,7	59	2,6
22	6	2010	7,1	25,9	0	12,3	51	2,7
23	6	2010	7,1	29	0	12,8	49	2,7
24	6	2010	12,7	30,5	0	12,3	47	2,6
25	6	2010	16,5	34,3	0	11,6	42	3
26	6	2010	17	33,6	0	6,1	46	3,1
27	6	2010	15,7	31	0	6,9	54	3,3
28	6	2010	16,4	29	9	9,1	62	3
29	6	2010	13,8	30,3	0	10,7	54	3,2
30	6	2010	15,3	29,8	0	12,4	46	2,3
1	7	2010	13,4	31,5	0	10,6	52	2,7
2	7	2010	15,4	33,6	0	10,5	48	3,5
3	7	2010	17	33,9	0	12,5	44	3,3
4	7	2010	16,2	35,1	0	10	46	3,1
5	7	2010	19,5	33,5	0	7,7	48	3,5
6	7	2010	16,7	30,2	0	12,5	52	4
7	7	2010	13,7	34,2	0	12,9	58	2,8
8	7	2010	15,4	35,3	0	12,7	43	3,1
9	7	2010	15,1	36,3	0	12,5	33	2,6
10	7	2010	18,7	37,2	3	11,3	34	3,2
11	7	2010	19,6	37	0	9,3	45	3,5
12	7	2010	18,5	35	0	12,5	40	3,7

13	7	2010	18,7	35,4	0	12,5	39	2,8
14	7	2010	19,2	38,4	0	12	38	3,8
15	7	2010	21	38,6	0	12,3	23	3,1
16	7	2010	19,4	38,7	0	7,6	41	2,6
17	7	2010	18,6	39	0	11,6	41	3,7
18	7	2010	19,6	36,1	0	12,2	42	2,8
19	7	2010	17,9	33,7	0	12,7	41	3
20	7	2010	17	35,6	0	12,4	39	2,6
21	7	2010	19,4	36,7	0	11	36	4,3
22	7	2010	21,2	38,6	0	10	29	5,1
23	7	2010	20,9	40,7	0	11,3	29	4,1
24	7	2010	20,8	33,3	0	10,2	64	3,1
25	7	2010	15,5	28,1	0	12,5	58	3,5
26	7	2010	14,3	26,2	0	11	60	4
27	7	2010	12	29,5	0	12,6	58	3
28	7	2010	15,5	34,1	0	11,8	53	3,5
29	7	2010	18,3	33,1	0	12,4	41	3,8
30	7	2010	15,5	32,3	0	12	45	3,2
31	7	2010	17,6	33,4	0	12,4	52	2,8

---

**Annexe 1 : Paramètres climatiques du site expérimental de Sétif**

Jour	Mois	Année	Température Minimale (°C)	Température maximale (°C)	Pluviométrie (mm)	Insolation (H/j)	Humidité (%)	Vitesse du vent (m/s)
1	11	2010	7,5	12,7	4,8	4,8	85	5,1
2	11	2010	4,7	10,8	13,0	0,6	89	5
3	11	2010	8,1	11,9	5,5	0,4	86	6,2
4	11	2010	9,7	15,1	2,7	6	80	4,2
5	11	2010	7,4	14	0	3,6	85	3,8
6	11	2010	9,5	15	0	1,4	86	2,8
7	11	2010	7,8	14,6	1,6	4,2	86	3,5
8	11	2010	6,5	12,5	0	0,6	82	7,1
9	11	2010	8,3	16,6	0,2	6,4	71	9,2
10	11	2010	10	15,1	0	6,3	74	6,3
11	11	2010	3,2	12,5	0	8,1	76	4,1
12	11	2010	-0,2	15,1	0	10	80	2,1
13	11	2010	3	19,6	0	9,9	72	1,5
14	11	2010	4,2	18,6	0	9,9	70	2,5
15	11	2010	2,6	18	0	8,5	72	3
16	11	2010	1	12,1	0	9,7	71	4,2
17	11	2010	-2,3	13,8	0	6	59	3,5
18	11	2010	5	13,9	0	5	67	3,3
19	11	2010	0,9	13,7	0	6	77	3
20	11	2010	2,2	16,9	0	8,5	64	3,5
21	11	2010	6,1	11,4	6,4	0,6	77	3,7
22	11	2010	1,9	9,4	1,8	3,9	81	6,1
23	11	2010	0,6	10,6	0	6,6	79	3,3
24	11	2010	0,1	12	3,2	5,4	79	3,2
25	11	2010	7	12,8	0,1	3,1	95	3,3
26	11	2010	7,3	12,4	0	0,3	92	2,5
27	11	2010	4,6	15,3	0	2,6	73	3,8
28	11	2010	5,6	13,2	0,8	7,8	69	7,3
29	11	2010	1,2	14,4	0	7,3	69	5,7
30	11	2010	11,1	17,7	3,6	3,8	64	6,3
1	12	2010	7,2	12,8	0,6	7,9	79	6,2
2	12	2010	0,1	11,9	0,1	3,9	80	5,2
3	12	2010	2,8	8,4	0	5,5	79	4,5
4	12	2010	-1,9	8,8	0	5,6	79	2
5	12	2010	-3	12,6	0	9,3	64	2,8
6	12	2010	0,8	15,7	0	6,6	60	2,2
7	12	2010	3,1	20,5	0	9	62	2,3
8	12	2010	6,7	21,8	0	7	50	3,3
9	12	2010	5,2	20,9	0	5,2	50	2,1
10	12	2010	5,5	13,1	0	5,8	64	3,7
11	12	2010	-3,4	12,4	0	9,4	70	1,8

