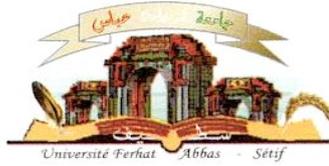


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Ferhat Abbas Sétif 1
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة فرحات عباس، سطيف 1
كلية علوم الطبيعة والحياة

DEPARTEMENT DE SCIENCES AGRONOMIQUES

N°...../SNV/2021

THÈSE

Présentée par

BELAGROUZ Abdenour

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Filière : AGRONOMIE

Spécialité : PRODUCTION VÉGÉTALE

THÈME

**Etude des caractéristiques liées à l'efficience d'utilisation de l'eau
chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*)**

Soutenue publiquement le 18/05/2021

DEVANT LE JURY

Président	MAKHLOUF Abdelhamid	Pr. UFA Sétif 1
Directeur	CHENNAFI Houria	Pr. UFA Sétif 1
Examineur	LARID Mohamed	Pr. UMAB Mostaganem
Examineur	BENNIU RAMDANE	Pr. UMB M'sila
Examineur	BENKHELIFA Mohamed	Pr. UMAB Mostaganem
Examineur	AISSAOUI Mohamed Ridha	MCA. UFA Sétif 1

Laboratoire de valorisation des ressources biologiques naturelles (LVRBN)

Remerciements

Au nom d'ALLAH, le Clément et le Miséricordieux.

A travers cette thèse de doctorat en sciences, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont eu à contribuer de près ou de loin à construire ce travail, et à me former dès ma tendre enfance.

*J'aimerais d'abord exprimer ma gratitude à mon encadreur Melle. **Pr CHENNAFI.H** pour avoir accepté de bon gré de participer à cette thèse, ainsi que pour ses efforts fournis, pour ses conseils judicieux prodigués et pour sa patience et sa persévérance dans mon suivi, malgré ses charges intenses.*

*Mes profonds remerciements vont aux membres du jury le **Pr MAKHLOUF A.**, le **Pr LARID M.**, **BENKHELIFA M.**, **BENNIOU R** et le **Dr AISSAOUI MR**, qui m'ont fait l'honneur de participer et de juger ma thèse malgré leurs plans de charge.*

*Je tiens aussi à remercier le personnel de L'ITGC et en particulier Mr **LWAHDI** et Mr **BACHIR A** que je remercie vivement pour leurs conseils précieux et encouragements.*

*A **GUENDOZ Ali** chercheur au niveau de L'INRA de Setif pour son aide et son encouragement*

J'adresse également mes reconnaissances aux enseignant(e) s qui m'ont donné les bases de la recherche scientifique et qui grâce à leur soutien, ont su me créer les conditions favorables à la poursuite de mes études supérieures.

*A titre personnel, je souhaite remercier chaleureusement les membres de ma famille du CNCC représentée par le maître **HADJ SAHRAOUI Abdelkrim** et ses oiseaux : **RABIE**, **MOHAMED**, **SARA** pour m'avoir épaulé, encouragé, et soutenu durant l'élaboration de cette thèse.*

Et aux personnes qui m'ont aidé directement ou indirectement

Sincères remerciements

BELAGROUZ Abdenour

DÉDICACE

Je dédie cette thèse de doctorat à :

La mémoire de mes parents Mabrouk (El becha) et Dalila

A mes anges, des adorables poussins, mes bébés mon fils

ABDELKAYOUM et Ma fille DORSAF

A ma femme (SAMIRA), Toi qui m'as éclairé mon chemin et qui m'as encouragé, Toi qui as supporté tant de choses pour moi. Tu es ma raison et ma force de réussite, j'espère que tu trouveras dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour

A ma grande famille

A ma belle famille

A tous ceux qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui

BELAGROUZ Abdenour

دراسة الخصائص المتعلقة بكفاءة استغلال الماء لدى القمح الصلب (*Triticum durum Desf*)

ملخص:

يعتبر الاجهاد المائي العائق الاكبر

يعتبر الاجهاد المائي العائق الاكبر تحدي بمنطقة الهضاب العليا بسطيف اذ يآثر مباشرة على إنتاجية القمح. غير أن استخدام الموارد الجينية المناسبة لتحمل الجفاف يمنح نوع من القدرة على إدارة الزراعة المطرية وكذلك يعتبر وسيلة رصد للمحافظة على البيئة. وهكذا فإن النهج مصمم على اختيار تقاوي من القمح تتميز بخصائص تحمل الجفاف. ويعكس هذا التفكير قدرة قيّمة على استخدام رطوبة التربة بكفاءة في مراحل نُذرة التساقطات. وعلى هذا الأساس اجريت تجارب على مستوى محطة البرهنة ونتاج البذور التابعة للمعهد التقني للمحاصيل الكبرى بسطيف خلال المواسم الفلاحية 2014/2013، 2015/2014، 2016/2015. ويتمثل المبدأ في اختبار مجموعة من تقاوي القمح الصلب (*Triticum durum desf*) وذلك عن طريق تقدير مستوى تثمينها للماء المستهلك عن طريق قياس الخصائص الزراعية، الفينولوجية، المرفولوجية والفسولوجية. ولذلك فإن هذه المنهجية تظهر أهمية في البحث عن تقاوي مثلى والتي تعتبر متكيفة مع الوسط العالي الشبه الجاف. المواد النباتية المستعملة تتألف من 10 تقاوي من القمح الصلب موزعة على فئتين فئة التقاوي القديمة وفئة التقاوي الحديثة. وقد تم تنظيم التقاوي على شكل التصميم العشوائي الكامل بالأجنحة والذي ضم أربعة أجنحة. أظهرت النتائج ان صنف واحة يتميز بكفاءة عالية لاستغلال الماء لإنتاج المردود الحبي فُدرت ب 8,09 كغ/م²، اما بالنسبة لصنف جناح الخطيفة فتقل نسبة كفاءة استغلال الماء لإنتاج المردود الحبي ب 54,14% مقارنة بصنف واحة. كما انه سجلت ارتباطات إيجابية ومعنوية بين مؤشر (ك إ م ح)، و المردود الحبي (م ح) ، ومؤشر الحصاد (مأ حد) وعدد الحبات لكل سنبل (ع ح س) و عدد الحبات في متر المربع (ع ح م²) ومحتوى الكلوروفيل (سباد). ومن ناحية أخرى فإن هذا المؤشر كان سلبيا و مترابطا إلى حد كبير مع طول النبات (ط ن) والمردود القشي (م ق) وعدد الأيام بعد الزرع للوصول الى مرحلة التسنبل (ع ا ب ز تس). لذا فإن النموذج الفعال للإنتاجية الصادرة عن الكفاء العالية لاستغلال الماء على مستوى الهضاب العليا والتي تنتمي الى المناطق شبه القاحلة، يتميز بتسنيبل مبكر وبالتالي إنتاجية فائقة. وعليه، تعبر هذه الخصائص على النتيجة التي عليها تقام عمليات الانتقاء والاستنباط.

الكلمات المفتاحية:

قمح صلب, كفاءة استغلال الماء, صنف, وسط شبه جاف, خصائص, أداء فعال.

Etude des caractéristiques liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Résumé

Sur les Hauts Plateaux Sétifiens, le stress hydrique reste la contrainte la plus redoutable affectant l'élaboration de la productivité de la culture du blé. Toutefois, le recours aux ressources génétiques adaptées à la sécheresse représente un outil de management de l'agriculture pluviale, et aussi de monitoring pour la préservation de son environnement. Donc, l'approche est conçue sur la sélection de cultivars de blé dotés de caractéristiques de tolérance à la sécheresse. Cette réflexion trahit un pouvoir de valorisation quant à l'utilisation efficiente de l'eau du sol, à des stades d'avènement du déficit hydrique. Dès lors, des expérimentations ont été conduites sur le site de la *Ferme de Démonstration et de Production de Semences, ITGC de Sétif*, au cours des campagnes agricoles de 2013/2014, 2014/2015 à 2015/2016. Le principe consiste à tester des génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à leurs réponses à l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE). Le niveau de valorisation de l'eau par le matériel végétal est appréhendé à travers les composantes agronomiques, phénologiques, morphologiques et physiologiques. Donc, au préalable cette méthodologie manifeste un intérêt qui tend vers la recherche d'idéotypes productifs, considérés adaptés au milieu semi-aride d'altitude. Ainsi, le matériel végétal est constitué de dix cultivars de blé dur répartis en deux catégories, *cultivars anciens* et *cultivars modernes*. Pour être expérimentés, les génotypes ont été organisés dans un dispositif expérimental en blocs complètement randomisés avec quatre répétitions. Les résultats révèlent que la variété waha se démarque par une performante efficiente pour l'utilisation de l'eau, de $8,09 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Par contre, pour le génotype Djenah Khetaifa, l'EUE se réduit de 54,14% relativement à waha. Par ailleurs, l'EUE est corrélée positivement et significativement avec le rendement en grain (RDT), l'indice de récolte (IR), le nombre de grain par épi (NGE), celui de grains par mètre carré (NGM) et avec la teneur en chlorophylle (SPAD). D'autre part, cette composante apparaît être négativement et significativement corrélée avec la hauteur du chaume (HT), le rendement en paille (PLL), le nombre de jours après semis pour épier (JASEp). Donc l'idéotype recherché efficient pour l'eau pour la productivité en zones semi-aride des *Hauts Plateaux Sétifiens*, se révèle par une précocité à l'épiaison et donc une productivité performante. En revanche, ces caractères expriment la résultante sur laquelle s'opère la sélection.

Mots clés

Blé dur, efficacité d'utilisation de l'eau, semi-aride, génotype, performance efficiente

Study of the characteristics related to the water use efficiency in durum wheat (*Triticum durum* Desf.)

Abstract

Water stress on the High Sétifiens Plateaus remains the most challenging constraint on the development of wheat crop productivity. However, the use of genetic resources adapted to drought is a tool for managing rainfed agriculture and also monitoring for the preservation of its environment. Therefore, the approach is designed to select wheat cultivars with drought tolerant characteristics. This reflection shows a power of valorization regarding to the efficient use of soil water at the stages of water deficiency. Since then, field experiments carried out on the site of the Demonstration and Production of Seeds Farm, ITGC in Setif, during the cropping seasons 2013/2014, 2014/2015 to 2015/2016. The principle involve to test durum wheat genotypes (*Triticum durum* Desf.) for their water use efficiency (WUE) responses. The valuation level of water use by plant material is understood through the agronomic, phenological, morphological and physiological components. So, this methodology manifests an interest that tends towards the search for productive ideotypes, considered adapted to the semi-arid region of altitude. Thus, the plant material consists of ten cultivars of durum wheat divided into two categories, old cultivars and modern cultivars. For experimentation, genotypes were organized in an experimental device in completely randomized blocks with four repetitions. The results show that waha variety has an efficient water performance of $8.09 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. However, for the genotype Djenah Khetaifa, the WUE_{GY} is reduced by 54.14% relative to waha. Furthermore, WUE_{GY} is positively and significantly correlated with grain yield (GY), harvest index (Hi), number of grain per spike (NGS), number of grain per square meter (NGSM) and chlorophyll content (SPAD). On the other hand, this component appears to be negatively and significantly correlated with height (He), straw yield (SY), number of days after sowing to heading (DASH). Thus, the desired efficient water idéotype for productivity in semi-arid areas of the High Sétifiens Plateaus is revealed by an early heading and thus a high productivity. However, these characters express the result on which the selection occurs

Keywords:

Durum wheat, water use efficiency, semi-arid, genotype, efficient performance

Sommaire

Remerciements	
ملخص	
Résumé	
Abstract	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction	01
CHAPITRE I. Revue bibliographique	
1. L'Origine du blé dur (<i>Triticum durum Desf</i>)	04
1.1 Origine géographique	04
1.2 Origine génétique	06
2. Biologie du blé	06
2.1. Les grandes périodes de la croissance	05
2.2. L'architecture aérienne de la plante de blé	07
2.3. Croissance et développement du blé	08
2.3.1. La période des feuilles (végétative)	08
2.3.2. La période reproductrice	08
2.3.3. La période de maturation	09
2.4. L'indice foliaire et la production de la matière sèche	10
3. La formation du rendement chez le blé dur	11
4. Situation de la céréaliculture dans le monde et en Algérie	12
4.1 Dans le monde	12
4.1En Algérie	14
5. Les contraintes à la production du blé dur en milieu semi-aride méditerranéen	15
5.1 L'effet des températures	15
5.2. L'effet de la salinité	17
5.3 L'effet des plantes adventices	17
5.4 Effet des modes de labour du sol	17
6. L'effet du manque d'eau	19
6.1. L'eau facteur limitant de production	19
6.2. Le confort et le stress hydriques	20
7. Mécanisme de résistance à la sécheresse et l'esquive	21
7.1. Mécanisme de résistance	21
7.2. Esquive ou échappement	21
7.2. Gérance de la déshydratation chez la plante de blé	22
7.3. Tolérance à la déshydratation	23
8. L'efficacité d'utilisation de l'eau et son évaluation	24
8.1. L'efficacité d'utilisation de l'eau	24
8.2. L'efficacité d'utilisation de l'eau pour le rendement	25
9. L'interférence de l'efficacité d'utilisation de l'eau avec les caractères mesurés	26

9.1. Relation entre photosynthèse, chlorophylle et efficacité d'utilisation de l'eau	27
9.3. La vigueur précoce et l'efficacité d'utilisation de l'eau	27
9.4. La phénologie et l'efficacité d'utilisation de l'eau	28
9.5. L'efficacité de transpiration et l'efficacité de l'utilisation de l'eau	28
9.6. L'indice de récolte et l'efficacité de l'utilisation de l'eau	29
10. L'efficacité d'utilisation de l'eau et la notion d'idéotype de blé dur	30

CHAPITRE II. Matériel et Méthodes

1. Présentation du site expérimental	32
2. Mise en place et conduite de la culture	33
2.1. Matériel végétal utilisé	33
2.2. Dispositif expérimental	36
3. Suivi de l'expérimentation et notations des paramètres	37
3.1. La densité apparente du sol	37
3.2. Gradient de variation de l'humidité du sol	37
4. Paramètres révélant le niveau de tolérance de stress de la culture	38
4.2. L'intégrité cellulaire	39
4.3. La température de canopée	39
4.4. La teneur en chlorophylle	40
5. Les paramètres morphologiques	41
5.1. La hauteur de la plante	41
5.2. La surface de la feuille étendard	41
6. Les paramètres agronomiques	41
6.1. Peuplement à la levée	41
6.2. Nombre de talles herbacées	41
6.3. Les composantes du rendement	41
7. Le rendement en grain et la biomasse aérienne	42
7.1. Rendement en grains	42
7.2. Rendement biologique	42
7.3. Rendement paille	42
7.4. L'indice de récolte	42
8. Cinétique de l'accumulation de la biomasse aérienne	42
8.1. L'indice foliaire vert	42
8.2. Matière sèche	43
8.3. Remplissage du grain	43
9. Réserve d'eau du sol	43
10. Eau du sol disponible pour la plante	44
11. Quantité d'eau utilisée au cours du cycle de la culture	44
12. Efficacité d'utilisation de l'eau	44
13. Statut hydrique dans le continuum sol-plante-atmosphère	45
13.1. Quantités d'eau transpirée par la culture et évaporée par le sol	45
13.2. Efficacité d'utilisation de l'eau et déficit de pression de vapeur	45
13.3. Analyse des valeurs décadales des éléments du climat	45

14. Analyse des données	46
CHAPITRE III. Résultats et Discussion	
1. Les éléments liés au climat	47
1.1. La température et la précipitation	47
1.2 Synthèse climatique	50
1.3 La variation de l'eau disponible au cours du cycle de la culture	51
2. Variation des paramètres agro-phénologiques	59
2.1 Variation du rendement et ces composantes	59
2.1.1 Nombre de plants levés /m ²	59
2.1.2 Nombre de talles herbacées /m ²	63
2.1.3 Nombre d'épis /m ²	66
2.1.4 Nombre de grains/épi	68
2.1.5 Nombre de grains/m ²	69
2.1.6 Poids de 1000 grains	71
2.1.7 Rendement en grains	72
2.1.8 Rendement Biologique, en paille et l'indice de récolte	74
2.2 Accomplissement des stades d'épiaison et de maturité des cultivars	77
2.3 Variation de l'accumulation de la matière sèche	79
2.4 Variation de l'évolution du remplissage du grain de l'épi	86
3. Variation des caractères morphologiques	90
3.1 La hauteur du chaume(HT)	90
3.2 Surface foliaire de la feuille étendard (SFE)	93
3.3 Variation de l'indice foliaire vert (GLAI)	95
4. Variation des caractères physiologiques	98
4.1 La teneur en Chlorophylle(CHL)	98
4.2 La température de la canopée (TC)	101
4.3 La teneur relative en eau (TRE)	103
4.4 L'indice d'intégrité cellulaire(IC)	105
4.5. Le poids spécifique de la feuille étendard (PSFE)	107
5. Efficience D'utilisation De L'eau (EUE)	109
5.1 Variation des composantes liées à l'efficience d'utilisation de l'eau	111
5.2. Efficience d'utilisation de l'eau relative à RDT, PLL et BIO	113
5.3. Efficience effective d'utilisation de l'eau relative à RDT, PLL et BIO	114
6. Etude des liaisons inter-caractères	116
7. L'analyse en composants principales (ACP)	119
8. Classification hiérarchique ascendante (CAH)	122
Conclusion et perspectives	124
Références Bibliographiques	
Annexées	

Liste des abréviations

Abréviation	Explication
%	Pour cent
A	Assimilation du CO ₂
ACP	Analyse en composantes principales
AN	L'assimilation Nette
BIO	Biomasse aérienne
BOU	Bousselam
CE	Conductivité électrique
CHL	La teneur en chlorophylle
CIC	Conseil international des céréales
CIHEAM	Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes
CIMMYT	Centre internationale d'amélioration du maïs et du blé du
cm	Centimètre
CM	Carre moyen
cm ²	Centimètre carré
cm ³	Centimètre cube
CNCC	Centre national de contrôle et de certification de semences et plants
Cnis	Centre National de l'informatique et des Statistiques
CNRS	Centre national de ressources textuelles et lexicales
CV	Coefficient de variation
da	La densité apparente du sol
Ddl	Degré de liberté
Dei	Nombre de Jours Apres Semis A l'épiaison
DKH	Djenah lkhoutaifa
Dm	Nombre de jours après semis à maturité
EEUE	Efficacité Effective d'utilisation de l'eau
Es	Evaporation sol
ESD	La Quantité d'eau du Sol disponible
Eto	Evapotranspiration de référence
ETc	Evapotranspiration culturale
EUE	Efficacité d'utilisation de l'eau
EUEBIO	Efficacité d'utilisation de l'eau de La Biomasse
EUEPLL	Efficacité d'utilisation de l'eau de La Paille
EUERdt	Efficacité d'utilisation de l'eau du Grain
FAO	Organisation des Nations Unies Pour l'alimentation Et l'agriculture
G	Conductance stomatique
GLAI	Green leaf area index
GMG	Guemgoum rkhem
GTA	Gatdur

H%	L'humidité Pondérale Observée
H3	Hedba3
Hf	L'humidité Au Point De Flétrissement
Hi	Indice de récolte (harvested index)
HT (cm)	Hauteur du chaume en centimètres
IC	Intégrité cellulaire
IF	Indice foliaire
K	Le coefficient physico-physiologique de la culture
K_d	Le Coefficient de transpiration
Kg	Kilogramme.
MADR	Ministère de l'agriculture et du développement rural
MAP	Mono-ammonium phosphate
MBB	Mohamed ben bachir
MGS	Mgress
Ms	Matière sèche
mScm-1	Milli siemens par centimètre
NE (m2)	Nombre d'épis Par Mètre Carré
NGE	Nombre de grain par épi
NGM (/m2)	Nombre de grains par mètre carré
°C	Degré celsius
OZ₃₆₈	Oued zenati ₃₆₈
P(mm)	Précipitation en millimètre
PLL	Paille
PMG (g)	Poids de mille grains
PPDS	Plus petite différence significative
PSFE	Poids spécifique de la feuille étandard
PTL(/m2)	Nombre de plants levés par mètre carre
RDT (Qx/Ha)	Rendement grain
SE	La Réserve d'eau du Sol
SEA	La ferme expérimentale agricole
SFE (cm2)	Surface de la feuille étandard en centimètre carré
SMT	Semito
TC(C°)	Température de canope
TLL(/m2)	Nombre de talles par mètre carre
TRE	Teneur relative en eau
USAD	Département de l'agriculture des Etats-Unis
VTG(g/JAS)	Vitesse de remplissage gramme de pmg /jas
W	La teneur en eau massique
WAH	Waha
Δe, Pa	Le déficit moyen de pression de vapeur

Liste des figures

<i>N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
1	L'origine géographique des blés cultivés. Adapté de Dubcovsky and Dvorak (2007).	3
2	Schéma de l'origine des génomes portés par les différents blés. Marcussen et al (2014)	5
3	Le cycle de développement du blé (Zadoks et al., 1974)	6
4	Culture de céréale au Stade de tallage (Boyeldieu ,1999)	7
5	Évolution de l'inflorescence chez le blé. D'après. Boyeldieu (1999)	8
6	Principaux stades de remplissage du grain (Gâte, 1995)	9
7	Relation entre photosynthèse, respiration et indice foliaire chez la culture de blé (Evans, 1978)	10
8	Figure 8. Périodes de repérage des composantes du rendement et les contraintes à L'élaboration (Boyeldieu, 1999)	11
9	Les quantités produites en (10 ⁶) de tonnes par les dix premiers pays (FAO,2020)	12
10	Evolution de la production des céréales en Algérie (MADR, 2017)	15
11	Schéma représente les différentes définitions de l'efficience de l'utilisation de l'eau d'après (Tambussi et al., 2007)	26
12	Représentation schématique idéotype de blé dur correspondant aux régions semi-aride Reynolds et al. (2005)	34
13	Profil cultural de parcelle dite Trente	37
14	Schéma du dispositif	40
15	Démentions d'une parcelle élémentaire	41
16	Thermomètre infrarouge de marque TECPEL	45
17	Chlorophylle-mètre de marque SPAD-502Plus	46
18	Variation moyenne décadaire des températures maximales, minimales et moyennes et précipitations. Campagne agricole 2013/2014.	47
19	Variation moyenne décadaire des températures maximales, minimales et moyennes et précipitations. Campagne agricole 2014/2015	49
20	Variation moyenne décadaire des températures maximales, minimales et moyennes et précipitations. Campagne agricole 2015/2016	50
21	Variation de l'humidité disponible pour les variétés en fonction de l'évolution du NJAS pour les trois campagnes (2013/2014-2015/2016).	53
22	Variation de l'humidité en fonction de l'évolution du NJAS pour la campagne 2013/2014.	55

23	Variation de l'humidité en fonction de l'évolution du NJAS pour la campagne 2014/2015.	55
24	Variation de l'humidité en fonction de l'évolution du NJAS pour la campagne 2015/2016	56
25	Variation de l'humidité moyenne (%) en fonction de la campagne de l'expérimentation.	56
26	Variation de l'humidité moyenne (%) des 3 campagnes en fonction des profondeurs	57
27	Variation de l'humidité moyenne (%) en fonction des profondeurs et des campagnes d'expérimentation	58
28	Cumul des pluies automnales (septembre à décembre) des trois campagnes d'étude.	61
29	Nombre de plants levés/m ² des 10 variétés évaluées en fonction des campagnes d'étude (Ppds5% = 25.83).	62
30	Cumul des pluies automnales et hivernales (septembre à mars) des trois campagnes d'étude.	64
31	Nombre de talles herbacées émises/m ² des 10 variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (Ppds5% = 70.40 talles/m ²).	65
32	. Nombre d'épis/m ² des 10 variétés évaluées au cours de trois campagnes d'étude (Ppds5% = 31.07 épis/m ²).	67
33	Nombre de grains/épi des 10 variétés évaluées au cours de trois campagnes d'étude (Ppds5% = 31.07 épis/m ²).	68
34	Cumul des pluies d'avril et de mai des trois campagnes d'étude.	69
35	Nombre de grains/m ² des 10 variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (Ppds5% = 551,25grains/m ²).	70
36	Poids de mille grains en gramme des 10 variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (Ppds5% = 0.95 g).	71
37	Rendement en grains en quintaux par hectare des 10 variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (Ppds5% = 1.83 Qx/ha).	73
38	Le rendement biologique et en paille des 10 variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (Ppds5%BIO = 4,18 Qx/ha, Ppds5%PLL=3,23 Qx/Ha).	74
39	L'indice de récolte en % des 10 variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (Ppds5% = 2,56 en %).	76
40	Variation moyenne de la durée d'épiaison, de la maturité des dix variétés évaluées, durant les trois campagnes d'expérimentation.	78
41	Quantité de matière sèche produite selon la variété pendant les trois campagnes consécutives (2014/2016)	80
42	Evolution globale de la matière sèche en fonction du nombre de jours après semis	81
43	. Evolution de la matière sèche en fonction de nombre de jours après semis au cours de trois campagnes consécutives	82

44	Effet de l'interaction G*NJA pour la réalisation de la matière sèche par les génotypes au cours de trois campagnes	83
45	Taux de croissance de la culture (CGR) en début de cycle (126 JAS) pour les dix variétés durant les trois campagnes consécutives.	85
46	Evolution globale du remplissage des mille grains des dix variétés au cours de trois campagnes consécutives.	87
47	Evolution du remplissage des mille grains en fonction du nombre de jours après semis pour chaque campagne d'étude.	87
48	. Effet de l'interaction NJAS*G sur l'évolution du remplissage du sur les trois campagnes	89
49	. Effet année sur la hauteur du chaume (cm) des variété au cours de trois campagnes	91
50	Variation de la hauteur du chaume en fonction du génotype	92
51	Variation de la surface de la feuille étendard (cm ²) selon les génotypes.	94
52	Variation globale de d'indice foliaire vert(GLAI) en fonction des nombres de jours après semis pour la culture de blé dur au cours des trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)	96
53	Variation de d'indice foliaire vert(GLAI) sous l'interaction JAS*A pour les dix variétés	96
54	Effet interaction NJAS* Variété sur l'indice foliaire vert(GLAI) sur trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)	97
55	. Effet année sur la teneur en chlorophylle	99
56	Effet génotype sur la teneur en chlorophylle.	100
57	Effet génotype sur la TC au cours de trois campagnes consécutives	102
58	Effet génotype sur la teneur relative en eau (%)	104
59	Effet de la variété sur l'intégrité cellulaire au cours de trois campagnes agricoles Successives	106
60	Effet année sur le poids spécifique de la feuille étendard de dix variétés de blé conduits sur trois campagnes successives	108
61	Effet moyen génotype sur le poids spécifique de la feuille étendard de dix variétés de blé conduits sur trois campagnes successives	109
62	L'ET (mm) des génotypes sous l'effet campagne agricole (2014, 2015 et 2016)	111
63	Transpiration de la plante (T, mm) et Evaporation de l'eau du sol (Es, mm) sous l'effet génotype sur les trois campagnes agricoles (2014, 2015 et 2016)	112
64	L'EUE (kg/ha-1mm-1) chez les variétés testées pour produire le RDT, PLL et BIO	113
65	Variation de l'EeueBIO, EeuePLL, EeueRdt des dix variétés évaluées, durant les trois campagnes d'expérimentation.	115
66	Matrice de corrélation des différentes variables illustrées sous forme de corrélogramme	118
67	Représentation en trois démentions des trois premières composantes	119

68	Projection des 10 variétés étudiées, sur les plans des axes 1-2 de l'ACP sur la base des caractères Phéno agro morpho- physiologiques	120
69	Projection des 10 géotypes étudiées ainsi que les variables étudiées, sur les plans des axes 1-2 de l'ACP	121
70	Classification ascendante hiérarchique des cultivars sur la base des traits Phéno-agronomiques et morpho physiologiques examinées lors de l'étude.	122
71	Écart relatif en % des variables mesurés par rapport à la moyenne de trois groupes	123

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
1	Évolution de la production de blé dans le monde (FAOSTA, 2020) M.t	13
2	Nom et pédigrée des génotypes utilisés comme matériel végétal	39
3	Les carrés moyens de l'analyse de la variance du pourcentage de l'humidité résiduelle dans les parcelles expérimentales au cours des trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	52
4	Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et des composantes des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	59
5	Valeurs moyennes de l'effet campagne du rendement et des composantes des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	60
6	Valeurs moyennes de l'effet variété du rendement et des composantes des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	61
7	Variation interannuelle dates d'épiaison et de maturité pour l'ensemble des variétés évaluées	77
8	Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'accumulation de la matière sèche des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	79
9	Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'évolution du remplissage du grain de l'épi des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	86
10	Carrés moyens de l'analyse de la variance de la hauteur du paille des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	90
11	Carrés moyens de l'analyse de la variance de la surface foliaire de la feuille étendard des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	93
12	Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'indice foliaire vert des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	95
13	Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en chlorophylle des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	98

14	Carrés moyens de l'analyse de la variance de la température de canopée des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	101
15	Carrés moyens de l'analyse de la variance de teneur relative en eau des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	103
16	Carrés moyens de l'analyse de l'intégrité cellulaire des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	105
17	Carrés moyens de l'analyse de la variance du poids spécifique de la feuille étendard des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	107
18	Carrés moyens de l'analyse de la variance des composantes de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).	110

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

Le blé est distingué comme principale céréale cultivée en Algérie. Effectivement, le blé prend la première position, la surface récoltée lors de la campagne agricole de 2018 est de 2087003ha (FAOSTAT, 2020). La production moyenne de 2015 à 2019 est de 3.1 Millions de tonnes, celles de 2019 et 2020 dans l'ordre sont de 4.0 et de 3.6 Millions de tonnes (FAO, 2020). La demande des produits alimentaires semble accrue, et *en regard des conditions liées à la pandémie de l'épidémie de Coronavirus, les prix ont augmenté au cours de la saison de printemps de 2020*. Toutefois, en Algérie, selon FAO (2020) les estimations du stock de blé varient de 5.3 Millions de tonnes pour 2018 à 6.6 Millions de tonnes pour 2020. Cependant, les prévisions de 2021 semblent se réduire de 38%. Par ailleurs, le rendement moyen du blé de 2009 à 2018 est de 15.65 qha⁻¹. Par contre, la campagne agricole de 2017, s'est caractérisée par un rendement réduit de 40% à l'égard de celui de 2018 (FAOSTAT, 2020). Pour répondre à une croissance exponentielle de la population, l'Algérie importe environ 7,00 Millions de tonnes de blé (USDA, 2020). Le pays dépend fortement de l'importation de céréales, le blé tendre étant le plus important. Ainsi, au cours des cinq dernières années, les besoins d'importations du pays ont augmenté, la moyenne est de 7,9 millions de tonnes par an de blé tendre, cela représente environ 70% de son utilisation intérieure (FAO, 2020).

La région considérée déterminante pour la céréaliculture, donc elle est renommée, ce sont les *Hauts Plateaux Sétifiens* à étage bioclimatique semi-aride où le déficit climatique se localise sur les trois saisons, mis à part celle de l'hiver (Chennafi, 2012). En revanche, le contexte agropédoclimatique ne semble pas répondre favorablement à une expression potentielle des génotypes de blé cultivés. En effet, en conditions pluviales, les travaux de recherche et de développement révèlent que la productivité de la culture du blé reste étroitement dépendante des contraintes liées aux sols, aux conditions climatiques et aux modes de management des pratiques culturales. Effectivement, les caractéristiques des précipitations par le cumul et la répartition, associée au matériel végétal et à la gestion des pratiques culturales, sont désignés les facteurs qui entravent une productivité potentielle (Hannachi et Felahi, 2010; Latrèche, 2011; Belagrouz, 2013; Ferras, 2015; Belagrouz et al., 2016). Dès lors, apparaissent les divergences de réponses de génotypes de blé d'une saison à une autre et s'expliquent par l'interférence de nombreux paramètres, cependant le plus déterminant est celui du manque d'eau à des stades où la plante la requiert (Chennafi et al., 2005). Par ailleurs, la variabilité spatio-temporelle et les impacts des interactions à l'échelle des compartiments du *continuum sol-plante-atmosphère* affectent le rendement du blé et la qualité des grains (Bouzerzour et al., 2002; Cammarano, 2019). En effet, la capacité productive de la culture du blé reste dépendant des contraintes agropédoclimatiques

(Lipiec et al., 2013). Ainsi, Xue et al., (2016) indiquent que la production de biomasse aérienne de la plante décroît rapidement sous l'effet particulièrement d'un stress hydrique, lorsque l'eau disponible pour la plante varie de 35% à 50% de la capacité de rétention en eau du sol. Les auteurs considèrent que le rapport (eau liée/eau libre) est le paramètre le plus sensible à la sécheresse et prend une valeur de 158% sous stress hydrique relativement au traitement contrôlé (Xue et al., 2016), c'est-à-dire en conditions de confort hydrique (Chennafi, et al., 2006; Chenafi, 2020). D'où la notion de *déficit agricole* lié au stress hydrique, son origine est générée de l'insuffisance conjointement des précipitations et de la préservation de l'eau au niveau du sol au cours du cycle végétatif de la plante (Chennafi, 2012; Lipiec et al., 2013). En effet, le déficit hydrique affecte la productivité au cours du cycle de la plante et donc se répercute sur le rendement final.

Effectivement, l'eau est l'élément vital pour le développement et la croissance des plantes. Cependant, *la ressource en eau devient de plus en plus rare, donc chère*. En effet la ressource en eau se raréfie, par sa quantité et sa qualité (Salam et al., 2019; Castro Campos et al., 2020). Les Hauts Plateaux Sétifiens sont renommés zone céréalière, toutefois les rendements restent faibles à l'égard des efforts déployés en agriculture. Comme toutes les études sur les contraintes à la production de la céréale révèlent que l'eau est l'élément le plus contraignant (Belagrouz et al., 2018), le management actuel des pratiques culturales, positionné avec les risques du changement climatique, se pose avec acuité (Chennafi, 2008). En revanche, un challenge particulier est recommandé pour assurer une régularité de fonctionnement de l'agrosystème pour une production potentielle des cultures. Ainsi, l'attention doit s'agencer sur une approche de monitoring du matériel végétal efficient pour l'eau.

En effet, en fonction de la quantité d'eau transpirée, s'évalue la productivité de la plante. Ainsi, Karrou et Oweis (2012) définissent la productivité totale (PT) par le rapport du rendement grain sur la quantité d'eau évapotranspirée au cours de la saison. Elle est exprimée en kilogramme par hectare par millimètre d'eau utilisée par la plante ($\text{kgha}^{-1}\text{mm}^{-1}$). Donc, l'efficacité d'utilisation de l'eau s'évalue par la production de grains ou de biomasse aérienne produite sur la quantité d'eau utilisée (Stewart et al., 1983). Ce caractère lié à la culture reste tributaire des conditions du climat. Tataw et al., (2016) insèrent l'effet lié au changement du climat et indiquent que le régime des précipitations future réduit significativement le rendement du blé, l'indice de surface foliaire et la hauteur des plantes au stade de croissance précoce. Ce résultat prédit que la productivité sera aussi affectée.

Dès lors, le recours au matériel végétal qui se singularise par une *valorisation effective de l'eau* semble déterminant. En revanche, cette approche est édictée en tant que solution intermédiaire mais permanente, recommandée et urgente. Effectivement, l'expression phénologique relève que le rendement des cultures est directement dépendant de la transpiration de la culture (Sinclair, 2018).

D'ailleurs, Blum (2009) considère que le rendement des cultures en conditions de stress hydrique est bien déterminé par l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes. Donc, *l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) est assimilée à une composante caractéristique de résistance à la sécheresse* (Blum, 2009). Ainsi, l'EUE est définie par la quantité de CO₂ fixée lors de la photosynthèse relativement à la quantité d'eau perdue par la plante dans l'atmosphère (Bertolino et al., 2019). En environnement des Hauts Plateaux Sétifiens, l'introduction de génotypes performants par les caractéristiques morphologiques, agronomiques et physiologiques, améliorent l'efficacité d'utilisation de l'eau (Chennafi, 2006; Belagrouz et al., 2018). Donc, la sélection de génotypes de blé considérés efficaces, donc valorisant la quantité d'eau disponible à une profondeur donnée dans le profil cultural et utilisée à un stade végétatif où l'avènement d'un déficit hydrique est repéré, apparaît un outil de modèle d'innovation en agriculture pluviale (Belagrouz et Chennafi, 2016). Ainsi, les génotypes de blé qui se discernent par une résilience en milieu déficitaire en eau représentent un volet puissant de management de l'agrosystème pour stabiliser et améliorer la production dans un contexte de durabilité en agriculture pluviale, et donc par la préservation de l'eau au niveau du sol au profit de la plante efficace. C'est sous cette approche méthodologique que s'insèrent les éléments calés sur *Etude des caractéristiques liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (Triticum durum Desf.)*.

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I. Synthèse bibliographique

1. Origine du blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Le blé est une monocotylédone et appartient au genre *Triticum* de la famille des *Gramineae*. C'est une céréale dont le grain est un fruit sec et indéhiscent, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments (Feillet, 2000). Le genre *Triticum* s'intègre dans la tribu des *Triticées* au sein de la famille des *Poacées*, au groupe des angiospermes monocotylédones (Bolot et al., 2009).

1.1. Origine géographique

Les premières cultures de blé sont apparues il y a environ 10000 ans en Mésopotamie au moment de la révolution néolithique (Shewry, 2009). Cette période distingue la transition de mode de vie basé sur la chasse et la cueillette à celui qui s'appuie sur l'agriculture et l'élevage, développant ainsi un système de sédentarisation. Les éléments archéologiques, génétiques et botaniques, déterminent que l'origine des premiers blés cultivés qui sont l'engrain diploïde (*T. monococcum*) et l'amidonnier tétraploïde (*T. turgidum spp dicoccum*) est accordée à une zone limitée du croissant fertile située à l'amont du Tigre et de l'Euphrate et qui correspond à des territoires de l'actuelle Syrie et de la Turquie (Figure 1) (Lev- Yadun et al., 2000; Dubcovsky et Dvorak, 2007).

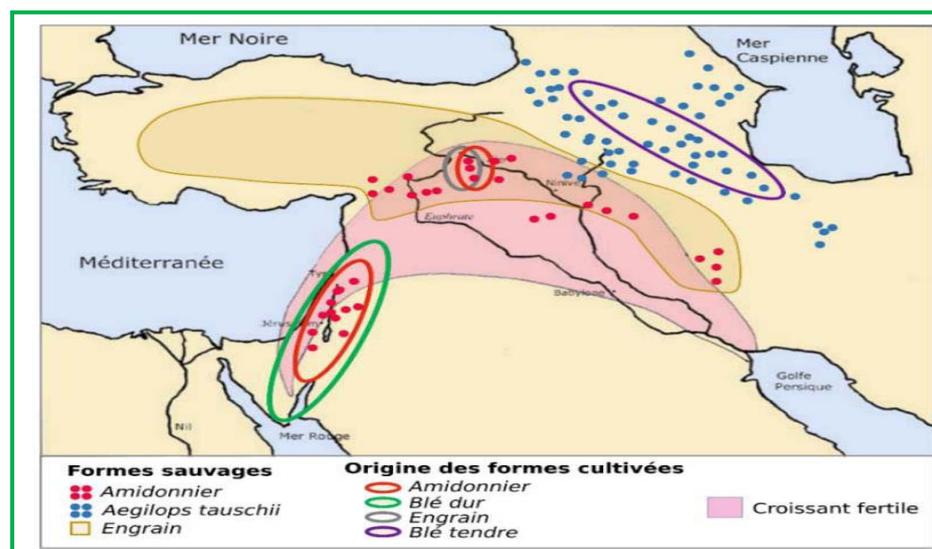


Figure 1. Origine géographique des blés cultivés (Dubcovsky et Dvorak, 2007)

Cependant l'origine du blé tendre, semble être localisée au Nord-Ouest de l'Iran et/ou au Nord-Est de la Turquie. La diffusion du blé en Europe a débuté vers environ 8000 ans avant JC à partir du bassin méditerranéen. La culture du blé s'est étendue à l'Est du croissant fertile pour atteindre la Chine vers environ 5000ans, vers l'Afrique à travers l'Egypte vers 6000ans. Le blé fut introduit au XVI^e siècle en Amérique par les Espagnols, puis en Australie par les Anglais au XVIII^e siècle, à partir de pools génétiques européens (Shewry, 2009).

1.2. Origine génétique

Les blés cultivés appartiennent au genre *Triticum* et possèdent différents niveaux de ploïdie, qui témoignent des événements de polyploïdisation survenus au cours de leur histoire évolutive, avant domestication. Les espèces sont diverses, des espèces diploïdes telles que l'engrain ou petit épeautre (*Triticum monococcum*), des espèces tétraploïdes comme l'amidonnier (*T. turgidum*) et des espèces hexaploïdes (*T. aestivum*) (Figure 2a). Les blés tétraploïdes se sont différenciés en sous-espèces comme l'amidonnier domestiqué ou le blé dur, (*T. turgidum spp dicoccoïdes ou durum*) respectivement. Il en est de même pour les blés hexaploïdes où deux sous-espèces sont cultivées, le blé tendre (*T. aestivum spp aestivum*) et le grand épeautre (*T. aestivum spp spelta*). Le génome des blés hexaploïdes est ainsi constitué de 3 génomes différents (A, B et D), chacun constitué de 7 paires de chromosomes, soit un total de 42 chromosomes (Figure 2b). La comparaison de ces 3 génomes a prédit leur date de divergence pour appréhender ainsi l'histoire phylogénétique du blé (Marcussen et al., 2014). En revanche, les génomes diploïdes (2n=14) A et B, portés respectivement par *T. urartu* et *Aegilops speltoides* ont divergé il y a environ 6,5 Millions d'années, succédés par un premier événement d'hybridation à l'origine du génome D (2n=14) il y a 5,5 Million d'années (Figure 2c). Le génome hexaploïde du blé tendre est alors apparu suite à deux événements majeurs de polyploïdisation. Le premier correspond à une hybridation il y a environ 0,8 Millions d'années entre *T.urartu* (AA) et une espèce proche d'*Ae. speltoides* (BB) qui a permis l'apparition du blé dur sauvage (*T. turgidum*) au génome AABB à l'origine du blé dur actuel. Le second phénomène a eu lieu il y a environ 0,4 Million d'années et correspond à un croisement entre *T. turgidum* (AABB) et le diploïde *Ae. tauschii* (DD), qui a donné naissance à l'ancêtre hexaploïde du blé tendre (AABBDD).

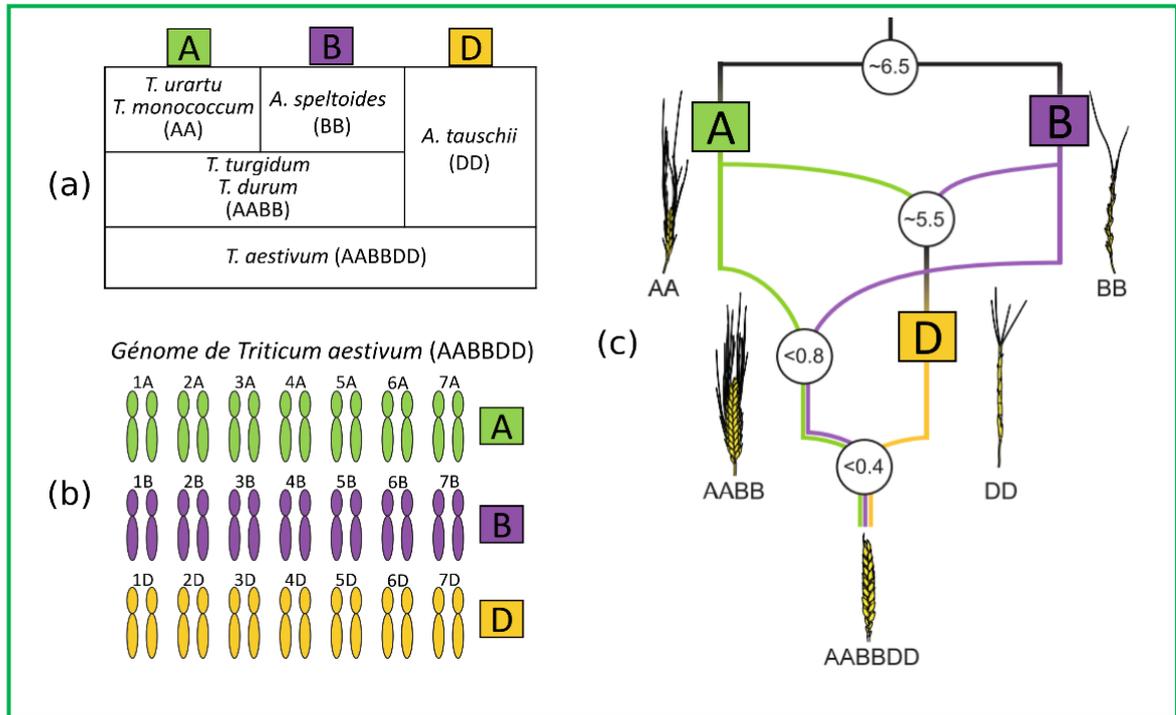


Figure 2. Origine des génomes portés par les différents blés (Marcussen et al., 2014)

2. Biologie du blé

2.1. Principales périodes de croissance

Le cycle de développement du blé dur comprend trois grandes périodes (Figure 3). La première période végétative (des feuilles), s'étale de la germination aux premières manifestations de l'allongement de la tige principale. La période reproductrice (des tiges) s'étend du tallage herbacé à la fécondation (Boyeldieu, 1999). Elle apparaît au cours du tallage et regroupe la formation de l'ébauche de l'épi, l'initiation florale (montaison-gonflement) et la méiose-fécondation (Egli, 2017). La troisième période de formation et de maturation des grains est repérée de la fécondation à la maturation physiologique du grain. A chacune de ces phases concordent des exigences spécifiques de la plante liées aux facteurs et conditions du milieu (Bodson et al., 2019). Le repérage de ces périodes prédit le raisonnement du choix des techniques culturales. A cet effet, plusieurs échelles ont été établies pour identifier les stades végétatifs clés du cycle de développement de la culture du blé. Selon Soltner (2016) les échelles de notation les plus utilisées, donc les plus recommandées sont celles de Jonard (1952), Feeks In Large (1954) et de Zadocks (1974) (Figure 3).

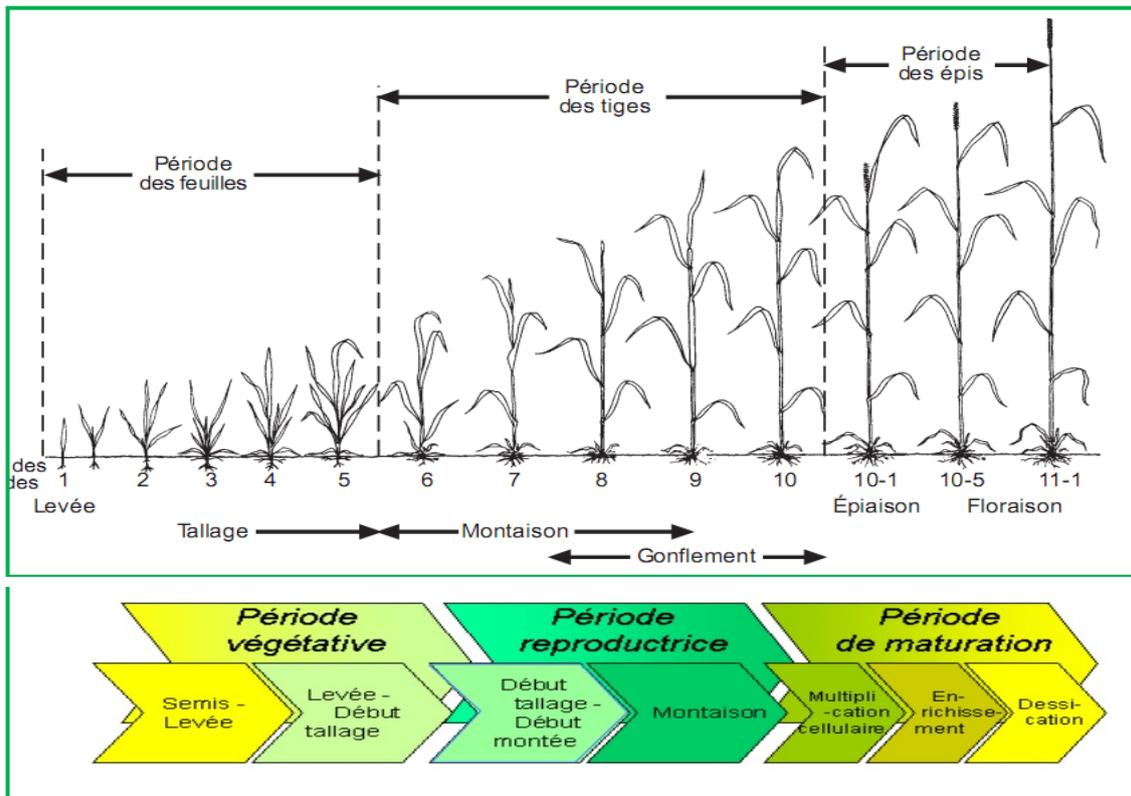


Figure 3. Cycle de développement du blé (Zadoks et al., 1974)

2.2. Architecture aérienne de la plante de blé

L'appareil végétatif est constitué de talles émises depuis le plateau de tallage situé à la base de la plante (Figure 4c). Ces talles se développent à partir du bourgeon principal (talle principale) et des bourgeons axillaires (talles secondaires). Chaque talle se compose de phytomères formés de tiges, gaines, limbes foliaires, un bourgeon axillaire à son sommet un épi formé de deux rangées d'épillets situés de part et d'autre du rachis (Boyeldieu, 1999).

L'épillet regroupe trois à quatre fleurs à l'intérieur de deux glumes. Chaque fleur est dépourvue de pétales, entourée de deux glumelles. Elle contient trois étamines et un ovaire surmonté de deux styles plumeux. La fleur du blé est dite cléistogame, donc le pollen est relâché avant la sortie des étamines de la fleur. Du fait du caractère cléistogame de la fleur, l'autofécondation est le mode de reproduction fréquent (autogamie). Les glumes et les glumelles sont éliminées lors du battage pour libérer le grain. Le grain, ou caryopse, est à la fois le fruit et la graine du fait que les enveloppes du fruit sont soudées à celles de la graine. Ses réserves contenues dans l'albumen sont composées de 65% d'amidon, 15% de protéines,

15% d'eau et de microéléments, le Fe, le Zn, les acides gras et les vitamines (Bogard et *al.*, 2011). La qualité de la pâte de la farine est liée à la structure et à la composition de l'amidon.

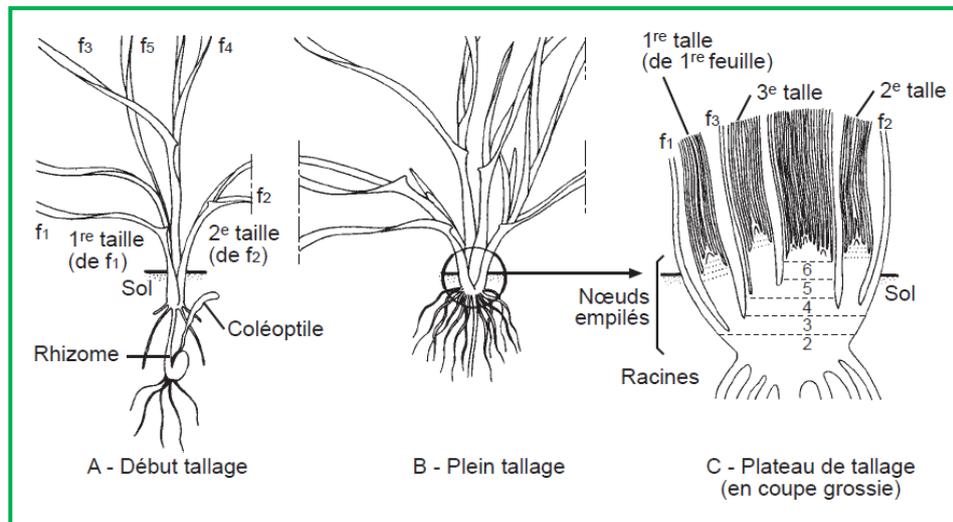


Figure 4. Culture de céréale au stade de tallage (Boyeldieu, 1999)

2.3. Croissance et développement du blé

Le cycle biologique du blé est divisé en deux périodes, végétative et reproductrice, qui sont subdivisées en phases délimitées par des stades (Soltner, 2016). La maturation constitue une troisième période, relative à l'accumulation dans les grains des produits issus de la photosynthèse qui, s'étaient auparavant accumulés dans la tige, les racines, la rafle (Gautier, 1991; Yu et *al.*, 2015).

2.3.1. Période des feuilles (végétative)

Elle commence par la germination qui correspond à l'entrée de la semence en vie active et dès le début de croissance de l'embryon (Michalcová et *al.*, 2019) décelable par les échanges respiratoires de la graine. Ce processus préparatoire se traduit par la sortie des racines séminales de la coléorhize et, à l'opposé, par la croissance d'une préfeuille, (Boyeldieu, 1999). La levée est marquée par l'apparition de la première feuille qui sera fonctionnelle et percera le sommet du coléoptile. Le stade début tallage est repéré dès que la plante possède trois à quatre feuilles et une tige sur le maître brin à l'aisselle de la feuille la plus âgée (Gate, 1995). La fin du tallage est celle de la fin de la période végétative. Elle marque le début de la phase reproductrice, conditionnée par la photopériode et la vernalisation, dès l'élongation des entre nœuds (Steinfort et *al.*, 2017).

2.3.2. Période reproductrice

Le stade A marque le début de la période reproductrice (Figure 5), l'apex se différencie en épi. Cette période se termine à la fécondation, plus ou moins repérable extérieurement selon les espèces par la floraison qui la suit directement. Elle s'étend du stade A, B, et C. qui représentent les manifestations intérieures, les manifestations extérieures débutent par dès la montaison juste après la fin de tallage. Elle se distingue par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales (Kinet, 2018).

Le stade de l'épiaison–floraison se réalise au stade méiose pollinique, la gaine de la dernière feuille s'écarte progressivement suite à l'allongement des derniers entre-nœuds de la tige, la gaine s'éclate et le sommet de l'épi sort de la dernière gaine (Sadeghi et al., 2017).

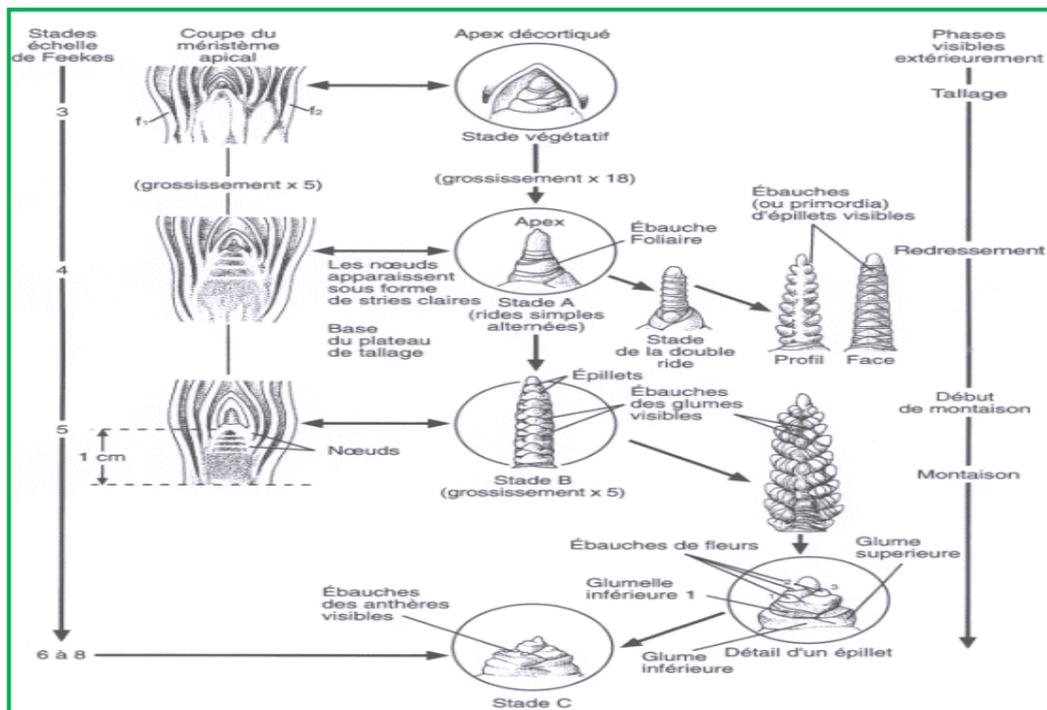


Figure 5. Évolution de l'inflorescence chez le blé (Boyeldieu, 1999)

2.3.3. Période de maturation

A ce stade, l'élongation du dernier entre-nœud assure l'élévation de l'épi au-dessus de la dernière feuille. Le stade gonflement du grain est marqué par une photosynthèse intense pour l'élaboration des substances de réserve, l'amidon migre vers l'albumen, ainsi le grain grossit tandis que l'embryon se forme. Cette migration nécessite une circulation d'eau, il peut y avoir échaudage en cas de stress hydrique (Madeline et al., 2019). Le grain subit trois stades, du

grain laiteux au pâteux au grain dur. Entre les stades laiteux et pâteux (Figure 6), la quantité d'eau contenue dans le grain est stable, c'est le palier hydrique (Houssa et al., 2017).

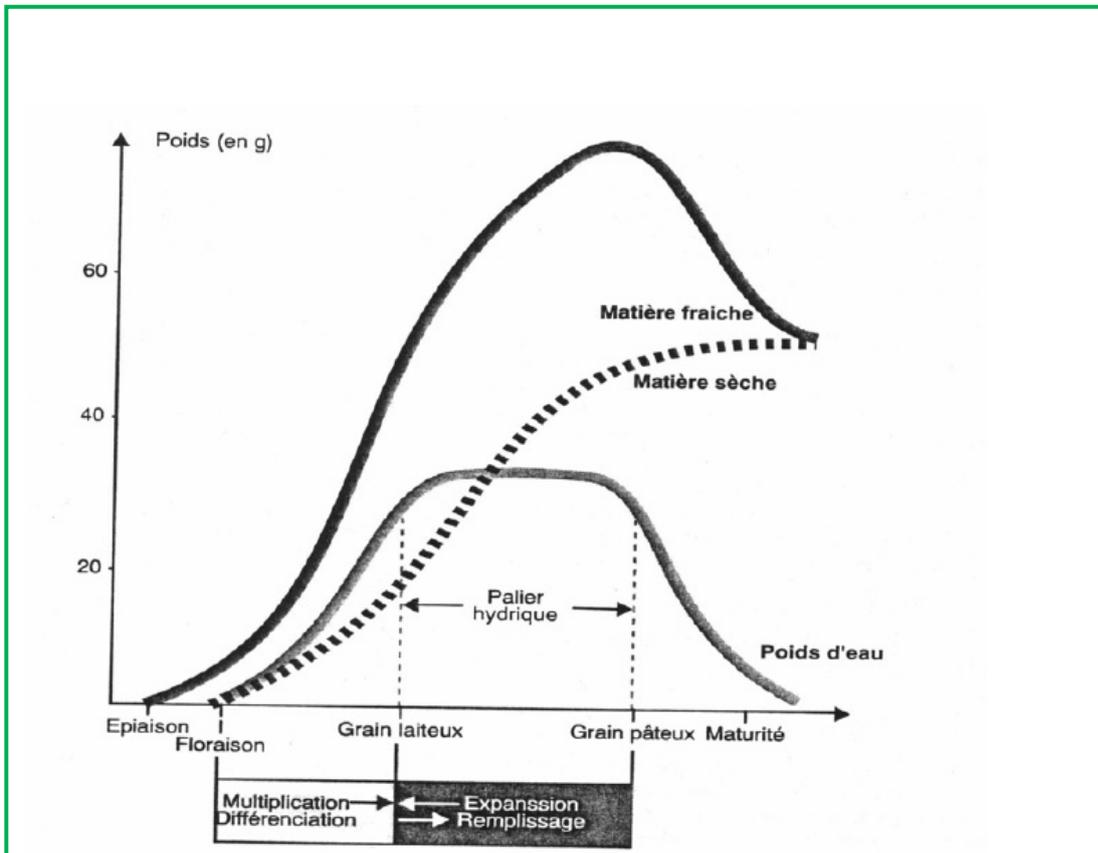


Figure 6. Principaux stades de remplissage du grain (Gâte, 1995)

2.4. L'indice foliaire et production de la matière sèche

L'indice foliaire (*leaf area index*) mesure la taille de l'appareil assimilateur, il représente le rapport entre la surface foliaire totale d'un couvert (L) et la surface de sol correspondante (A), avec $LAI = L \times A^{-1}$ (Apolo-Apolo et al., 2020). L'énergie lumineuse interceptée est liée à l'amplitude de ce rapport (Tao et al., 2018). Boyeldieu (1996) considère que pour les céréales, un indice foliaire de valeur de 4 indique que le feuillage intercepte 95% de l'énergie lumineuse. Cependant, si l'indice continue à croître, le gain en énergie se réduit et pour devenir négligeable d'où résultent des risques de verse, de parasites. Les feuilles inférieures dépérissent lorsque l'intensité lumineuse devient trop faible pour couvrir les pertes de CO_2 par respiration, tombant ainsi en dessous du point de compensation (Figure 7).

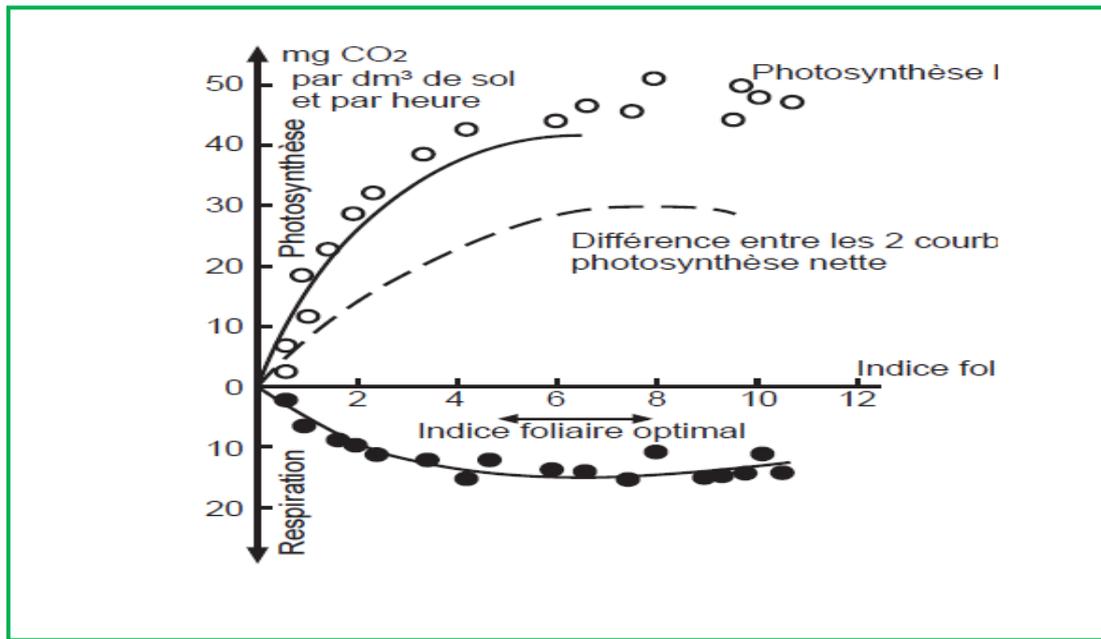


Figure 7. Relation entre photosynthèse, respiration et indice foliaire chez le blé (Evans, 1978)

3. Formation du rendement chez le blé dur

Pour l'élaboration du rendement intervient l'enchaînement de plusieurs mécanismes liés à la croissance et au développement du peuplement cultivé à travers la morphogénèse et le fonctionnement des organes des plantes qui les constituent, en relation avec les facteurs et conditions du milieu (Combe et Picard, 1994). Mekhlouf et Bouzerzour (2000) considèrent que le rendement est un caractère complexe, il résulte des composantes impliquées dans sa formation. Selon Megherbi et *al.*, (2012) le nombre de grains par unité de surface est le déterminant principal du rendement. La valeur découle des nombres de plantes, d'inflorescences par plante, des épillets par inflorescence, et du nombre des fleurs par épillet, donc de la proportion de fleurs fournissant réellement un grain (Figure 8).

Le stockage des matières glucidique et protéique dans les grains coïncide avec la période floraison-maturité physiologique (Gallais et Bannerot, 1992). Cette période correspond à l'élaboration de la dernière composante du rendement qui est le poids de 1000 grains (Rickman et Klepper, 1991). En effet le rendement du blé est la résultante du fonctionnement du peuplement végétal au cours de deux phases, la formation du grain (levée floraison) et le remplissage du grain (Mondal et *al.*, 2020). Le nombre de grains réels formés est déterminé par les conditions climatiques et les techniques culturales (Hebert, 1976).

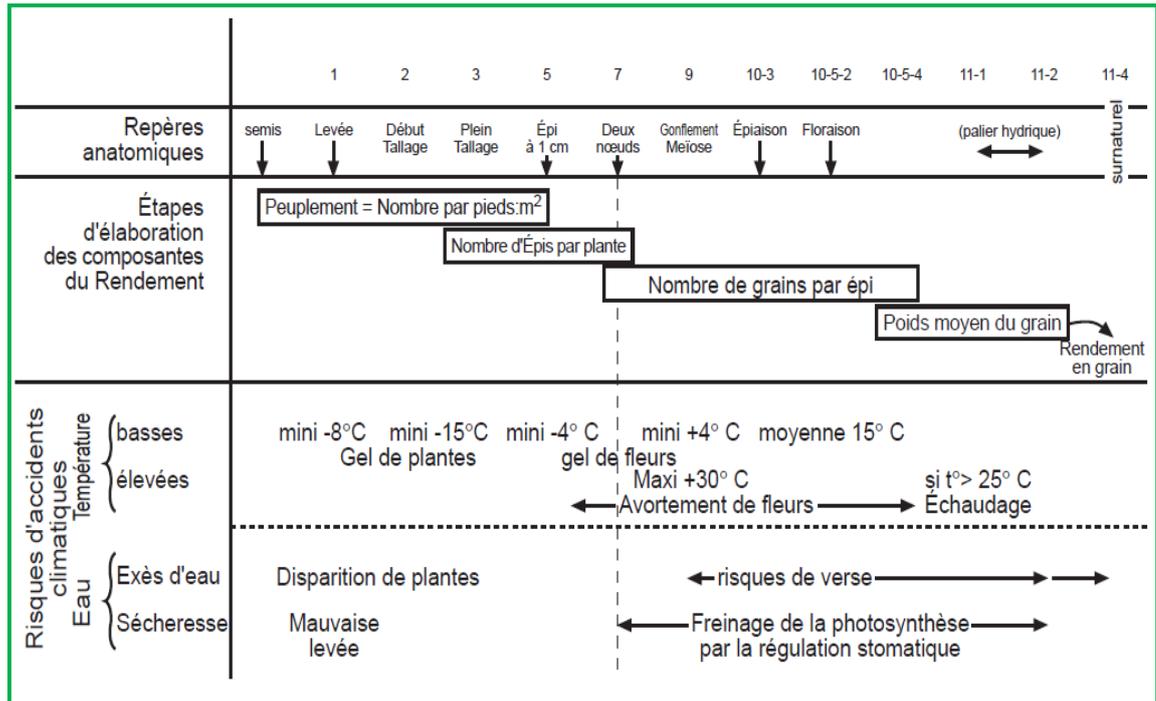


Figure 8. Composantes du rendement et contraintes à l'élaboration (Boyeldieu, 1999)

4. Situation de la céréaliculture dans le monde et en Algérie

4.1. Dans le monde

Au niveau mondial, 700 millions d'hectares de céréales sont cultivés, soit 49% des terres arables, 14% de la surface agricole mondiale et 5% des terres émergées du monde. Une quantité de 2,6 milliards de tonnes de céréales a été produite (USDA, 2018). Le blé dur joue un rôle central dans la disponibilité alimentaire au Maghreb et au Moyen-Orient, même si leur part dans la disponibilité régionale en produits végétaux a baissé de 65 à 60% au cours de la période 1960-2010 (Le Mouël et *al.*, 2015). En effet, c'est un aliment de base d'une très grande partie de la population mondiale. Les pays importateurs et exportateurs de céréales dépendent les uns des autres. Ils doivent assurer l'approvisionnement de cette denrée alimentaire et maintenir aussi des prix stables au niveau mondial. Ils collaborent avec les organisations internationales, comme le Conseil International des Céréales (CIC), son siège est à Londres (Kellou-Harbouze, 2010). La consommation apparente théorique se haussait en 2012 à 230 kg par habitant en Algérie dont 87% sous forme de blé, 206 kg pour la Tunisie et 175 kg pour le Maroc (Rastoin et Ben Abderrazik, 2014). Ce maintien considéré appréciable de la part des céréales dans l'alimentation de la région s'explique par les traditions culinaires, favorisant les aliments à base céréalière (Bessaoud, 2018), qui ont été soutenues par les

politiques de maintien de prix à la consommation bas pour les produits de première nécessité et consolidés par les faibles revenus d'une partie des consommateurs (Le Mouël et *al.*, 2015). Le blé est la seconde céréale produite dans le monde et représente 30% de la production céréalière totale, après le maïs (41%) et devant le riz blanchi (19%) (USDA, 2018). Au cours de la campagne de 2014/2015, une production record a été réalisée avec 730 millions de tonnes (Mt) (FAO, 2016). Positionné aux conséquences du risque lié au changement climatique, associé à une population mondiale estimée à 9 milliards d'habitants pour l'année 2050, le niveau prédit de production ne répondra pas à la demande (FAOSTAT, 2017).

Huit pôles agricoles assurent les 3/4 des exportations mondiales et ce sont dans l'ordre, les Etats-Unis (31,65%), la Russie (18%), l'Ukraine (13,8%), l'Argentine (10,38%), la France, le Canada, le Brésil et l'Australie (Tableau 1) (USDA, 2018).

Tableau 1. Évolution de la production de blé dans le monde en Millions de Tonnes (FAOSTA, 2020)

Pays	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Moy	%
UE	135,5	142	132,6	142,5	145	161	144	150	144,07	22,15
Chine	115,1	113	120	120,6	121,3	132	133	134	123,62	19,00
Inde	80,8	81,5	94,9	88,43	92,3	86	92	98	89,24	13,72
Russie	41,5	55	37,7	54,3	55,9	61,7	73,29	85,86	58,15	8,94
Etat Unis	60,1	56,6	61,7	59,6	57,5	55	62	47	57,43	8,83
Canada	23,2	25	27,2	28,5	28,6	37,64	32,13	29,98	29,03	4,46
Pakistan	23,3	24	24	25,1	25	25,08	25,63	26,67	24,84	3,82
Australie	26,3	24	22	23,1	24,9	23,74	22,27	31,81	24,76	3,80
Ukraine	17,8	21	15,8	18,4	18,7	26,53	26	26,2	21,30	3,27
Turquie	19,5	19,8	20,1	20,2	20,5	22,6	20,6	21,5	20,6	3,16
Kazakhstan	10	15,6	10,3	17,09	18	13,74	14,98	14,8	14,31	2,20
Argentine	14	13,5	13,7	11,49	13,6	13,93	11,31	18,39	13,74	2,11
Iran	14,5	13,2	13,8	14,12	13,8	11,52	14,59	14	13,69	2,10
Egypte	8,5	8,6	8,7	8,93	9,2	9,6	9,3	8,8	8,95	1,37
Ouzbékistan	6,7	6,6	6,7	6,9	6,5	6,9	6,9	6,07	6,65	1,02
Total	596,8	619,4	609,2	639,26	650,8	686,98	688,0	713,18	650,44	

La production moyenne des dix premiers producteurs de la période de 2010-2017 indique que l'Union Européenne se positionne en premier, suivie par la Chine, l'Inde et la Russie. Les Etats Unis se situent en cinquième position (Tableau1, Figure 9).

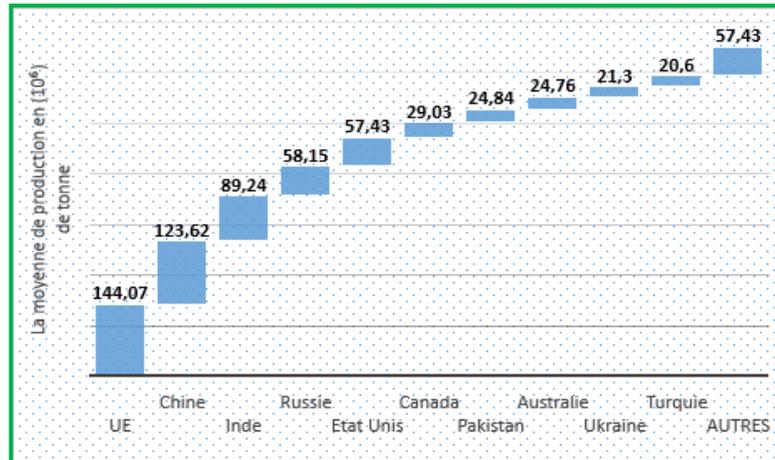


Figure 9. Quantités produites en (10⁶ tonnes) par les dix premiers pays (FAO, 2020)

4.2. Situation de la céréaliculture en Algérie

La superficie totale de l'Algérie est de 238 millions d'hectares dont 191 millions sont occupés par le Sahara. La superficie agricole représente 3% de ce total, la surface agricole utile (SAU) est de 7,14 millions d'hectares, dont près de la moitié est laissée en jachère chaque campagne agricole. Les cultures herbacées couvrent 3,8 millions d'hectares. La céréaliculture constitue la principale activité en zones arides et semi-arides. Les terres annuellement emblavées sont de 3,6 millions d'hectares, soit 50% des terres labourées (MADR, 2007). Les grandes cultures, spécifiquement les céréales, les légumineuses alimentaires, les fourrages et les oléagineux sont des produits alimentaires de première nécessité dans l'agriculture algérienne. Elles constituent la consommation de base qui est estimée à 228 kg par habitant et par an pour les céréales (Mesrane, 2018). En effet, la consommation individuelle évaluée en 2000 est de 205 k_gan⁻¹ en Tunisie, de 219 k_gan⁻¹ en Algérie (Chehat, 2007) et de 209 k_gan⁻¹ au Maroc (Boulal et *al.*, 2007).

Toutefois, la production de céréales en Algérie est marquée par une forte irrégularité interannuelle, elle-même conditionnée par les aléas climatiques (Figure 10), et l'avènement du déficit hydrique (Belagrouz et Chennafi, 2016) (Figure 10). La production totale des céréales est loin de couvrir une demande de plus en plus croissante, de 6.5 Millions de tonnes (Bessaoud et *al.*, 2018). La satisfaction de la demande intérieure est assurée alors par les importations, de 72% pour les blés et de 30,4 % pour l'orge (Bessaoud et *al.*, 2019).

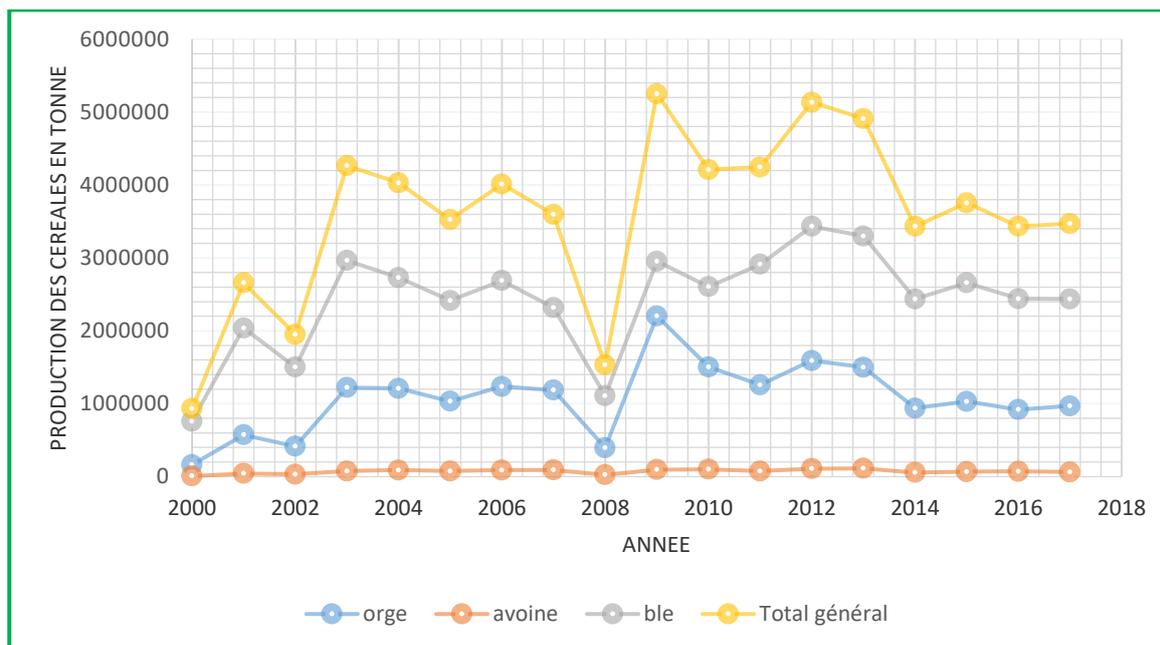


Figure 10. Evolution de la production des céréales en Algérie (MADR, 2017)

Le blé dur reste ainsi la céréale prépondérante en Algérie. Sa production progresse au même rythme que celle du blé tendre (+ 47% entre les moyennes quinquennales 2000-2004 et 2008-2012), contre + 84% pour l'orge, qui reste plus importante que le blé tendre, à plus de 13 millions de quintaux en 2008-2012, contre 8 millions de quintaux pour le blé tendre et 19 millions de quintaux pour le blé dur (Feddal, 2015).

Toutefois, les rendements céréaliers demeurent faibles et très irréguliers malgré les efforts déployés. Le blé dur s'est distingué par un rendement moyen de $13,5 \text{ qha}^{-1}$, relatif à la période de 2001-2010. En effet, il semble mieux s'adapter aux conditions agroclimatiques, relativement au blé tendre et à l'orge. Toutefois, ces niveaux de rendement sont considérés faibles à l'égard de la productivité des pays méditerranéens. C'est le résultat de l'interaction de l'itinéraire technique associée à l'utilisation de matériel végétal non performantes et à la mauvaise gestion des pratiques culturales (Latreche, 2011; Chennafi, 2012; Belagrouz, 2013; Ferras, 2015; Belagrouz et Chennafi, 2016; Fellahi, 2017).

5. Effets des contraintes à la production du blé dur en milieu semi-aride méditerranéen

5.1. Températures

Doucet (2006) considère que la température est une mesure du niveau d'énergie, elle se détermine comme le principal élément de l'ambiance atmosphérique (Vilibić et al., 2019). Ainsi, elle reflète la chaleur dont dépend le rythme de développement des plantes (Eliard,

1974). Ce paramètre est important pour la durée des phases de pré-anthèse et post-anthèses. Pour Soltner (2016) les conditions optimales de la céréale recommandent une somme de température de 150°C pour la période du semis-levée, 500 °C la phase levée-fin tallage; cependant à elle seule, la phase épiaison-maturité physiologique exige 850°C. Toutefois, ces exigences restent dépendantes du matériel végétal, des campagnes agricoles et du contexte environnementale (Araus et *al.*, 2003). En effet, la température est une composante climatique dont le gradient de variation fluctue perpétuellement, à toutes les échelles de temps et d'espaces. Les conséquences sont telles que de faibles variations de ce paramètre, de l'ordre de quelques degrés affectent les conditions d'adaptation au climat (Mackwell et *al.*, 2014).

Sur les Hauts Plateaux Sétifiens, le niveau performance du rendement est fonction de la période de mise en place des cultures (Chennafi et *al.*, 2011). En effet, en milieu méditerranéennes semi-aride, le semis précoce affecte la fertilité des épis, sous l'ampleur des effets des basses températures au stade gonflement. Les variétés précoces sont sensibles aux gelées printanières, elles pénalisent le stade début-montaison et détruisent l'épi du brin maître (Abbassenne et *al.*, 1998). Les dégâts sur les racines des céréales se manifestent ainsi sur la croissance du rhizome. Les dommages se singularisent, lorsque le froid se manifeste vigoureusement en précédant une période d'exposition aux températures considérées douces, dès lors le temps attribué à la plante est court pour lui assurer de s'accoutumer ou de s'endurcir (Kane, 2012). La contrainte du gel affecte intensément le rendement en grains des céréales (Bouzerzour, 1990; Mekhlouf et *al.*, 2012). Ainsi, au stade de l'épiaison la tolérance au froid représente un paramètre déterminant, en effet elle exprime la capacité de la plante à supporter des températures inférieures à 4°C (Makhlouf et *al.*, 2006).

Le stress thermique qui se manifeste en période de semis sous l'effet des hautes températures engendre une réduction de la longueur du coléoptile. Ainsi, la plante apparaît très sensible et n'arrive pas à s'ancrer en profondeur. En effet, la température du sol de 15°C réduit sa longueur de 10 mm et tend vers une valeur supérieure à un seuil de 35°C (Rebetzke et *al.*, 1999). Cependant, en période de tallage herbacé, les températures de 15 à 20°C favorisent la production de talles (Makhlouf et *al.*, 2006). Par ailleurs, en phase de montaison, l'occurrence plus fréquente de températures élevées affecte la croissance des tiges. Aussi, en semis tardifs, les effets des hautes températures de fin de cycle réduisent le rendement en grain lié à une diminution du nombre d'épis et du poids moyen du grain (Kadi, 2018). La phase de remplissage du grain est très sensible à l'avènement de fortes températures. Les valeurs de 25 à 30°C limitent la durée de remplissage du grain et en revanche affectent la

masse finale (Wiegand et Cuellar, 1981; Bahlouli et *al.*, 2008; Djanaguiraman et *al.*, 2020). Les variétés dont l'épiaison est précoce sont à rendement plus potentiel que celles tardives. La réduction du rendement est estimée de 35.3 kg ha^{-1} à 91.0 kg ha^{-1} pour un délai d'un jour de retard à l'épiaison (Tewolde et *al.*, 2006; Liu et *al.*, 2014). En revanche, les génotypes à épiaison précoce auront une post-épiation plus longue et, donc une période de remplissage du grain plus étalée, réalisant ainsi un rendement plus conséquent.

5.2. Salinité

La salinité est estimée à travers la conductivité électrique (CE, mScm $^{-1}$). Les Américains considèrent qu'un sol est salé lorsque la CE à 25 °C est supérieure à 4 mScm $^{-1}$. Le blé tolère des valeurs de CE de 4.5 mScm $^{-1}$ (Durand, 1983; Ali et *al.*, 2007). Le blé tendre apparaît plus tolérant au sel que le blé dur (Alem et *al.*, 2002; Benderradji et *al.*, 2010). La réponse à la salinité se manifeste chez la plupart des plantes cultivées par un effet dépressif sur la croissance et le développement (Munns et *al.*, 1995; Chen et *al.*, 2014). Cette réponse varie largement à l'égard du genre, de l'espèce et même de l'écotype ou de la variété (Cramer, 1994; Shani et *al.*, 2001; Gadimalliyeva et *al.*, 2020).

5.3. Plantes adventices

Les pertes potentielles dues aux maladies, aux animaux ravageurs et aux plantes adventices sont estimées de 50 à 80% de la production potentielle (Walton et Parnel, 1996). Les plantes adventices partagent le même espace que la culture, elles se servent des mêmes facteurs de lumière, d'éléments nutritifs et d'eau. Cette concurrence engendre une réduction de la croissance de la culture. Les mauvaises herbes sont aussi nuisibles par l'hébergement d'animaux ravageurs et de maladies qui menacent la culture (Sforza et Bon, 2007). La compétition des adventices se traduit par une baisse du rendement potentiel des cultures. Sur les Hauts Plateaux Sétifiens, les plantes adventices réduisent la production finale de plus de 50% (Kadra, 1976; Machane, 2008; Karkour, 2012).

Les maladies affectent les rendements de biomasse et de grain. L'altération concerne la semence et la qualité des grains, suite aux mycotoxines fusariennes (Torres et *al.*, 2019). Elles engendrent des pertes consistantes (Paynter et *al.*, 2008)

5.4. Modes de labour du sol

Le management des terres est recommandé en agriculture pluviale. La bonne préparation des sols améliore le taux d'infiltration des eaux de ruissèlement, préserve de l'eau dans la

zone des racines (FAO, 2004; Belagrouz, 2013). Un monitoring doit être adopté pour manager la productivité des cultures. Ainsi, il s'instaure à travers le mode de gestion des pratiques culturales. Donc, le mode de labour du sol, le matériel végétal et le management de gestion pour la mise en culture du sol est fondamental. Ainsi, les travaux de recherches sur le mode de labour du sol, la préservation de l'eau au profit de la plante, révèlent que le mode de non labour du sol avec une couverture végétal, donc un paillis prolonge le temps pour atteindre l'humidité au point de flétrissement, par réduction de l'évaporation de l'eau du sol (Chennafi et al., 2011; Mrabet et al., 2012). Ce résultat est déterminant en zone semi-aride où l'avènement du déficit hydrique est très récurrent (Chennafi, 2012). Cette suggestion corrobore l'approche de nombreux travaux de recherches réalisés sur les Hauts Plateaux Sétifiens, parmi lesquels 1) Effet du précédent cultural et de l'outil de labour du sol sur le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau de la culture de blé dur (*Triticum durum* Desf.) (Latrèche, 2011), 2) Réponse de la céréale à l'irrigation déficitaire (Chennafi, 2007), 3) Analyse du comportement du blé tendre sous labours contrasté (Belagrouz et Chennafi, 2016), 4) Dynamique du système Racinaire d'espèces de légumineuses fourragères sous irrigation limitée (Djallal et al., 2020). L'objectif est centré sur le niveau de performance du matériel végétal utilisé à travers la réponse des compartiments des terroirs, en matière de productivité de l'eau par les cultures. Aussi, c'est ainsi qu'a été conçue la problématique de l'efficacité d'utilisation de l'eau par des géotypes de blé en conditions pluviales (Ferras, 2015).

Les conséquences fondamentales, sont de même décrites à travers les travaux de Gréco (1979). En revanche, ce sont celles déterminées par la stabilité structurale sous l'enfouissement de la matière organique, par l'aération et la capacité de stockage des éléments nutritifs et de l'eau au profit de la plante, en réduisant conjointement les effets des plantes adventices (Gréco, 1979). Ainsi, le mode de labour du sol occupe une place particulière par l'effet sur les caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des parcelles cultivées. En effet, il modifie la structure des sols, il affecte le fonctionnement du peuplement végétal et la plupart des processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans le sol. Il conditionne le cycle des éléments minéraux et du carbone, le devenir des résidus de culture, le transfert de l'eau et des substances dissoutes (Mrabet, 1997; Ouattara et al., 2006; Mrabet et al., 2012). Le travail du sol est une composante principale de l'itinéraire technique des grandes cultures, la valorisation des facteurs de production comme la variété, la semence certifiée, le désherbage chimique, la fertilisation et l'irrigation déficitaire dépend, en grande

partie de la qualité du travail du sol, qui elle-même dépend de l'outil et de la date de réalisation des travaux, de l'état du sol lié au précédent cultural (Chennafi et *al.*, 2011a).

Sur les Hautes Plaines Sétifiennes, les céréales et les cultures fourragères sont conduites en pluvial. La céréale domine dans un système biennal céréales/jachère travaillée qui est typique du Dry farming et se concentre dans la zone réservant 400 mm de précipitation et de manière plus marquée dans les exploitations supérieures à 50 ha (Lahmar et Bouzerzour, 2011). La jachère est pratiquée durant 16 mois, de la récolte de la céréale en juillet jusqu'à novembre période de mise en place de la culture suivante (Belagrouz, 2013). L'amélioration des propriétés du sol par la jachère contribue à la conservation d'une quantité d'eau de 60 mm au niveau du profil cultural pour la culture suivante (Bouguendouz, 2011 ; Chennafi et *al.*, 2011). Sur les Hauts Plateaux Sétifiens, sous précédent cultural jachère, la quantité d'eau préservée est plus appréciable comparativement au précédent blé (Chennafi et *al.*, 2011a).

6. Le manque d'eau

6.1. L'eau facteur limitant de production

L'eau est la principale composante des plantes, la teneur moyenne en eau chez les végétaux représente 60 à 95% de leur masse en matière fraîche totale (Mayer et *al.*, 2004; Catell, 2006). Ainsi, la croissance et la productivité des céréales sont déterminées par la disponibilité en eau dans le sol. Par ailleurs, la contrainte climatique reste la plus contraignante, donc il est recommandé d'assurer la préservation de l'eau au niveau du sol par les techniques de labour du sol, le choix du précédent cultural et le respect de l'itinéraire technique (Latrèche, 2011; Chennafi et *al.*, 2011a; Feddal, 2015). En effet, l'eau joue un rôle primordial dans la synthèse de matière organique par le biais de la photosynthèse (Slama et *al.*, 2005). Les besoins en eau des cultures sont fonction des espèces et des variétés cultivées, des conditions édaphiques et climatiques. Silvestri et *al.*, (1990) définissent la consommation relative en eau par la quantité d'eau nécessaire pour réaliser 1 kg de matière sèche. Dans le cas du blé, la quantité d'eau utilisée au cours du cycle végétatif pour former 1 kg de matière sèche est de 1000 kg (FAO, 2004), de 1500 litres d'eau (Bernard, 2006) et de 590 kg (CNRSF, 2010). Nareshet et *al.*, (2017) indiquent une valeur de 1350 kg d'eau dans le cas du blé. Sur les Hautes Plaines Sétifiennes, ce paramètre est de 639 kg (Chennafi et *al.*, 2008a).

Le niveau des valeurs en eau varie en fonction du stade végétatif. En effet, la période de la montaison à celle du remplissage du grain est exigeante en eau (Zhang et Oweis, 1999; Chennafi et *al.*, 2008b; Belagrouz et chennafi, 2016). Ces stades coïncident avec l'avènement

du déficit hydrique lié au déficit d'évaporation de l'air (Chennafi, 2012a). En revanche, le contexte agropédoclimatique des Hautes Plaines Sétifiennes qui se singularise par la rareté de l'eau à des stades où les exigences sont croissantes recommande un management et un monitoring des modes de pratiques culturales (Chennafi, 2012a; Chennafi, 2018).

6.2. Le confort et le stress hydriques

La plante vit dans des conditions dites de confort hydrique lorsque le niveau de l'humidité du sol est à la capacité de rétention (Chennafi et *al.*, 2006; Chennafi, 2020). Cependant, sous déficit hydrique, la plante se stresse, dès lors le seuil d'humidité du profil cultural tend vers une valeur inférieure. Ainsi, Zhao et *al.*, (2020) révèlent que les niveaux d'humidité exprimés par rapport à la capacité au champ, se définissent dans l'ordre, 30 à 40% (stress sévère), 40 à 50% (stress modéré), 50 à 60% (stress léger) et 60 à 80 % (confort hydrique). Le manque d'eau conditionne le fonctionnement du statut hydrique du végétal et passe progressivement par trois principales phases (Blum, 2005). Au cours de la première phase, la plante dispose de l'eau, la transpiration et l'assimilation chlorophyllienne se déroulent normalement. Dès que la réserve utile du sol est épuisée à 50%, le niveau hydrique d'absorption racinaire baisse et la demande climatique n'est plus satisfaite. Cette seconde étape se détermine par un potentiel réduit de la transpiration et de l'assimilation Chlorophylliennes. A la troisième phase, l'activité photosynthétique s'arrête sous l'effet de l'intensité du déficit hydrique et donc de la fermeture des stomates (Blum et *al.*, 2006). Dès lors, la transpiration est assurée par la cuticule, d'où une baisse de la production de matière sèche (Chaves et *al.*, 2002).

Dès que le niveau d'humidité baisse dans le profil cultural, tous les organes de la plante subissent des fluctuations de teneur en eau de façon inégale (Katerji, 1989). Ainsi, en environnement semi-aride, le risque climatique affecte la culture céréalière de 50 à plus de 90% (Giunta et *al.*, 1993; Chennafi et *al.*, 2005; Chennafi et *al.*, 2006). En zone déficitaire en eau, la sécheresse est la contrainte la plus redoutable pour le développement agricole (Zhao et *al.*, 2020). Cependant, le degré d'affection dépend de l'avènement du déficit et du stade végétatif et du génotype (Chennafi et *al.*, 2008b). Abbassenne et *al.*, (1998) indiquent que sous conditions pluviale des Hautes Plaines Orientales, la durée de remplissage et par conséquent la masse du grain atteignent rarement les valeurs optimales, d'où une baisse de rendement. Toutefois, la précocité assure relativement une durée plus longue de remplissage du grain et améliore ainsi le rendement (Monpara, 2011).

Sous stress hydrique, le nombre et la masse racinaire sont significativement affectés. La réduction du volume se répercute sur la croissance, et diminue le diamètre. Cette réduction engendre une augmentation de la résistance au transfert de l'eau vers la partie aérienne (Menad, 2009). Zhao et *al.*, (2020) révèlent que le stress hydrique altère la photosynthèse, la croissance, le rendement, l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) et la productivité de l'eau d'irrigation (PEI) du blé d'hiver. En effet, dès l'avènement d'un stress hydrique, la croissance foliaire est fortement inhibée à l'assimilation du carbone, réagissant moins vite, produit des assimilats qui sont déroutés en priorité vers la croissance racinaire et utilisés pour l'ajustement osmotique (Blum, 1996). Ce processus se répercute sur le rendement économique de la culture qui se réduit de plus de 80% (Chennafi et *al.*, 2006). En revanche, le management des modes de pratiques culturales économes en eau est particulièrement recommandé (Belagrouz et Chennafi, 2016; Zhao et *al.*, 2020).

7. Mécanisme de résistance à la sécheresse et l'esquive

7.1. Mécanisme de résistance

Des génotypes de blé ont été testés à l'effet de la sécheresse, à travers la croissance et la productivité, en identifiant des caractères permettant aux céréales de croître et de survivre dans des environnements qui se distinguent par un stress hydrique (Reynolds and Tuberosa 2008, Belagrouz et *al.*, 2018). En effet, la tolérance au stress hydrique d'une culture est évaluée par son rendement sous l'effet de sécheresse, mais celui sous stress dépend aussi du potentiel de rendement et de la phénologie variétale.

En revanche, les variétés à haut rendement sont celles qui se singularisent par une forte vigueur, une floraison précoce et une période de remplissage des grains rapide (Bahlouli et *al.*, 2008; Belagrouz et *al.*, 2018). Le génotype résistant à la sécheresse est identifié lorsque les besoins en eau de la culture ne sont pas satisfaits et le statut hydrique des plantes est réduit, ainsi ces dernières résistent à la sécheresse par l'échappement à la déshydratation ou par la tolérance à la déshydratation (Blum, 2005).

7.2. Esquive ou échappement

En environnements aride et semi-aride, l'esquive de la sécheresse permet à la culture de terminer son cycle de développement avant l'installation du stress hydrique terminale (Balota et *al.*, 2017). En effet, l'échappement au manque d'eau, de la chaleur et des contraintes de rayonnements se réalise dans les zones semi-arides méditerranéennes en raccourcissant le

cycle de croissance (Aboughadareh et *al.*, 2017). Les variétés de blé dur peuvent être sélectionnées pour un cycle court, par l'observation des jours jusqu'à l'anthèse, l'épiaison, le remplissage des graines et la maturité physiologique (Thapa et *al.*, 2018).