12	12	2010	-2,8	12,2	0	4,2	55	1,8
13	12	2010	2,8	12,9	0	1,5	52	2,7
14	12	2010	-0,7	9,7	2,1	2,3	79	2,6
15	12	2010	0,3	5,8	5,5	2,1	90	3,7
16	12	2010	-3,9	0,7	0,7	2,5	91	4,8
17	12	2010	-7,5	5	0	7,7	76	3,1
18	12	2010	-3	11,8	0	6,7	64	1,6
19	12	2010	1,1	15,4	0	7,9	63	2,8
20	12	2010	6,8	13,3	0	7,5	78	3,2
21	12	2010	1,1	15,2	1,8	3,1	74	3,3
22	12	2010	2,7	15	3,9	1,9	76	3,5
23	12	2010	6,8	10,1	2,6	1,4	80	7
24	12	2010	2,3	7	0	3,3	79	7,5
25	12	2010	0,5	6	0	2,9	75	3,8
26	12	2010	-3,2	6	0,3	6,7	76	4,1
27	12	2010	-0,5	6	0,4	3,2	87	4,3
28	12	2010	-4,4	11,1	0	8	70	1,7
29	12	2010	-2,5	15	0	8,2	65	1,3
30	12	2010	-1,7	12,5	0	2,5	57	2,2
31	12	2010	-4,1	12,5	0	9,1	63	2,2
1	1	2011	0,6	9,6	1,5	1,5	88	2,1
2	1	2011	4,5	9,7	0,9	3,9	90	2,5
3	1	2011	1,8	8,3	0	1,2	87	3,3
4	1	2011	-2,8	9,4	0	7,4	79	2,1
5	1	2011	-2,7	12,7	0	9,3	74	2,6
6	1	2011	0,3	15,8	0	9,3	66	3,1
7	1	2011	-0,3	16,2	0	8,3	61	3,1
8	1	2011	-0,1	16,2	0	5,9	57	2
9	1	2011	3,2	13,5	0	1	50	2,8
10	1	2011	-1,2	11,3	0	5,8	68	2,5
11	1	2011	0,5	8,3	0,1	1,5	88	3,3
12	1	2011	5,1	10,4	0	6,8	73	6,1
13	1	2011	4,1	12,1	0,1	4,5	85	3,1
14	1	2011	-1,4	16,8	0	9,4	79	1,7
15	1	2011	-0,4	18,8	0	9,4	68	1,8
16	1	2011	-0,4	18,2	0	8,8	68	2,2
17	1	2011	0,5	17,9	0	5,7	61	2,3
18	1	2011	0	16,6	0	7,8	72	1,8
19	1	2011	-2,6	12,4	0	5,8	77	2,1
20	1	2011	0,8	8,9	0,9	0,4	88	2,5
21	1	2011	-2,4	5,2	0	2,5	88	3,6
22	1	2011	-3,8	2,6	0	1,9	88	2,6
23	1	2011	-4,3	2,7	1,4	0,1	91	1,2
24	1	2011	-1,7	7,8	0	3,1	75	3,2
25	1	2011	-1,7	11,1	0	7,8	76	2