Ainsi, en environnements où la sécheresse est tardive, la floraison précoce semble une option déterminante, cependant la sécheresse apparaît parfois imprévisible et intermittente. Des études montrent la liaison positive entre le degré de précocité au stade épiaison et le rendement en grain (Bishaw et *al.*, 2015; Watanabe, 2017; Belagrouz et *al.*, 2018). Dans une étude réalisée sur 53 cultivars de blé, orge et triticale, le gain de rendement est de 30 Kg ha^{-1} , pour chaque jour de précocité de la levée au stade épiaison (Fischer et Maurer, 1978). En conditions semi-arides d'altitude, Abbassenne et *al.*, (1998) révèlent que les génotypes précoces à l'épiaison se démarquent par des vitesses de remplissage appréciables. Toutefois, la résistance aux basses températures printanières est un outil pour appréhender l'avantage en productivité des génotypes précoces (Mekhlouf et *al.*, 2006). Par ailleurs, des investigations révèlent que les variétés tardives se caractérisent par un rendement potentiel dans des conditions productives. Gate et *al.*, (2007) mentionnent l'amélioration du rendement de variétés à une floraison précoce qui évite le stress lié à la sécheresse à condition qu'elles soient peu sensibles au gel de printemps. La réduction du rendement par les génotypes précoces semble se compenser par l'augmentation de la densité de semis (Whaley et *al.*, 2000).

7.2. Gérance de la déshydratation chez la plante de blé

L'évitement de la déshydratation est la capacité de la plante à conserver des niveaux d'eau relativement plus élevés dans les conditions de stress hydrique édaphique et atmosphérique (Yue et *al.*, 2006). En fonction de la déshydratation, les espèces végétales se classent par 1) Economes d'eau par une transpiration réduite, 2) Les dépensières en eau. Les deux mécanismes interfèrent dans la productivité végétale (Lerner, 2018). Les plantes évitent la déshydratation en captant l'humidité du sol, par la réduction de la perte d'eau et par la conservation de l'hydratation cellulaire (Blum, 2005). Les stomates jouent un rôle important dans le contrôle de la perte d'eau par fermeture en cas de déficit hydrique (Motzo, 2013). Diverses études ont révélé une corrélation positive entre la conductance stomatique et le rendement (Royo et *al.*, 2000; Rebetzke et *al.*, 2013; Maize, 2017). Cependant une transpiration réduite semble hausser la température dans la cavité stomatique et à la surface foliaire (Fukuda, et *al.*, 2018) engendrant ainsi l'accélération du vieillissement du feuillage et la diminution de la capacité photosynthétique de la plante (Ramírez et *al.*, 2016). Toutefois le

maintien d'un rendement potentiel s'appuie par la sélection des caractères qui favorisent l'évitement à la déshydratation, mais pas au détriment de la fermeture des stomates (Blum, 2018). Lorsque le gradient du stress hydrique est lent, la plante s'adapte par l'accumulation active des solutés dans les feuilles. De plus, cet ajustement osmotique provoque la fermeture des stomates aux potentiels hydriques foliaires faibles. Ainsi, l'ajustement osmotique, comme moyen de conservation d'une turgescence plus élevée à un potentiel hydrique tissulaire donné, est un élément important de prévention de la déshydratation (Blum, 2018).

Le système racinaire joue un rôle important dans le contrôle du potentiel hydrique foliaire (Tandonnet et *al.*, 2018). La demande de transpiration de la plante subissant le stress hydrique pourrait être satisfaite par les racines qui s'enracinent profondément dans les couches humides du sol (Blum 2005; Kirkegaard et *al.*, 2007). La capacité des racines d'un génotype à s'enfoncer en profondeur détermine un élément de la résistance à la sécheresse. Souvent, les plantes modifient leur architecture racinaire sous conditions de stress hydrique (Manschadi et *al.*, 2013; Sayed et *al.*, 2017). La Glaucescence qui est la cire épicuticulaire confère une résistance contre la perte d'eau par transpiration cuticulaire (Bi et *al.*, 2017). Elle augmente la réflectance de la lumière (Yudina *al.* 2020) et réduit l'énergie du rayonnement absorbé et de la température de la canopée (Carvalho et *al.*, 2020). La glaucescence favorise le rendement du blé dur dans les régions à sécheresse terminale (González et Ayerbe, 2010) et améliore le rendement du blé tendre sous irrigation (Monneveux et *al.*, 2004).

L'enroulement foliaire est considéré un indicateur de perte de turgescence et aussi un caractère d'évitement de la déshydratation. Il joue un rôle cohérent dans la résistance aux températures élevées et au déficit hydrique de fin de cycle (Sarieva et *al.*, 2010; Bena-Amar et *al.*, 2020). L'enroulement foliaire réduit les échanges gazeux des feuilles et la photosynthèse, mais améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau et le rapport de l'assimilation du carbone à la transpiration (Mahpara et *al.*, 2015; Purbajanti et *al.*, 2020).

7.3. Tolérance à la déshydratation

La tolérance à la déshydratation représente le maintien de la fonction métabolique lorsque le potentiel hydrique foliaire est faible. C'est le second mécanisme de défense après l'évitement de la déshydratation, cependant sont considérés encore mal connus (Amigues et *al.*, 2006). Le maintien de l'intégrité et de la fonction de la membrane sous un niveau donné de stress de déshydratation est admise une mesure de tolérance (Blum, 2018). Les troubles

membranaires sont mesurés par la fuite de solutés des cellules, évaluant la tolérance à la déshydratation (Hussain et *al.*, 2020).

Blum (2005) indique que la tolérance à la déshydratation chez les plantes cultivées révèle que la variation génotypique de la récupération des plantes après déshydratation, en tant que mesure de la tolérance, est positivement associée à la teneur en eau relative retenue pendant la dessiccation. Par ailleurs, l'utilisation des réserves des tiges offrent une ressource puissante pour le remplissage des grains des céréales sous la sécheresse (Bahlouli, 2008; Bazargani et *al.*, 2012). Inagaki et *al.*, (2007) révèlent que sous conditions de baisse d'humidité du sol, le rendement appréciable chez le blé tendre semble être le résultat d'une translocation rapide des glucides photosynthétiques aux grains après épiaison. Ainsi, chez les céréales, le stockage de glucides hydrosolubles dans la tige et leur remobilisation en grains influence l'indice de récolte, sous le stress post-anthèse (Savic et *al.*, 2017; Hu et *al.*, 2019).

8. L'efficacité d'utilisation de l'eau et son évaluation

8.1. L'efficacité d'utilisation de l'eau

L'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) est définie par le rapport entre la photosynthèse et la respiration au niveau physiologique. En indications agronomiques, l'EUE s'exprime par le rapport entre la biomasse produite par la plante et l'eau consommée (Zhang et *al.*, 2017). L'efficacité d'utilisation de l'eau se définit selon les mesures et les unités de l'échange (Condon et *al.*, 2004). Les définitions potentielles sont celles qui correspondent à une quantité d'eau utilisée pour une unité de production (Figure 11). Elle est mesurée à travers l'échange instantané de vapeur d'eau pour le dioxyde de carbone par rapport à l'accumulation de la biomasse ou pour le rendement, ou par rapport à un gain de carbone lié au dioxyde de carbone qui afflue à travers l'accumulation de la biomasse ou le rendement économique (Bacon, 2009). À l'échelle des feuilles, l'efficacité instantanée de l'utilisation de l'eau est exprimée par le rapport du CO₂ net assimilé par la photosynthèse (A) à l'eau transpirée (T) dans la même période (A/T) (Polley, 2002; Lovelli et *al.*, 2010). L'efficacité intrinsèque d'utilisation de l'eau selon Kambou et *al.*, (2014) est le rapport entre A et la conductance stomatique (gs), donc A/gs. Gregory (2009) mentionne que l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau résulte de la sélection de génotypes qui augmentent le rendement par unité d'eau transpirée, ou par la gestion de l'itinéraire technique. Les investigations réalisées sur les Hauts Plateaux Sétifiens révèlent que les pratiques culturales, par le précédent cultural, l'outil de labour du sol, les apports d'eau déficitaire, les labours contrastés, le matériel végétal et le mode de

monitoring de la conduite des cultures sur le sol déterminent des investissements efficaces pour la gestion efficace de l'eau (Latrèche, 2011; Chennafi et al., 2011; Ferass, 2015; Belagrouz et Chennafi, 2016; Belagrouz et al., 2018).

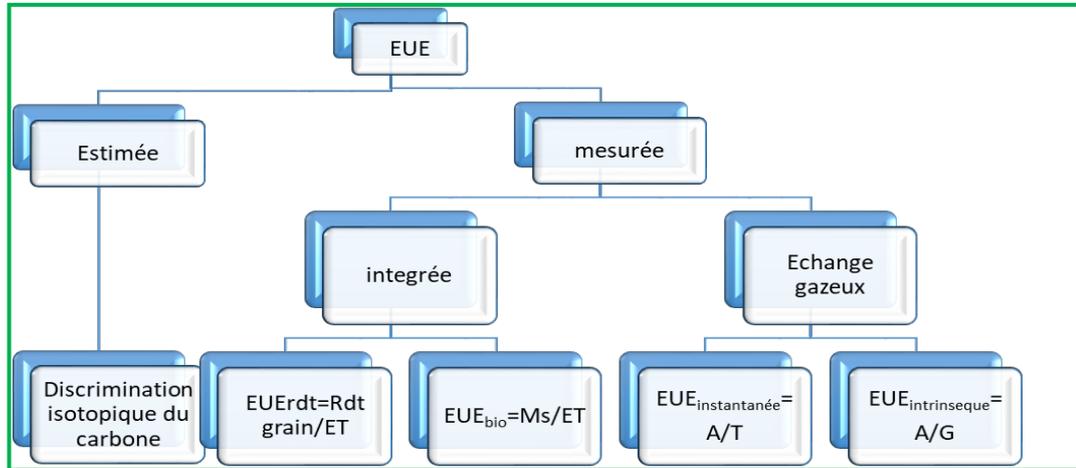


Figure 11. Définitions de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (Tambussi et al., 2007)

EUE= Efficacité d'utilisation de l'eau, Rdt = Rendement, Ms= Matière sèche, ET= Evapotranspiration, A = Taux net de photosynthèse; T= Taux de transpiration; G= Conductance stomatique

8.2. Estimation de l'efficacité d'utilisation de l'eau

Dans les zones céréalières où les précipitations sont limitées, Passioura (1977) a suggéré une équation déterminante de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour le rendement.

$$Rdt_g = E \times EUE \times IR$$

Rdt_g = Rendement en grains, E = Quantité totale d'eau utilisée par la culture, EUE = Efficacité d'utilisation de l'eau, et IR = Indice de récolte

Certains caractères affectent la quantité d'eau utilisée, et aussi l'efficacité d'utilisation de l'eau chez les céréales. Le plus important est de positionner le cycle de la croissance de la culture selon l'éventuelle répartition des précipitations (Villegas et al., 2000). En effet, une bonne installation de la culture suivie d'une vigueur précoce favorise la disponibilité de l'eau et une utilisation efficace. Par ailleurs, un système racinaire profond et l'ajustement osmotique sont avantageux pour extraire plus d'eau (Zhao et al., 2019). Gilbert et Hernandez (2019) décrivent l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) par un modèle exprimé aussi par un quotient liant la production de matière sèche totale et l'évapotranspiration.

$$EUE \text{ (matière sèche ou biomasse)} = TE / (1 + Es/T)$$

TE = Efficacité de la transpiration (Biomasse aérienne/Transpiration), Es = Quantité d'eau évaporée de la surface du sol et T = Quantité d'eau transpirée

La relation exprime que l'efficacité d'utilisation de l'eau des céréales s'améliore par l'augmentant de TE, ou en réduisant l'Es. Ces composantes sont fonction de la distribution des précipitations au cours du cycle de la plante. Ainsi, si la culture dépend de l'humidité du sol et que la pluviométrie est faible, l'augmentation de T offre la meilleure option pour augmenter l'EUE. Cependant, si la culture ne dépend que des précipitations saisonnières, la diminution d'Es conduit à des gains potentiels (Sadras et Angus, 2006).

9. Interférence de l'efficacité d'utilisation de l'eau avec les caractères mesurés

9.1. Relation entre photosynthèse, chlorophylle et efficacité d'utilisation de l'eau

L'EUE semble s'améliorer au niveau physiologique (Cao et al., 2007; Wang et al., 2015; Dunn et al., 2019). En revanche, c'est la notion de l'EUE intrinsèque qui est introduite pour comparer les propriétés photosynthétiques à une demande évaporative commune. Elle est évaluée par le rapport de l'assimilation nette (AN) à la conductance stomatique (gs) (Osmond et al., 1980). Les différences entre les génotypes en AN/gs et EUE sont rapportées comme ayant une base génétique (Kulkarni et al., 2017), et la sélection pour une EUE élevée représente un objectif principal (Condon et al., Medrano et al., 2015). L'efficacité de l'utilisation intrinsèque de l'eau augmente en réponse à un léger déficit hydrique, car la fermeture stomatique induite par la sécheresse limite davantage la perte d'eau que l'absorption de CO₂ (Saradadevi et al., 2017). Les génotypes dont la surface des épis est relativement large et qui ont une vitesse de sénescence lente dans les environnements secs peuvent capter une plus grande proportion de lumière incidente en phase de remplissage des grains. Cette réponse est déterminante lorsque la sénescence du couvert végétal ou l'efficacité d'utilisation de l'eau restent faibles (Li et al., 2017; Farooq et al., 2019; Zhang et al., 2020).

Sous stress hydrique prolongé, la plante ralentit sa photosynthèse, d'où réduction de la synthèse et l'accumulation de la matière organique et sa croissance, cette situation se répercute sur l'efficacité d'utilisation de l'eau (Zhang et 2018). Cao et al., (2017) indiquent que le manque d'eau inhibe la photosynthèse et diminue la quantité de chlorophylle. La sélection des génotypes qui se différencient par la capacité photosynthétique est fonction de la quantité de tissu photosynthétique par unité de surface foliaire. Ainsi, des paramètres structurels telle que la teneur totale en chlorophylle par unité de surface foliaire est un indicateur de la force du tissu photosynthétique, d'où augmentation de la valeur du rapport entre la matière sèche accumulée et l'eau utilisée (Fotovat et al., 2017). Aussi, une teneur élevée en chlorophylle est une caractéristique souhaitable car elle indique un faible degré de photo-inhibition de l'appareil

photosynthétique et une forte capacité d'accumulation de la matière sèche et par conséquent plus d'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE).

9.2. Température de la canopée et efficacité d'utilisation de l'eau

La transpiration assure un rôle majeur, celui du refroidissement des feuilles de la plante. En effet la température de la canopée et sa réduction par rapport à la température de l'air ambiant est une indication de la capacité de transpiration à refroidir les feuilles. Les relations entre la températures de la canopée, celle de l'air et la transpiration sont générées par 1) Les éléments météorologiques (Déficit de pression de vapeur, Température de l'air, Vitesse du vent), 2) Le sol (Humidité du sol), 3) La plante (Taille de la canopée, architecture de la canopée et ajustement des feuilles au déficit hydrique) (Prasad et *al.*, 2019).

Les génotypes qui se caractérisent par une température de la canopée basse (ou une dépression de la température de la canopée plus élevée) sous stress hydrique utiliseront davantage l'eau disponible dans le sol, évitant ainsi la déshydratation et atténuant les effets du stress hydrique sur le rendement en grains (Sofi et *al.*, 2019)

9.3. Vigueur précoce et efficacité d'utilisation de l'eau

La vigueur précoce se définit par la masse de surface foliaire produite en début de saison, dont le but est d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et le rendement des cultures de blé dans des environnements à faible précipitation et des températures élevées en phase de remplissage des grains (Nakhforoosh et *al.*, 2016). En effet, le développement rapide des feuilles favorise la valorisation de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Bacon, 2009). Toutefois, la vigueur précoce de l'orge apparaît plus efficace, avec une surface foliaire double avant l'initiation florale par rapport au blé, aboutissant à une augmentation relative de rendement biologique de 40% (Lopez-Castaneda et *al.*, 1996).

Le couvert végétal à croissance rapide couvre la surface du sol, réduisant ainsi l'évaporation de l'eau, valorisant la disponibilité de l'eau pour la culture (Rebetzke et *al.*, 2004). Une meilleure couverture végétale en début de saison réduit la disponibilité de la lumière sous couvert végétal et améliore la concurrence avec les mauvaises herbes (Ramesh et *al.*, 2017). La vigueur précoce favorise une croissance plus rapide des racines pour exploiter les couches de sol plus profondes et pour produire plus de racines adventives dans la couche supérieure du sol, bénéficiant de l'utilisation d'eau et de nutriments (Richards et *al.*, 2002). La vigueur précoce confère des avantages aux céréales cultivées dans des environnements arides méditerranéens (Ludwig et Asseng, 2010; Maydup et *al.*, 2012; Ben-David et *al.*, 2014).

Les lignées plus efficaces en eau se distinguent par une vigueur précoce qui s'acquiert de la sélection de surface foliaire spécifique (Asseng et *al.*, 2003). Ainsi l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour le rendement en grains s'améliore de 25% par la vigueur précoce (Lopez-Cassandra et Richards, 1994; Pang et *al.*, 2014).

9.4. Phénologie et Efficacité d'utilisation de l'eau

La phase de floraison revêt une importance cruciale dans la sélection pour une efficacité optimale de l'utilisation saisonnière de l'eau. En effet, elle est considérée le facteur critique d'optimisation de l'adaptation et donc de rendement dans des environnements divergents par la disponibilité et la distribution de l'eau (Flohr et *al.*, 2018). Kenney et *al.*, (2014) révèlent une corrélation génétique positivement significative entre $\Delta^{13}C$ et la période de floraison, en raison des effets pléiotropes. Donc, c'est la mise en évidence du rôle majeur de la variabilité génétique en phénologie pour l'optimisation de la durée des phases végétatives et reproductrices, en fonction des ressources en eau disponibles.

Une des approches d'utilisation efficace de l'eau consiste à réaliser des semis pour les cultures annuelles avant l'hiver, pour favoriser l'expansion de la culture lorsque 1) L'eau est disponible et 2) La demande d'évapotranspiration est plus faible (Tuberosa, 2004). Par ailleurs, Tuberosa (2004) considère que la base génétique de la période de floraison est plus complexe chez les espèces tempérées (orge et blé) par rapport aux espèces tropicales (riz, sorgho et maïs), en raison de la présence de gènes de vernalisation dans l'ancien groupe qui influencent le moment de la floraison en réponse au froid. Dans les céréales, plusieurs gènes sensibles à la photopériode et à la vernalisation contrôlent le passage de la période végétative à la période reproductrice (Royo et *al.*, 2020).

9.5. Efficacités de transpiration et d'utilisation de l'eau

L'efficacité de transpiration des feuilles, exprimée par la quantité de CO_2 fixée par unité d'eau transpirée, est dépendante de la demande d'évaporation de l'atmosphère et de la concentration intra feuille CO_2 (Tausz Posch et *al.*, 2013). L'amélioration de l'efficacité de la transpiration recommande de s'assurer que la période de croissance maximale de la biomasse et se produit en périodes plus fraîches de la saison de croissance (Richards et *al.*, 2002). Dans les environnements méditerranéens, la demande d'évaporation est faible en période hivernale, entraînant une efficacité de transpiration plus élevée relativement à celle de fin de printemps et de l'été. Ainsi, les cultures réalisant une surface foliaire importante au début de l'hiver réduisent l'évaporation de l'eau du sol, fixant ainsi du CO_2 . Par conséquent, une plus grande

efficacité de transpiration s'opère à travers la date de semis, en se positionnant sur 1) Vigueur précoce, 2) Réflectance de surface élevée (glaucosité), 3) Petites feuilles après la floraison, 4) Sélection de barbes pour assurer une activité photosynthétique (Xu et *al.*, 2019).

L'efficacité de la transpiration est un facteur important de l'efficacité de l'utilisation de l'eau des cultures (López-Castañeda et Richards, 1994). Une grande variation génétique de ce caractère a été identifiée chez le blé (Wilson et *al.*, 2015). Aussi, l'amélioration de l'efficacité de la transpiration s'opère par la mesure de discrimination des isotopes du carbone ($\Delta^{13}C$) du matériel végétal (Hossain et *al.*, 2020). Chez le blé, la discrimination des isotopes du carbone est corrélée négativement avec l'efficacité de transpiration (Condon et *al.*, 2020). La sélection des plantes intrinsèquement efficaces pour la transpiration relève de l'analyse isotopique des tissus végétaux (Rizza, et *al.*, 2012).

9.6. Indice de récolte et Efficacité d'utilisation de l'eau

En environnements déficitaire en eau, l'indice de récolte est une composante déterminante du rendement des cultures céréalières (Passioura, 1977). Ainsi, deux composantes de l'indice de récolte semblent être exploitées pour réaliser un bon rendement céréalier, 1) La première repérée au stade de pré-anthèse en absence de stress hydrique et définit le potentiel génétique, 2) La seconde évaluée par le modèle d'utilisation de l'eau après l'anthèse, en conditions de manque d'eau, affectant ainsi le niveau potentiel génétique (Flohr et *al.*, 2017). Les variétés qui produisent un rendement potentiel en conditions optimales, semblent susceptibles d'être performantes en environnements où l'eau est limitée. L'amélioration du rendement du blé à travers l'indice de récolte dans des conditions favorables s'est révélée dans nombreux travaux de recherche (Belagrouz et *al.*, 2018; Pradhan et *al.*, 2019). Un indice de récolte élevé indépendant de la sécheresse semble être valorisé par une bonne répartition de la matière sèche vers les organes reproductifs au détriment des organes non reproducteurs, donc par la réduction de la hauteur et la précocité (Richards et *al.*, 2002; Zhou et *al.*, 2007).

L'indice de récolte est fonction de la disponibilité en eau au stade de l'anthèse (Moser et *al.*, 2006). La floraison précoce, l'étroitesse des vaisseaux du xylème racinaire et la translocation accrue des assimilats pré-anthéniques aux grains favorisent la croissance végétative faible et un remplissage élevé des grains. Cependant, ils valorisent l'efficacité de l'utilisation de l'eau et l'indice de récolte sous stress (Moser et *al.*, 2006). Toutefois, l'efficacité d'utilisation de l'eau traduite à travers la variabilité génétique semble être attribuée à l'interaction d'une multitude de caractères morpho-physiologiques hérités quantitativement,

dont les effets sur le rendement restent très variables en termes d'amplitude et de direction, en fonction des conditions environnementales (Tuberosa, 2004).

10. Efficacité d'utilisation de l'eau et notion d'idéotype de blé dur

Le terme *Idéotype* a été introduit pour la première fois dans le domaine de l'amélioration des plantes par Donald (1968) pour décrire les caractéristiques modèles d'une plante de céréales connues pour influencer la photosynthèse, la croissance et la production de grains (Figure 12). L'auteur exposa la *sélection par plantes modèles ou idéotypes à la sélection pour le rendement et à l'élimination par défaut* classiquement utilisées à l'époque. Cependant, à travers les travaux, l'Idéotype est défini comme un nouveau *modèle de plante* qui, en conditions de cultures, utilise mieux les ressources du milieu et en supporte aussi les aléas abiotiques pour réaliser une productivité meilleure (CNRTL, 2005). Toutefois, l'idéotype n'est pas conçu comme un modèle a priori. En effet, il semble être remis en question, à la faveur d'observations et d'études physiologiques, génétiques ou agronomiques (Figure 12).

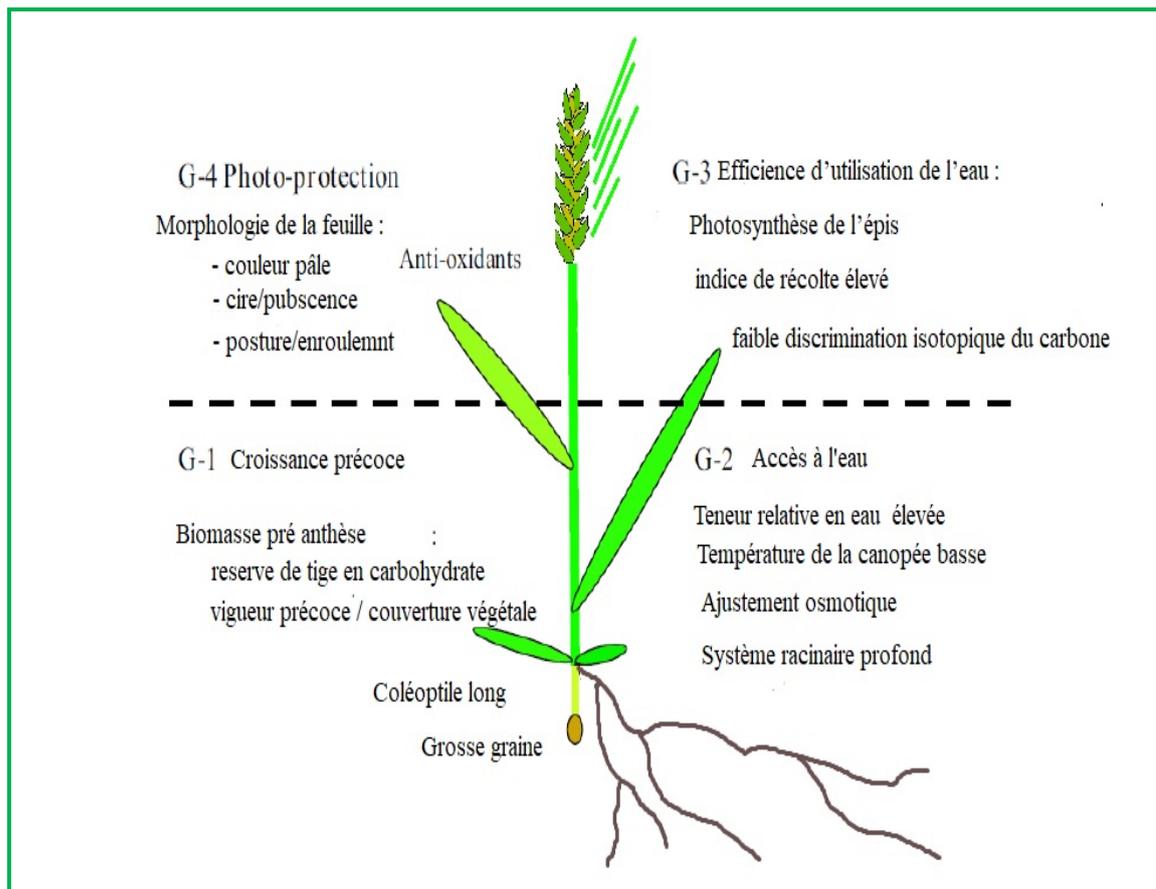


Figure 12. Présentation d'Idéotype de blé dur de régions semi-aride (Reynolds et al., 2005)

Ainsi, Trethowan (2014) a mené des recherches considérées stratégiques sur la modification de l'architecture des plantes de blé pour valider l'efficacité de productivité. La conception et la réalisation sont liées au développement d'un nouveau type de variété de blé, se caractérisant par 1) PMG de 45 à 50 g), 2) NGE de 90 à 100), 3) Une BIO notable, 4) Feuilles épaisses, larges, semi-dressées et vert foncé, 5) Tige épaisse, 6) Hauteur de la plante de 85 à 100 cm et 7) Un bon système racinaire, de plus 8) Talles fertiles et 9) Tolérance aux maladies des blés. Ainsi, Gauffreteau (2018) révèle la notion d'*Idéotype théorique*, considéré être déterminée par différentes caractéristiques utiles en région arides et semi arides (Figure 12). Ce sont principalement 1) Taille des graines et la longueur des coléoptiles, 2) Couverture végétale précoce et biomasse pré-anthèse appréciable, 3) Réserves dans la tige/ remobilisation et photosynthèse des épis, 4) Conductance stomatique (indicatif des racines capables d'extraire les eaux profondes du sol), 5) Ajustement osmotique (maintient les fonctions cellulaires à faible potentiel hydrique), 6) Accumulation d'acide abscissique (préadaptation des cellules au stress), 7) Tolérance à la chaleur (le stress thermique peut être dû à une faible transpiration des feuilles sous l'effet de la sécheresse), 8) Les caractéristiques des feuilles (cire, pubescence, enroulement, épaisseur).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Chapitre II. Matériel et Méthodes

1. Présentation du site expérimental

L'expérimentation a été menée sur trois campagnes agricoles consécutives 2013/2014, 2014/2015 et 2015/2016, sur le site de la Ferme Expérimentale Agricole (SEA) de l'Institut Technique de Grandes Cultures (ITGC, Sétif), sur la parcelle dénommée *Trente*. La SEA est située à 5 km au sud-ouest de la ville de Sétif. Les coordonnées géographiques sont de 36° 9' N et 5°21'E, l'altitude est de 1081 m. Le site se distingue par un climat de type méditerranéen, continental, appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride. Deux saisons distinctes le caractérisent, en effet la prédominance des pluies se localise en saison froide, l'été est chaud et sec (Baldy, 1986; Chennafi, 2012).

Ainsi, la région se singularise par un déficit climatique qui se détermine le long du cycle de la céréale, mis à part la saison hivernale. Et le cumul pluviométrique de 369.6 mm est repéré comme base au-dessous de laquelle l'année est considérée sèche. Le bilan des flux d'eau génère une lame d'eau écoulée de 48 mm. Ces conditions engendrent un déficit moyen d'écoulement estimé à 334.6mm (Chennafi, 2018).

Le sol du site présente de grandes variations. Il est profond, avec peu de calcaire et plus fertile au voisinage du lit de l'Oued Boussalem. Les parcelles plus éloignées et en altitude se caractérisent par un sol moins profond, taux de calcaire notable, avec présence de croûtes calcaires. La teneur en matière organique varie de 1.4% à 2.8 % en surface, par contre en profondeur les valeurs sont plus faibles (Ferras, 2015; Belagrouz et Chennafi, 2016). Sur la parcelle *Trente* (Figure 13), le sol repose sur un matériau tendre (marne calcaire altérée) qui génère une morphologie mamelonnée, il est moyennement profond à profond, calcaire avec un pH moyen de 8,7; de texture argileuse à limono argileuse, et pauvre en matière organique. Les valeurs moyennes de la capacité d'échange cationique varient de 30 à 33 meq/100g. Les teneurs en éléments nutritifs sont faibles, et moyennes pour l'azote assimilable (Ferras, 2015; Belagrouz et *al.*, 2018).

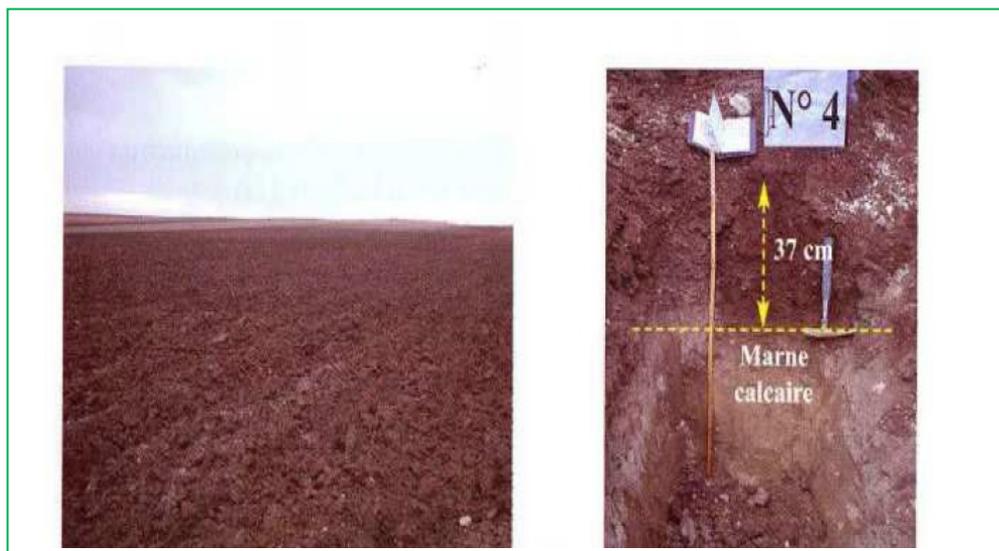


Figure 13. Profil cultural de parcelle dite *Trente*

2. Mise en place de l'essai et conduite de la culture

2.1. Matériel végétal utilisé

Il est composé d'une collection de dix variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) dont l'origine est une sélection CIMMYT/ICARDA et des variétés locales provenant de l'institut Technique de grandes cultures de Sétif, Algérie (Tableau 2). Communément, elles sont dénommées, *Mohamed Ben Bachir (MBB)*, *Hedba*, *Oued-Zenati*, *Djenah Khetaiifa*, *Guemgoum Rkhem*, *Gta/dur*, *Megress*, *Waha*, *Simeto*, *Bousselem* (ITGC, 2006; CNCC, 2018). La semence a été délivrée par le Centre National de Contrôle et de Certification des Semences et Plants (CNCC) de Sétif.

- ***Oued-Zenati***

C'est une lignée obtenue en 1936 d'une population locale Bidi 17. La plante se caractérise par un épi blanc, compact, à barbes noires et longues. Le grain ambré, gros et peu allongé. Les conditions favorables favorisent une paille haute de 1,30 m, une tige pleine, à feuilles larges et retombantes, et le tallage reste moyen. Oued-Zénati semble tolérante à la septoriose, par contre elle est sensible aux rouilles brunes et à la fusariose. Le PMG est appréciable, la qualité semoulière est bonne. Elle est considérée à cycle tardif et sa productivité est moyenne.

- ***Djenah Khetaiifa***

C'est une variété sélectionnée, assez tolérante à la sécheresse. Elle est tolérante à la septoriose, la fusariose, l'oïdium, les rouilles jaune et noir. Elle est efficace pour l'eau, produisant ainsi plus de biomasse et de paille.

- **Gta /Dur**

Est une sélection de l'ITGC de Guelma, croisement CIMMYT-ICARDA, variété précoce, c'est une plante à épi blanc, compacte, tallage fort, à paille moyenne, tolérante à la septoriose, fusariose, oïdium, rouilles jaune et noire, au froid et à la sécheresse. Sa qualité semoulière est bonne.

- **Megress**

Megress est une variété issue d'un croisement (OFANTO x Waha x MBB). C'est une plante demi-dressée au tallage, à épi roux, pyramidale et compacte à barbe noire. Le grain est ovoïde, la tige de la paille est pleine, moyennement haute avec 84 cm. L'efficienc e d'utilisation de l'eau pour produire du grain est appréciable.

- **Guemgoum Rkhem**

C'est une variété de sélection de lignée locale (ITGC, Tiaret). L'épi est compact blanc à barbes noires, à paille haute et creuse. Elle est considérée à cycle tardif, le tallage est moyen. Le grain blanc ambré est de forme allongée, sensible aux rouilles, fusariose et sectorise, résistante à la moucheture et au mitadinage. Elle se caractérise par un PMG élevé, cependant la productivité reste relativement faible.

- **Waha**

Waha est obtenue d'un croisement CIMMYT-ICARDA, d'origine syrienne. L'épi demi-lâche est compact, roussâtre, à paille courte et demi-pleine. Le grain moyen est clair ambré à roux. C'est une variété précoce, le tallage est moyen à fort. Elle est modérément tolérante aux rouilles, à la fusariose, et à la septoriose, cependant sensible aux piétin-échaudage. Son PMG est moyen, la qualité semoulière est assez bonne. Elle se distingue par une bonne productivité.

- **Simeto**

C'est une variété sélectionnée à l'ITGC de Tiaret, d'origine Italienne, épi demi lâche, faiblement coloré, blanchâtre, à paille moyenne 90 à 100 cm. Le grain est demi allongé, semi-précoce, tallage fort, modérément tolérante aux rouilles, à la septoriose, résistante à la fusariose, et à la moucheture, PMG moyen, sensible à la sécheresse.

- **Bousselem**

C'est une lignée de CIMMYT-ICARDA, à cycle végétatif mi-tardif, tallage fort. C'est une variété à paille haute, avec 90 à 100cm, épi poilu jaune pâle. Le grain est long et le PMG est appréciable. Elle s'adapte aux régions arides et semi arides, elle semble résistante aux maladies.

- **Mohamed Ben Bachir**

Variété sélectionnée en 1938 par l'Institut Agricole Généalologique d'Algérie, sa sélection a été réalisée à l'intérieur d'une population locale de blé dur à Ain Roua, au nord de Sétif. Elle se distingue par une paille longue supérieure à 120 cm, la tige est creuse, sensible à la verse, à la rouille brune et à la septoriose.

- **Hedba03**

C'est une variété Sensible à la rouille noire. Elle est à cycle végétatif tardif, tolérante à la sécheresse, semis précoce et très semoulière.

Tableau 2. Nom et pédigrée des génotypes utilisés comme matériel végétal (CIMMYT, 2020)

Codages	Génotypes	Pédigrées	Origines
OZ368 (V1)	Oued-Zenati	Population locale	Algérie
GMG (V2)	Guemgoum Rkhem	Population locale	Algérie
DKH (V3)	Djenah Khetaiifa	Population locale	Algérie
H3 (V4)	Hedba	Population locale	Algérie
MBB (V5)	MBB	Population locale	Algérie
WAH (V6)	Waha	Plc/Ruff//Gta's/3/ Rolette CM 17904	Cimmyt-Icarda
MGS (V7)	Megress	Ofanto/Waha//MBB	Cimmyt-Icarda
SMT (V8)	Simeto	Capeiti8 x Valvona	Italie
GTA (V9)	Gta/dur	Gaviota/durum 69//Egret /3/Winged. CD27516	Cimmyt-Icarda
BOU (V10)	Bousselem	Heider/Martes/ Huevosde Oro	Cimmyt-Icarda

2.2. Dispositif expérimental

Les cultivars sont mis en place dans un dispositif expérimental en blocs complètement randomisés avec quatre répétitions (Figure 14), sur des parcelles élémentaires de dimensions de 1,2 m de largeur, de 6 rangs avec un espace inter-rang de 20 cm et de 5 m de longueur, soit une superficie parcellaire de 6 m² (Figure 15). La densité de semis est de 250 graines au mètre carré. Le semis a été fait à l'aide d'un semoir expérimental de marque *HEGE80*.

Les parcelles expérimentales dont le précédent cultural est une jachère travaillée pour les trois campagnes. Avant le semis, la fumure de fond a été réalisée, en utilisant le *Mono-ammonium Phosphate (MAP)* à 52% de phosphore, à raison de 80 kg ha⁻¹. La fertilisation azotée a concerné l'épandage de 100 kg ha⁻¹ d'*urée* (46% N) au stade épi 1cm. Le désherbage est réalisé chimiquement avec l'herbicide *Brumby 80 EC*, appliqué au stade 2-3 feuilles contre les graminées adventices à raison de 0,75 l ha⁻¹ et le *Granstar 75 DF* [*Methyl Tribenuron*] contre les adventices dicotylédones à raison de 12,5 g ha⁻¹.

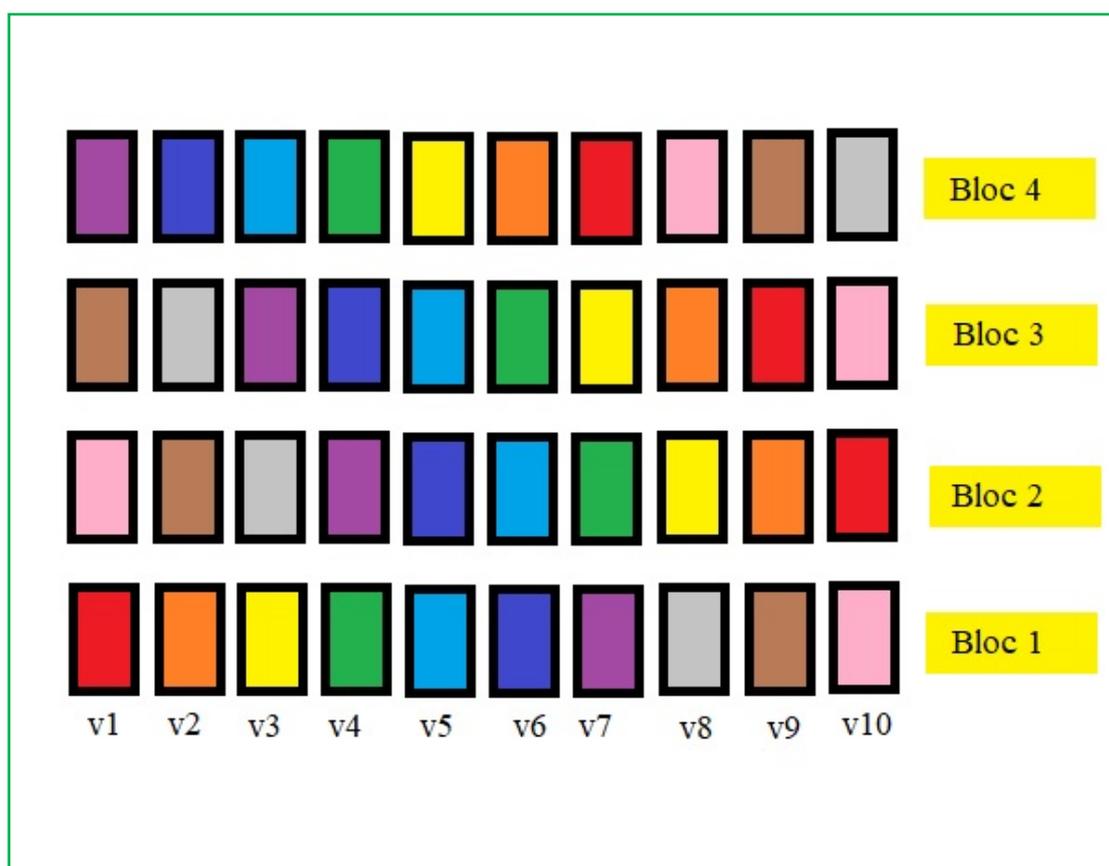


Figure14. Dispositif expérimental

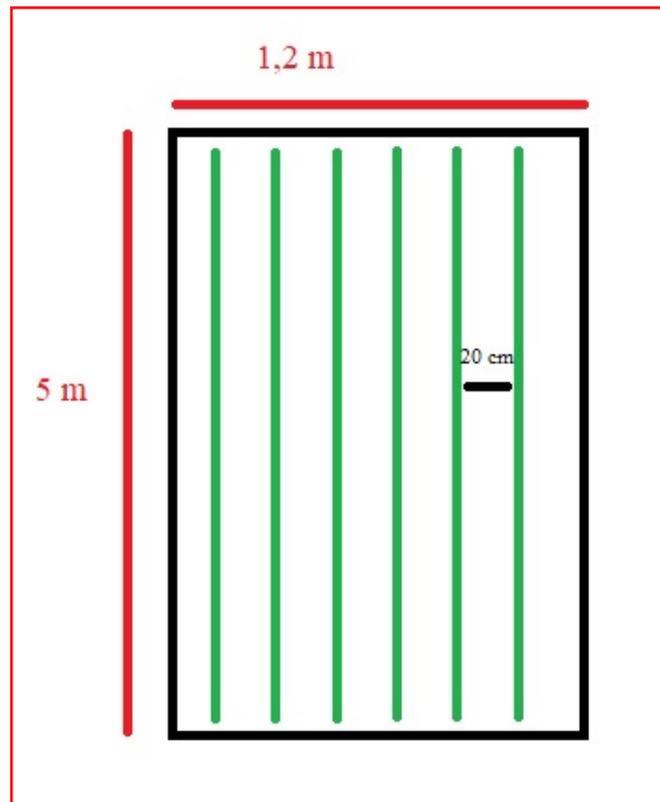


Figure15. Parcelle élémentaire expérimentale

3. Suivi de l'expérimentation et notations des paramètres

L'analyse du comportement de dix variétés ainsi que les caractéristiques liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau est évaluée par la notation des paramètres dépendants de la phénologie, la morphologie et la physiologie de la plante ainsi que le rendement et ses composantes. Ces éléments interfèrent avec les paramètres climatiques au cours du cycle végétatif de la culture.

3.1. Densité apparente du sol

La densité apparente du sol (d_a) est déterminée selon la procédure décrite par Yoro et Godo (1990). Le principe de la méthode au cylindre est fondé sur l'évaluation de la masse spécifique à son volume apparent (V) de sol prélevé, le volume est celui du cylindre. La masse prélevée (M) est évaluée par pesée au laboratoire après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures en utilisant une balance de précision. La densité apparente est déduite selon l'équation (1) en fonction des deux variables mesurées.

$$d_a = \frac{M}{V} \quad (1)$$

3.2. Gradient de variation de l'humidité du sol

La teneur en humidité du profil cultural des parcelles expérimentales correspond aux échantillons de sol prélevés sur les profondeurs de 0-20cm, 20-40 cm et 40-60 cm et pour chaque parcelle élémentaire. Elle est déduite selon la méthode gravimétrique qui consiste à sécher l'échantillon à 105°C pendant 24 heures. La réduction de la masse après séchage détermine la teneur en eau du sol. Les valeurs obtenues sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse de l'échantillon sec du sol. Les pesées ont été relevées au niveau du laboratoire avec une balance de précision de marque *Ohaus série Scout Pro*.

La teneur en eau massique (W) du sol est exprimée par le rapport de la variation de la masse d'eau (ME= MH - MS) entre les masses des échantillons du sol à l'état humide (MH) et l'état sec (MS) à la valeur de MS, selon le modèle (2) (Henin, 1977; Mermoud, 2006).

$$W = 100 \times \frac{MH-MS}{MS} \quad (2)$$

4. Paramètres révélant le niveau de tolérance de stress de la culture

4.1. Teneur relative en eau

La teneur relative en eau (TRE%) de la feuille a été déterminée selon la méthode décrite par Barrs (1968). Sur parcelles expérimentales, dix feuilles sont prélevées la matinée pour toutes les variétés et les répétitions. Les feuilles sont coupées à la base du limbe, mises dans des sachets en polyéthylène, étiquetés. Les feuilles pesées (masse fraîche, MF) sont trempées dans de l'eau distillée pendant 24 heures, elles sont pesées à l'état de turgescence (MT). La masse sèche (MS) des échantillons est obtenue après séchage à l'étuve pendant 48 heures à 80°C. La teneur relative en eau est déterminée selon l'expression (3) repérées de nombreuses recherches (Weatherley, 1950; Turner, 1981; Kaur et Thind, 2016).

$$TRE\% = \frac{MF-MS}{MT-MS} \times 100 \quad (3)$$

4.2. Intégrité cellulaire

Le test de l'intégrité cellulaire (CI%) a été réalisé selon la méthode décrite par Sullivan (1972). Cette méthode est similaire à celle énoncée par Thiaw (2003). Le principe consiste à évaluer l'efflux d'électrolytes par la mesure de l'électroconductivité (EC, mscm⁻¹) d'un milieu aqueux dans lequel des échantillons de feuilles ont été incubés. Ainsi, dix feuilles étendards sont prélevées au hasard par traitement et par répétition. Elles sont lavées à l'eau courante, découpées en segments de 1cm de long. Les échantillons sont mis dans des tubes à essai

auxquels sont ajoutés dix ml d'eau distillée déminéralisée. La méthode consiste à mesurer la conductivité électrique (CE, mScm^{-1}) de l'échantillon en utilisant un conductimètre de marque *Conductivity Meter HI9932*, préalablement étalonné. La première valeur de la conductivité électrique (CE_1 , mScm^{-1}) a été relevée sur les échantillons placés à la température ambiante du laboratoire ($T=25^\circ\text{C}$). La seconde valeur de la conductivité électrique (CE_2 , mScm^{-1}) est notée 24 heures après le passage des échantillons placés au bain marie à une température de 100°C , pendant 60 minutes. Le pourcentage de cellules endommagées (CI%) est estimée sous l'effet de l'augmentation de la température, est décrit selon le modèle (4).

$$\text{IC (\%)} = 100 \times (\text{CE}_1/\text{CE}_2) \quad (4)$$

4.3. Température de la canopée

La méthode adoptée pour la mesure de la température de la canopée est celle mentionnée par Blum et *al.*, (1989). La mesure est effectuée à un stade végétatif où le taux de couverture du sol est appréciable. Toutes les mesures ont été relevées avec le thermomètre infrarouge de marque *TECPEL513* (Figure 16) par temps clair et à midi. Les précautions de mesures sont celles recommandées et décrites par l'auteur.



Figure 16. Thermomètre infrarouge de marque *TECPEL*

4.4. Teneur en chlorophylle

La teneur en chlorophylle des feuilles des variétés testées est mesurée par un SPAD [*Leaf Chlorophyll Meter Spad 502 Plus*], dont la Marque est celle de *Green Agritechequipment*, compagnie *Konica Minolta*, *Japan*] (Figure 17). Le principe de mesure est celui indiqué dans

les travaux de recherches sur blé (Parry et *al.*, 2014; Kacim et *al.*, 2018; Song et *al.*, 2020). Les mesures sont relevées au stade de l'épiaison. Pour être propice et donc répondre à la collecte des données de mesures, la journée doit se distinguer par un aspect météorologique où le ciel est non couvert de nuages, donc clair, la journée ensoleillée.

La chlorophylle (CHL) est mesurée avec le chlorophylle-mètre (*chlorophyll meter, SPAD*) en utilisant un chlorophylle-mètre digital de type *SPAD502Plus* qui donne des lectures en unité *SPAD*. Le SPAD mètre est un outil portable de diagnostic qui mesure la verdure ou la teneur relative en chlorophylle des feuilles (Figure 17). L'opération est effectuée au stade de l'épiaison sur la prise de cinq feuilles au hasard de chaque parcelle élémentaire.



Figure 17. Chlorophylle-mètre de marque SPAD-502Plus

4.5. Surface foliaire et poids spécifique de la feuille drapeau

Dix feuilles étendards de chaque variété sont coupées à la base du limbe après l'arrêt de la croissance, puis photographiées à l'aide d'un appareil photo numérique (*Nikon Coolpix*, à 14 méga pixels de résolution), chaque photo est traitée par le logiciel *MESURUM Pro* pour déterminer la surface foliaire. Les feuilles sont ensuite mises à l'étuve à 85°C pendant 48 heures pour avoir leur poids sec (masses sèche). Le poids spécifique (masse spécifique) de chaque variété est exprimé par le rapport du poids (masse) de la feuille (g) sur sa surface (cm²). L'expression (5) décrit la méthode d'évaluation.

$$\mathbf{PSF} = \frac{\mathbf{PF}}{\mathbf{SF}} \quad (5)$$

5. Paramètres morphologiques

5.1. Hauteur de la plante

La hauteur (HT, cm) de la plante est estimée au stade de maturité, donc mesurée à partir du ras du sol jusqu'aux sommets des barbes de l'épi selon l'orientation décrite (Bognar et *al.*, 2007).

5.2. Surface de la feuille étendard

Pour chaque parcelle élémentaire, la surface de la feuille étendard (SFE) est estimée selon le modèle (6), intégrant les dimensions de la feuille et un coefficient, tel qu'il a été décrit dans les recherches (Spagnoletti et *al.*, 1979).

$$SFE(cm^2) = L \times l \times 0,709 \quad (6)$$

6. Paramètres agronomiques

6.1. Peuplement à la levée

Le nombre de plants levés (PLT) est estimé à partir des stations de comptage fixées préalablement sur le long de la diagonale des parcelles élémentaires, en plants levés par mètre linéaire; il est rapporté en plants par mètre carré.

6.2. Nombre de talles herbacées

Le nombre des talles herbacées (NTH) est déterminé par le comptage direct, à l'exception du maître brin, et pour chaque variété, à partir du stade 4 feuilles jusqu'au stade début montaison, aboutissant à la moyenne des talles herbacées par variété et par répétition.

6.3. Composantes du rendement

A maturité, les mesures ont porté sur le rendement et ses composantes sur les variétés testées et les quatre répétitions.

- **Nombre d'épis/m²(NE)** est déterminé par comptage des épis produits sur une surface d'un mètre carré (1m²).
- **Nombre de grains/épi (NGE)** est obtenu par comptage direct d'un échantillon de 10 épis par variété.
- **Poids de milles graines (PMG)** est obtenu par pesée directe sur balance de précision, de 1000 graines par variété. Il est exprimé en gramme (g).

7. Rendements en grain et en biomasse aérienne

7.1. Rendement en grains

Le rendement en grain (**RDT**) est estimé en fonction des composantes selon la relation (7).

$$\mathbf{RDT} = \mathbf{NE} \times \mathbf{NGE} \times \frac{\mathbf{PMG}}{\mathbf{1000}} \quad (7)$$

Le rendement est exprimé en gm^{-2} , converti en qha^{-1} .

7.2. Rendement biologique

La masse de la biomasse aérienne (**BIO**) accumulée à maturité est déterminée à partir d'un bottillon de végétation récolté sur un rang d'un mètre linéaire par parcelle élémentaire.

7.3. Rendement paille

Le rendement paille (**PLL**) est déduit par la différence entre la biomasse accumulée à maturité (**BIO**, qha^{-1}) et le rendement grain (**RDT**, qha^{-1}), selon l'expression (8).

$$\mathbf{PLL} (\mathbf{qha}^{-1}) = \mathbf{BIO} - \mathbf{RDT} \quad (8)$$

7.4. L'indice de récolte

L'indice de récolte (**HI**) est évalué selon le modèle (9).

$$\mathbf{HI}(\%) = \mathbf{100} \times \frac{\mathbf{RDT}}{\mathbf{BIO}} \quad (9)$$

8. Cinétique de l'accumulation de la biomasse aérienne

8.1. L'indice foliaire vert

L'indice foliaire vert (**GLAI**) est le rapport de la surface foliaire (**SFV**) à la surface du sol (**SS**) (Amanullah et *al.*, 2007), déterminé selon l'équation (10).

$$\mathbf{GLAI} = \frac{\mathbf{SFV}}{\mathbf{SS}} \quad (10)$$

La surface foliaire verte (**SF**, cm^2) est estimée selon la méthode décrite par Pommel et *al.*, (2006) selon l'équation (6).

8.2. Matière sèche

La matière sèche (MS) accumulée est mesurée à différentes dates relatives aux stades végétatifs du cycle de la culture. La végétation échantillonnée est fauchée sur un segment de rang de 0.5 mètre linéaire, par variété et par répétition. La masse de la matière sèche est déterminée après passage à l'étuve à une température de 80°C pendant 48 heures (Ehdaie et *al.*, 2006). Les résultats obtenus sont exprimés en qha⁻¹. La vitesse relative de croissance se définit comme l'augmentation de biomasse accumulée par unité de temps. Elle est exprimée selon l'équation (11) (Kumar et *al.*, 2020).

$$\mathbf{RGR} \left(\frac{\mathbf{qha}^{-1}}{\mathbf{JAS}} \right) = \frac{\mathbf{MS2-MS1}}{\mathbf{JAS2-JAS1}} \quad (11)$$

8.3. Remplissage du grain

L'étude de la cinétique de croissance du grain au cours de la période de remplissage a été réalisée sur des échantillons prélevés de la seconde ligne de chaque parcelle élémentaire, sur lesquelles sont prélevés des grains de la tierce médiane de l'épi, soit au total 250 grains/variété. Cette opération est répétée tous les deux jours jusqu'à la maturité physiologique. Les prélèvements sur tous les génotypes et les quatre répétitions ont débuté juste après le stade de floraison. Les grains sont pesés à l'état frais et mis à l'étuve à 85°C pendant 48 heures, puis repesés à l'aide d'une balance de précision pour déterminer la masse sèche moyenne d'un grain. La vitesse de remplissage des grains est calculée selon l'équation(12) (Dias et Lidon, 2009).

$$\mathbf{VRG}(\mathbf{g\ de\ pmg.jas}^{-1}) = \frac{\mathbf{PMG2-PMG1}}{\mathbf{JAS2-JAS1}} \quad (12)$$

9. Réserve d'eau du sol

La réserve d'eau du sol (SE) est évaluée selon le modèle (13) élaboré par Henin (1977). Ainsi, le stock d'eau du sol est fonction de l'humidité volumique (Hv) et de la profondeur du sol correspondant à l'enracinement de la plante (Z) à un stade végétatif.

$$\mathbf{SE} = \mathbf{Hv \times Z} \quad (13)$$

10. Eau du sol disponible pour la plante

La quantité d'eau du sol disponible (ESD) pour la plante au niveau du profil cultural est déterminée selon l'expression (14) en fonction des humidités aux capacités à la rétention (HR) et au point de flétrissement (Hf), la densité apparente du sol (da) et de la profondeur utile du sol (Z, mm), paramètres énoncés par Chennafi et *al.*, (2011). Nombreuses études révèlent des équations similaires (14) (Liu et *al.*, 2016; Khan et *al.*, 2020).

$$\mathbf{ESD(mm) = [(HCR - HCF)/100] \times Z \times da} \quad (14)$$

11. Quantité d'eau utilisée au cours du cycle de la culture

L'estimation de la quantité d'eau utilisée (ETU= EUC) au cours du cycle de la culture intègre l'eau transpirée (T) par les plants de la culture, ainsi que celle perdue par évaporation (Es) à partir du sol (Ehdaie, 1995; McKenzie et Woods, 2011; Chen et *al.*, 2003; Sezen, 2006; Zhao et *al.*, 2020), déterminées selon le modèle (15).

$$\mathbf{ETU(mm) = T + ES = ET = P + \Delta ES} \quad (15)$$

ET= Evapotranspiration (mm), *P*= cumul des précipitations (mm) au cours du cycle de la culture, *ΔES*= variation du stock d'eau du sol entre le semis et la récolte (mm)

Liu et *al.*, 2016 définissent *ΔES* (mm), selon le modèle (16).

$$\mathbf{\Delta ES = SWSb - SWSa} \quad (16)$$

ΔES(mm)= fait référence à la variation du niveau d'humidité du sol relatif à la récolte et la mise en place de la culture

12. Efficience d'utilisation de l'eau

L'efficience d'utilisation de l'eau (EUE, kgmm⁻¹ha⁻¹) est définie par le rapport du rendement en grain (RDT) ou de celui de la biomasse aérienne (BIO) élaborés par la culture sur la quantité d'eau utilisée au cours du cycle de la culture (EUC) (Oweis et *al.*, 2000; Chen et *al.*, 2010; Foley et *al.*, 2019). Sadras et McDonald (2012) précisent que l'EUE s'évalue par le rendement grain ou de biomasse aérienne, par millimètre d'eau utilisée par la culture. L'EUE est traduite à travers les équations (17) et (18). Ces notions sont similaires à celles énoncées par Zhao et *al.*, (2020).

$$\mathbf{EUEBDT} \text{ (kgha}^{-1}\text{mm}^{-1}\text{)} = \frac{\mathbf{RDT}}{\mathbf{EUC}} = \frac{\mathbf{RDT}}{\mathbf{ETA}} \quad (17)$$

$$\mathbf{EUEBIO} \text{ (kgha}^{-1}\text{mm}^{-1}\text{)} = \frac{\mathbf{BIO}}{\mathbf{EUC}} = \frac{\mathbf{BIO}}{\mathbf{ETA}} \quad (18)$$

13. Statut hydrique dans le continuum sol-plante-atmosphère

13.1. Quantités d'eau transpirée par la culture et évaporée par le sol

Stöckle et Kemanian (2020) mentionnent l'approche qui intègre les paramètres qui simulent la biomasse aérienne. A cet effet, des relations étroites ont été observées entre la biomasse aérienne et la transpiration. Pour se faire, la quantité d'eau transpirée (T, mm) est estimée en tenant compte de la biomasse aérienne formée (BIO, kgm⁻²), le déficit moyen de pression de vapeur (Δe , Pa) de l'atmosphère et de la feuille, et le coefficient physico-physiologique de la culture (k). La méthode adoptée est celle énoncée par Moutonnet (1982).

Dans cette optique, nombreuses études révèlent l'importance de ces paramètres caractéristiques du continuum *sol-plante-atmosphère*. Ces compartiments sont régis par un flux d'énergie à travers lequel se matérialise la formation d'une matière qui est la biomasse.

13.2. Efficience d'utilisation de l'eau et déficit de pression de vapeur

Décrite selon Moutonnet (1982), l'approche d'estimation de l'efficience d'utilisation de l'eau (EUE, mm), est qu'elle reflète le critère production de matière agricole (kgha⁻¹). Nombreux auteurs mettent en relief l'utilité de ce paramètre et l'expriment sous une succession d'expressions, en intégrant des composantes liées à la plante, l'atmosphère et au sol (Moutonnet, 1982; Caspari et *al.*, 1993; Dewars, 1996; Sadras et McDonald, 2012; Stöckle et Kemanian, 2020).

13.3. Analyse des valeurs décadaires des éléments du climat

L'analyse des valeurs décadaires des éléments du climat des trois campagnes a concerné les températures moyennes maximale, minimale et moyenne, et le cumul des précipitations. La demande climatique évaluée par l'évapotranspiration de référence (ET₀) et les besoins en eau de la culture du blé (ETC) ont été estimées par le logiciel CROPWAT version 8 développé par Smith et *al.*, (2000) (FAO, 2006). L'ET₀ est calculé selon la méthode de Penman-Monteith, sur la base de la température maximale (°C), minimale (°C), l'humidité relative de l'air (%), la vitesse du vent (kmj⁻¹) et de l'insolation horaire (hj⁻¹), et des coordonnées géographiques du lieu.

14. Analyse des données

Les données sur le climat qui ont caractérisé chaque campagne agricole 2013/2014, 2014/2015 et 2015/2016 ont été obtenues de l'Office National de la Météorologie de Ain Sfiha (Sétif). L'analyse décadaire a été réalisée par le logiciel CROPWAT version 8.0 (FAO, 2009). Les mesures obtenues de l'expérimentation ont été traitées aux logiciels CropStat 7.2.3. (2009), STATPLUS 598. Les graphes ont été dessinés par le logiciel Microsoft Excel et GGLOT2 appartenant au package R.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Chapitre III. Résultats et discussion

1. Caractérisation climatique

1.1. La température et les précipitations

La première campagne de l'expérimentation de 2013/2014 qui s'étale de septembre à juin est caractérisée par une température minimale moyenne de 6,37 °C, par contre la température maximale moyenne est de 19,37°C. Les indications sur les relevés de ces paramètres démontrent que la troisième décennie (d₃) de novembre, la première et la seconde décennie de décembre ainsi que la troisième de février sont les plus froides avec des valeurs inférieures à zéro degré Celsius (Figure 18). Toutefois, les basses températures moyennes sont marquées dès la 2^{ème} décennie de novembre jusqu'à la deuxième décennie de mars où elles varient de 3,44 à 8,84 °C (d₃). Les températures élevées sont celles des mois de septembre, octobre et juin qui atteignent 32,5 °C à la troisième décennie (Figure 18).

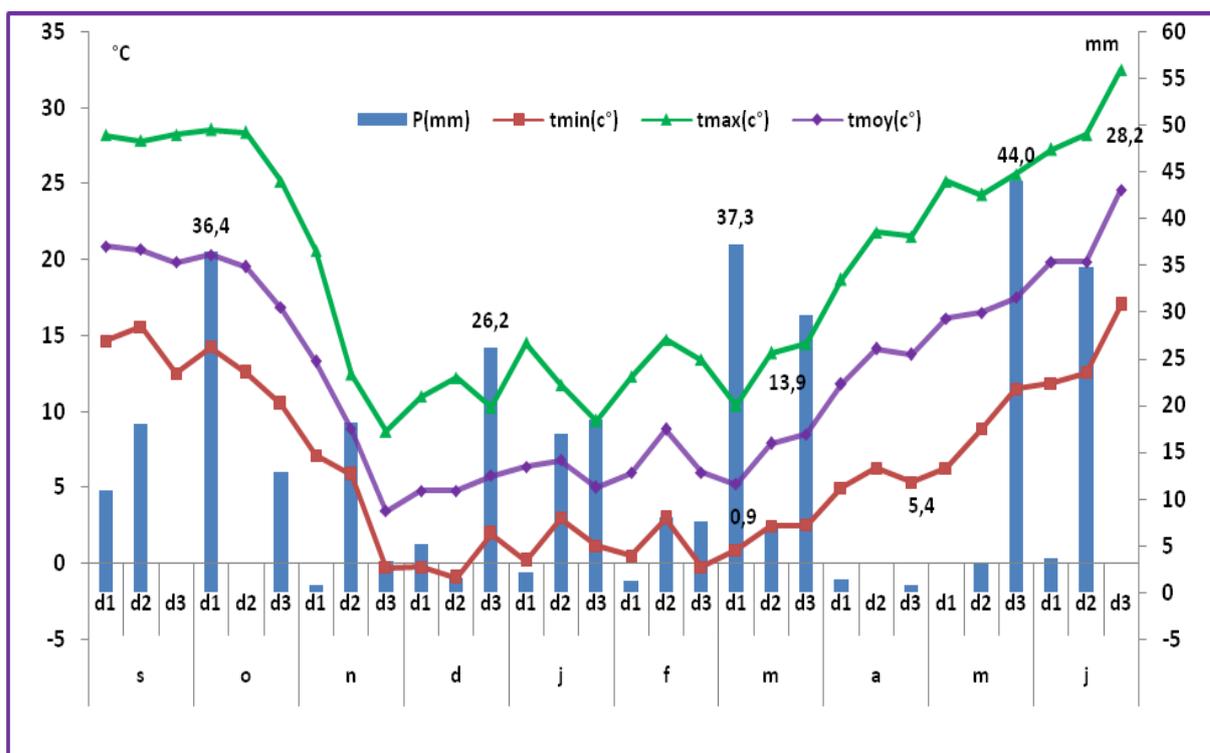


Figure 18. Variation décadaire des températures maximales, minimales et moyennes et des précipitations de la campagne agricole 2013/2014

La variation saisonnière des précipitations au cours de la campagne expérimentale se distingue par un cumul pluviométrique de 350.03 mm. La répartition saisonnière révèle que 28,74% (100,6 mm) sont notés en période automnale, 25.03% (87,63 mm) correspondent à celle de l'hiver et 46,22 % (118.2 mm) ont caractérisé le printemps et début été. Ainsi, le mois de mars avec un cumul de 74 mm est pluvieux. Par contre, avril semble être le mois le plus sec avec de 2,3mm (Figure 18).

La seconde campagne agricole 2014/2015 est caractérisée par une température minimale moyenne de 6,65 C°, accusant ainsi une augmentation de 0,28°C relativement à la campagne 2013/2014 (Figure 19). Il apparaît qu'en période hivernale, les décades les plus froides sont d3 (décembre), d1 et d3 (janvier) et la d1 de février. Le début de la saison printanière se caractérise par une température moyenne minimale de 6.15°C à la première décade de mars (Figure 19). La température moyenne maximale de la campagne de 19,37°C, semble similaire à la campagne précédente de 2013/2014. En période de croissance, les variations saisonnières de températures moyennes de $\pm 2^\circ\text{C}$ affecte le blé, révélant ainsi sa grande sensibilité aux gradients de variation de température (Asseng *et al.*, 2010). Les auteurs considèrent que la réduction de la production céréalière atteint 50%. La plupart de ces facteurs peuvent être attribués à une augmentation de la sénescence des feuilles due à des températures $> 34^\circ\text{C}$ (Asseng *et al.*, 2010).

Le cumul des précipitations de la d1 de septembre à la d3 de juin est de 343,1mm (Figure 19). La répartition saisonnière révèle que 9,62% (33 mm) sont enregistrés en période automnale, une baisse de 77,6 mm par rapport à la campagne 2013/2014. La saison hivernale, a reçu 58,55% des précipitations avec 200,9 mm. Par contre, la période de printemps et le mois de juin cumulent 109.2 mm (31,83%). Le mois de décembre, avec une quantité de précipitation de 76 mm apparaît le plus arrosé. Par ailleurs, avril semble le moins pluvieux avec 5,4 mm. C'est une période où la culture du blé requiert de l'eau (Chennafi *et al.*, 2005; 2012; Belagrouz et Chennafi, 2016; Yang *et al.*, 2019). En condition pluviale méditerranéenne, l'avènement du déficit hydrique et l'occurrence de fortes températures printanière affectent significativement la productivité potentielle du blé (Chennafi *et al.*, 2006; Belagrouz *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2019; Stallmann *et al.*, 2020; Javed *et al.*, 2020). Cette période coïncide avec l'épiaison, perturbe la phase de remplissage du grain et par conséquent le rendement final. Ces valeurs des précipitations sont considérées faibles pour accomplir le cycle de blé dans les régions semi-arides. Baldy (1986) mentionne que l'altitude et la

continentalité sont les particularités locales qui expliquent la faible pluviosité. L'auteur souligne l'importance du choix des cultivars adaptés qui succèdent à un choix préalable de techniques et de successions culturales.

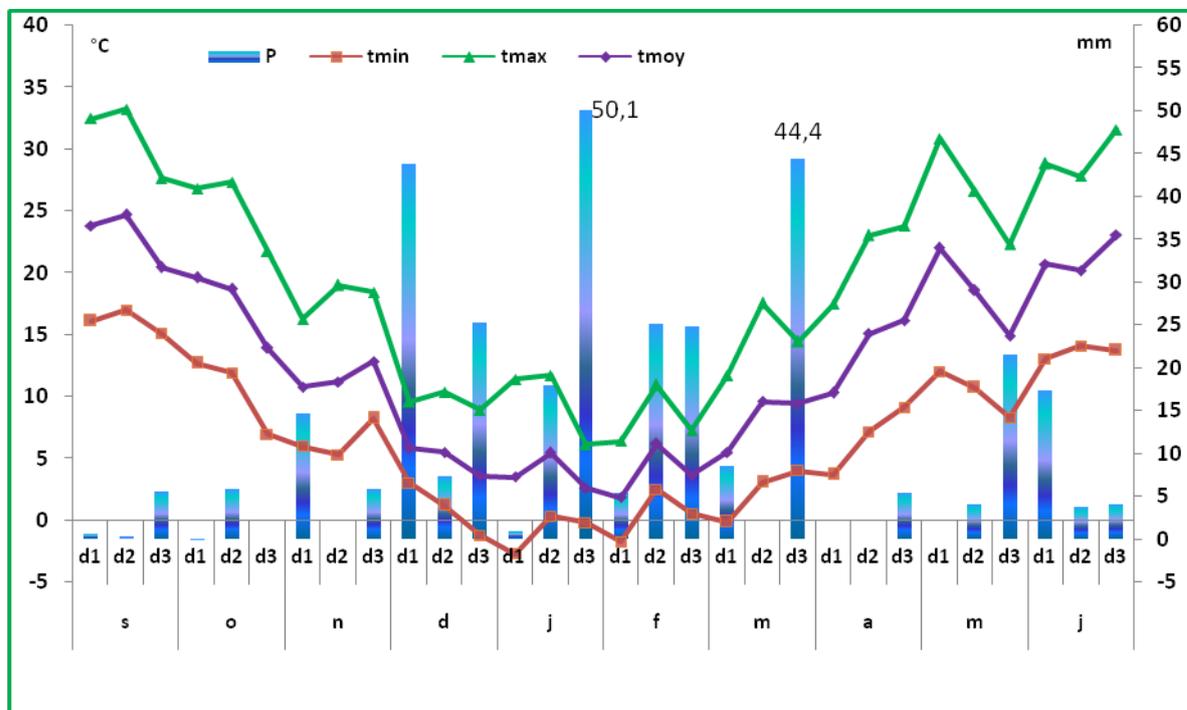


Figure 19. Variations décadaires des températures maximales, minimales et moyennes et des précipitations de la campagne agricole 2014/2015

La troisième campagne de l'expérimentation (2015/2016) se distingue par une température basse annuelle moyenne de 6,45 °C. Cependant la valeur de 19,67 °C caractérise la moyenne de la température maximale de la campagne, alors l'écart est de 0,30 °C relativement aux deux campagnes précédentes. Les valeurs indiquent que les décades d₂ et d₃ de décembre, la d₂ de janvier et la d₁ de mars apparaissent les plus froides (Figure 20). Cependant, la période considérée froide s'étale de la d₃ de novembre jusqu'à la d₂ de mars, où les températures moyenne minimales varient de 4,98 °C à 7,47°C. Les températures les plus élevées correspondent aux mois de septembre et de juin, y compris la d₃ de mai.

La campagne agricole de 2015/2016 a reçu une quantité de précipitation cumulée de septembre à juin de 330,40 mm. La répartition saisonnière est structurée par 31,14% (102,9 mm) en période automnale, 16,25% (53,70 mm) en saison hivernale. Cependant, lors de la saison printanière et le mois de juin, 173,8 mm (52,60%) ont caractérisé la période de croissance de la culture de blé. Toutefois, mars semble le mois le plus pluvieux avec un cumul de 66,30 mm, secondé par le mois de mai avec une quantité de 57,80 mm (Figure 20).

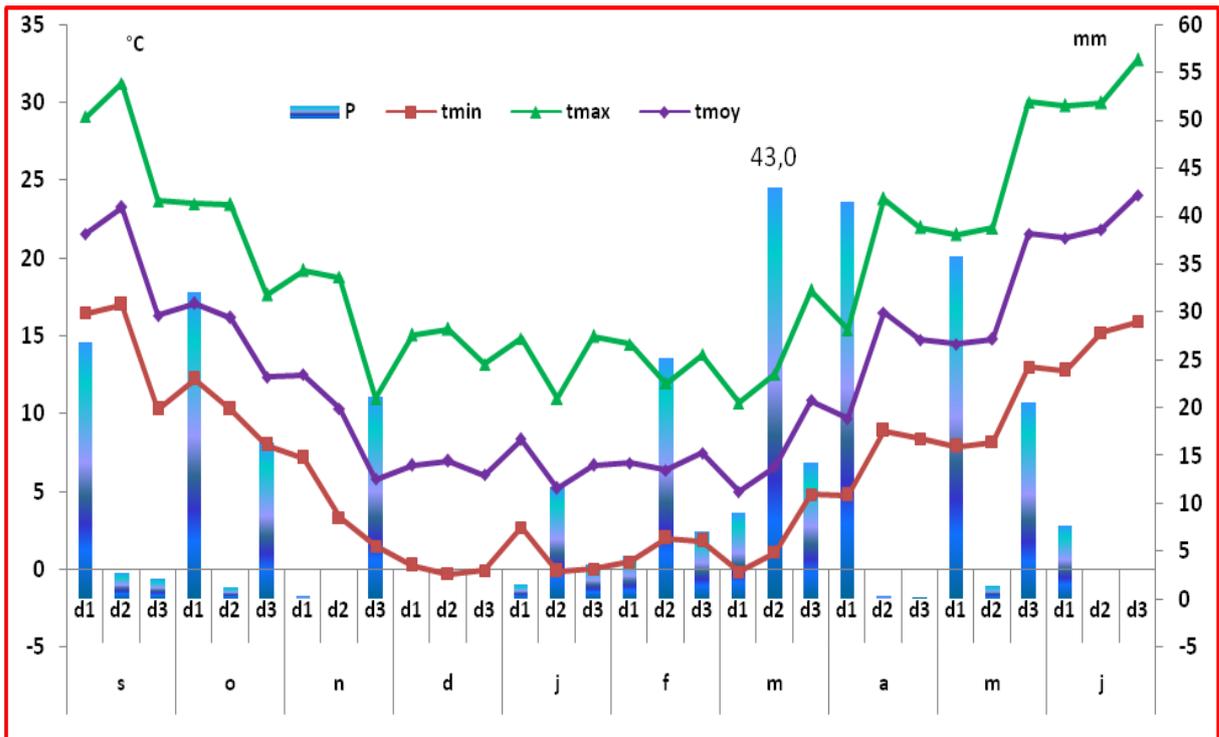


Figure 20. Variations décadaires des températures maximales, minimales et moyennes et des précipitations de la campagne agricole 2015/2016

1.2. Synthèse climatique

Sur les 3 campagnes de l'expérimentation, les indications révèlent une répartition bimodale de la température, en effet la période hivernale est considérée froide liée aux basses températures. Par contre la période printanière relative à la période de croissance de la culture du blé coïncide avec les fortes températures, est décrite comme saison chaude. Dès lors, de la première décennie de novembre à la deuxième décennie de mars, la température moyenne mensuelle reste inférieure à 10°C, seuil estimé favorable à la croissance et le développement de la culture. Par ailleurs, le gradient décadaire de précipitations accuse une distribution mensuelle, saisonnière et interannuelle variable. Ainsi, l'ordre de classement du cumul saisonnier hivernal suit le sens $[(53,70 \text{ mm}, 2015/16) < (87,63 \text{ mm}, 2013/2014) < (200,9 \text{ mm}, 2014/2015)]$. A l'inverse, le printemps de la campagne de 2013/14 est décrit déficitaire en eau, particulièrement au cours des mois d'avril (2,2mm) et mai, coïncidant avec la période croissance et du remplissage du grain des céréales. Alors que celui de 2015/16 est pluvieux avec 173.8 mm (Figure 20). Toutefois, une quantité d'eau reçue reste fonction de l'intensité des précipitations, du stade végétatif où la plante valorise l'eau (Chennafi et al., 2005).

En conditions pluviales, l'ampleur de la vulnérabilité de la production agricole sous l'effet de la variation des précipitations, a engendré un débat sur les effets 1) Du déficit et 2) De l'excès de l'humidité, aux stades sensibles de la croissance de la céréale. En revanche, nombreuses investigations ont abordé ce contexte (Tavakoli et Oweis, 2004; Chennafi *et al.*, 2006; Asada et Matsumoto, 2009; Belagrouz *et al.*, 2018). Dès lors, sur les Hauts Plateaux Sétifiens, en condition pluviale, la production du blé reste aléatoire et dépendante du régime des précipitations (Chennafi, 2012; Belagrouz et Chennafi, 2016). Par ailleurs, les effets du risque d'un avènement de changement climatique provoque une baisse supérieure 57% de la production agricole (Bennayan et Eyshi Rezei, 2014; Asseng *et al.*, 2015). Le changement climatique altère la structuration des systèmes alimentaires en réduisant la production agricole. Ils génèrent des sécheresses ou des inondations, et affectent la durée de la saison (Gregory *et al.*, 2005), dès lors, il le changement climatique est un facteur qui induit la baisse de la productivité des cultures (Leclère *et al.*, 2014).

1.3. Variation de l'eau disponible au cours du cycle de la culture

L'humidité du sol est indispensable aux systèmes terrestres et joue un rôle essentiel dans les processus hydrologiques de surface, pour le ruissellement, l'évaporation du sol et la transpiration des plantes (Wang *et al.*, 2012a; Qin *et al.*, 2013). L'humidité du sol reste dépendante des processus hydrologiques et des fonctions écologiques (Yang *et al.*, 2012). L'humidité du sol est fortement influencée par l'infiltration ou l'évapotranspiration des précipitations. C'est une source d'eau régulière pour la croissance de la végétation, présente dans les couches profondes du sol, l'humidité fonctionne comme un réservoir.

Au cours de la période de croissance du blé, l'approvisionnement en eau disponible dans le sol est une source d'eau importante (Zhou, 1995). L'humidité du sol participe à la diversité et la composition des plantes (Svoray *et al.*, 2007), il est intéressant de noter que la disponibilité en eau dans le sol au cours du début de cycle de blé détermine la levée qui est la phase végétative de croissance la plus cruciale déterminant le rendement final (Mkhabela et Mashinini, 2005).

L'analyse de la variance de l'humidité du sol mesurée au cours du cycle de la culture du blé de notre expérimentation révèle des effets significatifs des dates, génotypes, profondeurs, année et des interactions (Tableau 3).

Tableau 3. Carrés moyens de l'analyse de la variance du niveau de l'humidité relevé au cours du cycle du blé sur les trois campagnes agricoles de 2013/2014 à 2015/2016

Sources de variation	ddl	CM
Profondeur(P)	2	419,91***
Date(D)	7	4764,56***
P*D	14	27,75***
Génotype(G)	9	16,73***
P*G	18	25,11***
D*G	63	5,34***
P*D*G	126	3,83***
Année(A)	2	1158,71***
P*A	4	389,29***
D*A	14	1053,17***
P*D*A	28	34,53***
G*A	18	28,11***
P*G*A	36	14,22***
D*G*A	126	6,07***
P*D*G*A	252	4,38***
Erreur	2160	0,66***

ns, * et *** : effets non significatif et significatif à 5% et 1%, respectivement

Les résultats indiquent que sur les 3 profondeurs, 8 dates d'échantillonnage et les 3 campagnes d'expérimentation, le niveau moyen de l'humidité disponible est de 16,1%, 16,0%, 16,0%, 15,9%, 15,8%, 15,8%, 15,8%, 15,7%, 15,5%, 15,3%, respectivement pour les variétés OZ368, GTA, MGS, SMT, GMG, BOU, MBB, H3, WAH et DKH. La plus petite différence significative est de 0.13%.

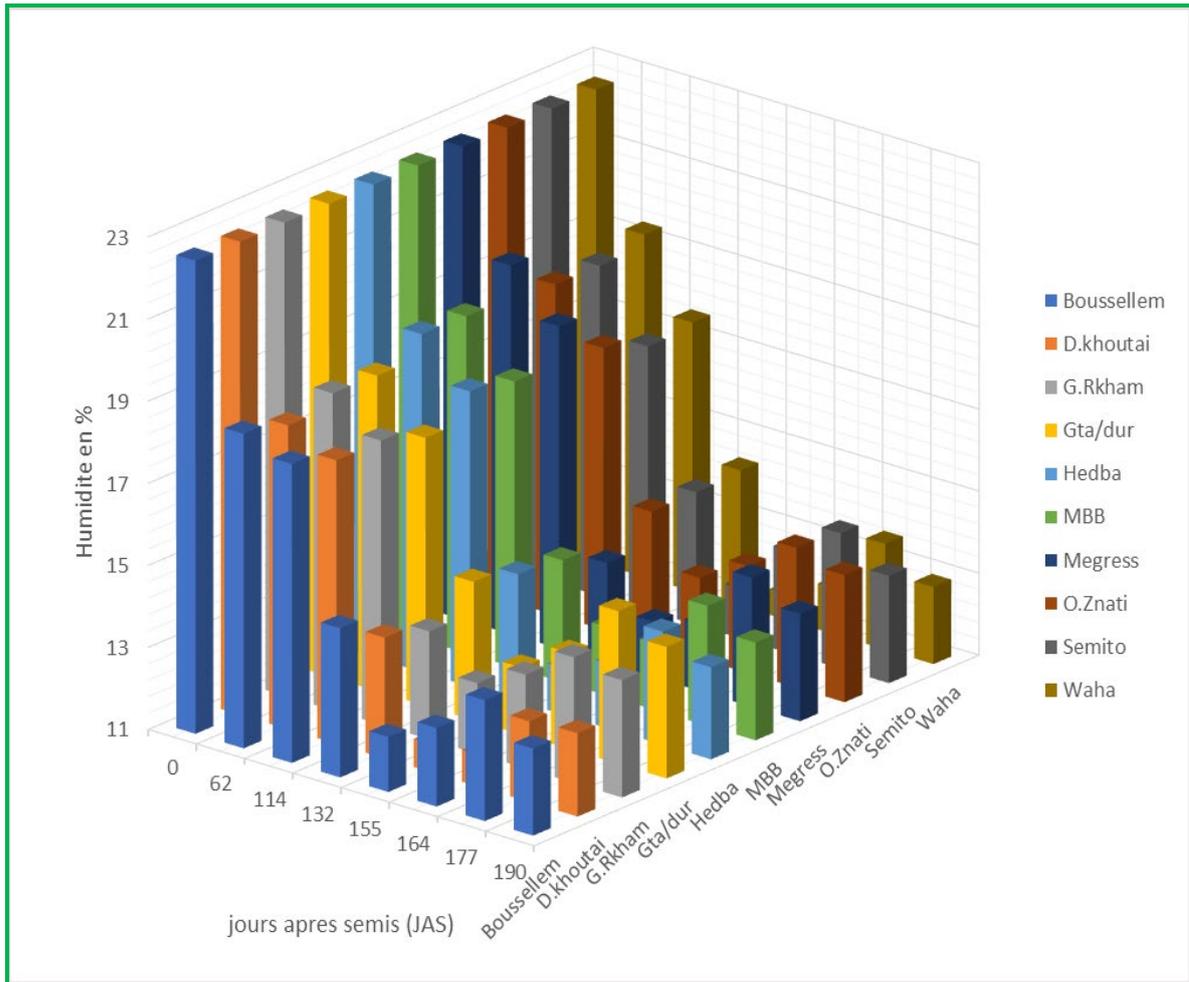


Figure 21. Variation de l'humidité disponible pour les variétés en fonction de l'évolution du NJAS pour les trois campagnes (2013/2014, 2014/2015 et 2015/2016)

Les variations de l'humidité sont le résultat combiné de facteurs topographiques, de caractéristiques du sol et de végétation, en revanche de conditions agropédologiques. Ainsi, le type de cultivar est déterminant du gradient de variation de la teneur en humidité au niveau du profil cultural du sol. La divergence pour ce paramètre peut s'appréhender à travers la consommation de l'eau par la plante (Figure 21), expliquée par la charpente architecturale racinaire. Les caractéristiques peuvent diverger selon 1) La surface racinaire totale (Sharma et al., 2011), 2) L'angle, le diamètre et le volume racinaire (Wasson et al., 2012), 3) Le nombre total de racines séminales (Rosello et al., 2019), 4) La croissance des racines en profondeur (Hamada et al., 2012), 5) La réduction de la taille du xylème pour augmenter la résistance axiale au transport d'eau (Comas et al., 2013), 6) La réduction de la résistance au mouvement de l'eau du sol vers la partie supérieure du blé par des poils racinaires plus longs et plus denses (Bates et Lynch, 2001; Wasson et al., 2012).

Les conditions spécifiques de la croissance racinaire des variétés et la densité de semis influent également sur la variation de l'utilisation de l'eau du sol. Ainsi un système racinaire profond valorise l'humidité du sol des horizons profonds alors qu'un système racinaire dense utilise l'humidité des horizons superficiels. L'humidité du sol est aussi fonction de l'architecture de la canopée et de la couverture du sol par le feuillage (Richards *et al.*, 2010; Unkovich *et al.*, 2018). Par ailleurs, un recouvrement approprié du sol par le feuillage est lié à la vigueur d'une croissance précoce spécifique de la variété. Dès lors, l'évaporation directe du sol se réduit au profil de la plante, en effet ce paramètre représente plus de 60% de l'évapotranspiration en milieu semi-aride (Cooper *et al.*, 1987). Dans ce contexte, la vigueur précoce des cultivars de blé est efficace pour caler la couverture du sol, et donc pour améliorer l'interception de la lumière, réduire l'évaporation de surface, et ainsi pour réduire l'évaporation de l'eau du sol. Le résultat engendre une valorisation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Donc, il serait utile de procéder à des semis précoces, pour la préservation de l'eau et des éléments nutritifs pour la culture du blé (Rebetzke *et al.*, 2005).

L'humidité du sol disponible au niveau de la solution du sol dépend de la date de prélèvement, donc lié au stade végétatif de la culture. Ainsi, les résultats des expérimentations révèlent que la période du semis au stade épiaison et pour la campagne de 2013/2014, l'humidité varie de 22% à 14,7 % (Figure 22), pour celle de 2014/2015, elle semble fluctuer de 23,0% à 13%,0 (Figure 23), et la campagne de 2015/2106 se caractérise par un gradient d'humidité de 22,5% à 11,0% (Figure 24). Le niveau de la teneur d'humidité du sol atteint des valeurs inférieures à 15% et tend vers le point de flétrissement en saison de croissance, ceci génère une réponse de plante stressée au cours de fin de cycle. Dès lors, le rendement et ses composantes sont pénalisés, par détérioration au préalable des organes de la plante. Des résultats similaires sont rapportés à travers nombreuses investigations (Schuppler *et al.*, 1998; Gregory *et al.*, 2000; Blum, 2005; Chennafi, 2006; Lugojan et Ciulca, 2011; Chennafi, 2012; Belagrouz, 2013; Belagrouz et Chennafi, 2016). En conditions pluviales semi-arides, la précocité à l'épiaison est recommandée comme une caractéristique pour minimiser les effets du stress hydrique de fin de cycle du blé et par conséquent limiter la baisse du rendement (Asseng *et al.*, 2003; Shavrukov *et al.*, 2017).

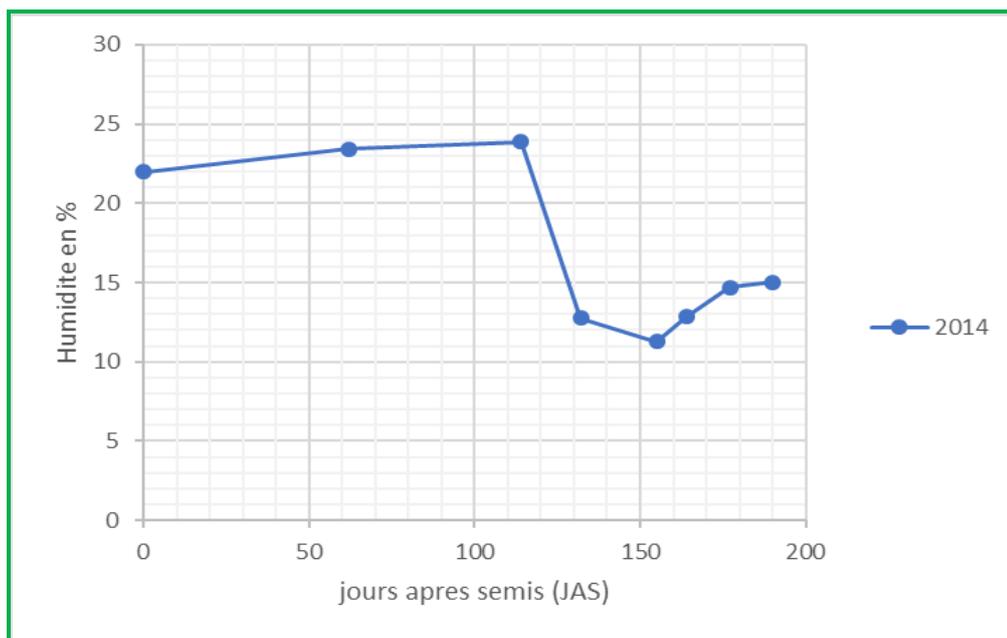


Figure 22. Variation de l'humidité en fonction de l'évolution du NJAS pour la campagne 2013/2014

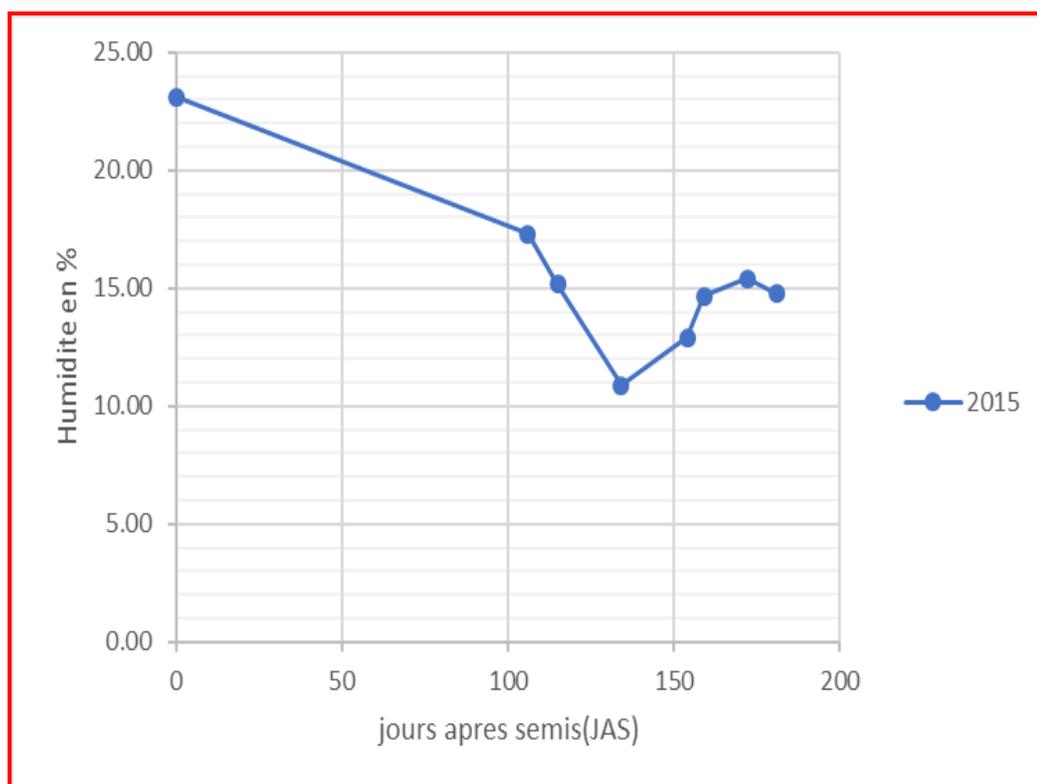


Figure 23. Variation de l'humidité en fonction de l'évolution du NJAS pour la campagne 2014/2015

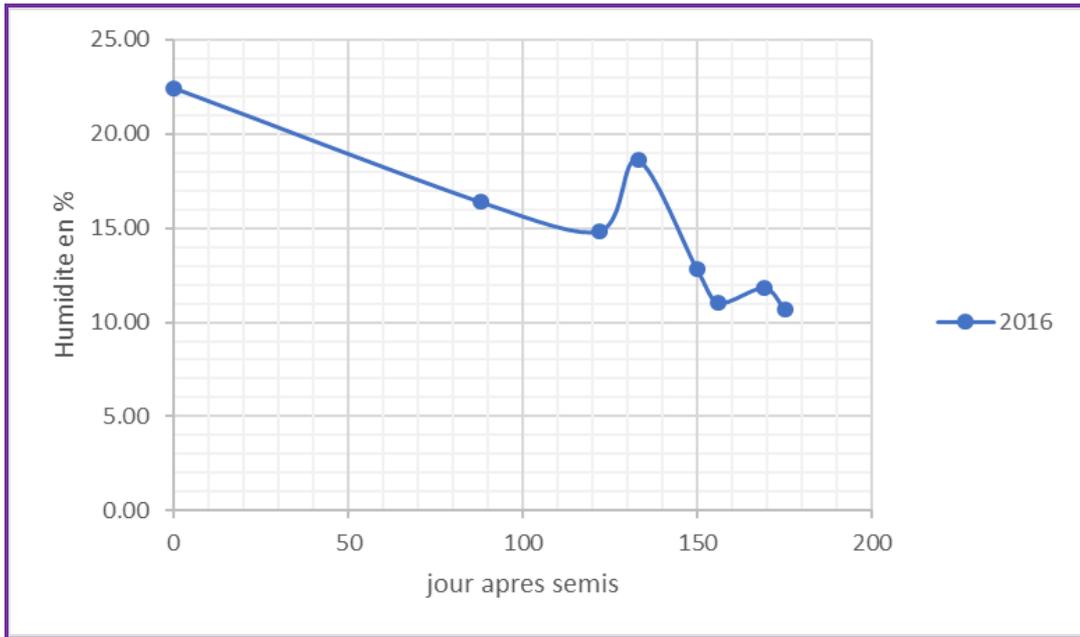


Figure 24. Variation de l'humidité en fonction de l'évolution du NJAS pour la campagne 2015/2016

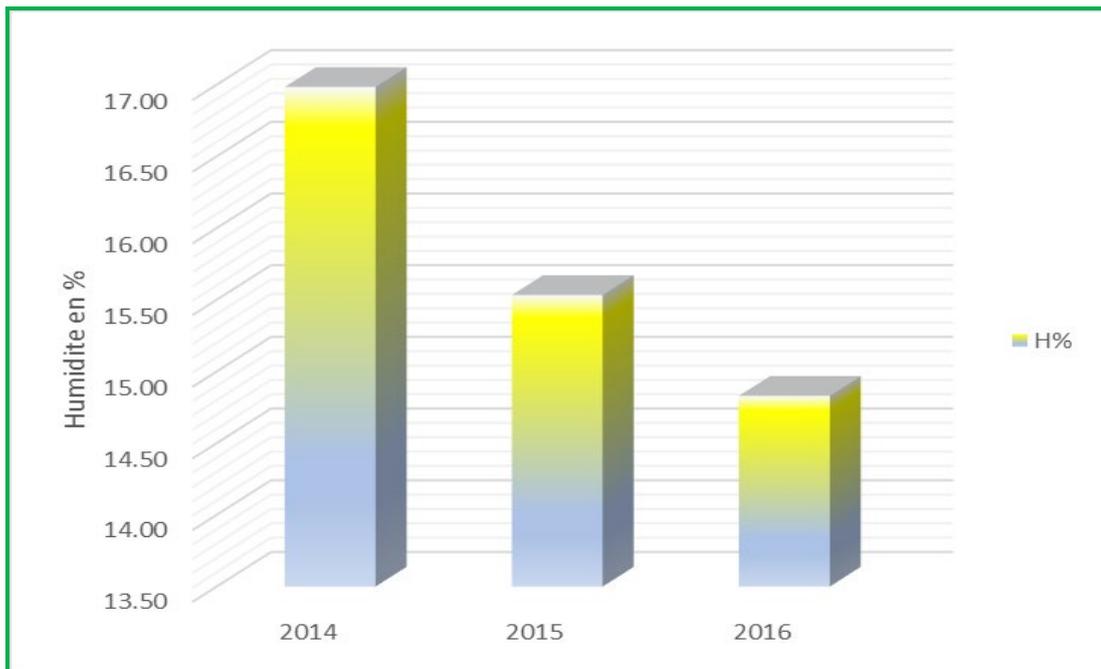


Figure 25. Variation de l'humidité moyenne (%) en fonction de la campagne agricole

En fonction des campagnes agricole, l'analyse statistique indique que les niveaux de l'humidité divergent significativement d'une année à une autre ((Figure 25). La comparaison des moyennes révèle trois groupes différents, chaque année forme un groupe indépendant avec une ppds égale à 0,07 % (Figure 25). La campagne de 2013/2014 se caractérise par un

taux d'humidité de 16,98 % tandis que la campagne de 2014/2015 présente une teneur de 15,53 %. A l'égard, celle de 2015/ 2016 enregistre la plus faible valeur avec 14,83 %. Ferras (2015) note la même tendance pour la campagne de 2013/2014.