26	1	2011	0,6	9,5	9,0	3,2	90	2,7
27	1	2011	5,1	10,5	0,4	2,6	88	4,2
28	1	2011	2	11,8	0	6,4	80	3,8
29	1	2011	-0,7	13,7	0	8,6	76	3,5
30	1	2011	-1,8	10,2	0	5,2	80	1,8
31	1	2011	-1,2	8,6	0	7,9	87	3,2
1	2	2011	0	6,1	15,0	1,6	94	5
2	2	2011	0,3	4,5	20,1	0,2	91	8
3	2	2011	0,9	6,6	3,4	3,9	86	5,5
4	2	2011	1,5	8,3	0,5	5,9	82	3,6
5	2	2011	2,8	9,8	0	8,8	80	4
6	2	2011	-2	11,1	0	9,6	85	1,3
7	2	2011	-2,5	14,1	0	9,8	69	2
8	2	2011	-1,8	12,4	0	7,8	69	2,5
9	2	2011	-4,2	13,5	0	10,2	68	1,6
10	2	2011	-3,8	14,4	0	10,3	63	2,5
11	2	2011	-4	14	0	10,4	62	2
12	2	2011	-2,4	13,7	0	10,3	64	2
13	2	2011	-2,4	13,7	0	10,3	66	2,3
14	2	2011	-3,7	8,1	2,2	2,7	86	2,8
15	2	2011	-3	10,9	1,8	5,3	79	3,6
16	2	2011	5	11,5	0,1	9,7	75	7
17	2	2011	3,6	7,6	10,1	0,6	80	5,5
18	2	2011	-0,3	5,7	4,9	4,6	90	5
19	2	2011	-2,6	11,6	0	8	74	2,3
20	2	2011	0,8	11,7	3,8	4,5	76	4,5
21	2	2011	0,3	5,7	18,9	1	94	4,3
22	2	2011	0,4	10,8	12,3	6,8	87	5,5
23	2	2011	3,3	8,2	1,9	7,6	79	7,3
24	2	2011	1,3	8,9	0,5	5	83	4,7
25	2	2011	3,6	8,9	1,7	3,1	89	3,7
26	2	2011	3,3	12,6	0	8,6	82	5
27	2	2011	1,9	13	4,8	3,8	84	4,7
28	2	2011	-0,9	7	0	4,7	83	3,2
1	3	2011	0,1	4,5	4,3	2,7	94	4,5
2	3	2011	-0,5	6,9	0	7,8	86	3,6
3	3	2011	-3,4	8,5	2,9	2,6	86	2,3
4	3	2011	-1,9	7,1	0	2,1	84	2,6
5	3	2011	-3,4	12,5	0	9,6	74	2,2
6	3	2011	-0,1	16,1	0	9,3	60	2,3
7	3	2011	3,3	19,2	0	8,8	52	2,2
8	3	2011	2,6	17	0	9,1	65	3,8
9	3	2011	4,5	16,1	0	5	72	1,5
10	3	2011	4,7	15,7	0	7,5	73	2,6
11	3	2011	6,5	13,6	0	7,5	77	4,2