Tenant compte de la profondeur du sol, l'humidité du sol varie significativement d'une profondeur à une autre (Tableau 3), leur variation semble proportionnelle à la répartition des précipitations (Figure 26), et donc l'humidité du sol dépend en grande partie des conditions météorologiques. Le niveau d'humidité du sol suit l'évolution du cumul de la précipitation (Figure 26). Dès lors où l'ordre annuel des précipitations suit le sens $2014 > 2015 > 2016$, celui de l'humidité du sol est similaire (Figure 26). En environnement semi-aride, des résultats similaires ont été mentionnés (Berndtsson *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2016).

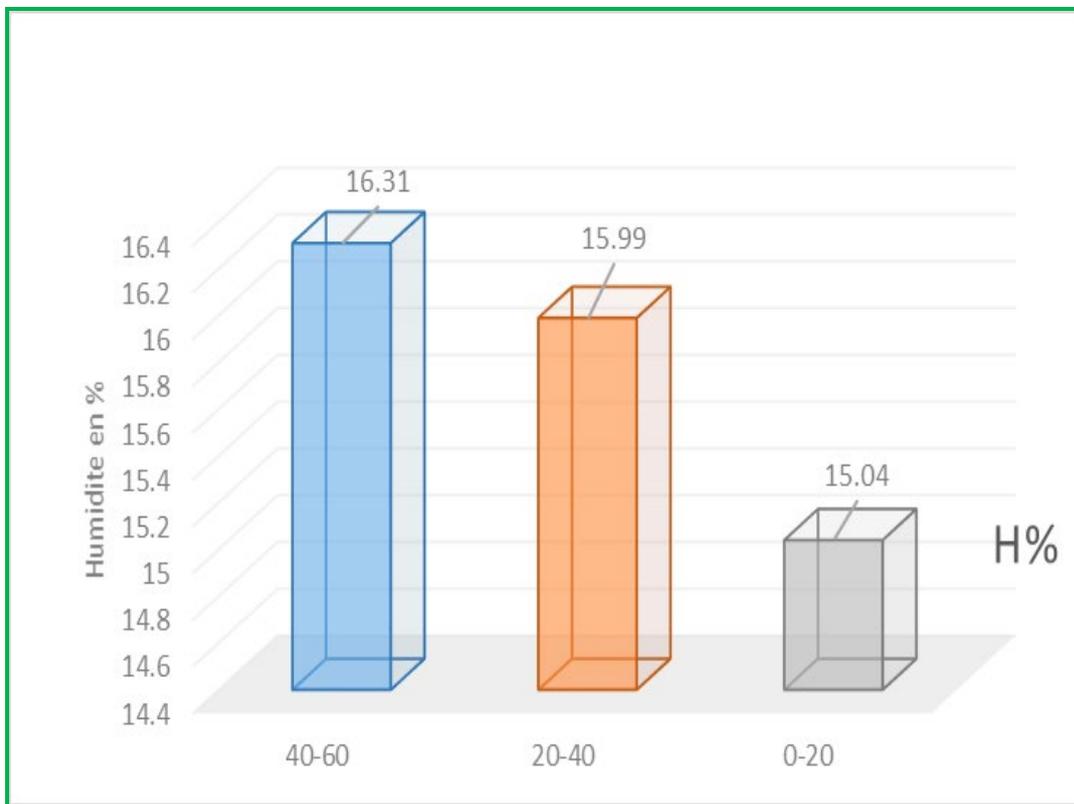


Figure 26. Variation de l'humidité moyenne (%) des 3 campagnes en fonction des profondeurs du sol

L'effet significatif de l'interaction profondeur du sol x année sur l'humidité du sol est illustré tenant compte de la profondeur de (0-20, 20-40 et 40-60cm) et respectivement pour chaque campagne (2014, 2015 et 2016) (Figure 27).

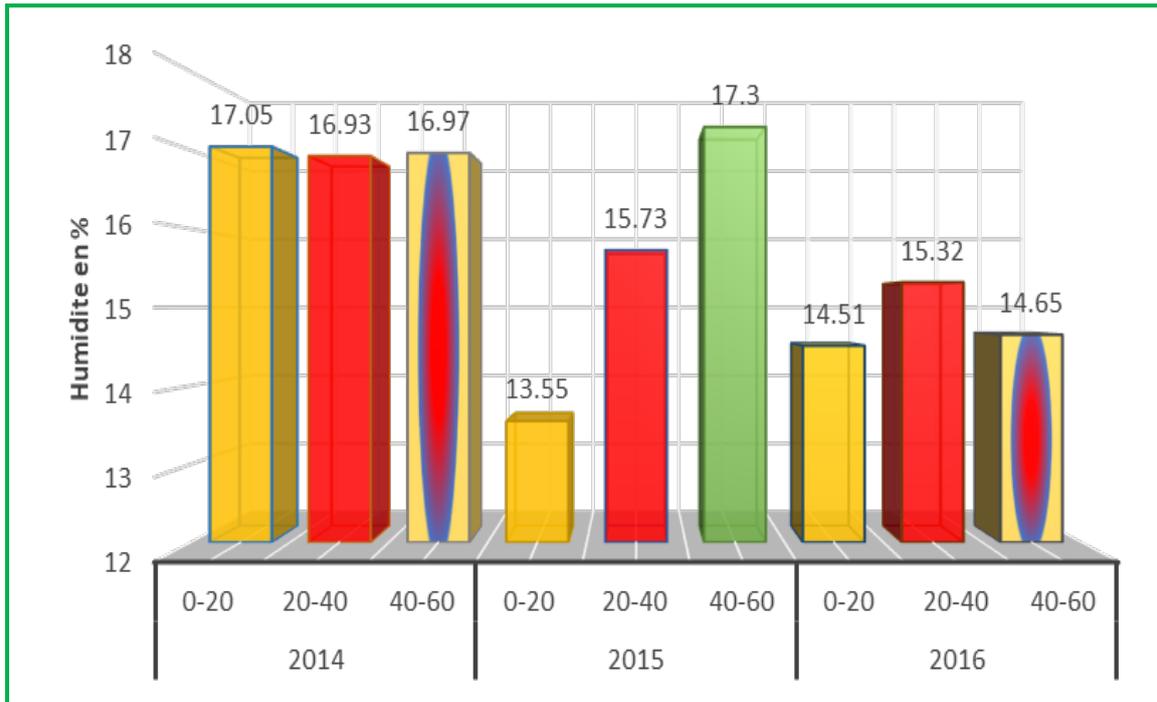


Figure 27. Effet de l'interaction profondeur du sol x année sur l'humidité du sol

Il est utile de rappeler que pour chaque profondeur, l'humidité a été prélevée à 8 dates différentes et pour chaque campagne d'expérimentation. Ainsi, la teneur en eau est plus faible dans la profondeur 0-20 cm, avec 13,55% et 14,52% et dans l'ordre pour les campagnes de 2014/2015 et 2015/2016. La moyenne des trois campagnes montre que l'horizon 40-60 cm est le plus humide et qui enregistre une valeur de 16,31 % suivi par l'horizon 20-40 et 0-20 dont les valeurs sont de 15,99 %, et 15,04 %, respectivement. L'humidité du sol est donc faible dans la première profondeur (Figure 26) à cause de la consommation de l'eau par les racines des plantes cultivées et des adventices, racines plus nombreuses dans l'horizon superficiel que dans les horizons en profondeur (Baldy, 1986; Chennafi et *al.*, 2008).

Relativement, il apparaît que l'humidité sur la profondeur (40-60 cm) semble supérieure à celles des deux autres profondeurs. Ce comportement hydrique du sol peut s'expliquer partiellement par l'infiltration de l'eau engendrée par la macroporosité de surface qui est un caractère typique de la jachère travaillée. Par ailleurs, au niveau des deux premières profondeurs, l'absorption de l'eau est favorisée par le système racinaire (Chennafi, 2007; Choudhary et *al.*, 2013). Dès lors, c'est la conséquence de l'interaction entre les compartiments du continuum sol plante atmosphère qui génère ce fonctionnement. Ainsi, il apparaît que l'humidité du sol est relativement élevée sur les couches subsuperficielles (20-40 cm et 40-60 cm) que sur celles dites superficielles (Kuotsu et *al.*, 2014).

2. Variation des paramètres agro-phénologiques

2.1. Variation du rendement et ses composantes

L'analyse de la variance du rendement en grains et des caractères qui lui sont directement liés indique un effet moyen année et une interaction génotype x année significative. Ces résultats indiquent que les valeurs prises par les variables analysées changent significativement en fonction des années et que ces changements sont aussi en fonction du génotype en interaction avec l'année considérée.

Tableau 4. Carrés moyens des écarts de l'analyse de la variance du rendement et des composantes des dix variétés testées au cours de trois campagnes consécutives (2013/2014, 2014/2015 et 2015/2016)

Source	Année (A)	Répétition/(A)	Génotype (G)	A x G	Erreur
DL	2	9	9	18	81
PLT	9969.64**	593.529 ^{ns}	2453.80 ^{ns}	1857.83**	337.2
TLL	936520.00**	1009.94 ^{ns}	9757.13 ^{ns}	18737.40**	2505.5
NE	55201.10**	2549.42**	4169.41 ^{ns}	3106.21**	487.8
NGE	3241.56**	104.46**	214.58***	116.28**	17.2
NGM ²	105903000**	1024781.2 ^{ns}	12898474***	5937100**	362314.0
PMG	203.11**	1.57 ^{ns}	320.79**	20.77**	1.3
RDT	4486.16**	3.81 ^{ns}	304.04**	77.53**	5.2
BIO	36841.70**	77.99**	338.41 ^{ns}	374.32**	21.3
PLL	17155.60**	56.25**	693.03 ^{ns}	293.96**	11.3
HI	1407.85**	19.10*	876.48**	33.87**	8.7
Eco	10541.6**	14.24 ^{ns}	259.23 ^{ns}	119.73**	7.8

PLT=plants levés/m², TLL= talles herbacées/m², NE= nombre d'épis/m², NGE= nombre de grains par épi, NGM = nombre de grains/m², PMG= poids de 1000 grains, RDT= rendement en grains.

2.1.1. Nombre de plants levés par mètre carré

Les valeurs moyennes prises par le rendement et les composantes, relatives aux dix variétés testées, sont indiquées sur tableau (Tableau 6). Ainsi le nombre de plants levés par unité de surface emblavée varie d'un minimum de 163.14 plantsm⁻², moyenne de la campagne de 2014/2015, à un maximum de 192.91 plantsm⁻², moyenne de la campagne 2013/2014 (Tableau 5). En comparaison avec la valeur prise par la plus petite différence significative au seuil de 5% (*ppds*5%), qui est de 12.32 plantsm⁻², l'écart de 192.91-163.14= 29.77 plantsm⁻², entre les moyennes extrêmes est significatif.

Ces résultats suggèrent que le nombre de plants levés changent en fonction des campagnes. Ainsi certaines campagnes induisent des pertes à la levée plus importantes que d'autres. Pour une densité de semis de 250 graines /m², le taux de perte à la levée est, en moyenne des trois

campagnes, de $100(250-181.06)/250= 27.57\%$. Ce taux varie d'un minimum de $100(250.0-192.91)/250= 22.83\%$ à un maximum de $100(250.00-163.14)/250= 34,47 \%$. Le phénomène des pertes à la levée est très peu étudié sous les conditions pédoclimatiques des Hautes Plaines Orientales.

Tableau 5. Valeurs moyennes de l'effet campagne du rendement et des composantes des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)

Année	2014	2015	2016	ppds5%
PLT	192.91	163.14	187.13	12.32
TLL	541.09	271.20	531.08	16.07
NE	165.59	239.89	202.22	25.54
NGE	25.85	17.65	35.63	4.23
NGM	4325.76	4149.40	7051.73	628.14
PMG	43.85	47.75	43.85	0.64
RDT	12.16	12.98	30.90	0.99
BIO	36.61	60.27	96.84	4.47
PLL	24.59	47.29	65.94	3.79
HI	33.09	22.35	32.09	2.21

PLT=plants levés/m², TLL= talles herbacées/m², NE= nombre d'épis/m², NGE= nombre de grains par épi, NGM = nombre de grains/m², PMG= poids de 1000 grains, RDT= rendement en grains

Toutefois, les causes probables des pertes peuvent être justifiées par 1) La profondeur de semis, 2) La qualité de la semence utilisée, 3) L'effet combiné du manque d'eau, des basses températures (gel) automnales et la date de semis (Bouzerzour et Refoufi, 1992). La comparaison des pluies relatives à la période automnale (Septembre à décembre) semble justifier que l'humidité du sol peut être considérée la cause des différences de taux de plants levés par m² entre campagnes. En effet la campagne de 2013/2014 a accumulé 100.6 mm, par contre 33 mm ont caractérisé la campagne de 2014/2015 (Figure 28).

L'effet moyen variété n'est pas significatif, il indique que globalement les 10 variétés présentent le même taux de plantes levées par m². Cependant l'examen des valeurs moyennes par génotype indique qu'Oued Zénati368 (OZ368) présente le plus faible nombre de plants levés/m² avec une valeur moyenne de 160.1 plants/m², suivi de Simeto (SMT) dont la moyenne est de 169.2 plants levés/m². Les neuf autres variétés présentent des valeurs moyennes de plants levés/m² qui ne sont significativement différentes l'une de l'autre et qui varient de 210.3 plants levés/m² chez Djenah khotaïfa (DKH) à 174.6 plants/m² chez Hedba3 (H3); pour une ppds5% de 36.9 plant levés/m² (Tableau 6).

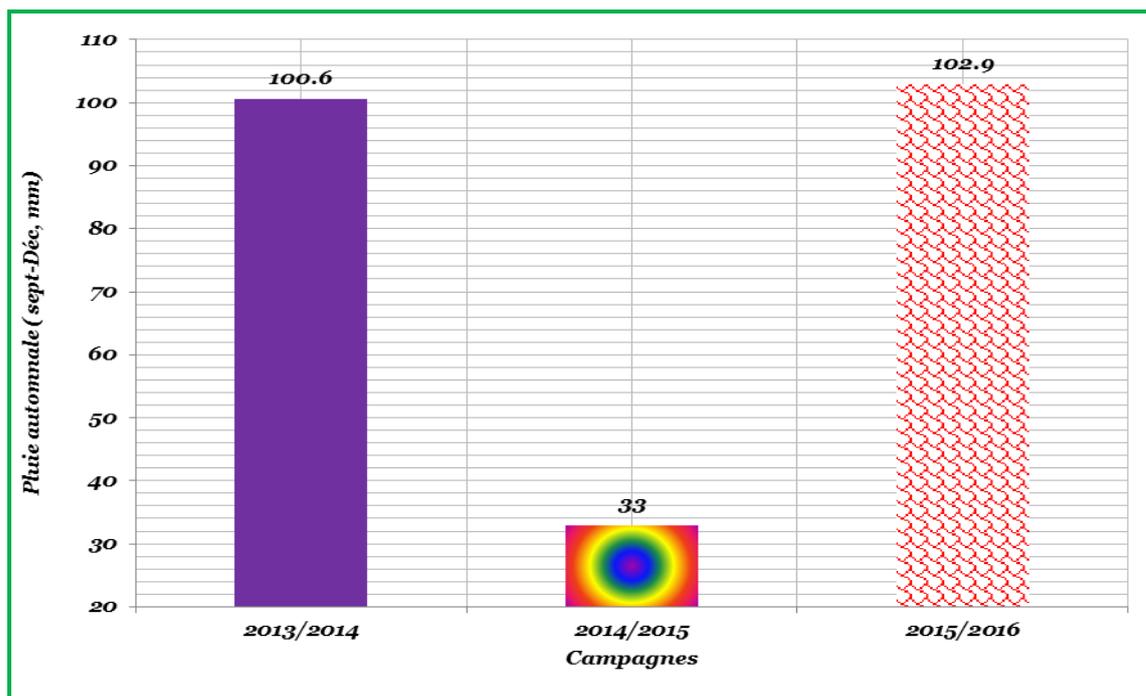


Figure 28. Cumul des pluies automnales (septembre à décembre) des trois campagnes

L'analyse de l'interaction génotype x campagne indique que si globalement l'ordre de classement des campagnes pour le nombre de plants levés/m² est 2015<2016<2014, il est variable selon les génotypes. Le comportement d'OZ₃₆₈ est le plus contrasté. Cette variété présente le nombre de plants levés par m² dans cet ordre 2014<2015<2016, par contre H3 présente l'ordre suivant 2016<2015<2014. Les autres variétés suivent la tendance indiquée par l'effet moyen campagne, avec cependant des écarts inter-campagnes différents selon les génotypes (Figure 29).

Tableau 6. Valeurs moyennes de l'effet variété du rendement et ses composantes des dix variétés testées sur trois campagnes consécutives (2013/2014, 2014/2015 et 2015/2016)

	BOU	DKH	GMG	GTA	H3	MBB	MGS	OZ ₃₆₈	SMT	WAH	Ppds5%
PLT	184.7	210.3	183.7	175.9	174.6	197.7	175.7	160.1	169.2	178.0	36.9
TLL	428.8	475.7	433.3	460.7	493.6	474.6	405.7	419.1	429.9	456.0	117.4
NE	197.1	193.9	182.9	227.8	216.1	179.5	227.1	182.5	199.4	219.0	47.8
NGE	30.6	23.0	19.8	28.3	22.3	26.8	31.2	21.9	28.81	30.7	9.2
NGM	6198	4182	4371	4911	4542	4611	6618	3964	5705	6650	2089
PMG	43.5	37.4	55.3	41.6	45.7	41.3	46.5	48.6	49.5	41.7	3.9
RDT	23.7	11.1	14.9	22.8	14.2	14.9	23.6	14.9	22.1	24.1	7.5
BIO	68.46	59.46	71.26	57.47	70.71	63.50	65.81	68.88	57.06	63.11	16.59
PLL	44.69	48.34	36.71	54.22	56.47	48.56	42.06	53.89	34.88	39.58	14.71
HI	32.36	19.72	22.28	39.18	19.67	23.70	36.73	21.30	38.70	38.12	4.99

PLT=plants levés/m², TLL= talles herbacées/m², NE= nombre d'épis/m², NGE= nombre de grains par épi, NGM = nombre de grains/m², PMG= poids de 1000 grains, RDT= rendement en grains

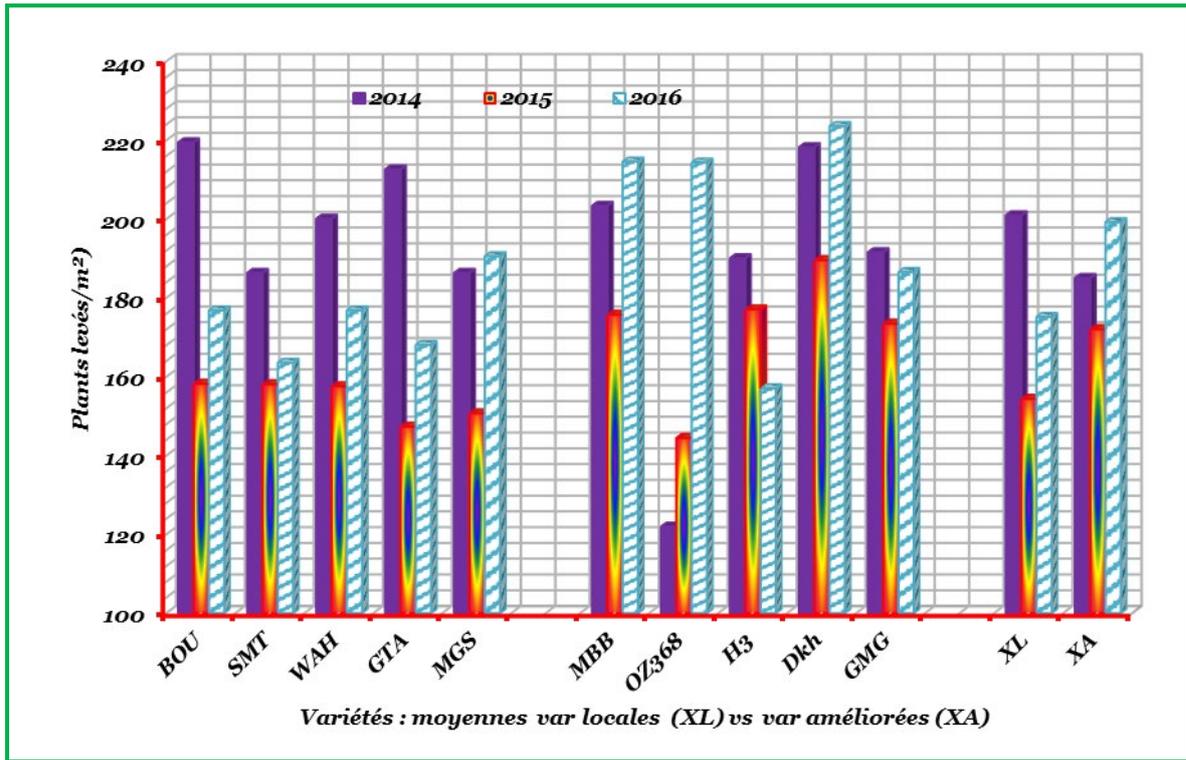


Figure 29. Nombre de plants levés/m² des 10 variétés évaluées en fonction des campagnes d'étude (ppds5% = 25.83).

Ainsi, par exemple, le nombre de plants levés/m² chez Boussem (BOU) est significativement plus élevé en 2014 qu'en 2016. L'inverse est noté chez OZ368, alors que la différence entre campagnes n'est pas significative chez DKH, Megress (MGS) et Mohammed Ben Bachir (MBB). Guemgoum Rkhem (GMG) présente des moyennes sensiblement égales au cours des trois campagnes d'étude. Cette variabilité de réponse du nombre de plants levés par unité de surface emblavée suggère une diversité de sensibilité des différentes variétés vis-à-vis des stress exprimés par le milieu.

Pour assurer la productivité de la variété, il est intéressant d'avoir une variété qui soit moins sensible vis-à-vis des stress du milieu pour cette variable (ex: plants/m²), donc faisant lever le maximum de plants/m² et de manière régulière. En dehors du fait que le taux de perte à la levée, constaté dans la présente étude, est trop élevé, et qu'il faudrait relever les causes pour en réduire les effets. Les résultats de cette étude indiquent que l'ordre de stabilité des variétés évaluées en fonction du plus stable au moins stable est décrit GMG > SMT > H3 > DKH > MBB > WAH > MGS > BOU > GTA > OZ368.

Les variances inter-campagnes des variétés, dans cet ordre, sont 87.6, 184.7, 224.3, 334.0, 400.2, 452.9, 479.5, 544.4, 985.9, 1111.4, et 2320.8. Ainsi la variété OZ₃₆₈ est 26.5 fois moins stable, alors que la variété WAH est 5.2 fois moins stable que GMG qui est le plus stable

pour le nombre de plants levés par m² dont la variance est prise comme unité. La comparaison des deux sources de germoplasme, locale versus améliorée, n'indique pas de différence significative pour cette variable. Le nombre de plants levés influence la capacité de tallage herbacée et le nombre d'épis produit par m². Makhoul et *al.*, (2006) montrent des résultats similaires dans la même région d'étude.

2.1.2. Nombre de talles herbacées par mètre carré

La capacité de tallage herbacée est une caractéristique importante, elle détermine le nombre d'épis montants par m² qui représente une composante principale de la productivité du génotype. Les valeurs moyennes prises par le nombre de talles herbacées sur les dix variétés sont indiquées sur tableau (Tableau 6). Le nombre de talles émises par unité de surface varie d'un minimum de 271.2 TLLm⁻², pour la campagne de 2014/2015, à un maximum de 541.09 TLLm⁻², relatif à la campagne de 2013/2014 (Tableau 5). En comparaison avec la valeur prise par la Ppds5%, qui est de 16.07 TLLm⁻², l'écart de 541.09-271.20= 270.09 TLLm⁻², entre les moyennes extrêmes, est significatif.

Donc, l'effet année affecte la variable talles par mètre carré. Dès lors, les résultats indiquent que le nombre de TLLm⁻² varie largement selon les campagnes, d'un écart presque égal à la moyenne observée lors de la campagne défavorable à l'expression de ce caractère. Exprimé relativement au nombre de plants levés par m², les moyennes de la capacité de tallage herbacé sont de 2.80, 1.66 et 2.84 TLLm⁻², respectivement pour les campagnes 2014, 2015 et 2016. Les contraintes à la capacité de la variété pour produire des talles herbacées semblent être 1) L'humidité du sol, 2) La nutrition azotée et 3) Le nombre de plants levés par m². Toutefois, dans le cas de la présente recherche, il semble que ce soit le faible nombre de plants levés par mètre carré et la nutrition azotée qui soient les causes probables des faibles valeurs de tallage herbacé observées au cours de la seconde campagne. En effet le cumul pluviométrique des saisons d'automne et d'hiver est en faveur de la campagne de 2015. Le cumul pluviométrique de la période automnale et hivernale suit l'ordre [(279.7 mm, 2015)> (248.8 mm, 2014)> (226.3mm, 2016)] (Figure 30).

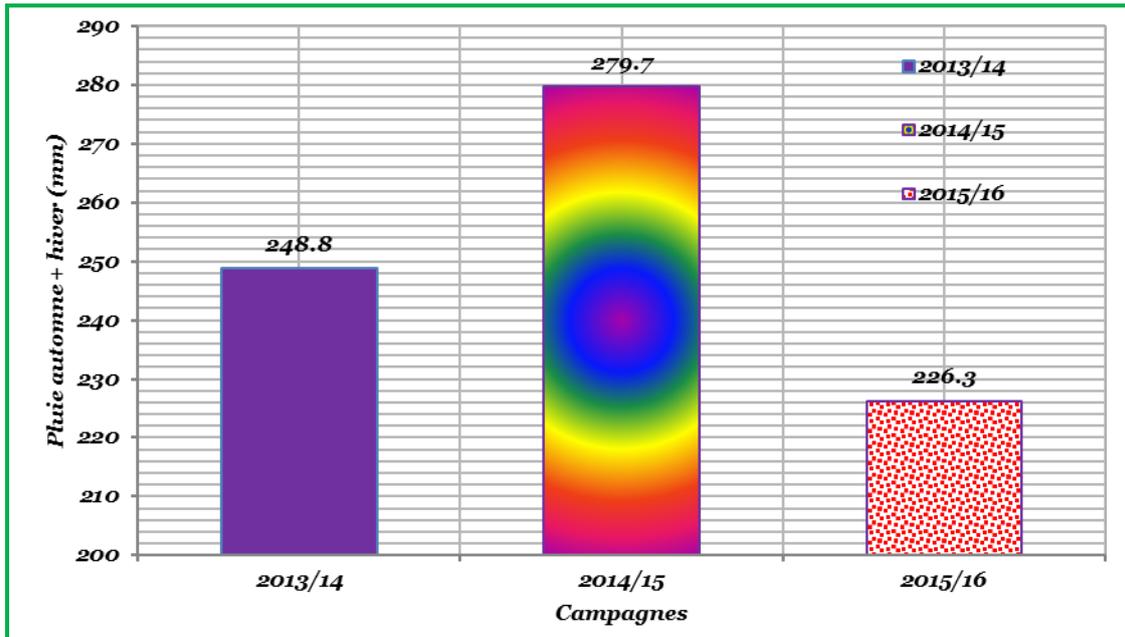


Figure 30. Cumul des précipitations de septembre à mars des trois campagnes d'étude

Par ailleurs, les résultats indiquent que l'effet moyen variété n'étant pas significatif (Tableau 4). Donc, les variétés semblent similaires pour la capacité de tallage herbacé par unité de surface emblavée (Tableau 6). La valeur moyenne du nombre de talles herbacées produites par plant levé est de $447.79/181.06 = 2.47$ talles/plant. L'ordre de classement des campagnes pour le nombre de talles herbacées/m² est $2015 < 2014 = 2016$ (Tableau 5), suggérant que la campagne de 2014/2015 apparaît avoir été défavorable à l'émission des talles herbacées.

Cependant, la réponse variétale varie d'une campagne à une autre (Tableau 4). Ainsi l'émission des talles, au cours de la campagne de 2014/2015, est plus affectée chez DKH, SMT et à un degré moindre chez MBB que chez H3, GMG ou BOU. Comparativement à la campagne 2014/2015, la campagne 2013/14 a été plus favorable à l'émission des talles chez BOU, WAH et GTA que chez MGS et SMT, qui présentent la même capacité aux cours des deux campagnes (Figure 31).

L'interaction du génotype x campagne affecte significativement ce caractère mesuré. Ainsi, l'analyse des résultats révèle que la campagne de 2015/2016 a été plus favorable à l'émission des talles chez GMG, OZ368, MM et DKH que la campagne de 2013/14 ; alors que chez H3 ces deux campagnes offrent des capacités similaires (Figure 31). La comparaison des sources de germoplasme n'indique pas des différences significatives entre sources mais plus un effet environnement (Figure 31). Ces résultats établis à travers l'interaction expriment

que la performance de la variété s'évalue selon la campagne, donc 1) GTA (2013/2014), 2) DKH (2015/2016 et 3) H3 (2014/2015) (Figure 31).

En fonction de la *stabilité temporelle* exprimée par la régularité d'émission des talles herbacées dans le temps, le génotype GMG apparaît plus stable avec une variance égale à 10567.2. En se calant sur la variance de GMG comme unité, les variances des autres variétés sont 1.2 (MGS), 1.4 (H3), 1.6 (BOU), 1.6 (OZ368), 3.1 (SMT), 3.2 (WAH), 3.5 (GTA), 3.8 (MBB) et 5.7 (DKH) fois importantes que celle de GMG, respectivement. Ces résultats indiquent que DKH est la moins stable, suivi à un degré moindre par MBB, GTA, WAH, et SMT.

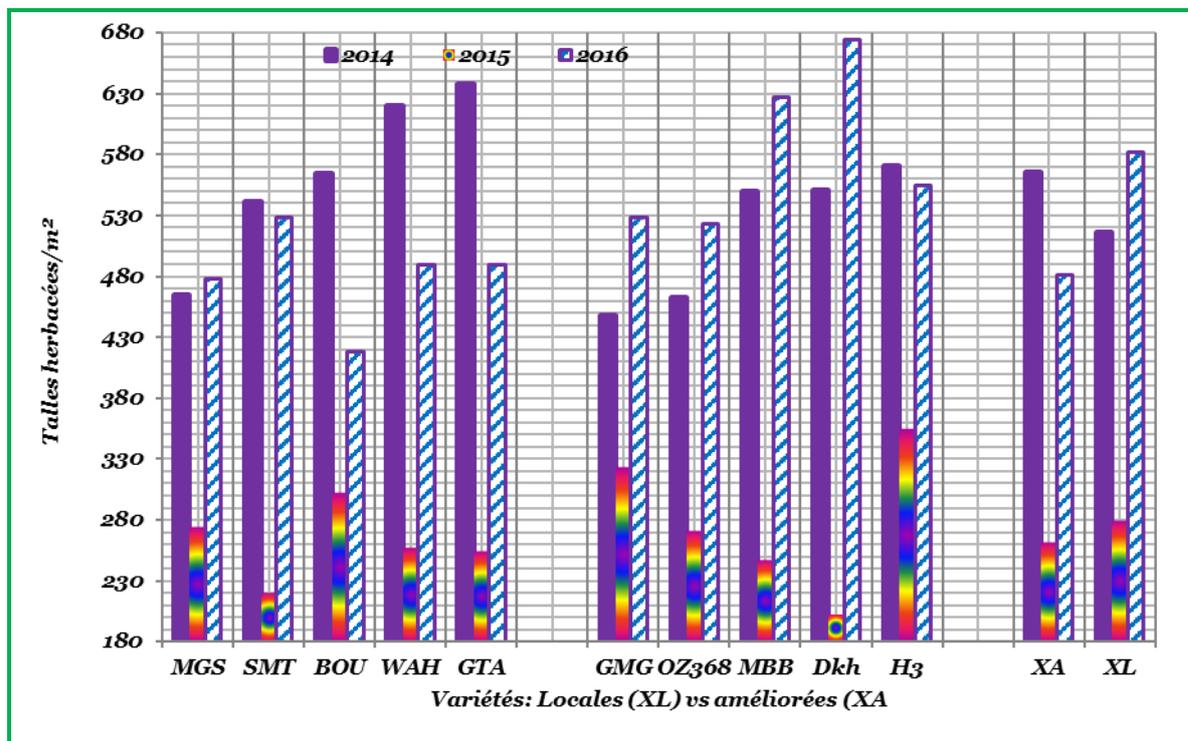


Figure 31. Nombre de talles herbacées émises m^{-2} des dix variétés testées en fonction des trois campagnes d'étude (ppds5% = 70.40 talles/m²)

2.1.3. Nombre d'épis par mètre

Les valeurs moyennes prises par le nombre d'épis produit par mètre carré pour les dix variétés figurent sur tableau (Tableau 6). Il varie d'un minimum de 165.59 NEm⁻² pour la campagne de 2013/14, à un maximum de 239.89 NEm⁻², pour celle de 2014/15 (Tableau 5). En comparaison avec la valeur prise par la ppds5%, qui est de 25.54 NEm⁻², l'écart de 239.89-165.59= 74.30 NEm⁻², entre les moyennes extrêmes est significatif. Comme il a été noté pour les nombres de plants et de talles herbacées par mètre carré, le nombre d'épis par mètre carré est aussi soumis à l'effet du milieu ou environnement qui favorise ou défavorise l'expression

du potentiel, par un écart de plus de 70 NEm⁻². Les causes probables de la variation du nombre d'épis/m², d'un environnement à un autre, peuvent être interprétées par 1) La capacité du génotype, 2) L'humidité du sol, 3) La température et la nutrition azotée. Ainsi, au regard de ces résultats, de l'analyse des quantités de précipitations cumulées au cours des saisons d'automne et d'hiver, (*Septembre à mars*) s'éclaircit relativement que l'humidité du sol semble le paramètre indicateur de la variation de la production des épis par NEm⁻² observées entre campagnes agricoles (Figure 30).

L'effet moyen variété étant significatif, donc les dix variétés ne font pas monter le même nombre d'épis au mètre carré, dans la marge des 47.8 NEm⁻² qui est la valeur prise par la ppds5% pour cette variable. En effet le NE produit par variété et sur les trois campagnes varie de 179.5 (MBB) à 227.8 NEm⁻² (GTA) (Tableau 6). Exprimés relativement aux nombres de plants et de talles herbacées, le nombre d'épis varie, en moyenne sur les trois campagnes d'études, de 0.92 épi/plant levé pour DKH à 1.30 épis/plant pour GTA. Il varie de 0.38 épi/talle herbacée pour MBB à 0.56 épi/talle herbacée pour MGS.

La comparaison des sources de germoplasme suggère un léger avantage de la capacité de faire monter plus d'épis/plant levé chez les variétés améliorées (1.21 épis/plant) que chez les variétés locales (1.04 épis/plant), avec peu de différences pour la capacité de tallage/ épis (0.49 vs 0.42 épi/talle herbacée). De l'analyse des résultats, s'appréhende que la capacité de tallage herbacé/m² n'est valorisée qu'à 50% pour la production d'épis.

L'analyse de l'interaction génotype x campagnes indique que si globalement l'ordre de classement des campagnes pour le nombre d'épis/m² est 2014 < 2016 < 2015, ce classement varie chez certains génotypes en fonction des campagnes. En effet la campagne 2015 n'est favorable à l'expression du potentiel du nombre d'épis que pour GTA, MGS, MBB, DKH et H3, la campagne 2016 n'est pas plus favorable que pour SMT, BOU, WAH et OZ368 (Figure 32). Ainsi le meilleur génotype est variable selon la campagne, donc pour la production des NEm⁻², MGS semble performant avec 213.75 NEm⁻². Relativement, en fonction campagnes, les génotypes suivent l'ordre [GTA (321.97NEm-2, 2015); WAH (228.44NEm-2, 2016)] (Figure32).

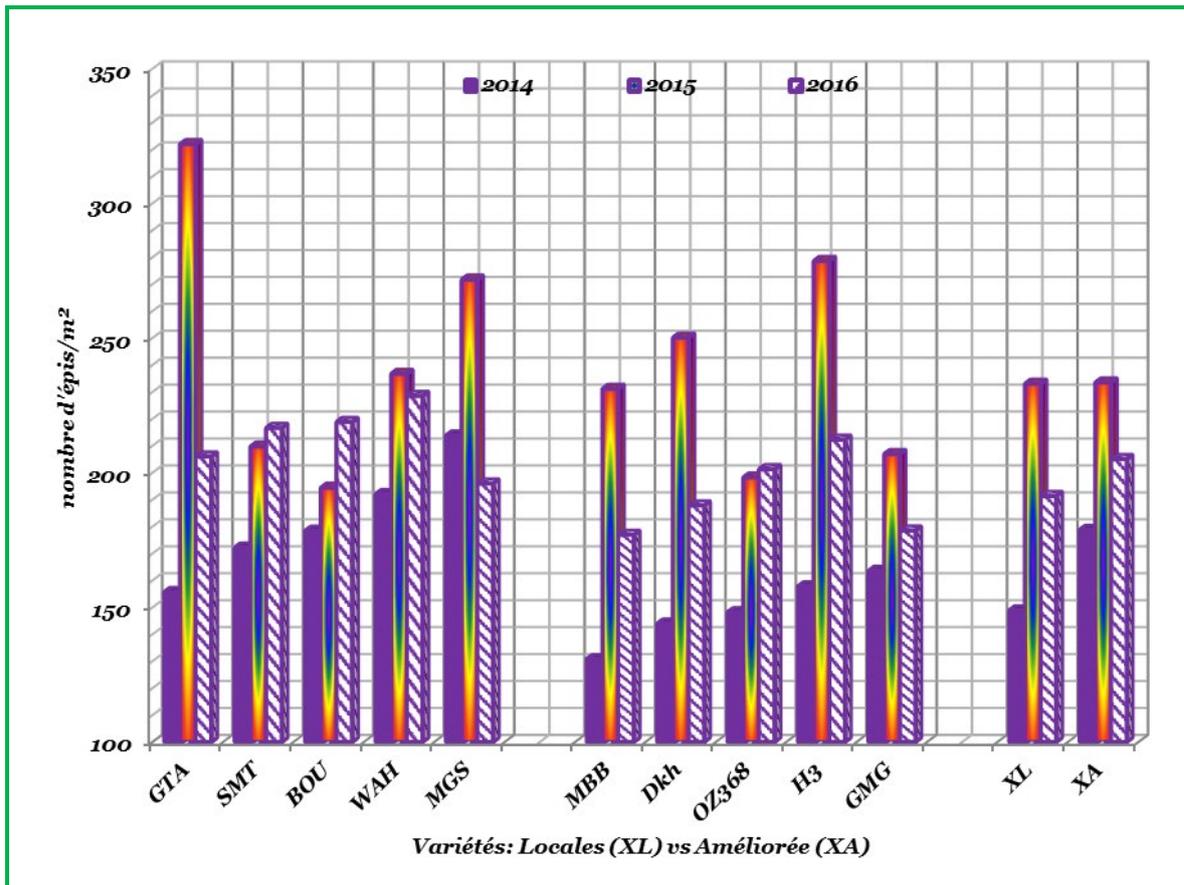


Figure 32 Nombre d'épis/m² des dix variétés testées au cours de trois campagnes d'étude (ppds5% = 31.07 épism⁻²)

Au cours de la campagne de 2013/2014, le germoplasme local a tendance à produire moins d'épism⁻² que le germoplasme amélioré. En effet, les différences n'étant pas significatives au cours des deux autres campagnes. Cette réduction est plus marquée chez les variétés MBB, DKH et OZ368 (Figure 32). Selon la stabilité du nombre d'épis produit par m², BOU est plus stable avec une variance inter campagnes de 413.5. Les ratios des variances des autres variétés sur la variance de BOU représentent 1.2 pour GMG, 1.4 pour WAH et SMT, 2.2 pour OZ₃₆₈, 3.8 pour MGS, 6.1 pour MBB, 6.9 pour DKH, 8.9 pour H3 et 17.6 pour GTA qui apparaît la variété la moins stable pour cette caractéristique. Ces résultats corroborent ceux mentionnés par Bouzidi et *al.*, (2020) dans les régions des Hautes Plaines Orientales de Sétif. En effet l'augmentation du nombre d'épis/m⁻² favorise potentiellement l'amélioration du rendement en grain des nouvelles obtentions (Sherman et *al.*, 2005, Rabi et *al.*, 2020). En effet c'est la réponse des génotypes *GTA*, *MGS*, *WAH*.

2.1.4. Nombre de grains par épi

Les valeurs moyennes de la fertilité de l'épi, traduites en nombre de grains/épi se caractérisent par un minimum de 17.65 NGE, pour la campagne de 2014/2015, à un maximum de 35.63 NGE atteint lors de la campagne de 2015/2016 (Tableau 5). En comparaison avec la valeur prise par la ppds5%, qui est de 4.23 NGE, les écarts entre les moyennes des trois campagnes sont significatifs. Ces résultats suggèrent que chaque campagne ou environnement affecte significativement l'expression du nombre de grains par épi, avec des écarts qui peuvent atteindre la valeur de $35.63 - 17.65 = 17.98$ NGE, soit l'équivalent de la moyenne minimale observée.

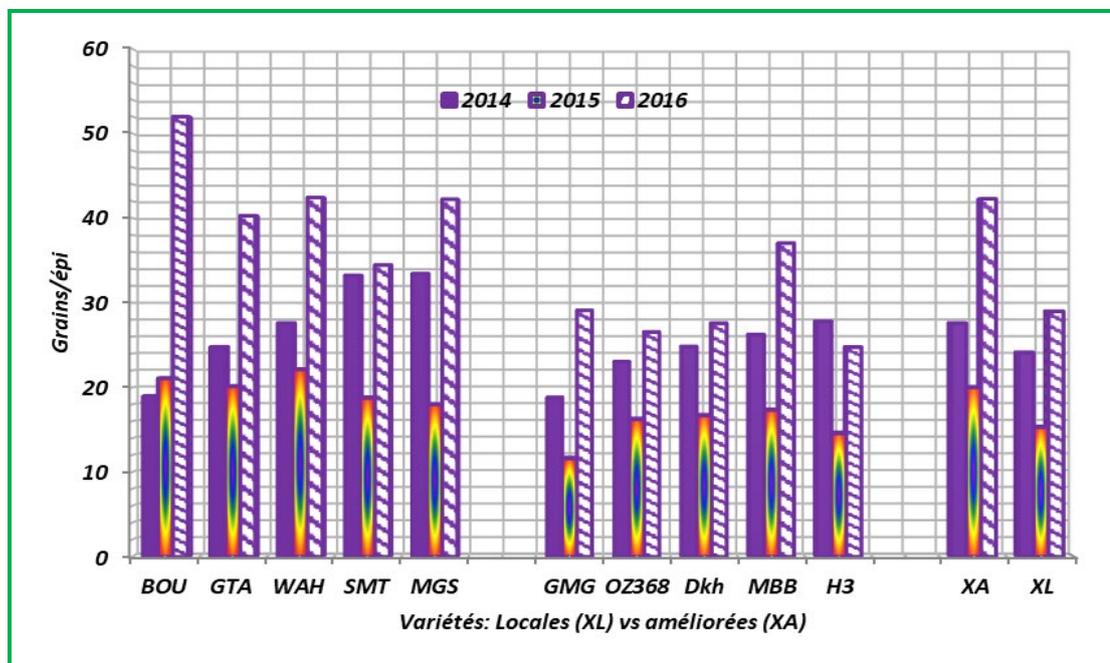


Figure 33. Nombre de NGE des dix variétés testées sous l'effet de l'interaction G*A (ppds5%= 31.07 NGE)

La variation du nombre de grains par épi reste dépendante de la variation des milieux, par l'humidité du sol; la compensation induite par les autres composantes comme le nombre d'épism², et le génotype et la température. Ainsi, l'analyse du cumul des précipitations au cours de la période (avril et mai) conduit à évaluer l'humidité du sol comme élément explicatif des différences du niveau de fertilité de l'épi obtenu entre les campagnes. En effet, pour les trois campagnes, le cumul des précipitations suit le sens [(31.0 mm, 2014/2015) < (49.2mm, 2013/2014) < (80.2 mm, 2015/2016) (Figure 34).

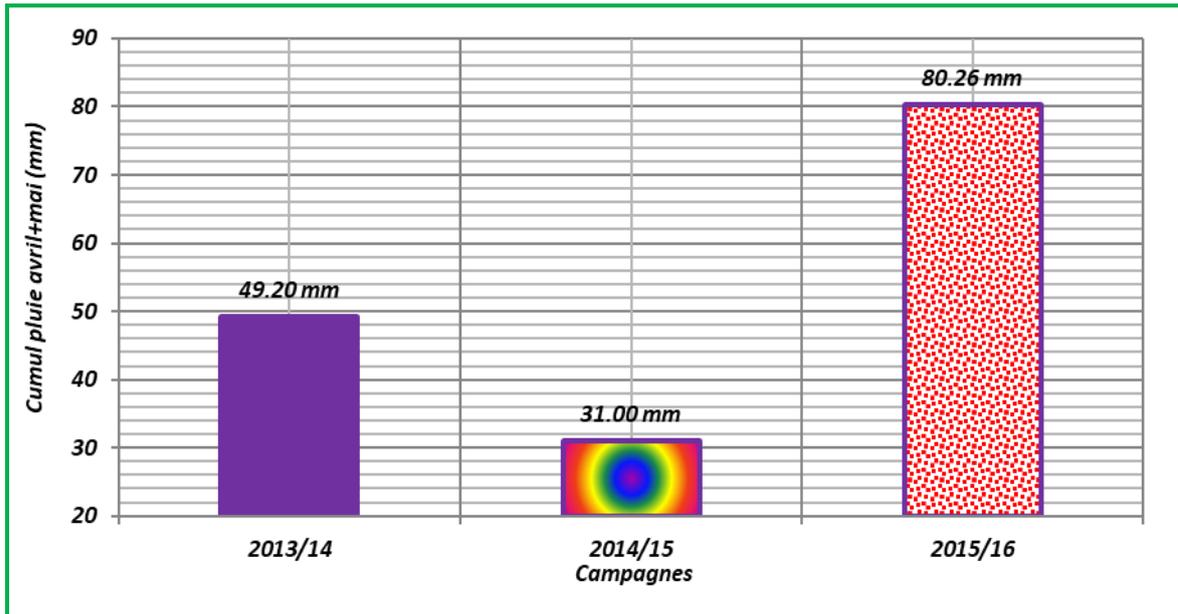


Figure 34. Cumul des précipitations d'avril et de mai de chacune des trois campagnes

La variabilité génotypique est fonction de la fertilité épi, du nombre d'épis, du nombre d'épillets par épi et de la fertilité épillet (Gate ,1995). Parfois, le nombre de grains par épi affecte significativement le rendement relativement aux autres composantes (Belkherchouch et *al.*, 2009). Toutefois, le nombre de grains par épi est considéré sensible aux variations de nutrition pendant les semaines de croissance actives de l'épi (3 ou 4 semaines avant l'épiaison) (Fisher, 1985). En effet l'amélioration du nombre de grains par épi affecte positivement le rendement (Hannachi, 2017; Ma et *al.*, 2019; Bouzidi et *al.*, 2020) chez les variétés modernes, ainsi l'augmentation du nombre de grains par épi se répercute directement sur le nombre de grain/m² et par conséquent sur le rendement final (Royo et *al.*, 2007).