12	3	2011	7,8	11	5,3	1,6	80	4,8
13	3	2011	5,2	16,1	0	9,5	80	3,3
14	3	2011	8,7	16,5	0	6,2	69	6,1
15	3	2011	11,7	19,5	6,6	8,7	55	7,6
16	3	2011	6	13	0	6,8	80	3,5
17	3	2011	3,2	11,4	0,4	4,1	80	5,7
18	3	2011	2,8	13	0	10	78	4,1
19	3	2011	4,5	12,7	0	11	69	4,8
20	3	2011	-1,2	12	0	9,4	71	3,6
21	3	2011	2,1	11,1	0	5,7	77	2,6
22	3	2011	1,8	13,9	0	6,3	76	3,3
23	3	2011	2	15,8	0	9	70	2
24	3	2011	3,4	16,7	2,5	6	69	2,3
25	3	2011	6,8	13,3	4	2,5	82	2,7
26	3	2011	2,8	18,6	0	9,2	71	3,1
27	3	2011	4,7	20,6	8	10,4	65	3,8
28	3	2011	4,9	16,1	0	6,2	69	4
29	3	2011	2,5	15,8	9,8	7,6	74	3,2
30	3	2011	7,2	13,1	2,8	7,8	81	3,6
31	3	2011	6,7	13,8	0	7,6	73	3,7
1	4	2011	6,6	15,8	0	5,3	80	2,3
2	4	2011	2,5	23	0	11,8	70	2,2
3	4	2011	5,4	25,3	0	11,7	61	2,1
4	4	2011	7,4	25,4	0	11,4	56	2,5
5	4	2011	9	24,2	0	7,9	65	2,3
6	4	2011	6	23,7	0	11,6	51	2,3
7	4	2011	4	22,7	0	11,9	48	2,6
8	4	2011	3,9	24,8	0	11,8	57	2,8
9	4	2011	6,4	25,5	0	11,7	54	3,2
10	4	2011	8,1	24,8	0	11,3	48	3,8
11	4	2011	6	24,4	20,4	7,9	66	3,3
12	4	2011	9,5	17,3	0	7,3	84	4,1
13	4	2011	4,2	19,5	0	11,9	68	1,8
14	4	2011	3,5	22,6	0	11,8	65	3,3
15	4	2011	6,8	22,7	0	11,4	61	2,5
16	4	2011	4	13,4	0	11,7	71	3,8
17	4	2011	-0,3	18,7	0	11,7	69	2,7
18	4	2011	5	21,7	0	11,3	63	3,3
19	4	2011	8,6	21,2	1,4	5,2	76	1,6
20	4	2011	5,7	22,8	0	10,4	70	2,6
21	4	2011	11,8	14,1	0	0	81	5,8
22	4	2011	11	17,5	30,3	2,6	88	3,3
23	4	2011	6	20,1	0	10,9	80	2,8
24	4	2011	10,4	19,8	27,8	8,3	81	5,3
25	4	2011	9,3	14,4	0,4	1,2	87	4,3

26	4	2011	7,6	12,1	1,2	0,4	88	5,3
27	4	2011	8	16,8	0	11,6	78	4,7
28	4	2011	4,7	20,9	0,6	11,2	71	2,6
29	4	2011	10,8	23	0	6,5	59	4,3
30	4	2011	8,2	14,7	0,5	1,3	87	6,2
1	5	2011	4,7	20,8	0	8,6	67	3,2
2	5	2011	11,3	18,1	0,8	5,1	61	8,2
3	5	2011	10,2	14,8	0,2	2,6	88	5
4	5	2011	4,5	20	0	11,4	76	2,7
5	5	2011	7,4	22,1	0,2	10,4	71	3
6	5	2011	8,2	24,2	0	12,5	66	2,7
7	5	2011	9,4	23,4	0	7,8	62	3,6
8	5	2011	8,8	22,4	0	12,5	62	3,5
9	5	2011	4,7	22,6	0	12,8	60	4
10	5	2011	6,1	23	0	12,7	63	3
11	5	2011	4,4	25	0	12,7	60	2
12	5	2011	6,6	24,7	0	11,5	57	2,6
13	5	2011	6,5	27,7	0	11,9	53	2,7
14	5	2011	9,8	28,9	0	11,4	46	3
15	5	2011	10,9	23,3	0	11,7	64	4,2
16	5	2011	6,4	19,4	0	12,4	52	4,1
17	5	2011	3,5	19,2	0	1,6	66	2,3
18	5	2011	8,1	23,9	17,4	1,6	75	2,1
19	5	2011	12,3	21,1	2,0	3,5	84	3
20	5	2011	11,5	16,1	13,8	0	91	3,2
21	5	2011	11,6	14,3	6,5	0	94	3,5
22	5	2011	9,9	14,8	0,3	0,9	87	3,8
23	5	2011	7,7	19,1	0	12	73	5,1
24	5	2011	7,5	21,7	0	12,9	69	4
25	5	2011	8,9	22,9	0	12,6	62	4,2
26	5	2011	7,8	25,5	0	11,9	58	1,8
27	5	2011	9,9	27	0	8,1	56	2,8
28	5	2011	12,6	27,3	0	11,3	61	3,6
29	5	2011	13	29,6	1,2	11,4	53	3,7
30	5	2011	16	30,4	0,4	4,7	63	3,5
31	5	2011	15,2	26,8	3,8	5,8	75	2,8
1	6	2011	10,8	18,5	0	9	81	4,3
2	6	2011	10,7	19,8	3,5	4,5	80	4
3	6	2011	11,2	20,5	11,8	6,2	83	3,8
4	6	2011	11,7	21,6	5,3	5,5	82	3,2
5	6	2011	13	20,7	1,1	2,3	82	2,8
6	6	2011	13,3	23	0	3,4	85	3,3
7	6	2011	10,9	24,9	0	7,3	74	3
8	6	2011	8	23,1	0	12	69	3
9	6	2011	8,9	25,8	0	10,9	65	2,3