2.1.5. Nombre de grains par mètre carré

Le nombre de grains par m² est la résultante du nombre d'épis et du nombre de grains par épi. Il résulte de l'effet combiné de ces composantes sur le rendement grain. L'analyse de la variance de cette variable indique un effet génotype et campagne significatif (Tableau 4). WAH, avec une valeur moyenne de 6650 grains produits par m², se positionne en tête de classement des dix génotypes testés (Tableau 6). MGS et BOU se classent en seconde deuxième position avec des moyennes, de 6618 et 6198 grainsm⁻² respectivement (Figure 35).

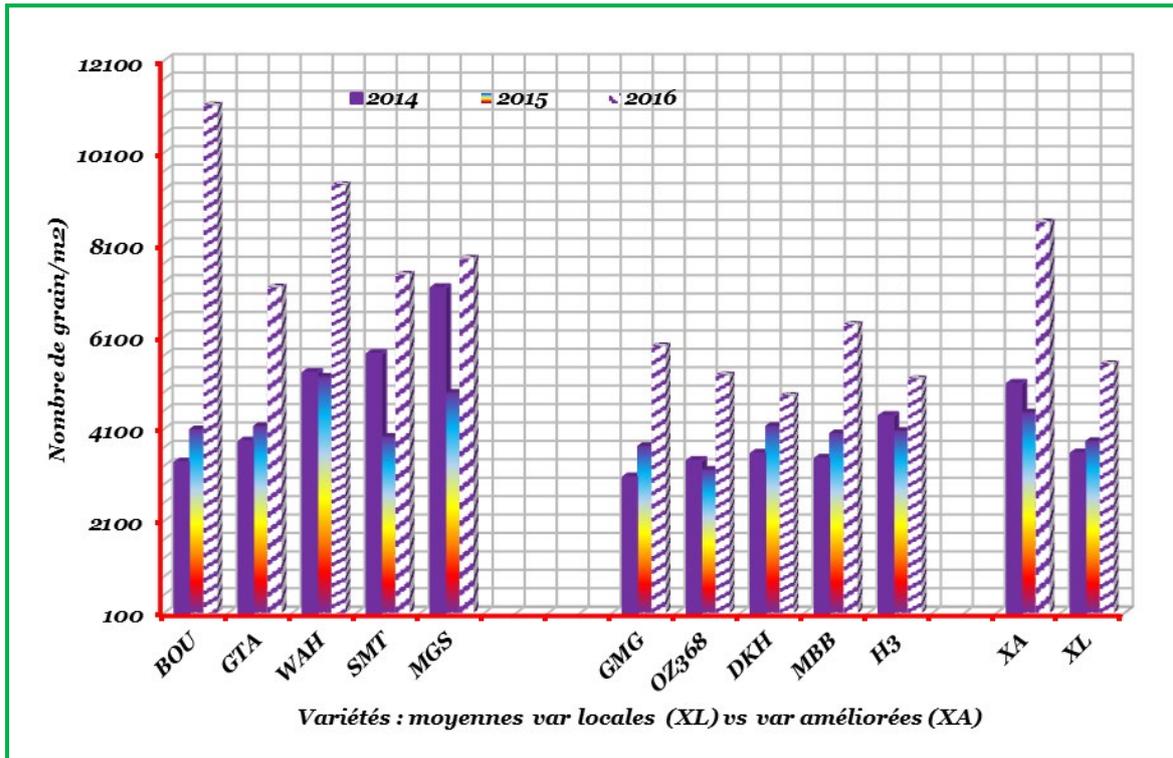


Figure 35. Nombre de grains m^{-2} des 10 variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (Ppds5% = 551,25grains m^{-2})

Alors que OZ368 et DKH sont les cultivars qui produisent moins de grains par m^2 avec les valeurs 3964 grains m^{-2} , 4182 grains m^{-2} respectivement (Tableau 6). Les cultivars modernes extériorisent un nombre de grains par m^2 28,78 % plus élevé que les variétés locales sur les trois campagnes d'études (Figure 35). L'analyse de l'interaction variétés x campagnes montre que l'ordre de classement des campagnes pour le nombre de grains/ m^2 est 2015 < 2014 < 2016. Les variétés qui ont donné le meilleur nombre de grains m^{-2} sont WAH, MGS avec les valeurs de 5235,67 grains m^{-2} , 4888,87 grains m^{-2} pour la campagne de 2015 ; MGS, SMT pour la campagne 2014 avec les valeurs de 7159,75 grains m^{-2} , 5727,88 grains m^{-2} respectivement ; la campagne de 2016 vient en troisième position avec les hautes valeurs enregistrées par BOU (11130,52 grains m^{-2}) et WAH (9399,76 grains m^{-2}). Ainsi, pour la variable nombre de grains m^{-2} , les résultats de la recherche indiquent que WAH et SMT semblent les variétés les plus performantes. A l'opposé, OZ368 et DKH se trouvent en bas de la liste et par conséquent considérés comme les variétés les moins performantes. Kirouani *et al.*, (2019) notent que les variétés précoces et notamment les variétés SMT, MGS se caractérisent par un nombre de grains m^{-2} élevé comparativement aux autres variétés, surtout les variétés locales. Les auteurs soulignent aussi que le nombre de grains m^{-2} représente le résultat de multiplication de nombre d'épis par m^2 fois le nombre de grains par épi, ces derniers sont des caractères adaptatifs qui

peuvent être utilisés en sélection pour repérer les meilleurs cultivars produisant un bon rendement en grain. Nos résultats corroborent ceux de De Vita *et al.*, (2010) et Rabti *et al.*, (2020) qui notent que le gain génétique obtenu sur blé est lié à l'augmentation du nombre de grains m^{-2} , à la réduction de la hauteur de chaume et à un grand nombre d'épim $^{-2}$.

2.1.6. Poids de mille grains

L'analyse de la variance du poids de 1000 grains indique un effet génotype et campagne significatif, suggérant des différences d'ordres génétique et environnemental entre les variétés (Tableau 4). L'étude des valeurs moyennes du poids de 1000 grains indique que les variétés *GMG*, *SMT*, *OZ368*, *MGS* et *H3* se singularisent par les meilleures valeurs pour ce caractère, avec 49,16 g, à l'égard de *MBB* et *DKH* dont le PMG est de 39,35 g (Tableau 6, Figure36).

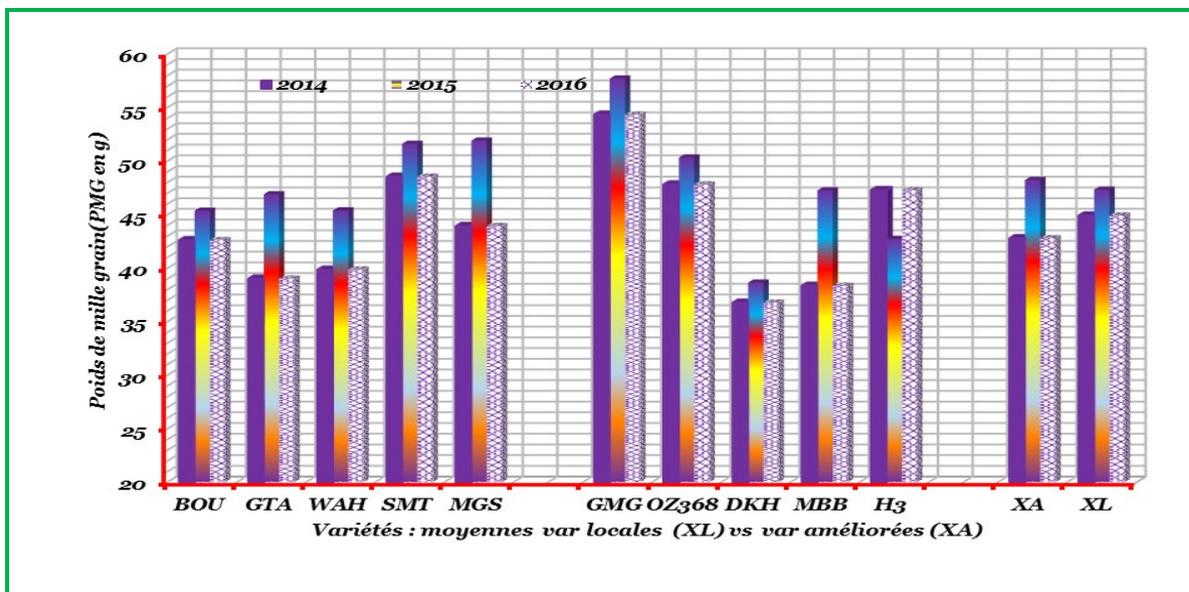


Figure 36. Poids de mille grains (g) des 10 variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (ppds5%= 0.95 g)

La comparaison de deux groupes de variétés, anciennes versus modernes, n'indique pas de différence significative pour cette variable (Figure 36). Néanmoins, les valeurs affichent une légère divergence entre les variétés locales et celles dites modernes, avec $45,67g < 44,60g$. Des suggestions élaborées à travers des résultats de recherche sur le même environnement ont été mentionnées (Chennafi *et al.*, 2005; Ferras, 2015).

L'effet interaction génotype*campagne est significatif sur le PMG, traduisant ainsi la disparité entre les variétés entre les campagnes.

Le nombre de grains par unité de surface est la composante la plus liée aux variations du rendement grain du blé (Frederick and Bauer, 1999) et par conséquent, le poids moyen du grain peut être une importante source de variation du rendement grain (Calderini et *al.*, 2001), particulièrement dans les régions caractérisées par des stress. (Acevedo et *al.*, 1999). Toutefois, Rodrigues et *al.*, (2007) soulignent que le gain génétique du rendement grain lie l'augmentation de nombre de grains/épi, et le nombre d'épism⁻² et la diminution du poids de 1000 grain. Bouzerzour et Benmahammed (2009) mentionnent que comparativement à la variété locale MBB, l'amélioration du rendement en grains de la variété Waha est associée à l'augmentation du nombre de grainsm⁻² et à la diminution du poids de 1000 grains.

2.1.7. Rendement en grains

L'analyse de la variance montre un effet génotype et année significatif pour le rendement grain produit (Tableau 4). WAH semble plus productive en réalisant un rendement 24,1 qha⁻¹, elle est secondée par BOU, avec 23,7 qha⁻¹. La troisième position est prise par SMT en produisant 23,6 qha⁻¹. Les résultats révèlent que les réponses de BOU et SMT apparaissent similaires. Par ailleurs, H3 et DKH se sont les variétés qui sont les moins productives et affichent des niveaux de 14,2 qha⁻¹, 11,1qha⁻¹ respectivement, donc la baisse relative de rendement est respectivement de 41,1% et de 54,0% à l'égard de la variété WAH. En effet, comparativement aux performances des variétés locales, prises comme indice 100 %, les variétés améliorées produisent 39,81% en plus.

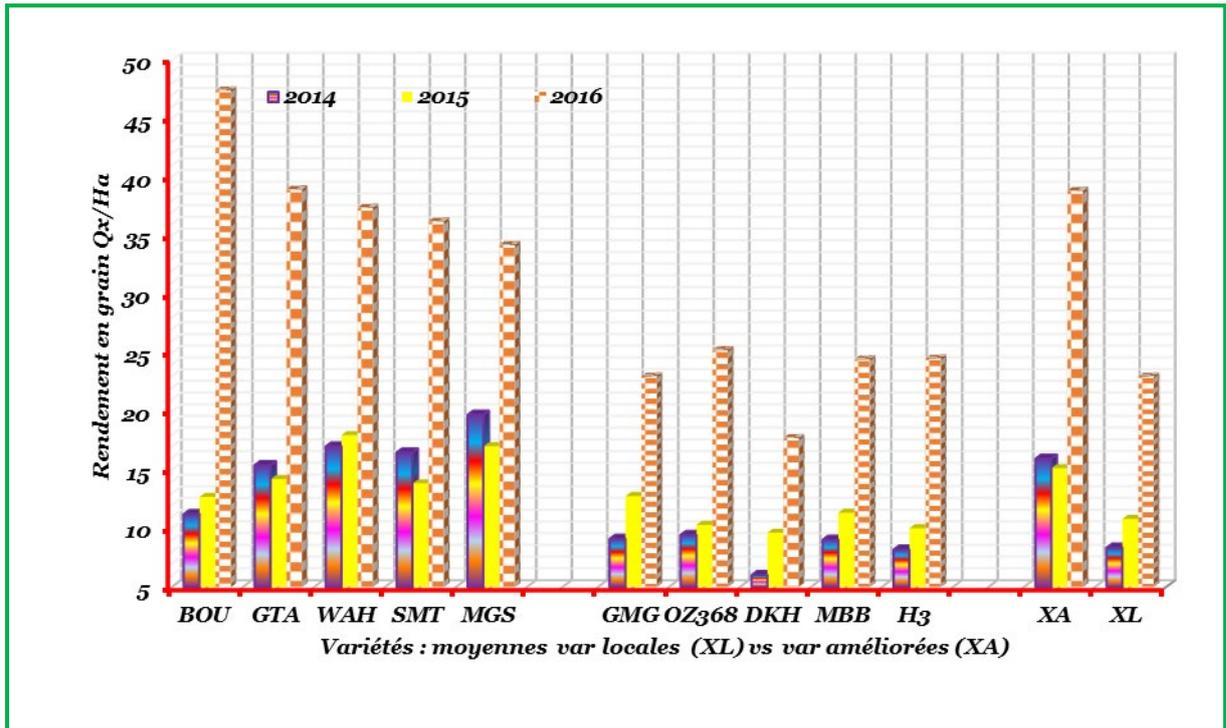


Figure 37. Rendement grain (qha^{-1}) des dix variétés évaluées en fonction des trois Campagnes d'étude ($\text{Ppds5\%} = 1.83 \text{ qha}^{-1}$)

L'analyse de l'interaction génotype*campagne significatif (Tableau 5) montre que la campagne 2015/2016 a été plus favorable à la production de rendement en grains chez BOU, GTA, WAH SMT et MGS que les deux campagnes 2013/2014 et 2014/2015. La comparaison des sources de germoplasme indique des différences significatives entre sources et en plus un effet environnement (Figure 37). Ces résultats révèlent la présence de l'interaction qui fait que la meilleure variété est différente selon la campagne examinée WAH en 2014/15 et en 2014/2015 avec un rendement moyen de 17 qha^{-1} , BOU en 2015/2016 avec un rendement de $47,39 \text{ qha}^{-1}$. Ces résultats rejoignent ceux de Bouzidi et *al.*, (2020) qui mentionnent que les variétés améliorées comparativement à la variété de référence MBB, produisent 31,7 % de plus d'épism², 62% de plus de rendement grain. Cette amélioration est due essentiellement selon Dai et *al.*, (2016) à l'introduction des gènes de nanisme ce qui a réduit la hauteur de la paille et a augmenté le rendement en grain par le biais de la biomasse aérienne et l'indice de récolte (IR). Hannachi et *al.*, (2013) illustrent l'importance de la quantité de la matière sèche accumulée au stade épiaison et leur transfert vers l'épi pour améliorer le rendement en grain.

2.1.8. Rendement Biologique, en paille et indice de récolte

L'analyse de la variance révèle un effet génotype significatif pour le rendement biologique, le rendement en paille et l'indice de récolte (Tableau 4). Le rendement biologique représente le rendement grain plus de la paille produite. Les valeurs moyennes du rendement biologique des trois campagnes d'études varient de 71,51 qha⁻¹ pour la variété GMG à 57,06 qha⁻¹ pour la variété SMT (Tableau 6). La moyenne générale est de l'ordre de 64,57 qha⁻¹. Tandis que les valeurs prises par le rendement en paille affichent 56,55 qha⁻¹ pour la variété GMG à 34,33 qha⁻¹ pour GTA. La moyenne générale est de 45,93 qha⁻¹ (Tableau 6)

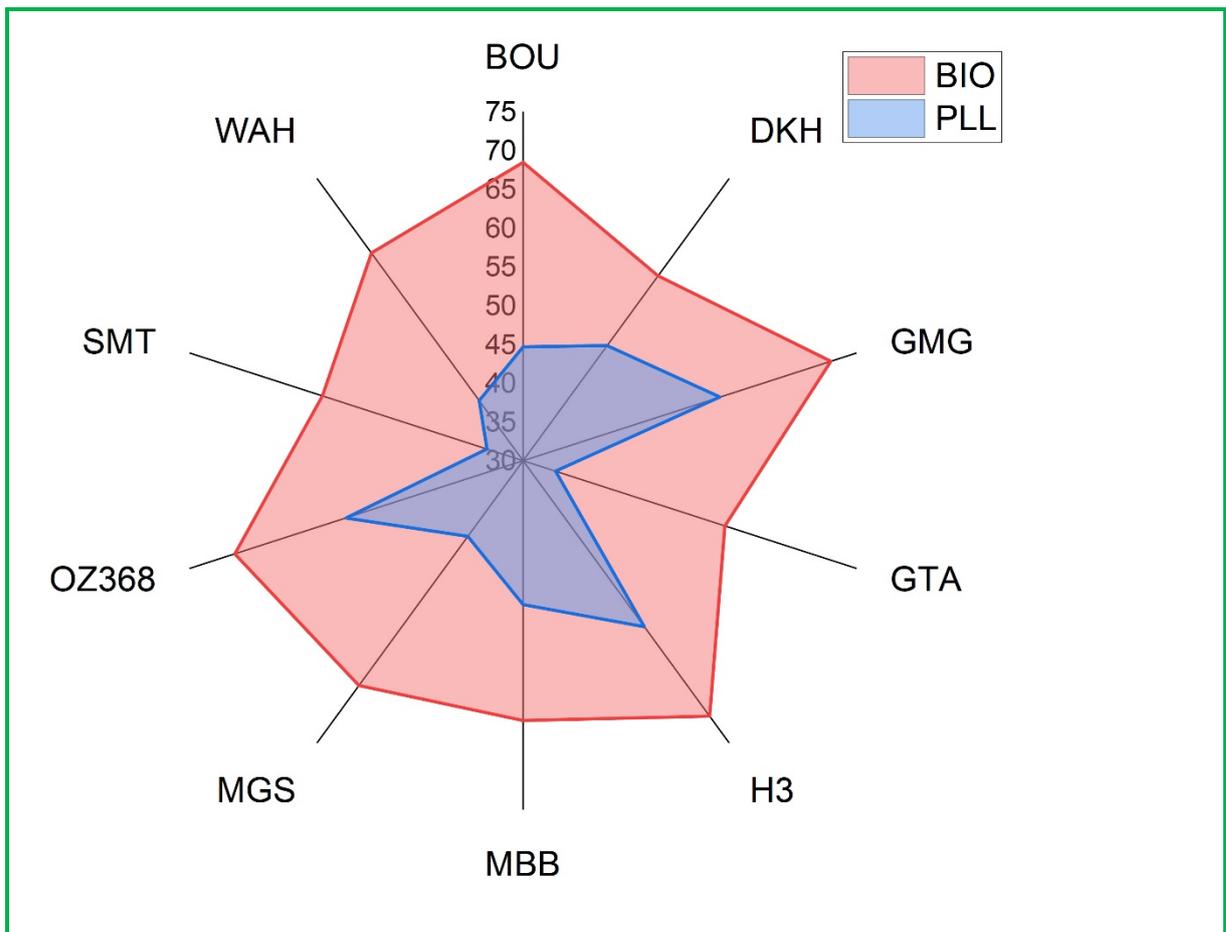


Figure 38. Rendements biologiques et en paille des dix variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (ppds5%BIO = 4,18 qha⁻¹, ppds5%PLL=3,23 qha⁻¹)

L'interaction génotype*année révèle un effet significatif pour les trois variables, cela retrace que la biomasse totale, la paille produite, et l'indice de récolte diffèrent en fonction de l'année et de la variété. Lors de la campagne de 2013/2014, le génotype MGS s'est singularisé pour la variable BIO, avec une valeur de 43,68 qha⁻¹. Par contre en 2014/2015, c'est la variété GMG qui s'est révélée plus productive avec un niveau de production de 80,4 qha⁻¹,

Alors, que la variété qui semble la plus performante en BIO, c'est BOU, qui lors de la campagne de 2015/2016 BOU enregistre la plus haute valeur pour l'ensemble des variétés et sur les trois campagnes d'études avec un BIO de 120,68 qha⁻¹. Pour la production de la paille, la variété Oz368 occupe le premier rang avec un rendement de 33,32 qha⁻¹ et lors de la campagne de 2014/2015. Cependant, le génotype le plus productif en 2015 est GMG avec 67,63 qha⁻¹. A la troisième campagne de 2015/2016, s'affiche OZ368 avec une quantité de 81,65 qha⁻¹ si appréciable (Figure 38)

Ces résultats rejoignent ceux de Ferras (2015) dans la même région ; semi-aride de Sétif. Hannachi (2017) rapporte qu'un rendement biologique élevé est considéré comme un bon signe pour les améliorateurs pour la sélection de variétés à haut rendement en grain. En effet, Belagrouz et Chennafi (2016) mentionnent que le rendement en paille est un facteur très important dans l'installation du système élevage céréales, la paille produite par les céréales est une source d'énergie pour le bétail. Chennafi (2011) rapporte que, la paille laissée sur champs contribue positivement à l'amélioration de la stabilité structurale, atténue l'effet érosif des pluies et augmente l'humidité résiduelle dans le sol. Ainsi, Dai et al., (2016) notent que les résidus de cultures comme la paille de blé et les cannes de maïs sont une importante source de matières premières cellulose pour la production du bioéthanol.

Les valeurs observées de l'indice de récolte sont fluctuantes chez l'ensemble des variétés. Elles varient de 19,67 à 39,17%, respectivement, pour H3 et Gat/Dur (Tableau 6). GTA, SMT et WAH valorisent plus de 38% de la biomasse aérienne accumulée à maturité sous forme de grains. Ces trois variétés sont suivies par MGS et BOU dont 36,73%, 32,36 % de la biomasse est traduite sous forme de grains, alors que H3 est la variété qui valorise le moins la biomasse aérienne produite (IR=19,67) suivi par DKH et OZ368 avec les valeurs de 19,72 % et 21,27 %. (Figure 39).

L'interaction génotype*année significative illustre l'effet combiné d'année et de la variété sur l'indice de récolte (Tableau 5). Les campagnes 2014, 2016 enregistrent les valeurs les plus élevées de l'indice de récolte 33,09% et 33,08% et forme un groupe indépendant, en effet la ppds% = 1,40% on ne détecte pas une différence significative entre 2014, 2016 à propos de l'indice de récolte. L'année se démarque par la valeur la plus faible IR= 22,35 %. Ces résultats corroborent les résultats mentionnés par Nouar (2015), elle rapporte que l'indice de récolte du blé est sous l'influence de la variation interannuelle des conditions climatiques notamment les températures et les précipitations. Selon Kobota et al., (2018), la variation de l'indice de récolte entre les années résulte de l'effet des hautes températures qui coïncident avec la

période de remplissage des grains, ces températures perturbent le palier hydrique. Cette situation engendre le blocage de la migration des matières protéiques et glucidiques vers les grains, d'où formation de grains chétifs, un faible rendement en grain et un indice de récolte bas. Prasad et Djanaguiraman (2014) repèrent que la stérilité peut être évitée pour le blé si les températures ne dépassent pas 24 °C pendant la semaine précédant la floraison.

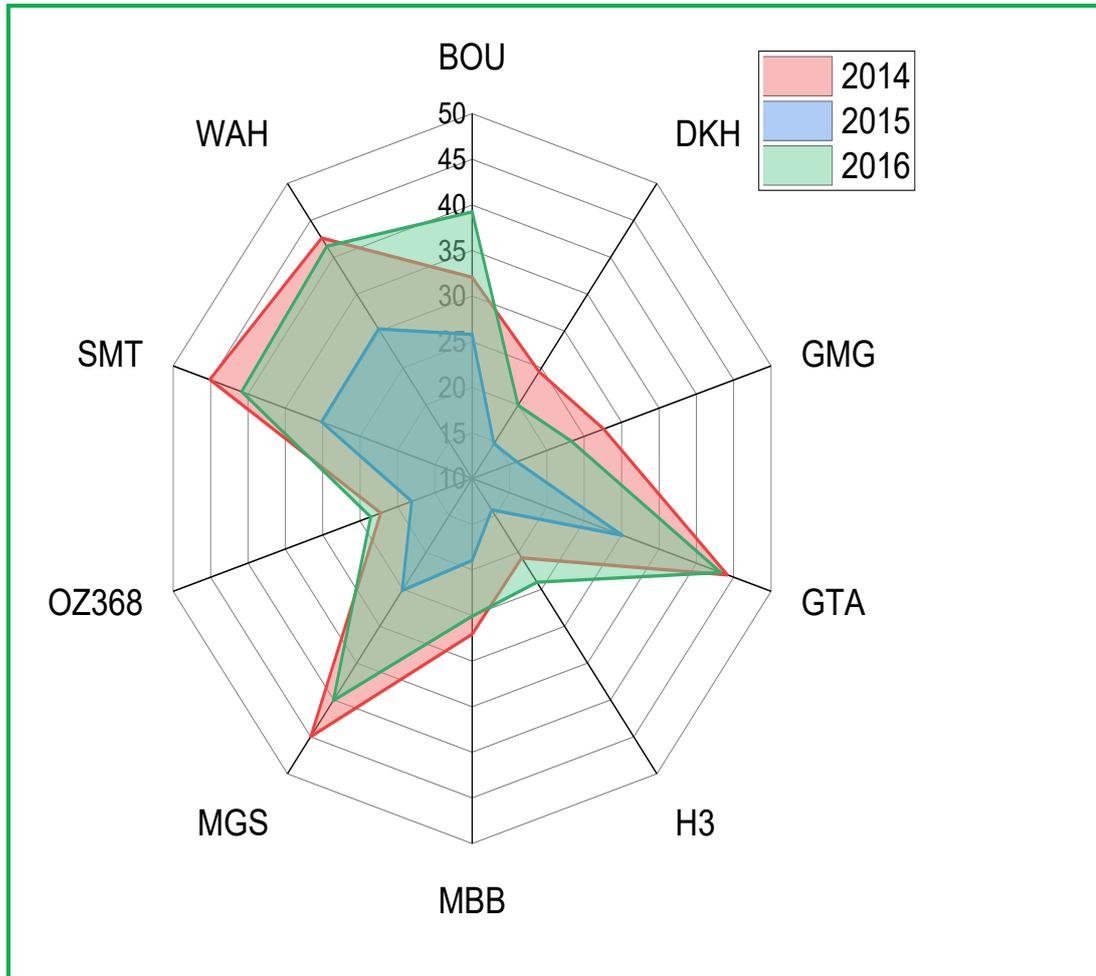


Figure 39. L'indice de récolte (%) pour les dix variétés évaluées en fonction des trois campagnes d'étude (ppds5% = 2,56%)

Les résultats de la comparaison entre les variétés améliorées et locales, révèlent une supériorité des cultivars modernes relativement aux cultivars anciens, 37,0 > 21,33. Bouzerzour et Benmahammed (2009) aperçoivent des résultats similaires relatifs à MBB et les nouvelles obtentions de variétés dans la région des Hauts Plateaux Sétifiens.

2.2. Accomplissement des stades d'épiaison et de maturité des cultivars

Les génotypes testés affichent leur divergence pour la réalisation de la date d'épiaison et de celle de maturation. La durée moyenne de l'épiaison exprimée en JAS est de 139. Les cultivars WAH, MGS s'identifient comme précoces, avec 135 JAS. Par contre, les cultivars tardifs sont MBB et H3, avec 143 JAS et 144 JAS, dans l'ordre cité (Tableau 07).

Tableau 7. Variation interannuelle des dates d'épiaison et de maturité pour les variétés

	2014		2015		2016		X	
	Dei	Dm	Dei	Dm	Dei	Dm	Dei	Dm
WAH	142	184	129	167	135	179	135	177
MGS	142	184	129	167	135	179	135	177
MST	143	186	130	168	136	180	136	178
GTA	144	187	133	171	139	182	139	180
BOU	144	188	132	172	140	183	139	181
OZ	145	190	135	175	142	185	141	183
DKH	147	189	135	178	142	188	141	185
GMG	148	188	136	175	143	185	142	183
MBB	149	190	137	172	142	182	143	181
H3	148	188	138	179	146	189	144	185
Y	145	187	133	172	140	183	140	181

Dei= Date d'épiaison en nombre de jours après semis, *Dm*= date de maturation en nombre de jours après semis, *X*= la moyenne de *Dei* et *Dm* pour chaque variété durant les trois campagnes d'études, *Y*= moyenne *Dei* et *Dm* pour chaque campagne des dix génotypes évalués

L'écart entre la variété précoce et la variété tardive est estimé à 9 JAS. Les variétés améliorées se caractérisent par leur précocité par rapport aux variétés locales avec un écart moyen de 6 JAS (Tableau7), les génotypes suivants sont marqués dans l'ordre décroissant de précocité: [(MGS, WAH)> (SMT, GTA, BOU)> (DKH) > (GMG, MBB)> (OZ368)]. Mekhlouf et al., (2006) rappellent que la précocité au stade épiaison est une composante importante d'esquive des stress de fin de cycle chez le blé dur. La sélection de génotypes à cycle relativement court est indispensable dans les régions arides à semi-arides compte tenu de la distribution temporelle des précipitations et le moment des stress thermiques.

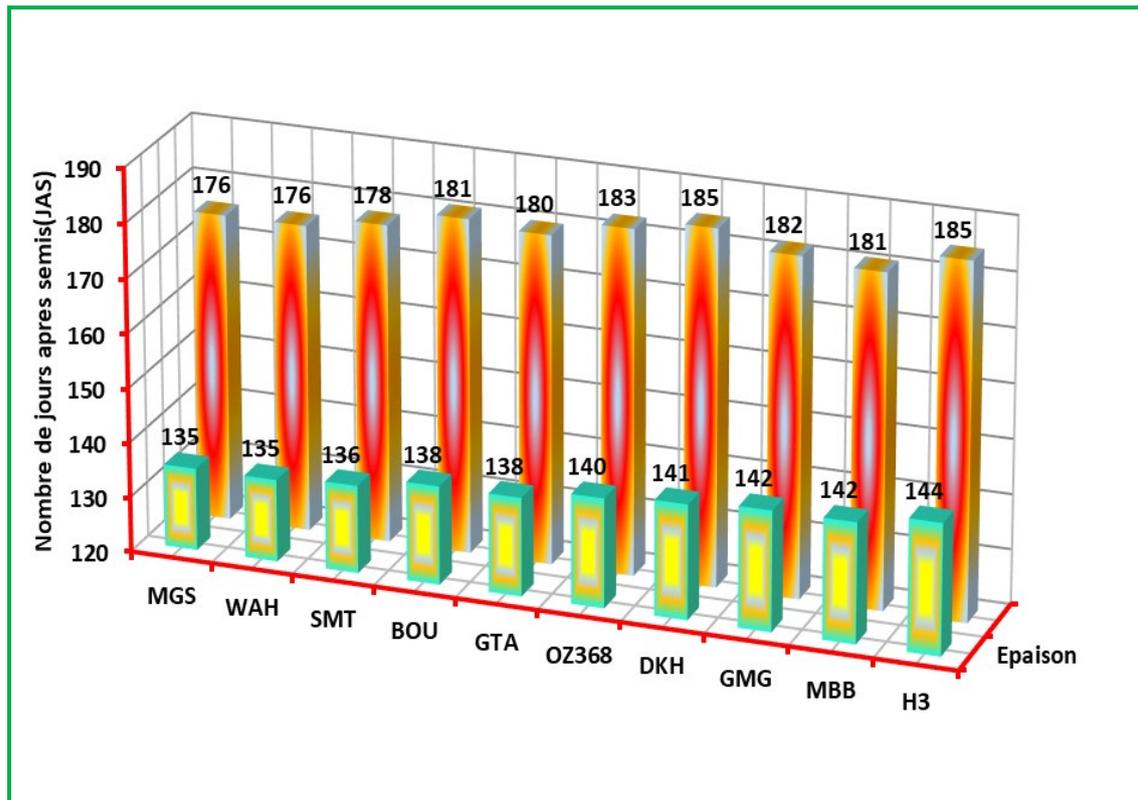


Figure 40. Variation moyenne de la durée d'épiaison, de maturité des dix variétés sur les trois campagnes d'expérimentation

La durée moyenne de maturation des variétés étudiées est de 180 JAS. Les notations sur ce paramètre montrent que l'écart varie de 2 JAS à 9JAS. Le cultivar le plus tardif a pris en moyenne 185 JAS. Le classement révèle que WAH et MAGS sont plus précoces. Sur la base de nombre de jours pour arriver au stade maturité, les variétés se regroupent en 7 classes à travers un ordre décroissant de précocité au stade de maturité : $[WAH, MGS] > [SMT] > [GTA] > [BOU, MBB] > [GMG, OZ_{368}] > [DKH, H3]$ (Figure40). Les variétés locales cumulent un retard de maturité de l'ordre de 7 JAS relativement aux variétés améliorées. Les résultats indiquent que les durées de l'épiaison et de la maturité pour les variétés étudiées sont variables d'une campagne à une autre. Dès lors, elles sont (145JAS, 187JAS) pour la campagne 2014, (133JAS, 172JAS) pour la campagne 2015, (140JAS, 183JAS) pour la campagne 2016. Cette variation est due essentiellement aux variations des données climatiques. Merah et *al.*, (2001) rapportent des résultats similaires pour une étude comparative entre les variétés anciennes et modernes. Afridi et *al.*, (2017) aperçoivent qu'il est important que les variétés terminent leur cycle avant l'installation des stress hydrique et thermiques.

2.3. Variation de l'accumulation de la matière sèche

L'analyse de la variance indique un effet significatif pour la date de prélèvement, pour les génotypes et les années d'expérimentation ainsi que pour l'interaction entre ces facteurs (Tableau 8). La matière sèche accumulée est un paramètre très important sur le plan rendement final, elle est le résultat de l'activité photosynthétique de la partie verte de la plante. Elle est fortement influencée par la variation interannuelle des précipitations, l'espèce, la variété ainsi que les éléments nutritifs qui se trouvent dans la solution du sol.

Tableau 8. Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'accumulation de la matière sèche des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).

Sources de variation	ddl	CME
Bloc	3	38,03 ^{ns}
Date(D)	8	34492,26**
Génotype(G)	9	639,29**
Année(A)	2	41963,36**
D*G	72	130,70**
D*A	16	6183,45*
G*A	18	278,95**
D*G*A	144	139,09*
Erreur	807	16,19

ns, * et ** : effet non significatif et significatif 5% et 1%

La matière sèche produite en fonction du génotype et année varie de 120,7 qha⁻¹ chez la variété BOU et 85,5 pour la variété MGS et cela pour la campagne 2015/2016. De 71,4 qha⁻¹ chez la variété SMT et 47,1 pour la variété GMG pour la campagne précédente (2014/2015). La première campagne (2013/2014) marque une production moyenne de matière sèche de 43,2 qha⁻¹ pour la variété MGS et 24,2 qha⁻¹ pour la variété DKH (Figure 41). La production de la matière sèche des variétés marque une variation interannuelle, cela s'identifie à travers leurs réponses différentes en fonction des années.

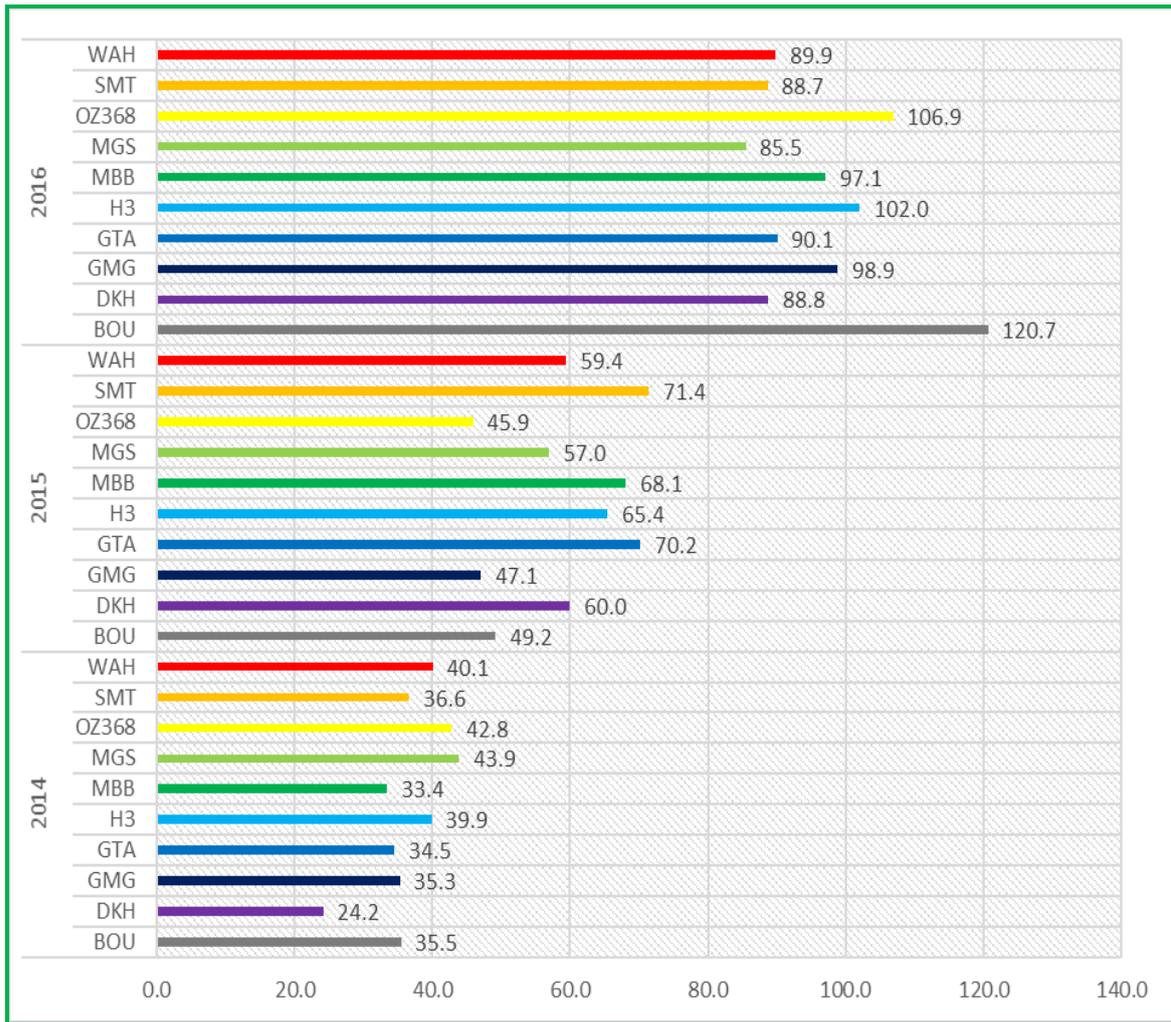


Figure 41. Evolution de la matière sèche sous l'effet de l'interaction GXA

La cinétique de l'accumulation de la matière sèche produite par les géotypes au cours des trois campagnes est affichée en figure (Figure 42). L'analyse de la régression progressive de l'accumulation de la matière sèche en fonction du nombre de JAS, donc du semis à la date de réalisation de l'échantillonnage, indique que le modèle polynomial est plus fondé pour entrevoir la cinétique l'accumulation de la matière sèche réalisées par les variétés en fonction des campagnes. Przulj et Momcilovic (2011) apprécient le recours aux modèles polynomiaux pour le blé pour décrire l'accumulation de biomasse au cours de la période pré anthèse. Les indications de la réalisation de la matière sèche décrivent un gradient d'évolution de 6,92 qha⁻¹ après 111 JAS, à une valeur de 39,63 qha⁻¹ 150 JAS. Le maximum est atteint avec 64,27 qha⁻¹ en fin de cycle à 185 JAS (Figure 43).

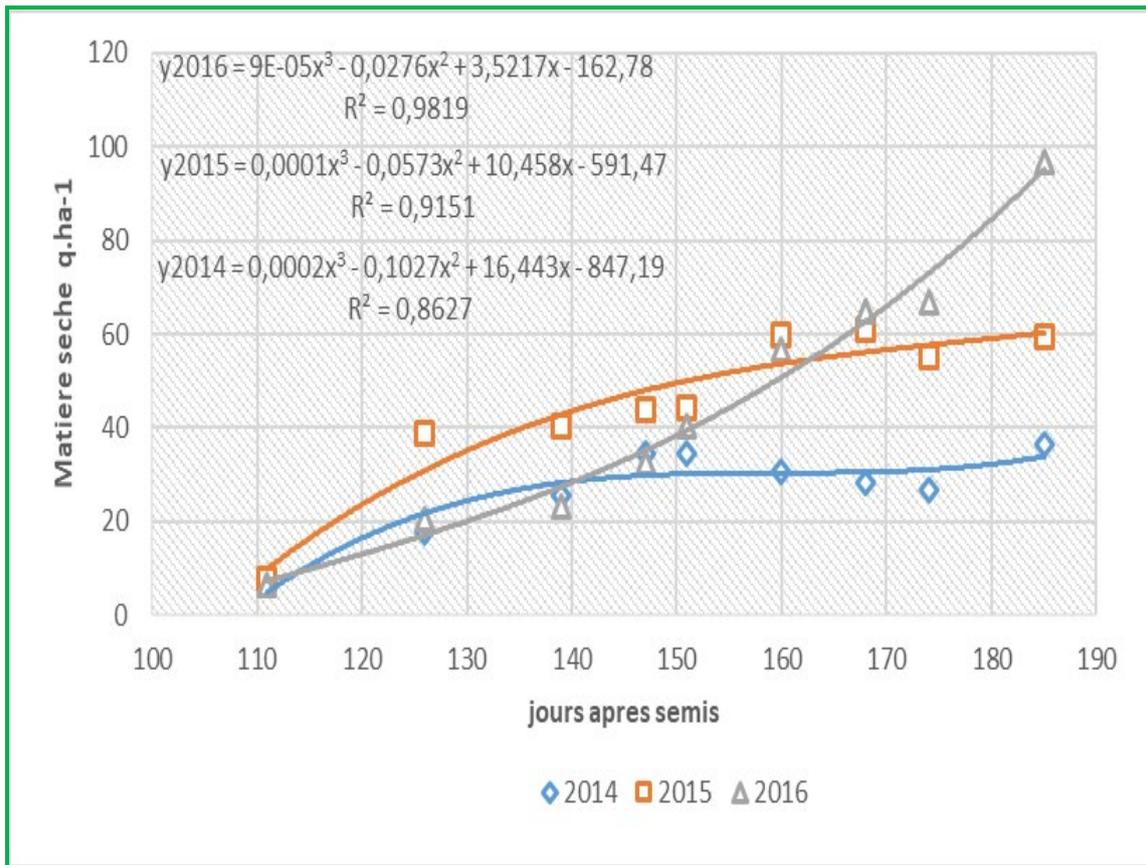


Figure. 42. Evolution de la matière sèche produite par les génotypes en fonction de l'interaction NJAS*A

Toutefois, relativement aux autres cultures, l'orge accumule plus de matière sèche que le blé dur et l'avoine. Malhi et *al.*, (2006) indiquent que les variétés d'orge se caractérisent par une biomasse appréciable et dans la plupart des stades de développement. Par contre, l'avoine produit moins, alors que le blé dur vient en troisième position. L'accumulation de la matière sèche est une caractéristique spécifique, ainsi elle diffère en fonction de l'espèce. Cependant la nette différence entre les espèces s'aperçoit par leurs capacités d'intercepter les rayonnements solaires, cette dernière est liée directement au type de cycle photosynthétique C3 ou C4. Broetto et *al.*, (2007) affirment que les céréales en C4 comme le maïs et le sorgho ont une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau que les céréales en C3 en conditions d'illumination et de température élevées. Kukul et Irmak (2020) considèrent que les céréales dites en «C4» [maïs et sorgho] leur efficacité d'utilisation de l'eau est de 89 % supérieure à celle [soja et blé]. Par ailleurs, pour produire 1 g de matière sèche, un blé transpire environ 500 g d'eau, contre 300 g pour un maïs (Gate et Bousquet, 2008).

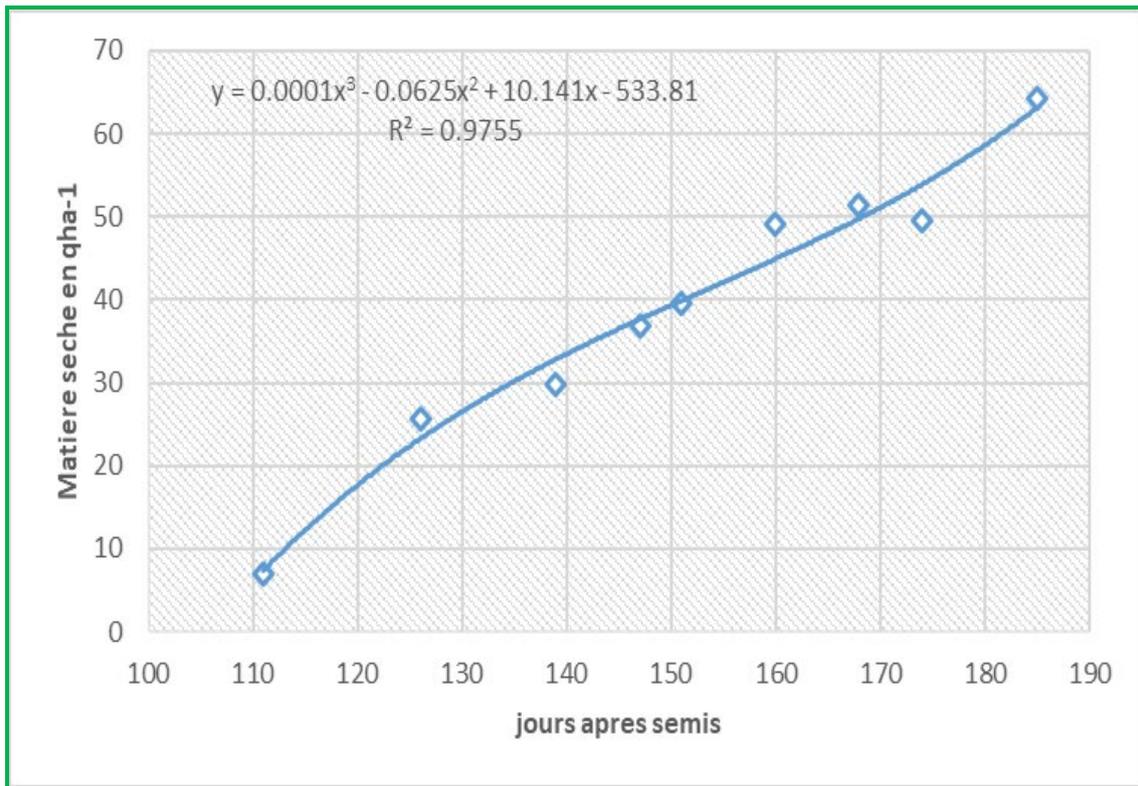


Figure 43. Evolution de l'accumulation de la matière sèche produite par les génotypes en fonction du NJAS et au cours des trois campagnes

Les courbes de la dynamique de l'accumulation de matière sèche par les parties aériennes pour les 3 campagnes sont présentées en figure (Figure 42). Cependant, la cinétique de la matière sèche de la campagne de 2014 est similaire à celle de 2015. Seulement, une légère supériorité semble apparaître pour 2015. Ainsi, la matière sèche accumulée varie de 6,58 qha⁻¹ à 36 qha⁻¹ pour l'année 2014 avec un taux moyen de croissance de 0,4 qha⁻¹jas⁻¹, et de 7,59 qha⁻¹ à 59,37 qha⁻¹ pour 2015 marquée par un taux de croissance de 0,7 qha⁻¹jas⁻¹. Toutefois, l'année 2016 se différencie nettement des autres années. Les niveaux de production de la matière sèche apparaissent identiques pour les deux campagnes précédentes pour la période qui s'étale entre 111 JAS et 151 JAS, cependant une augmentation spectaculaire de la matière sèche est repérée et atteint son maximum de 96,84 qha⁻¹ après 185 JAS. Ce résultat s'identifie par l'augmentation de la température coïncidant avec des précipitations enregistrées en période printanière. Ainsi, le taux de croissance est de 1,22 qha⁻¹jas⁻¹, donc 3 et 1,74 fois plus fort que les campagnes de 2014 et de 2015 respectivement. Selon Sugar et al., (2017) le taux de croissance est fortement influencé par les facteurs climatiques surtout la disponibilité en eau et les températures.