10	6	2011	13,8	22,2	0	2,1	72	3,8
11	6	2011	7,9	26,2	0	10,8	66	2,2
12	6	2011	9,3	27,6	0	12,3	56	2,6
13	6	2011	11,8	30,2	0,2	12,7	52	3,3
14	6	2011	12,5	28,9	0	13	51	3,3
15	6	2011	10	26,9	0	12,7	50	4
16	6	2011	9,1	28,8	0	12,8	46	2,6
17	6	2011	12,7	32,1	0	12,8	46	3
18	6	2011	14,3	34,8	0	12,8	42	4,2
19	6	2011	14,2	31,7	0	12,7	50	2,1
20	6	2011	14,1	33,5	0	12,6	51	2,7
21	6	2011	17,2	34,5	0	10,4	44	3,1
22	6	2011	17,5	33,1	0	4,6	52	3,1
23	6	2011	15,7	31,9	1,8	6,4	66	4,1
24	6	2011	15,1	33,2	0	11,4	53	2,8
25	6	2011	13,9	32,5	0	13	49	3,1
26	6	2011	11,7	33,5	0	13	42	2,8
27	6	2011	16,7	33,8	0	12,8	40	3,1
28	6	2011	16,3	35	0	12,7	37	2,7
29	6	2011	16,9	35,5	0	12,9	41	3
30	6	2011	16,4	35,8	0	12,6	40	2,6
1	7	2010	17,4	34,6	0	12,5	40	2,6
2	7	2010	16,7	35,1	0	12,7	41	3,3
3	7	2010	16	37,2	0	8,5	37	2,3
4	7	2010	21,6	34,5	0	6,3	34	3,8
5	7	2010	14,9	30,1	0	13	52	3,3
6	7	2010	12,2	32,9	0	12,9	45	2,6
7	7	2010	16	35,1	0	12,1	37	4,1
8	7	2010	18,4	37,6	1,6	12,5	33	3,8
9	7	2010	19,4	37,4	2,2	9,1	47	2,7
10	7	2010	20,4	38,4	0	8,3	39	3,7
11	7	2010	21,8	38,3	0	6,9	35	2,8
12	7	2010	19,2	39,9	0	11,2	31	4,3
13	7	2010	19,9	38	0	11,2	43	4,1
14	7	2010	17,5	33	0	12,3	65	4,1
15	7	2010	17,9	34,2	0	10,8	58	4
16	7	2010	18,9	35,3	0	10,9	41	3,5
17	7	2010	21,8	36,5	0	12,4	35	4,7
18	7	2010	18,4	36,1	0	11,8	43	3,3
19	7	2010	19,4	35,8	0	11,1	47	4,1
20	7	2010	14,7	33	0	12,1	49	2,8
21	7	2010	17,7	37,8	0	10,5	45	3,6
22	7	2010	21,4	40,6	0	10,3	33	4,2
23	7	2010	19,4	29,1	0	12,6	65	4,6
24	7	2010	15	31,7	0	12,8	58	3,2

25	7	2010	14,5	27,5	0	12,9	56	3,5
26	7	2010	13,1	30,8	0	12,8	52	3,3
27	7	2010	15,8	33,3	0	12,2	43	2,8
28	7	2010	18,2	34,8	0	12,7	44	3,5
29	7	2010	15,6	34,1	0	12,7	50	3
30	7	2010	19,4	33,2	0,1	10,2	51	3,7
31	7	2010	13,6	31,9	0	12,5	50	2,2