Sur les résultats moyens des trois années, les différences variétales sont assez marquées. La variabilité significative de l'interaction indique que MGS marque la plus forte valeur de la matière sèche à 111JAS avec 8,84 qha⁻¹ suivie par MBB avec 8,05 qha⁻¹, et WAH avec 8 qha⁻¹ (Figure 44). A la seconde date 126 JAS de prélèvement, les génotypes SMT, OZ368, MGS réalisent plus de matière sèche avec 28,68 qha⁻¹, 28,62 qha⁻¹ et 28,54 qha⁻¹ respectivement. A 139 JAS, MBB et MGS accumulent plus de matière sèche avec 41,83 qha⁻¹, 39,74 qha⁻¹. A 160 JAS, MGS, OZ368 et SMT valorisent la production de matière sèche, avec les quantités 58,83 qha⁻¹; 57,14 qha⁻¹; 52,04 qha⁻¹. En phase de fin de cycle de la culture, donc à 185 JAS les variétés H3, BOU et MBB réalisent des niveaux appréciables avec 69,11 qha⁻¹; 68,45 qha⁻¹ et 66,2 qha⁻¹ respectivement (Figure 44). En effet et selon Simane et *al.*, (1993), les génotypes résistants à la sécheresse se caractérisent par un taux de croissance, élevé en début de cycle et relativement plus réduit en fin de cycle.

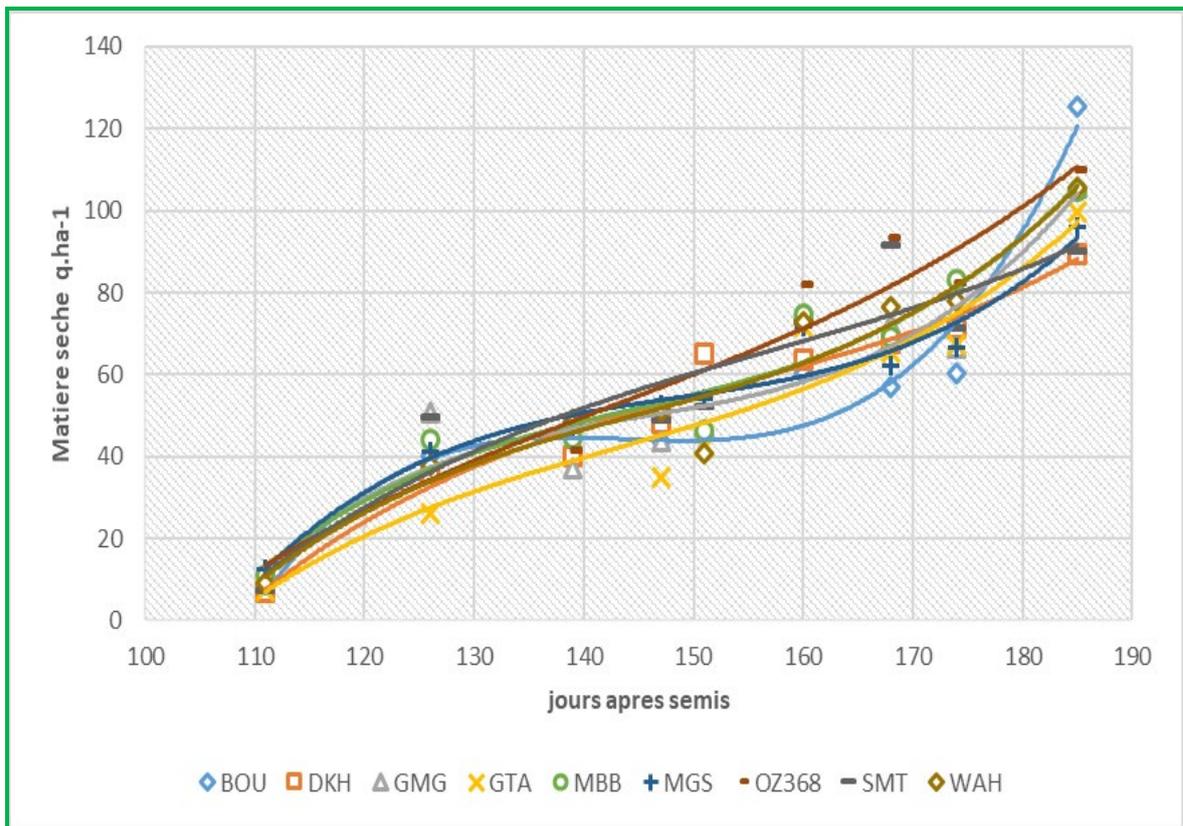


Figure 44. Effet de l'interaction G*NJA pour la réalisation de la matière sèche par les génotypes au cours de trois campagnes

Selon l'analyse statistique de la réparation des nuages de points formés par l'évolution de la matière sèche par l'ensemble des variétés en fonction du NJAS, c'est le modèle polynomial qui a été adopté avec un coefficient de détermination dépassant ($R^2 = 0,80$). Ces modèles sont :

$$\begin{aligned} \text{Ms qha}^{-1}_{\text{BOU}} &= 0,0012\text{JAS}^3 - 0,4975(\text{JAS})^2 + 71,456\text{JAS} - 3371,8 \quad (R^2 = 0,9516) \\ \text{Ms qha}^{-1}_{\text{DKH}} &= 0,0003(\text{JAS})^3 - 0,1199(\text{JAS})^2 + 19,089(\text{JAS}) - 990,58 \quad (R^2 = 0,96) \\ \text{Ms qha}^{-1}_{\text{GMG}} &= 0,0006(\text{JAS})^3 - 0,2453(\text{JAS})^2 + 35,951(\text{JAS}) - 1728,4 \quad (R^2 = 0,87) \\ \text{Ms qha}^{-1}_{\text{GTA}} &= 0,0003(\text{JAS})^3 - 0,1369(\text{JAS})^2 + 20,356(\text{JAS}) - 1001,9 \quad (R^2 = 0,91) \\ \text{Ms qha}^{-1}_{\text{MBB}} &= 0,0004(\text{JAS})^3 - 0,191(\text{JAS})^2 + 28,277(\text{JAS}) - 1373,8 \quad (R^2 = 0,94) \\ \text{Ms qha}^{-1}_{\text{MGS}} &= 0,0005(\text{JAS})^3 - 0,2266(\text{JAS})^2 + 34,054(\text{JAS}) - 1670,8 \quad (R^2 = 0,94) \\ \text{Ms qha}^{-1}_{\text{OZ368}} &= 0,0002(\text{JAS})^3 - 0,0846(\text{JAS})^2 + 13,106(\text{JAS}) - 669,08 \quad (R^2 = 0,90) \\ \text{Ms qha}^{-1}_{\text{SMT}} &= 0,0002(\text{JAS})^3 - 0,091(\text{JAS})^2 + 15,059(\text{JAS}) - 803,19 \quad (R^2 = 0,86) \\ \text{Ms q.h}^{-1}_{\text{WAH}} &= 0,0004(\text{JAS})^3 - 0,169(\text{JAS})^2 + 25,139(\text{JAS}) - 1230,9 \quad (R^2 = 0,94) \\ \text{Ms q.h}^{-1}_{\text{H03}} &= 0,0001(\text{JAS})^3 - 0,0551(\text{JAS})^2 + 8,5433(\text{JAS}) - 443,99 \quad (R^2 = 0,9304) \end{aligned}$$

Les résultats sur le taux de croissance en début cycle révèlent que SMT, MGS, GTA se démarquent par les valeurs les plus élevées ($1,6 \text{ qha}^{-1}\text{jas}^{-1}$, $1,37 \text{ qha}^{-1}\text{jas}^{-1}$ et $1,34 \text{ qha}^{-1}\text{jas}^{-1}$). Par contre, les plus faibles ont caractérisé WAH ($1,13 \text{ qha}^{-1}\text{jas}^{-1}$), H3 ($1,12 \text{ qha}^{-1}\text{jas}^{-1}$) et BOU ($1,11 \text{ qha}^{-1}\text{jas}^{-1}$) (Figure 45). Turner et Nicolas (1987) montrent qu'un taux de croissance élevé en début de cycle est déterminant du rendement en zones où l'eau, en fin de cycle, est un facteur limitant de la production. Triboi et *al.*, (1985) indiquent que la matière sèche accumulée est la résultante soit d'une faible vitesse de croissance associée à une longue phase de croissance, soit d'une vitesse élevée associée à une courte phase, soit d'une vitesse élevée plus une longue phase. Toutefois, Une variété qui utilise efficacement les ressources au début du stade de croissance en termes de rayonnement photosynthétique actif, accumulation de biomasse et de tallage améliore la compétitivité. Ainsi, la vigueur précoce au début de la saison est fonction de la taille des plantules, du pourcentage de germination (Lemerle et *al.*, 2001) et de la biomasse des premières plantes (Zerner et *al.*, 2008, Belagrouz, 2013). Les

cultivars de blé possédant une forte accumulation précoce de biomasse et une plus grande efficacité des rayonnements photosynthétiques actif se sont révélés les meilleurs concurrents face aux mauvaises herbes et par conséquent valorisent mieux les précipitations au début de cycle (Lemerle et *al.*, 1996 ; Duan et *al.*, 2016; Sanchez-Garcia et *al.*, 2015).

Des résultats semblables ont été rapportés chez l'orge, l'avoine et le blé, où la vigueur au début de la saison était fortement corrélée avec la longueur et la largeur de la première feuille (Lopez et *al.*, 1996). La vigueur au début de la saison dépend fortement du taux de croissance relatif d'une culture. Un taux de croissance relatif élevé au début de stade de croissance et développement modèle une effective valorisation des ressources (Zhao et *al.*, 2019; Markovic et *al.*, 2020).

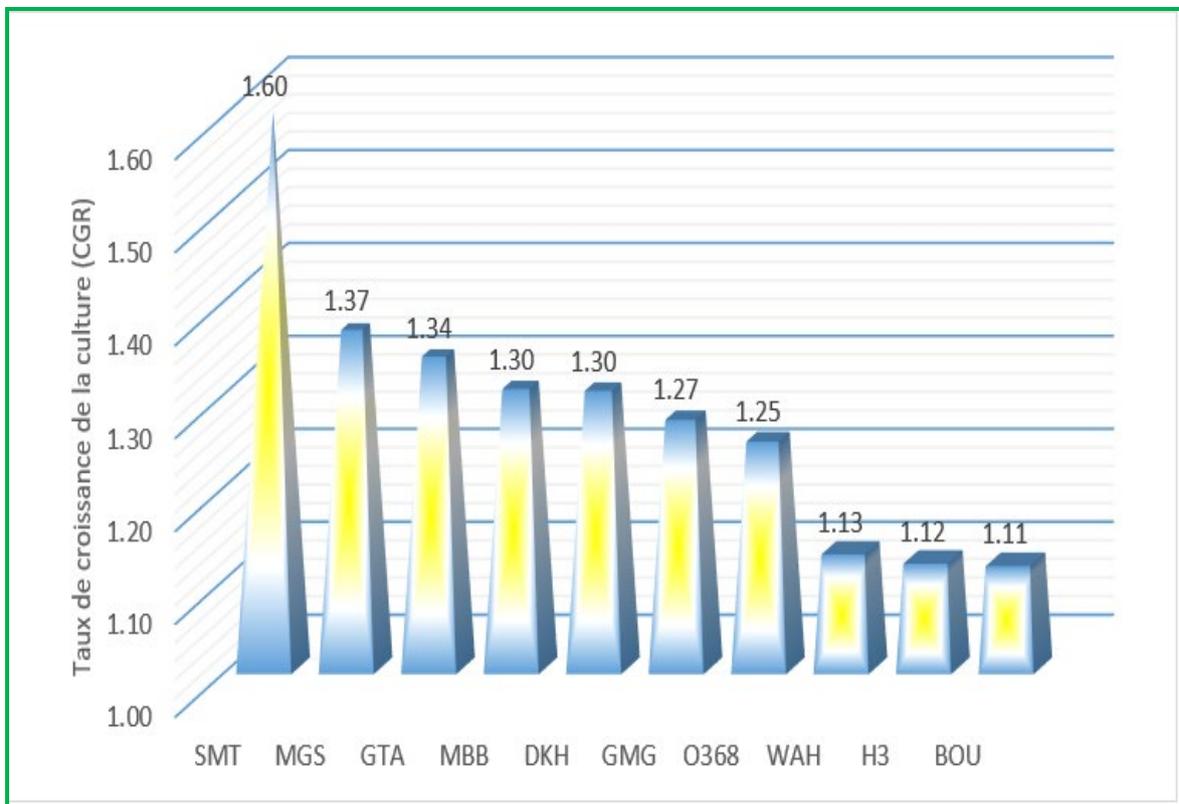


Figure. 45. Taux de croissance des variétés testées au cours des trois campagnes de 2014 à 2016

2.4. Variation de l'évolution du remplissage du grain de l'épi

Les carrés moyens de l'analyse de la variance montrent un effet hautement significatif pour l'ensemble des facteurs influençant le phénomène de remplissage des grains, la date de prélèvement, le génotype et l'année. L'interaction entre ces facteurs indique aussi un effet significatif (Tableau 09).

Tableau 09. Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'évolution du remplissage du grain de l'épi des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)

Sources de variation	ddl	CME
Bloc	3	42,54**
Date(D)	8	29667,09***
Génotype(G)	9	1599,88***
Année(A)	2	1436,96***
D*G	72	91,42***
D*A	16	397,97***
G*A	18	182,84***
D*G*A	144	49,78***
Erreur	807	10,01***

ns, * et ** : effet non significatif et significatif 5% et 1%

La période de remplissage du grain est la durée entre l'anthèse et la maturité physiologique. Après la maturité physiologique, aucune augmentation significative de la matière sèche du blé dans les grains n'a été observé (Mou et Kronstad, 1994). Cette phase varie quelque peu, selon le climat. La durée est estimée de 13 jours dans des environnements à haut stress et peut dépasser 20 jours dans des environnements à haut rendement et à faible stress. Ferras (2015) mentionne que le rendement en grains, sous système pluvial et sous environnement contraignant, est la résultante de la durée et la vitesse de remplissage et de la capacité de translocation des assimilâtes stockés dans la tige.

La cinétique de remplissage du grain change sous l'effet de l'espèce, la variété ainsi que les facteurs climatiques (Tableau 09). En effet, la moyenne des résultats obtenus durant 03 campagnes successives indique que la valeur minimale du PMG est de 4,53g au 153 JAS et de 46,31g au 180 JAS (Figure 46) avec une vitesse moyenne de $1,54\text{g}^{-1}$. El Hafid et al., (1996) indique que l'analyse par contraste signale que la différence de la vitesse de remplissage entre espèces n'a montré l'existence de différences significatives qu'entre l'orge vs le triticale; l'orge

vs le blé dur; et l'orge vs le blé tendre. La comparaison des espèces reste compliquée à cause des différences liées à la date de floraison. Néanmoins, Miroslavljevic et *al.*, (2018) rapportent que les cultivars de triticale et de blé ont une plus longue durée de remplissage, d'où un probable remplissage maximal des grains par rapport à l'orge à six et à deux rangs. De plus, les cultivars d'orge à deux rangs ont un taux de remplissage des grains plus élevé que le blé, le triticale et l'orge à six rangs.

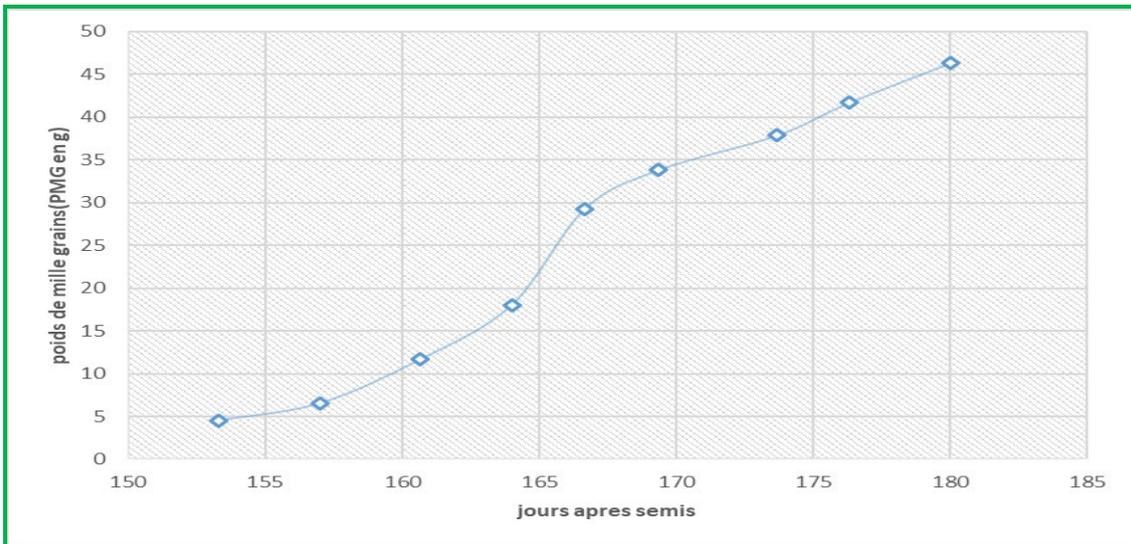


Figure 46. Variation du remplissage du grain en fonction du nombre de JAS

L'effet de l'interaction de la campagne A* NJAS sur la variation de remplissage du grain est affiché en figure (Figure 46).



Figure 47. Effet de l'interaction A*NJAS sur l'évolution du remplissage du grain

Le remplissage du grain est exprimé sous forme de modèles sous l'effet de l'interaction A*NJAS.

$$y_{2014} = 1,6478 \text{ JAS} - 233,11 \quad (R^2 = 0,9951)$$

$$y_{2015} = 1,7996 \text{ JAS} - 283,63 \quad (R^2 = 0,9838)$$

$$y_{2016} = 1,484 \text{ JAS} - 231,05 \quad (R^2 = 0,8855)$$

L'interaction année*NJAS révèle que la variation interannuelle affecte le début de la phase de remplissage des grains ainsi que la vitesse. Cependant, les courbes de remplissage montrent un décalage dans le temps (Figure 47). La campagne de 2014 apparaît la plus précoce pour le stade de remplissage. En effet, elle a débuté à 144 JAS et s'est terminée à 170 JAS, pour un PMG varie de 5,39 g à 47,80 g accusant une vitesse de $1,67 \text{ g} \cdot \text{j}^{-1}$. Pour l'année 2015, la phase a enregistré un retard de 13 jours (157 JAS) comparativement à 2014, le PMG varie de 1,03g à 47,29g avec une vitesse de $1,79 \text{ g} \cdot \text{j}^{-1}$. La campagne de 2016 se démarque par une faible vitesse de remplissage comparativement aux deux campagnes précédentes, elle est 17,31%, donc plus faible que celle de 2015 et de 9,75% que celle de 2014. Des variations interannuelles similaires ont été identifiées par par Bahlouli et *al.*, (2008), résultants de la température et du statut hydrique (Gooding et *al.*, 2003).

Le suivi du remplissage des grains par la matière sèche a mis en évidence une cinétique divergente pour l'ensemble des variétés évaluées durant les trois campagnes de l'expérimentation (Figure 48). En effet les vitesses de remplissage déduites à partir des pentes de régression ont montré plusieurs niveaux de translocation en fonction de nombre de jours après semis.

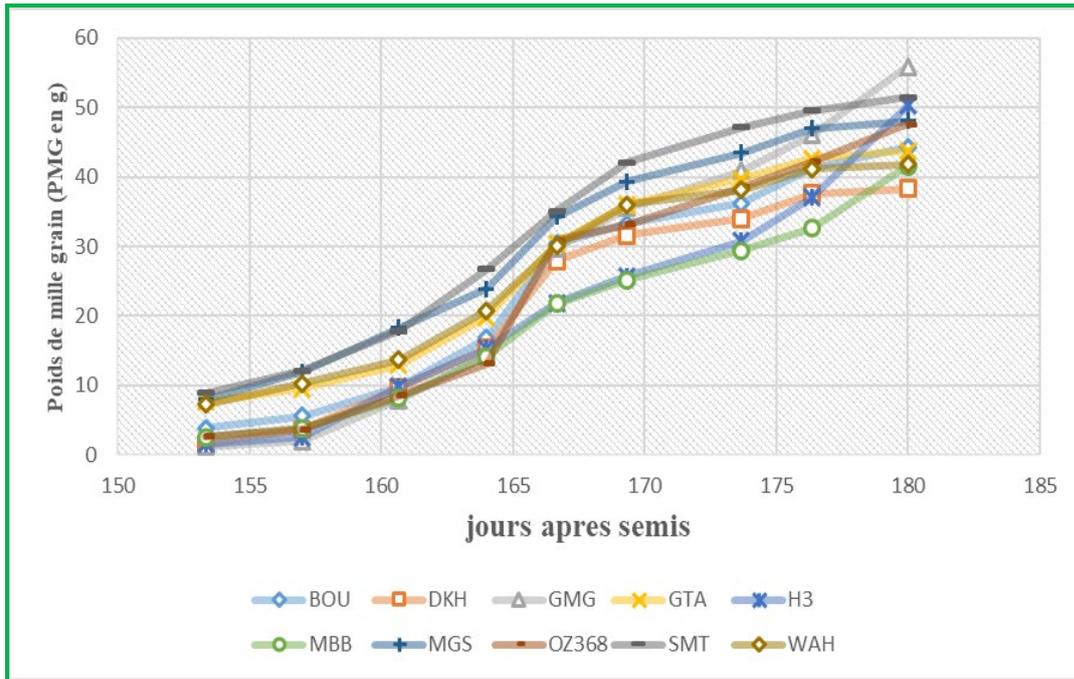


Figure 48. Effet de l'interaction NJAS*G sur l'évolution du remplissage du grain sur les trois campagnes

La vitesse de remplissage enregistrée varie d'une variété à une autre, la plus forte valeur est celle de SMT ($1,6\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), suivie par la variété MGS ($1,5 \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$). Les plus faibles valeurs sont celles des variétés OZ₃₆₈ ($1,02 \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) et MBB ($1,08 \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$). La vitesse de remplissage est déduite sous forme de modèles en fonction du NJAS et pour chacune des variétés.

$\text{VRG}_{\text{BOU}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,2001 x - 181,4$	$(R^2 = 0,9163)$
$\text{VRG}_{\text{DKH}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,321 x - 202,12$	$(R^2 = 0,9596)$
$\text{VRG}_{\text{GMG}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,2556 x - 192,98$	$(R^2 = 0,9137)$
$\text{VRG}_{\text{GTA}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = y = 1,1101 x - 163,73$	$(R^2 = 0,9131)$
$\text{VRG}_{\text{H3}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,3576 x - 208,17$	$(R^2 = 0,9274)$
$\text{VRG}_{\text{MBB}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,0832 x - 164,77$	$(R^2 = 0,9225)$
$\text{VRG}_{\text{MGS}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,5106 x - 224,26$	$(R^2 = 0,9901)$
$\text{VRG}_{\text{OZ368}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,0214 x - 155,12$	$(R^2 = 0,9365)$
$\text{VRG}_{\text{SMT}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,6529 x - 246$	$(R^2 = 0,9448)$
$\text{VRG}_{\text{WAH}}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = 1,4243 x - 181,32$	$(R^2 = 0,9434)$

Ces résultats sont similaires à des travaux réalisés dans la région des Hauts Plateaux Sétifiens (Bahlouli, 2008). Toutefois, la période de remplissage reste fortement affectée par les hautes températures (Liu et *al.*, 2016; Dupont et Altenbach, 2003). Cependant, une floraison précoce et une durée de remplissage courte associée à une vitesse élevée de d'accumulation de la matière sèche dans les grains déterminent des caractéristiques favorables à l'optimisation de la production de blé dur dans des environnements vulnérables (Xie et *al.*, 2015). Ainsi, le remplissage précoce des grains semble favorable au poids final des grains, dans les régions semi-arides qui se caractérisent par des stress hydrique et thermique installés en fin de cycle de blé. Dès lors, Blum (1998) suggère qu'une courte durée de remplissage des grains associée à une vitesse élevée est un caractère d'esquive du stress terminal tandis qu'une longue durée est caractéristique d'une plus grande translocation des assimilates du chaume pendant la phase d'enrichissement des grains par la matière glucidique ainsi que protéique.

3. Variation des caractères morphologiques

3.1. La hauteur du chaume (HT)

L'importance de la hauteur du chaume sous stress est liée à la capacité de croissance du système racinaire en profondeur. De ce fait, une paille haute est souvent associée d'un système racinaire profond (Ferras, 2015; Belagrouz et *al.*, 2018). En fonction des génotypes testés, les longueurs des tiges des variétés sont significativement différentes, l'effet année, interaction montre aussi un effet significatif (Tableau10).

Tableau 10. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la hauteur de la paille des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)

Sources de variation	ddl	CME
Bloc	3	22.55ns
Génotype(G)	9	2907.81**
Année(A)	2	5603.89**
G*A	18	344.79**
Erreur	807	15.9

ns, * et ** : effet non significatif et significatifs 5% et 1%

Les résultats de l'analyse reflètent une variabilité différentielle entre année pour la hauteur de la plante (Figure 49). Par ailleurs, la variabilité est divergente aussi chez les génotypes testés pour la hauteur de la paille. En effet, la hauteur moyenne de la végétation pour les dix génotypes et durant les trois campagnes d'expérimentation est de 86,21 cm. Le cultivar DKH avec une valeur de 96.95 cm apparaît le plus haut. D'autre part, le plus court, MGS mesure 52.53 cm (Figure 50).

L'interaction année*génotype montre un effet significatif, indiquant que la hauteur de des variétés testées est fortement affecté par la variation interannuelle. Les changements de la hauteur moyenne par année varient de 57,99cm pour l'année (2015) ; 65,48cm pour l'année 2014 et de 81,18cm en 2016. L'origine de la variation est expliquée par l'insuffisance et l'irrégularité des précipitations durant le cycle de la culture. En revanche, une hauteur de paille importante est une caractéristique désirable en zone semi-aride, suite à ses effets bénéfiques lors des années sèches. Ces effets sont attribués à la capacité de stockage et de transfert des substances glucidiques pour la formation du grain (Annichiarico et *al.*, 2005). Cette participation de la hauteur de paille avec les assimilâtes entreposés au niveau surtout de pédoncule de l'épi minimise la diminution du rendement en grain sous stress (Blum, 1988).

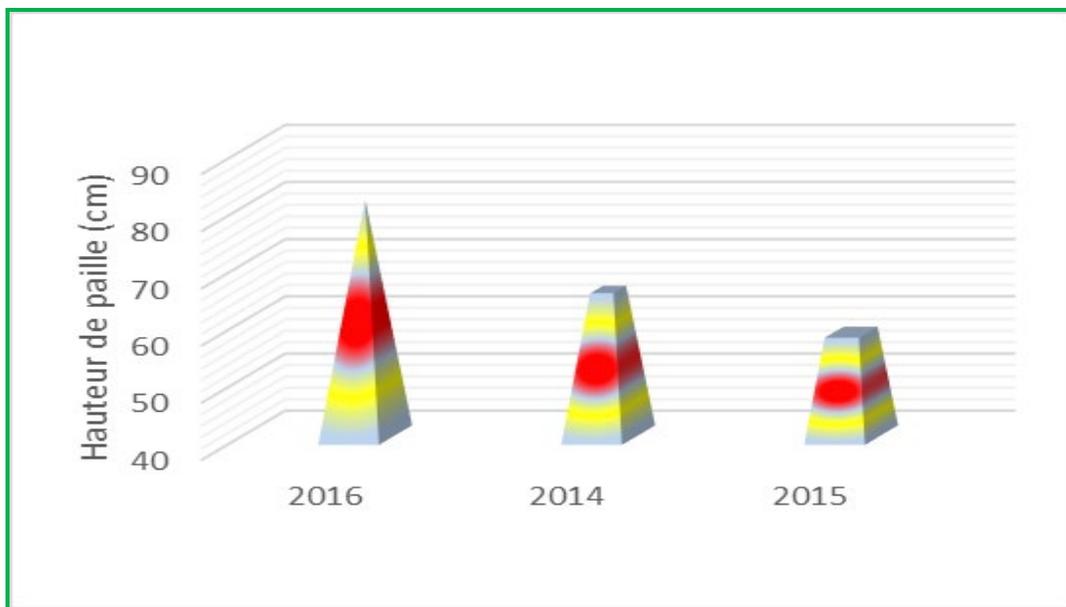


Figure 49. Effet année sur la hauteur du chaume (cm) des variétés au cours de trois campagnes

C'est une caractéristique désirable suite à la forte utilisation de la paille, comme aliment du bétail (Mouret *et al.*, 1988). Uddin et Marshall (1989) mentionnent que la réduction du rendement en grains, sous stress hydrique, est plus importante chez les variétés naines que chez les variétés hautes, ayant le même degré de précocité. Bouzerzour *et al.*, (1994) rapportent que les variétés de blé dur à paille courte, sous stress sévère en fin de cycle, ont une bonne adaptation et une meilleure productivité que les blés hauts et tardifs.

La sélection de nouveaux génotypes de blé ayant une hauteur de chaume réduite a augmenté les gains génétiques du blé et a contribué de façon significative à l'accroissement de la productivité mondiale du blé (Zhang *et al.*, 2016). De nombreux programmes d'amélioration du blé ont mis au point des variétés dotées des gènes de nanisme, à savoir : *Rht1 (Rht-B1b)*, *Rht2 (Rht-D1b)*, *Rht-D1c* and *Rht8* (Lopes *et al.*, 2012; Joudi *et al.*, 2014). Ces gènes réduisent la longueur de la coléoptile et la zone entrenœuds et par conséquent la hauteur du chaume (Rebetzke *et al.*, 2012), ce qui a entraîné une augmentation du rendement en grains (Grover *et al.*, 2018) par la réorientation des assimilates vers les épis.

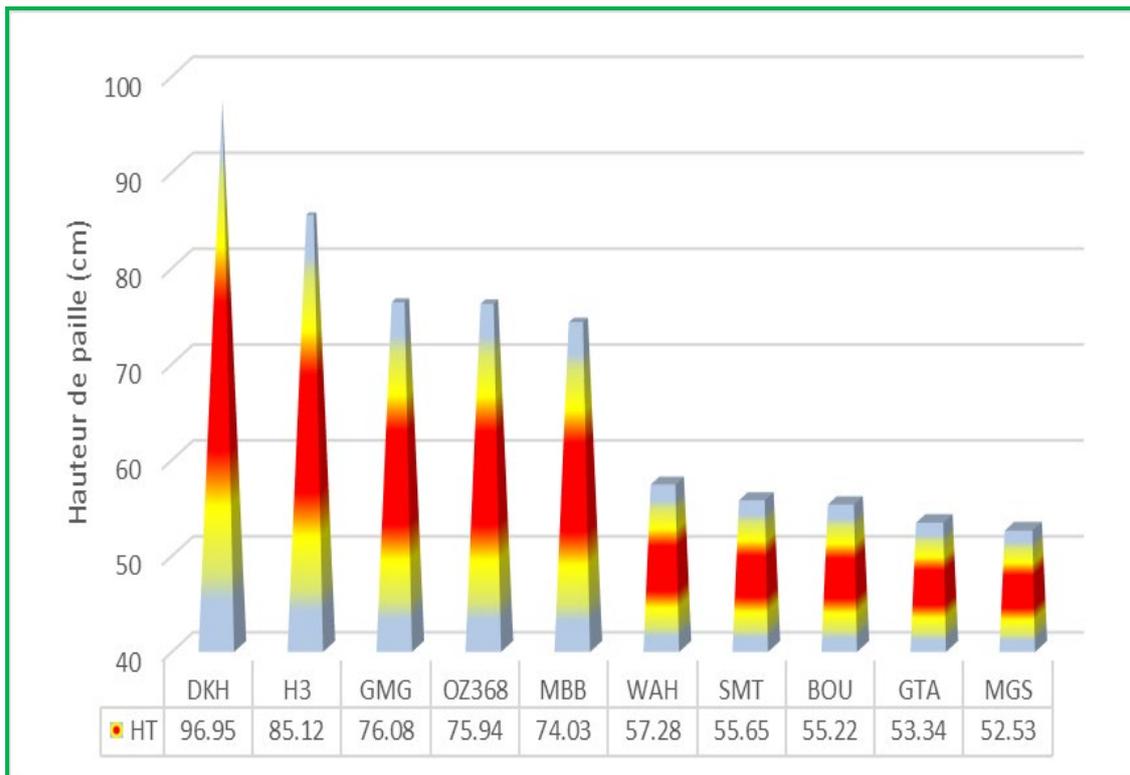


Figure 50. Variation de la hauteur du chaume en fonction du génotype

Les progrès de la sélection en vue d'améliorer la résistance à la verse et le rendement en grain du blé, ont entraîné une réduction de la hauteur des plantes de 130 à 60 cm en Chine (Gao et *al.*, 2017), de 110 à 95 cm au Royaume-Uni (Berry et *al.*, 2015), de 120 à 57 cm en Italie (De Vita et *al.*, 2007), de 130 à 60 cm au Brésil (Beche et *al.*, 2014) et de 125 à 65 cm en Espagne (Royo et *al.*, 2007) lorsqu'ils remplacent les anciennes variétés par géotypes plus au moins courts.

3.2. Surface foliaire de la feuille étendard (SFE)

La morphologie optimale des feuilles drapeaux peut améliorer l'absorption de la lumière, ce qui améliore la photosynthèse et le potentiel de rendement en grain (Liu et *al.*, 2018), la surface foliaire étendard joue un rôle primordial dans le remplissage des graines. Elle conditionne la résistance à la sécheresse. Benmahammed et *al.*, (2008) indiquent que suite à la variabilité climatique des Hauts Plateaux et à l'intensité des stress de fin de cycle, la stratégie d'évitement est théoriquement la plus intéressante, car, dans ce cas, la plante évite le stress au lieu de le contrer. D'autre part, Cherfia (2010) trouve une corrélation positive entre le rendement et la surface foliaire. Ainsi, les variétés de blé étudiées qui se distinguent par des surfaces foliaires les plus élevées donnent un rendement en grains élevé. Toutefois, une diminution de la surface foliaire peut affecter le rendement à cause de la réduction de la capacité photosynthétique. La variation de la surface foliaire étendard est fortement influencée par le géotype, l'année, l'interaction année géotype d'après l'analyse de la variance.

Tableau 11. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la surface foliaire de la feuille étendard des dix variétés testées sur les trois campagnes consécutives

Source de variation	ddl	CME
Bloc	3	3.14ns
Géotype(G)	9	6.93**
Année(A)	2	653.61**
G*A	18	20.32**
Erreur	87	2.74

ns, * et ** : effet non significatif et significatif 5% et 1%

Nos résultats révèlent qu'en fonction du génotype, la surface foliaire de la feuille étendard varie de $11,98 \text{ cm}^2$, $11,71 \text{ cm}^2$, $11,16 \text{ cm}^2$, $10,64 \text{ cm}^2$, $10,56 \text{ cm}^2$, $10,53 \text{ cm}^2$, $10,47 \text{ cm}^2$, $10,46 \text{ cm}^2$, $9,82 \text{ cm}^2$, $9,42 \text{ cm}^2$ pour les variétés OZ368, H3, WAH, GTA, MGS, SMT, MBB, GMG, DKH, BOU et dans l'ordre cité (Figure 51). Ces résultats corroborent ceux mentionnés (Maamri, 2011). Par ailleurs, pour réduire leur consommation en eau dans des environnements déficitaire en eau en fin de cycle en fin de cycle, certains génotypes réduisent leur surface du limbe (Malhi et al., 2004). Adjabi (2002) souligne que l'augmentation de la surface foliaire de la feuille étendard du blé soumis à un stress modéré ou sévère pourrait être un caractère d'adaptation.

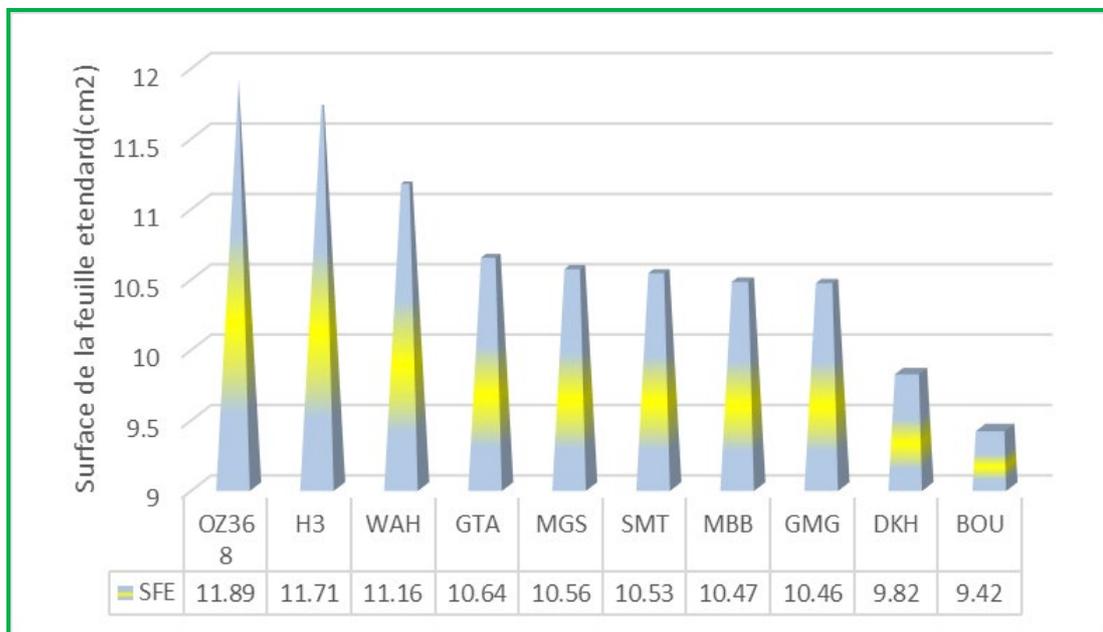


Figure 51. Variation de la surface de la feuille étendard (cm^2) selon les génotypes

Ainsi Araus et al., (2003) mentionnent que l'augmentation de l'activité photosynthétique, sous stress, est souvent observée chez les génotypes arborant des feuilles de petites dimensions qui sont moins sensibles à la déshydratation. Bouzerzour et Benmahammed (2009) suggèrent que, sous stress terminal, la sélection doit favoriser les génotypes aux feuilles de taille réduite. Bidinger et Witcombe (1989) affirment que le taux de régression de la surface sous l'effet de stress hydrique est une forme d'adaptation à la sécheresse. La réduction de la surface foliaire tend à minimiser les pertes d'eau par transpiration, mais aussi provoquer une diminution du rendement à cause de la réduction de la capacité photosynthétique. Abbassenne (1998) se penche sur les variétés dont la surface foliaire est

réduite pour l'intérêt qu'elles portent pour la performance du rendement par une meilleure efficacité d'utilisation de l'énergie lumineuse par unité de surface foliaire.

3.3. Variation de d'indice foliaire vert (GLAI)

L'indice foliaire vert est significativement affecté sous l'effet année, génotype, date de prélèvement et leurs interactions (Tableau 12). L'évolution moyenne de l'indice foliaire vert sous l'effet du NJAS pour les dix variétés et durant trois campagnes successives est illustrée en figure (Figure 52). Elle se caractérise par une période d'augmentation remarquable s'étalant de 103 JAS à 142 JAS et cela coïncide avec le stade de 2 à 3 nœuds et stade floraison respectivement. L'indice foliaire vert maximal a été obtenu après 142 JAS avec une valeur moyenne de $1,6\text{m}^2/\text{m}^2$, se réduit jusqu'à une valeur de $0,3\text{ m}^2/\text{m}^2$ à 175 JAS.

Tableau 12. Carrés moyens de l'analyse de la variance de l'indice foliaire vert des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)

Sources de variation	ddl	CME
Bloc	3	0,08***
Date(D)	7	36,56***
Génotype(G)	9	1,10***
Année(A)	2	6,38***
D*G	63	0,23***
D*A	14	21,36***
G*A	18	0,41***
D*G*A	126	0,20***
Erreur	717	0,01

ns, * et ** : effet non significatif et significatif 5% et 1%

L'interaction JAS*A significatif montre que la réalisation des valeurs maximales prend certains décalages dans le temps (Figure 53). Pour l'année 2015 l'ensemble des variétés présente une précocité de 27 JAS par rapport à l'année 2014(130 JAS) et 41 JAS par rapport à l'année 2016. Concernant l'année la plus expressive du point de vue indice foliaire vert c'est l'année 2016 avec une valeur moyenne de $3,45\text{ m}^2/\text{m}^2$ (144 JAS) suivi par l'année 2015 avec une valeur de l'ordre de $2,31\text{ m}^2/\text{m}^2$ (103 JAS) l'année 2014 vient en troisième position avec un indice de $2,11\text{ m}^2/\text{m}^2$ (Figure 53). Cette variation est expliquée par la variation interannuelle des conditions climatiques de températures et de précipitations décennales.

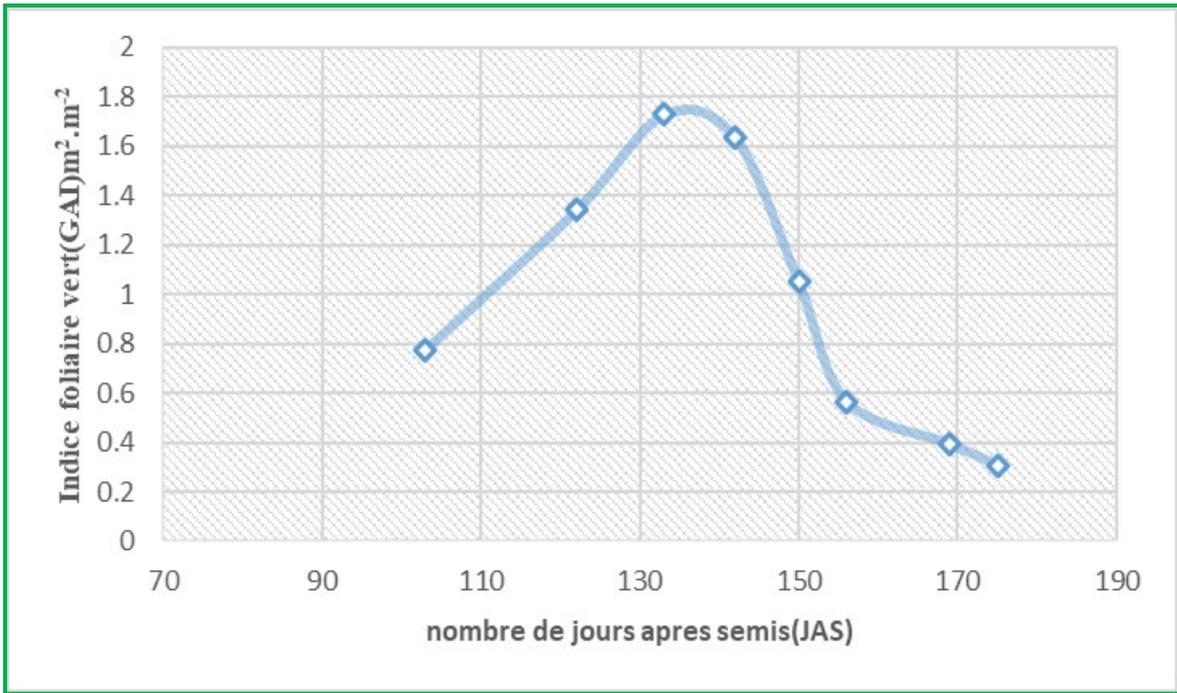


Figure 52. Variation moyenne de d'indice foliaire vert(GLAI) en fonction du NJAS pour les dix variétés et sur les trois campagnes d'étude (2013/14 à 2015/16)

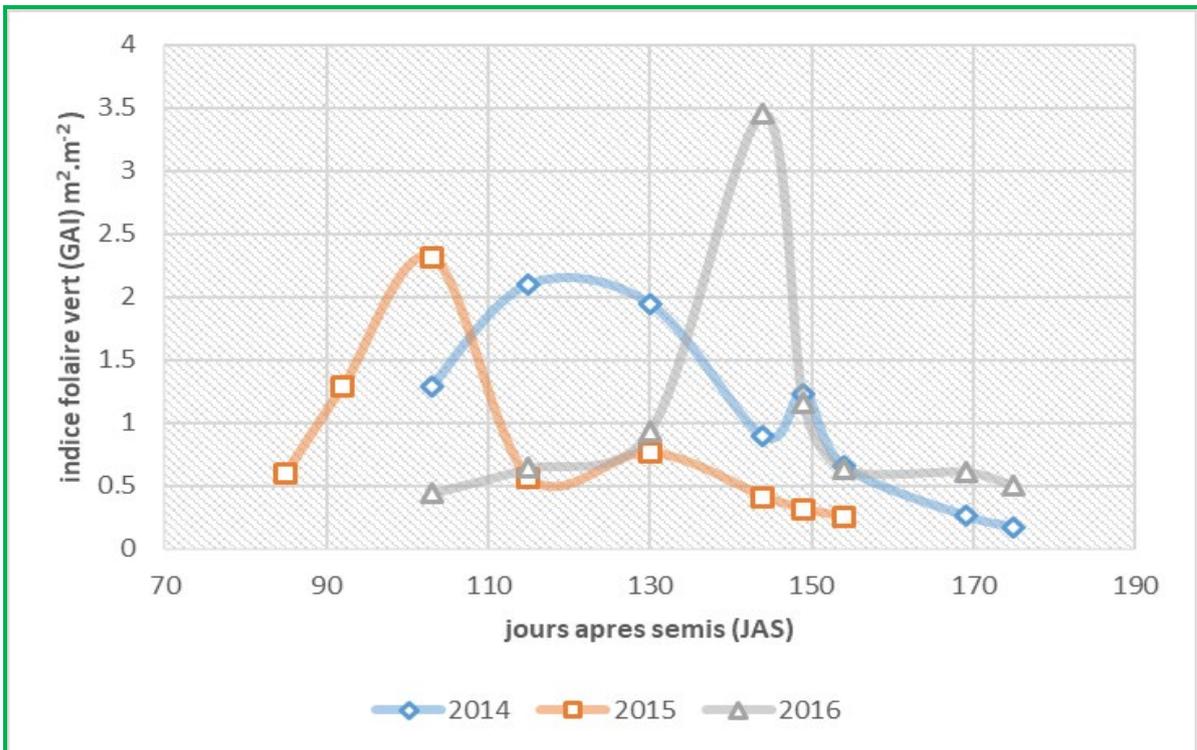


Figure 53. Variation de d'indice foliaire vert(GLAI) sous l'interaction JAS*A pour les dix variétés

En effet, l'augmentation de la température conduit au raccourcissement de la période de croissance des cultures, à la réduction du taux de photosynthèse, et donc l'indice foliaire vert et par conséquent pénalisation des composantes de rendement (Zacharias et al., 2010). Toutefois, les précipitations en fin d'hiver et en périodes printanière contribuent positivement à l'augmentation de l'indice foliaire vert ainsi qu'à sa persistance. Aparicio et al., (2000) notent que l'indice foliaire vert varie de 1,6 m²/m² à 3,1 m²/m² sous irrigation et de 0,9 m²/m² à 2,2 en conditions pluviales.

Sous l'effet significatif de l'interaction G*NJAS sur l'indice foliaire vert, les résultats décrivent que l'indice foliaire vert maximal montre une différence hautement significative entre les génotypes. Il prend les valeurs de 1,26 m²/m² pour la variété WAH et de 2,15 m²/m² pour la variété GMG, la première variété a atteint son maximum après 133 JAS. Tandis que la deuxième a enregistré un retard de 7 jours, les variétés qui ont enregistré de fortes valeurs de l'indice foliaire vert maximal sont [GMG (2,15 m²/m²), GAT (1,98 m²/m²), O368 (1,9 m²/m²), MGS (1,9 m²/m²), SMT (1,84 m²/m²)] (Figure 54).

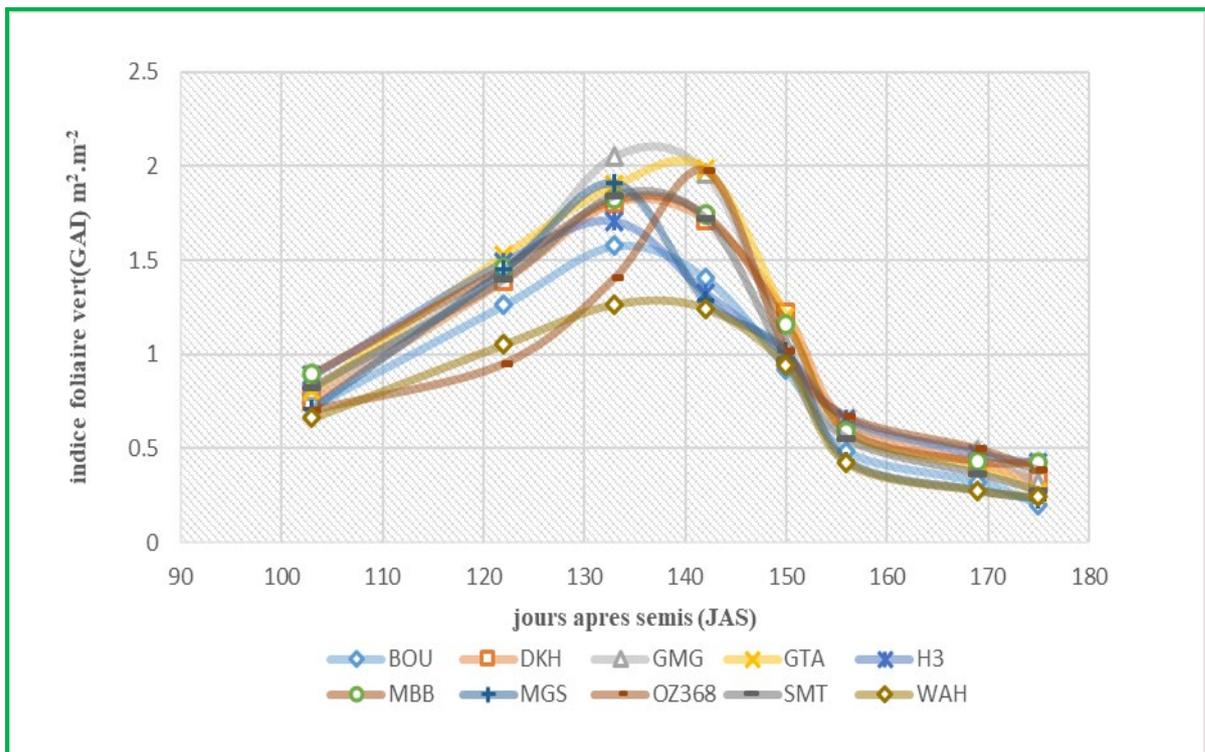


Figure 54. Effet interaction NJAS* Variété sur l'indice foliaire vert (GLAI) sur trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)

L'indice foliaire vert (GLAI) présente une grande importance dans l'interception de l'énergie lumineuse nécessaire à la photosynthèse. Il affecte la transpiration via les stomates et l'évaporation directe de l'humidité du sol. Ewert et Pleijel (1999) précisent qu'une valeur de 3 m²/m² est suffisante pour intercepter 100% de l'énergie lumineuse émise. De ce fait, les variétés évaluées développent un indice foliaire vert appréciable. Des valeurs élevées sont indicatrices selon Ewert et Pleijel (1999) de l'état de la croissance, du développement de la biomasse et du degré de la sénescence de la végétation. Les génotypes qui maintiennent un indice foliaire vert élevé, le plus longtemps possible, semblent plus tolérants aux stress dans des environnements variés (Rebetzke et al., 2016), cette adaptation écologique améliore le fitness des variétés en cas de sécheresse tardive (Christopher et al., 2020).

4. Variation des caractères physiologiques

4.1. La teneur en Chlorophylle (CHL)

La chlorophylle est un pigment vert photosynthétique qui absorbe les rayons lumineux bleu et rouge. Elle existe exclusivement dans les chloroplastes des cellules chlorophylliennes de la plante (Liang et al., 2016). L'abondance de la chlorophylle a un effet direct sur l'efficacité de radiation lumineuse et celle-ci influence le reste du métabolisme par sa fonction de producteur primaire (Asseng et al., 2019).

L'analyse de la variance pour la teneur en chlorophylle indique un effet significatif du génotype, année et interaction génotype x année (AxG) (Tableau 13).

Tableau 13. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la teneur en chlorophylle des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)

Sources de variation	ddl	CME
Bloc	3	34.30ns
Génotype(G)	9	143.26***
Année(A)	2	4240.49***
G*A	18	28.60**
Erreur	807	12.72

ns, * et ** : effet non significatif et significatif 5% et 1%

L'effet année significatif, révèle que la teneur en chlorophylle diffère significativement en fonction des années (Tableau 13). Ainsi, l'année 2015 se singularise par une teneur de 45,65 SAPDE, suivie par l'année 2016 avec 35,96 SAPDE. L'année 2014 présente la plus faible valeur 24,84 (Figure 55). La divergence interannuelle s'explique par les éléments liés au

climat. Ainsi, Kumari et *al.*, (2020) signalent que chez la plante subissant un stress thermique, tous ses processus génèrent une réduction de la teneur en chlorophylle, soit par blocage de sa biosynthèse, soit par accélération de sa dégradation. Toutefois, le manque d'eau provoque la diminution des pigments chlorophylliens, cette diminution est due à la fermeture des stomates et au manque de CO₂ (Mascher et *al.*, 2005) ce qui stimule le phénomène de peroxydation lipidique et par conséquent la destruction de la chlorophylle (Bouchemal et *al.*, 2018; Shin, et *al.*, 2019).

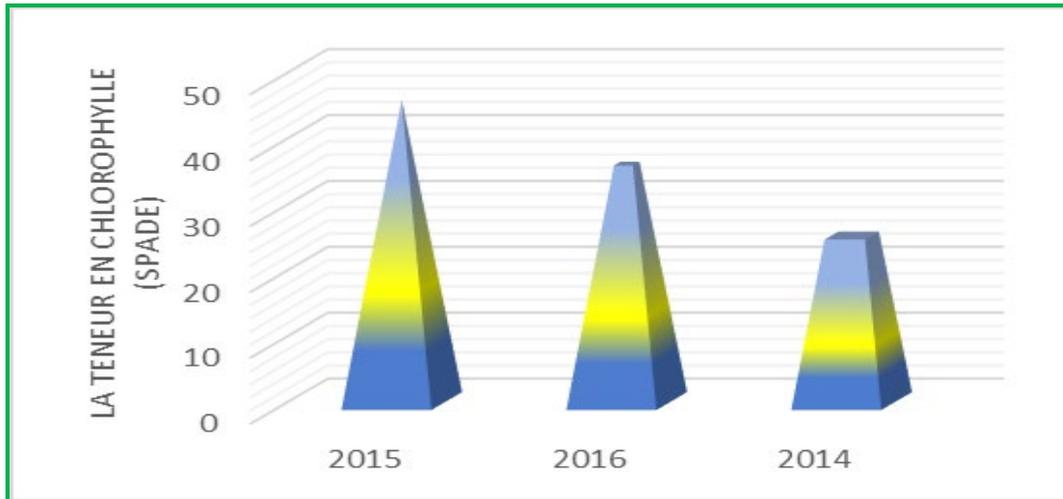


Figure 55. Effet année sur la teneur en chlorophylle

L'effet variété significatif s'identifie par le génotype MGS qui présente la meilleure valeur moyenne de 42.27 unités SPADE. BOU enregistre la valeur la plus faible, avec une moyenne de 31.4 unités SPADE (Figure 56). SMT, WAH, et DKH présentent des moyennes significativement supérieures à la moyenne générale (35,61 SPADE). GAT, O368, H3, MBB et GMG sont démarquées par des valeurs inférieures à la moyenne (Figure 56).

Hannachi (2017) signale la faible valeur du contenu en chlorophylle observée chez les variétés locales de blé dur telle que Guemgoum Rkhem. Chez le blé tendre, Fellahi (2017) note la même remarque chez le cultivar local Mahon Démiçais. Ceci suggère qu'une faible teneur en chlorophylle serait un facteur d'adaptation aux stress qui caractérisent les milieux semi-arides. Par contre Beche et *al.*, (2014) soulignent que la teneur en chlorophylle est un trait utile pour l'amélioration des génotypes à haut niveau de production. Certains travaux de recherche décrivent que la teneur en chlorophylle chez les variétés dites modernes est légèrement supérieure à celle des anciennes variétés.

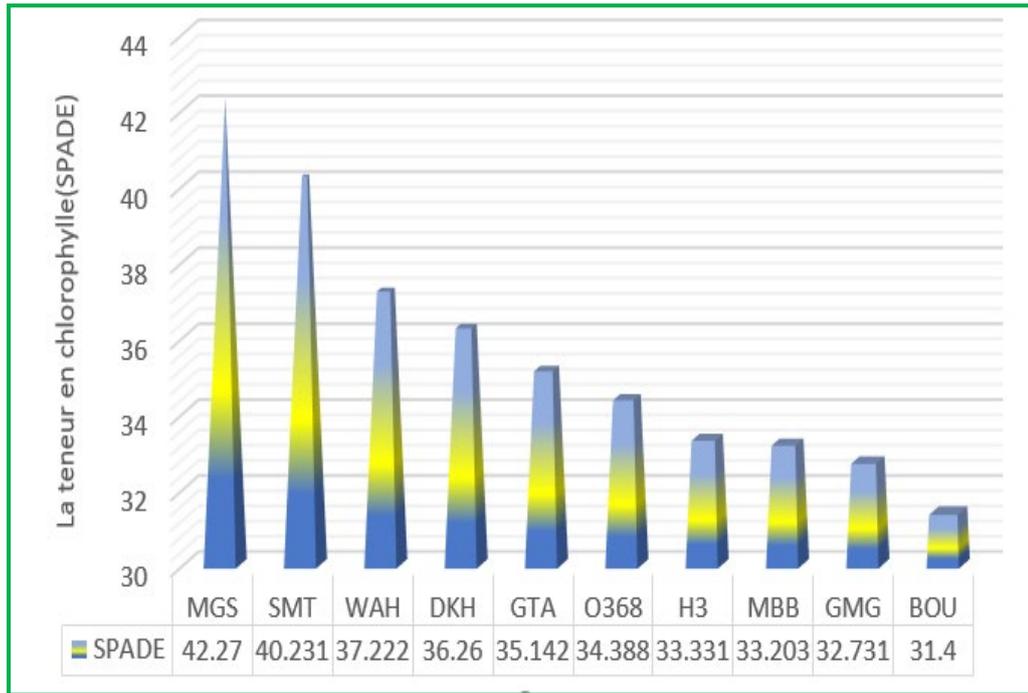


Figure 56. Effet génotype sur la teneur en chlorophylle

Ces résultats paraissent similaires à ceux notés par Ferras (2015). Cependant en environnement méditerranéen pluvial similaire, des valeurs variant de 49,2 SPAD à 55,9 SPAD ont été enregistrées chez 14 variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf) (Kiliç et Yağbasanlar, 2010). La diminution de la photosynthèse, qui fait suite à la réduction de la teneur relative en eau et du potentiel hydrique foliaire, est causée par la pénétration du CO₂ limitée par une fermeture des stomates.

La réduction de la teneur en chlorophylle est attribuée aux cultivars qui sont moins résistants à un effet de manque d'eau (Kiliç et Yağbasanlar, 2010; Khayatnezhad et al., 2011). Les auteurs rappellent l'utilité de l'eau dans la synthèse de la chlorophylle. La teneur en chlorophylle des feuilles est déterminée par de nombreux facteurs, d'une part de l'âge et la position des feuilles, et d'autre part, des composantes environnementales (Hikosaka et al., 2006). Toutefois, le stress hydrique est l'une des principales contraintes qui affecte le niveau de la teneur en chlorophylle chez la plante (Kiliç et Yağbasanlar, 2010; Khayatnezhad et al., 2011; Ali et al., 2020). Les génotypes qui ont la capacité photosynthétique intrinsèque la moins affectée par le déficit hydrique présentent une efficacité de l'utilisation de l'eau plus élevée et donc une plus grande capacité de survie (Araus et Labrana, 1991). L'augmentation de la teneur en chlorophylle après l'anthèse est corrélée positivement et modérément avec

l'indice de récolte, la température de canopée feuilles, les glucides solubles et le rendement en grains (Lopes et *al.*, 2012; Gao et *al.*, 2017).

4.2. La température de la canopée (TC)

Depuis les années soixante, la température de la canopée (TC) est utilisée pour le phénotypage des cultures (Fuchs et Tanner, 1966). L'utilisation de la TC est fondée sur le fait que les feuilles sont refroidies par évapotranspiration, de façon que les températures diminuent relativement au taux d'évapotranspiration. C'est pourquoi, la faible TC est liée à l'ouverture des stomates et un rythme de transpiration plus élevé, alors qu'en revanche, la fermeture stomatique et la diminution du rapport de transpiration se traduisent sous forme de TC plus chaude (Jones et Vaughan, 2010; Maes et Steppe, 2012).

Au stade épiaison et durant trois campagnes successives, et dix variétés divergentes de blé dur, l'analyse de la variance relève un effet hautement significatif pour le génotype et l'année tandis que l'interaction est non significative (Tableau 14).

Tableau 14. Carrés moyens de l'analyse de la variance de la température de canopée des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).

Source	ddl	CME
Bloc	3	1.0 ns
Génotype(G)	9	16.14***
Année(A)	2	1003.85***
G*A	18	2.36 ns
Erreur	807	1.47

ns, * et ** : effet non significatif et significatif 5% et 1%

Selon les années, les valeurs moyennes de la température de la canopée varient de 22,45°C à 31.71°C avec une plus petite différence significative de 0.78°C, l'année 2015 enregistre la plus haute valeur tandis que l'année 2014 était la plus faible. La température de la canopée est fortement influencée par les facteurs climatiques, édaphiques et intrinsèques de la variété.

En fonction des génotypes et sous les trois campagnes d'expérimentation, la température de canopée prend des valeurs comprises entre 29,45°C et 26,88°C avec une plus petite différence significative de 1,85°C. Les génotypes prennent les valeurs de 26,55 °C, 26,81 °C, 26,88 °C, 27,66 °C, 28,25 °C, 28,29 °C, 28,67°C, 29,45°C, 29,55°C et 29,55°C, pour les variétés *GMG*, *O368*, *H3*, *DKH*, *MGS*, *MBB*, *BOU*, *SMT*, *WAH* et *GAT* (Figure 57). Cet ordre montre que les variétés anciennes sont plus tolérantes au stress hydrique, elles marquent une

température de canopée faible et cela signifie que le phénomène de transpiration n'est pas interrompu. Le génotype MGS marque l'exception par sa réponse au stress hydrique qui se caractérise par une température fraîche au voisinage des feuilles et cela signifie aussi une forte évapotranspiration et une activité photosynthétique potentielle.

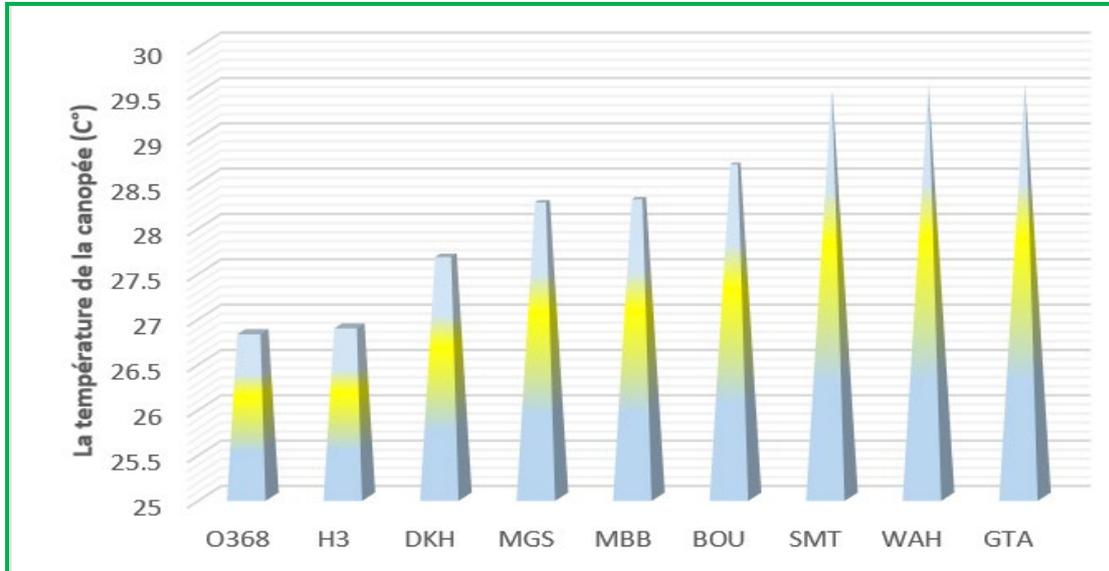


Figure 57. Effet génotype sur la TC au cours de trois campagnes consécutives

Pietragalla (2012) considère que les génotypes avec des températures plus fraîches se distinguent par un bon statut d'hydratation. Selon Royo et *al.*, (2002), la capacité des plantes à maintenir une température foliaire basse est une indication de leur forte capacité à extraire l'eau du sol et à se rafraichir par transpiration. Les variétés maintiennent une activité photosynthétique élevée autorisant un rendement plus élevé sous stress terminal. La mesure de la température de la canopée a bénéficié d'un certain intérêt comme une technique de criblage pour la résistance au stress. Ce paramètre très intéressant mérite plus de mesures et recommande plus d'attention pour être plus fiable et contribue ainsi à des interprétations plus logiques dans les aspects du comportement variétal. Balota et *al.*, (2008) prononcent l'importance de la valeur de la température dans l'intensité des échanges gazeux chlorophylliens. Par ailleurs, il est à distinguer que pendant 30 ans d'expérimentation, les améliorateurs du blé de printemps au niveau du CIMMYT; ont pu baisser la température de canopée de 30 à 29 °C (Lopes et *al.*, 2012). Dans le même sens, et en Chine, Gao et *al.*, (2017) affirment que les gains génétiques en température de canopée ont augmenté de 0,12 % par an pour les cultivars de blé.

4.3. La teneur relative en eau (TRE)

La teneur relative en eau (TRE) exprimée par Slatyer en 1967 *In* Santín Montanyá *et al.*, (2020) est un bon indicateur de l'état du bilan hydrique d'une plante, essentiellement parce qu'elle exprime la quantité absolue d'eau dont la plante a besoin pour atteindre une saturation artificielle complète. Il y a donc une relation entre la TRE et le potentiel hydrique. Cette relation varie considérablement selon la nature et l'âge du matériel végétal (Tableau 15).

Tableau 15. Carrés moyens de l'analyse de la variance de teneur relative en eau des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)

Sources de variation	ddl	CME
Bloc	3	25.71 ns
Génotype(G)	9	94.57**
Année(A)	2	2798.95***
G*A	18	75.06**
Erreur	807	31.55

ns, * et ** : effet non significatif et significatif 5% et 1%

La teneur relative en eau au sein de la plante varie entre 68 % et 84 % dans les bonnes conditions hydriques, et de 45 % à 63 % sous déficit hydrique (Radhouane, 2008). Les niveaux en teneur relative en eau inférieures à 80 % imposent un potentiel hydrique de -1,5 MPa ou moins, ce qui produirait des changements dans le métabolisme avec l'arrêt de la photosynthèse, l'augmentation de la respiration et l'accumulation de la proline ainsi que l'acide abscissique (Wang, *et al.*, 2011).

Le carré moyen de l'analyse de la variance indique un effet significatif de l'année, génotype et leurs interactions (Tableau 16). La teneur relative en eau change en fonction de l'année, les valeurs moyennes indiquent que l'année 2015 enregistre une valeur de 89.72% suivi par l'année 2016 avec 86, 91%. La plus basse valeur est relative à l'année 2014 (74,03 %). Ces résultats reflètent l'état hydrique du sol ainsi que les précipitations avant les dates de prélèvement, un sol lourd possédant une capacité de rétention élevée peut maintenir une teneur relative en eau élevée. La chute de pluie avant la date de prélèvement provoque la diminution du potentiel hydrique du sol, ce qui offre un confort hydrique à la plante et par conséquent une nette augmentation de la teneur relative en eau (Peycru *et al.*, 2014).

Selon les variétés, les résultats indiquent que la TRE varie de 88,25 % chez H3 à 78,85 % MGS (Figure 58). Ces résultats corroborent ceux de Najem (2012) et Ferras (2015), mesures notées sur la culture du blé dans les mêmes conditions pédo-climatiques. La teneur relative en eau est un indicateur de l'état hydrique de la plante (Bajji et al., 2001). Mullan et Pietragalla (2012) aperçoivent que ce paramètre traduit une mesure du déficit hydrique de la feuille. Dès lors, Clarke et al., (1991) suggèrent que la TRE est un critère de criblage pour la sélection des lignées tolérantes à la contrainte hydrique.

Beltrano et Ronco (2008) indiquent que la turgescence foliaire est un bon indicateur du statut hydrique de la plante. La contenance en eau des feuilles de blé dépend du stock d'eau dans le sol. En revanche, la TRE diminue proportionnellement avec la réduction d'eau contenue dans le sol (Bajji et al., 2001). La TRE est liée aussi au système d'adaptation de la plante. En effet, certaines plantes ont le pouvoir de fermer leurs stomates sous l'effet de fortes températures et du manque d'eau (Slafer et Andrade, 1990). La teneur relative en eau (TRE) est un paramètre hautement influencé par le stress hydrique et qui décrit la capacité de la plante à se maintenir hydratée en conditions déficitaires (Bousba et al., 2013).

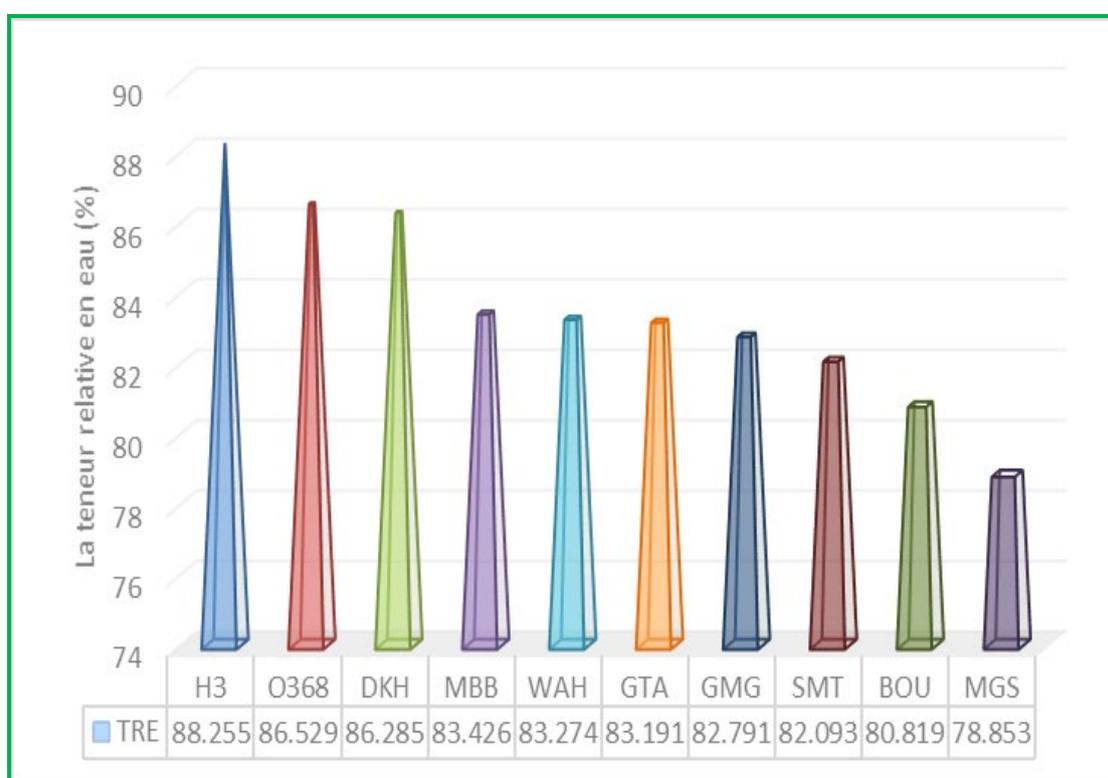


Figure 58. Effet génotype sur la teneur relative en eau (%)

4.4. L'indice d'intégrité cellulaire (IC)

Les modifications de la composition de la membrane cellulaire induites par les hautes températures peuvent jouer un rôle dans la stabilité de ces protéines, ce qui entraîne des effets positifs sur la croissance des plantes entières dans un milieu qui se caractérise par un stress thermique accru (Singh et *al.*, 2014). Sur cette base, l'indice d'intégrité cellulaire apprécie la sensibilité de la membrane cellulaire de la plante sous stress thermique.

L'analyse de la variance reflète un effet différentiel significatif chez les génotypes étudiés, l'année, l'interaction Année*génotype (Tableau 16). En effet, le seuil de sensibilité de la structure membraneuse diffère d'une manière significative d'un génotype à l'autre. La tolérance des membranes cellulaires face à la contrainte hydrique est l'un des mécanismes de résistance à la sécheresse le plus efficace chez les plantes.

Tableau 16. Carrés moyens de l'analyse de l'intégrité cellulaire des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16).

Sources de variation	ddl	CME
Bloc	3	90.57 ns
Génotype(G)	9	264.31**
Année(A)	2	2459.82***
G*A	18	249.98***
Erreur	807	44.84

ns, * et ** : effet non significatif et significatif 5% et 1%

L'année d'expérimentation affecte significativement l'indice de l'intégrité cellulaire des génotypes et cela est due à la variation des stress thermiques exercé par le climat. L'année 2015 enregistre la plus basse valeur avec un indice de 79.74%, suivi par l'année 2014 avec une valeur de 80.10 %, l'année 2016 est marquée par un indice d'ordre de 93.50 %.

Les dix génotypes testés ont un indice d'intégrité cellulaire moyen de 84.45 %. C'est un pourcentage bien expressif, en occurrence déterminant de la sensibilité des génotypes. En revanche, les résultats indiquent que l'intégrité cellulaire varie de 76.15 % pour MBB à 91.31 % pour MGS qui se montre plus vulnérable aux stress. BOU et WAH prennent respectivement les valeurs de 85.74% et 82.90 % (Figure 59).

Ces résultats sont similaires à ceux examinés sur le site expérimental (Ferras, 2015).

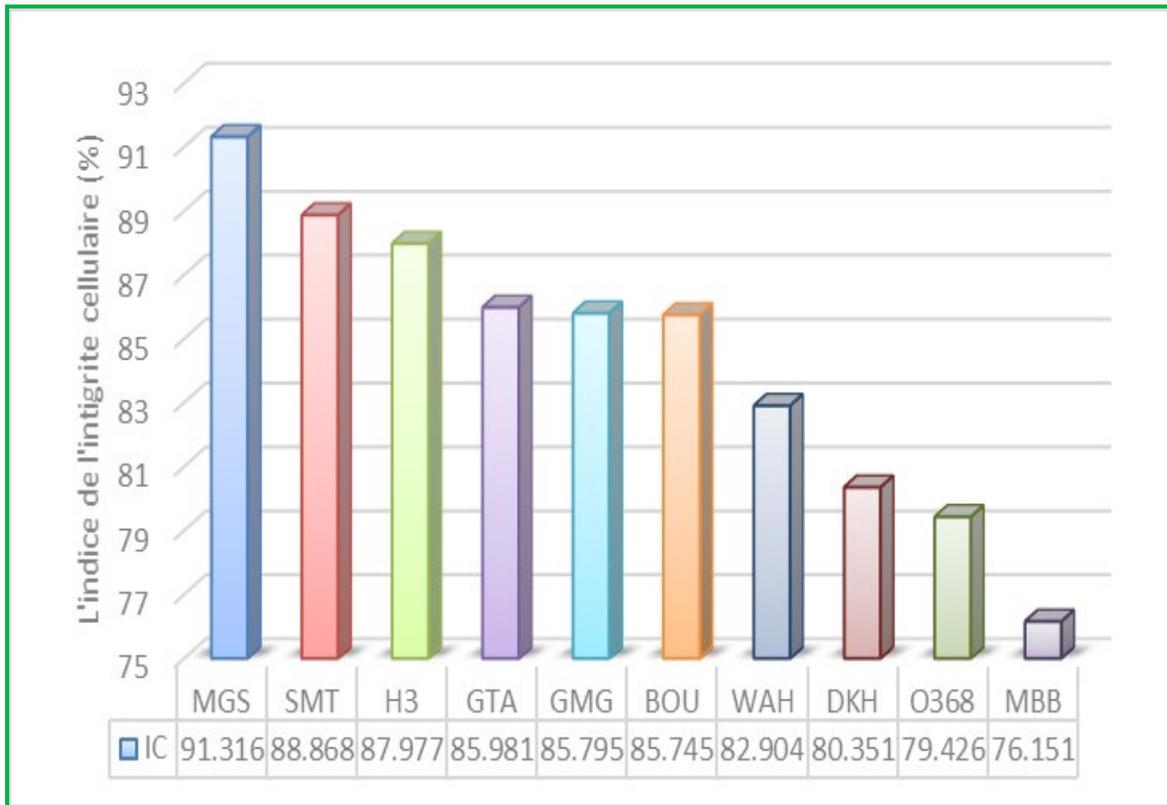


Figure 59. Effet de la variété sur l'intégrité cellulaire au cours de trois campagnes agricoles Successives

Benmahammed et *al.*, (2008) retracent la sensibilité de la variété WAH, en effet WAH présente une valeur moyenne de dommage significativement plus élevée que MBB et BOU, ces résultats renforcent donc les nôtres qui prédéterminent que les variétés précoces sont plus sensibles au stress. Les contraintes hydrique et thermique affectent d'une manière significative la membrane cellulaire chez le blé. La région des Hauts Plateaux Sétifiens se distingue par un déficit hydrique sévère qui se positionne sur les stades de tallage, d'épiaison et de remplissage du grain (Chennafi, 2012). La dégradation de la membrane cellulaire et la réduction de la teneur relative en eau de la feuille chez le blé deviennent remarquables et se localisent au niveau du second cycle de la plante où l'eau se fait rare (Chennafi et *al.*, 2006; Jager et *al.*, 2014).

Seidler-Lozykowska et *al.*, (2010) notent que parmi les divers caractères de résistance au stress thermique et hydrique visés par les obtenteurs, figurent la teneur totale en chlorophylle et la stabilité des membranes cellulaires considérés comme les paramètres physiologiques les plus affectés par le stress. En revanche au début des stress, la membrane cellulaire est la première barrière touchée, du coup; dans des conditions de stress, le maintien de l'intégrité

cellulaire est considéré comme un indicateur majeur de tolérance à la chaleur et à la sécheresse pour les plantes cultivées (Blum et Ebercon, 1981).

4.5. Le poids spécifique de la feuille étandard (PSFE)

L'épaisseur de la feuille joue un rôle important dans le fonctionnement des feuilles des céréales. Il est lié aux stratégies d'acquisition et d'utilisation des ressources disponibles pour la plante (Vile et *al.*, 2005). L'épaisseur de la feuille des céréales est mesurée en fonction de la surface foliaire spécifique.

L'analyse de la variance du poids spécifique de la feuille étandard montre un effet année hautement significatif qui explique l'essentiel de la variation mesurée. L'effet principal (variété) est significatif, ainsi que l'interaction (Tableau 17). Ces résultats suggèrent que le poids spécifique de la feuille étandard est largement déterminé par la variation saisonnière, cependant l'effet variété reste déterminant. En effet les valeurs annuelles mesurées varient de 10.08 mgcm⁻², moyenne de la 1ère année à 8.43 mgcm⁻² celle de la 3ème année; la moyenne de la deuxième année étant de 9.80 mgcm⁻² (Figure 60).

Tableau 17. Carrés moyens de l'analyse de la variance du poids spécifique de la feuille étandard des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/14 à 2015/16)

Sources de variation	ddl	CME
Bloc	3	0,36 ns
Génotype(G)	9	30,36 **
Année(A)	2	31,43 ***
G*A	18	27,14 **
Erreur	807	2,08

ns, * et **: effet non significatif et significatif 5% et 1%

Ces résultats semblent logiques puisque le poids spécifique est fortement affecté par la disponibilité en eau, l'année 2016 était une année pluvieuse en période printanière, et cela justifie la plus faible valeur enregistrée tandis que l'année 2014 était marquée par un stress hydrique accru installé depuis la période de l'épiaison. Kramer (1969) spécifie que le déficit hydrique génère un épaissement de la feuille. Le poids spécifique de la feuille étandard reflète l'état hydrique du sol, un sol assurant une bonne alimentation hydrique à la plante affecte directement les traits de la feuille étandard et surtout la surface foliaire, sa croissance rapide produit des feuilles minces et donc un faible poids spécifique.

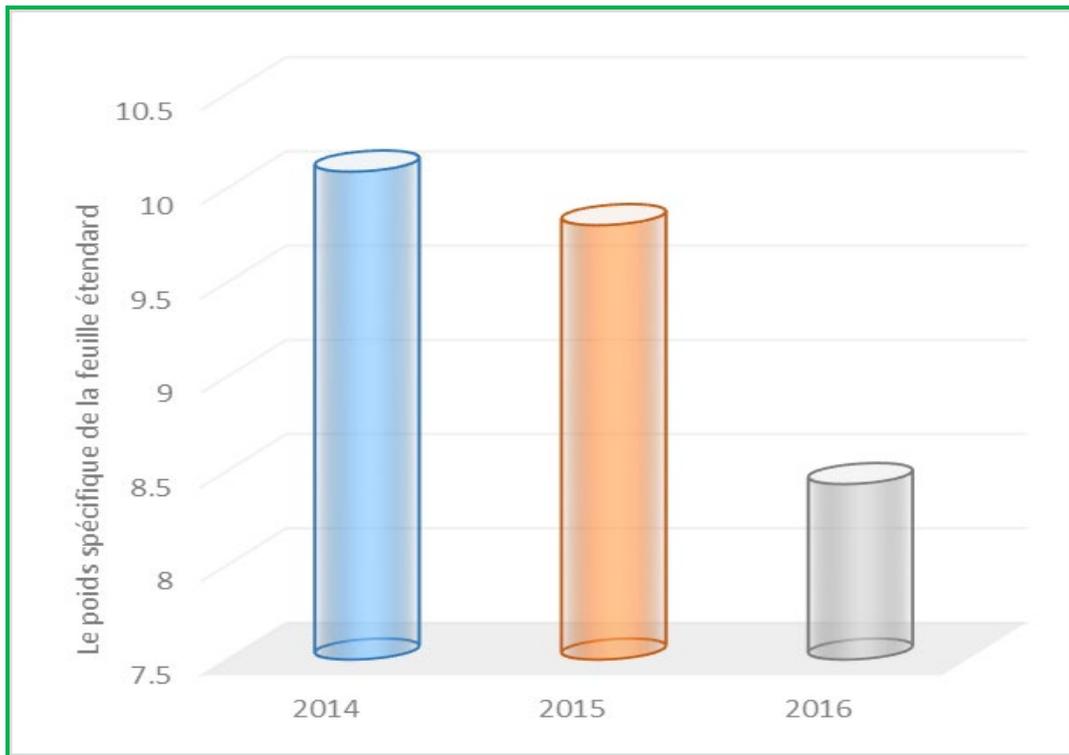


Figure 60. Effet année sur le poids spécifique de la feuille étendard de dix variétés de blé conduites sur trois campagnes successives

Les valeurs moyennes variétales varient de 11,67 mgcm⁻² pour OZ368 à 7,11 mgcm⁻² valeur mesurée chez GAT (Figure 61). On souligne que cette variation montre un effet principal (variété) hautement significatif (Tableau 18), la différence entre les valeurs extrêmes indique que OZ368 sort du lot des variétés testées par sa valeur moyenne élevée du poids spécifique de la feuille étendard (Figure 61).

Lambers et Poorter (1992) jugent que les variétés à faible poids spécifique de la feuille étendard sont caractérisées par des concentrations élevées en azote; taux élevés d'absorption de CO₂ et d'azote (N) par unité de masse foliaire et racinaire, respectivement; et un taux élevé de photosynthèse par unité de N foliaire. Par contre les variétés ayant un poids spécifique fort, ont une teneur élevée en matière sèche, de fortes condensations de parois cellulaires et de composés secondaires, avec une plus grande longévité des feuilles et des racines (Choong et al., 1992; Ryser, 1996; Reich, 1998). Les variétés qui possèdent des feuilles plus épaisses peuvent avoir plus de cellules mésophylliennes, ce qui pourrait se traduire par une augmentation du taux de photosynthèse (Ouyang et al., 2017).

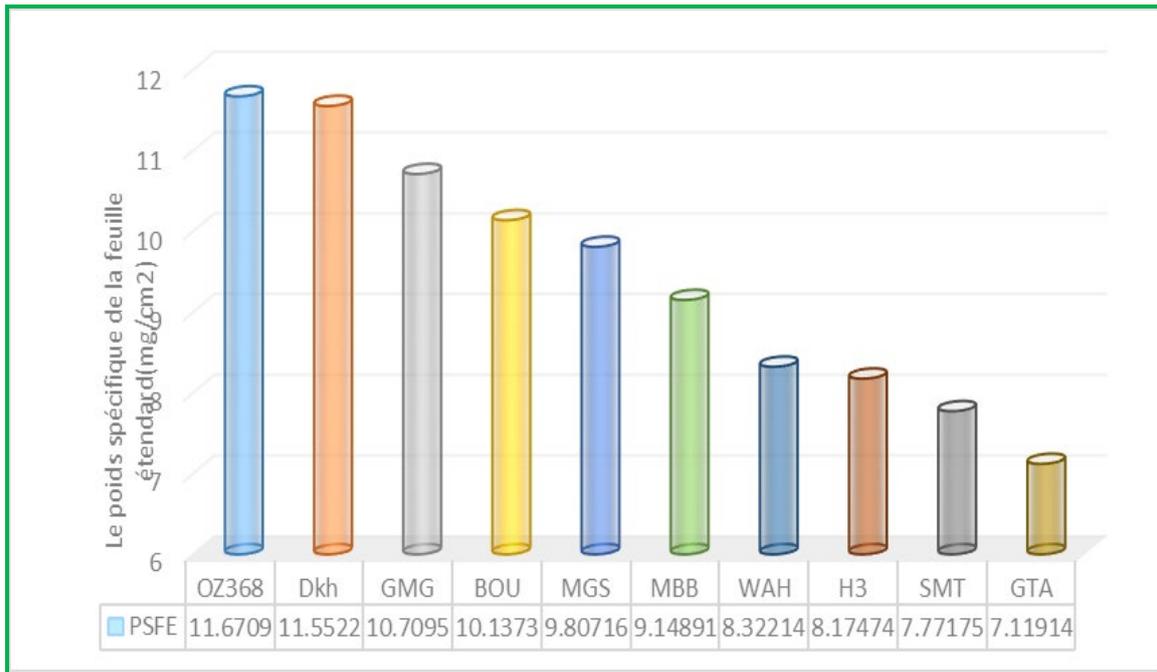


Figure 61. Effet moyen génotype sur le poids spécifique de la feuille étendard de dix variétés de blé conduites sur trois campagnes successives

Les cultivars dont le poids spécifique de la feuille étendard est faible sont plus efficaces dans les milieux riches en ressources, tandis que les espèces dont le poids spécifique de la feuille étendard est élevé sont plus efficaces dans les milieux pauvres en ressources, de sorte que la plupart des plantes qui poussent sur les dunes de sable semblent avoir un poids spécifique foliaire élevé en raison de leur adaptation à des environnements pauvres en ressources (Li et *al.*, 2005). Le poids spécifique de la feuille étendard est lié à la tolérance à la sécheresse et a été suggéré critère de sélection pour les programmes de l'amélioration des céréales visant les zones à faible précipitations. Les génotypes à feuilles épaisses ont des feuilles dont le rapport surface/volume est faible, donc considéré un avantage dans l'utilisation efficace de l'eau (Pang et *al.*, 2014).

5. Efficience d'Utilisation de L'Eau (EUE)

5.1. Variation des composantes liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau

Les hautes plaines orientales se caractérisent par une grande variabilité du régime pluviométrique enregistré par saisons. Ce régime présente une distribution bimodale avec absence presque totale de pluies au cours de l'été et une partie de l'automne et une présence plus abondante au cours de l'hiver-début printemps (Chennafi et *al.*, 2006). Dès lors, la

recherche sur l'efficacité d'utilisation de l'eau devient fondamentale pour élaborer un outil de management de la valorisation de l'eau au profil de la plante.

Le tableau 19 présente l'analyse de la variance qui montre les carrés moyens et les tests de signification pour les paramètres étudiés de L'EUE de 10 géotypes sélectionnés dans les conditions semi-aride de Sétif. Des différences hautement significatives ($P < 0,001$) ont été observées entre les géotypes pour les paramètres estimés caractéristiques de l'efficacité d'utilisation de l'eau pluviale, ce sont principalement *ET*, *T*, *Es*. Les résultats révèlent la divergence significative pour ces composantes de l'EUE sous l'effet du géotype, année, ainsi que celui de l'interaction G*A (Tableau 18).

Tableau 18. Carrés moyens de l'analyse de la variance des composantes de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) des dix variétés évaluées au cours de trois campagnes consécutives (2013/2014 à 2015/2016)

Source	Année (A)	Répétition/(A)	Géotype (G)	A x G	Erreur
dl	2	3	9	18	87
ET	31269.39***	45.56 ^{ns}	665.26***	665.269***	23.42
T	369462.46***	234.47 ^{ns}	2237.97***	3681.42***	222.04
Es	349082.84***	137.07 ^{ns}	1727.17***	2191.41***	171.96
EUEBIO	4807.08***	4.96 ^{ns}	37.23***	38.96***	3.06
EUEPLL	2118.69***	2.04 ^{ns}	87.51***	24.42***	1.77
EUERDT	607.58***	0.79 ^{ns}	35.26***	9.77***	0.57
EEUEBIO	342.12***	9.5*10 ^{-4ns}	3.00***	3.00***	0.06
EEUEPLL	99.24***	0.47 ^{ns}	104.09***	5.68***	1.51
EEUERDT	292.67***	0.60 ^{ns}	108.27***	5.37***	1.34

L'évapotranspiration (ET) quantifiant la quantité d'eau évaporée du sol et celle liée à la transpiration reste dépendante de la campagne agricole (Figure 62). Ainsi, les résultats engendrent le classement des campagnes selon les niveaux de l'ET (mm).

$[285,46\text{mm} (2013/2014) < 301,37\text{mm} (2015/2016) < 339,89\text{mm} (2014/2015)]$.

Les écarts entre campagnes pour l'ET sont de $54,43\text{mm}$ et de $38,46\text{mm}$ entre la campagne de (2014/2015) relativement et dans l'ordre à (2013/2014) et (2015/2016).

Ce gradient de l'ET est régi par les conditions agropédoclimatiques dans le continuum sol plante atmosphère et qui engendrent des conséquences sur l'évaporation du sol (ES), la

transpiration de la plante (T). Yang et *al.*, (2011) déclarent que la production et l'utilisation de l'eau par le blé dur, sont fortement affectées par la variabilité et le changement climatiques.

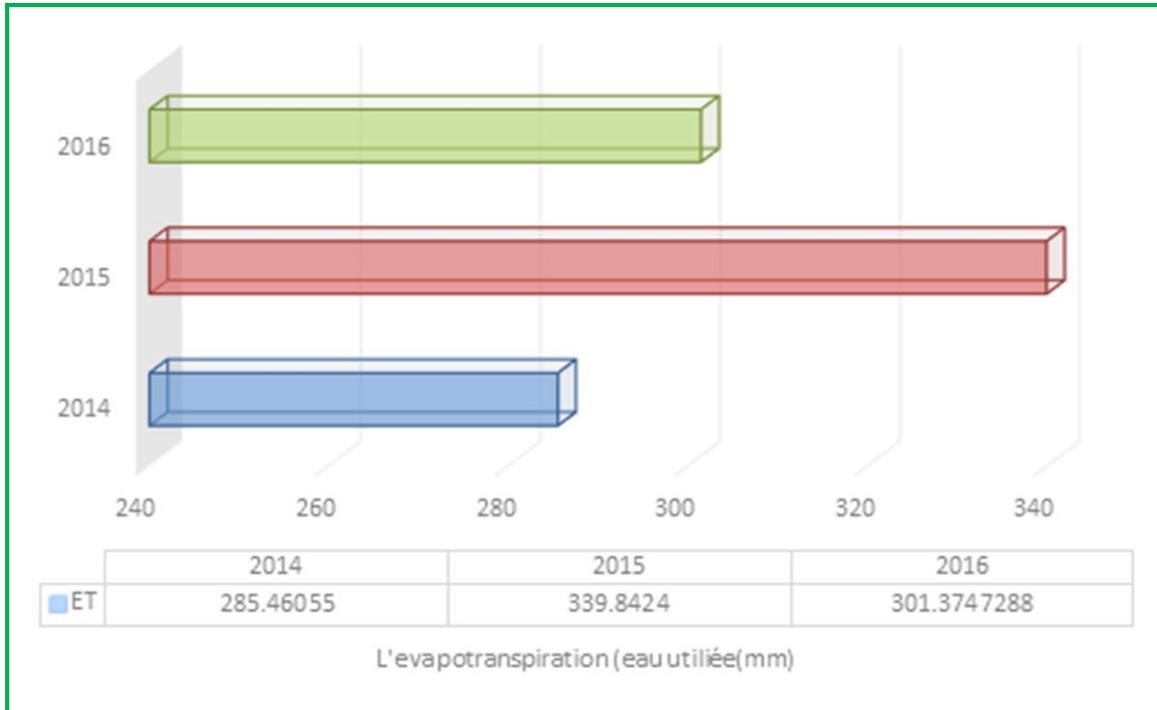


Figure 62. L'ET (mm) des génotypes sous l'effet campagne agricole (2014, 2015 et 2016)

La quantité d'eau transpirée (T, mm) et celle évaporée du sol (Es, mm) sous l'effet significatif du génotype et sur les trois campagnes agricoles (2014, 2015 et 2016), sont décrites en graphique (Figure 63). Dès lors, les niveaux déterminent que les moyennes des quantités d'eau transpirées par les variétés et au cours des trois campagnes de l'expérimentation (Figure 63) varie de 207,43 mm pour le génotype H3 à 166,57 mm pour SMT, la moyenne de T est 189,29 mm (Figure 63). Cependant, l'analyse de l'estimation des l'Es indiquent que le génotype H3 lui correspond la faible valeur de $l'Es = 102,8 \text{ mm}$. La valeur maximale de la quantité d'eau évaporée du sol est aperçue sur l'espace du génotype SMT avec $Es = 137,41 \text{ mm}$. Toutefois, la moyenne de la quantité d'eau évaporée du sol est estimée à $119,60 \text{ mm}$. Ces résultats illustrent la quantité d'eau perdue directement à travers le sol et donc non valorisée par la plante. *Ces résultats recommandent l'attention pour porter des commentaires de management et de monitoring pour la gestion de l'agrosystème en conditions pluviales des Hauts Plateaux Sétifiens.*

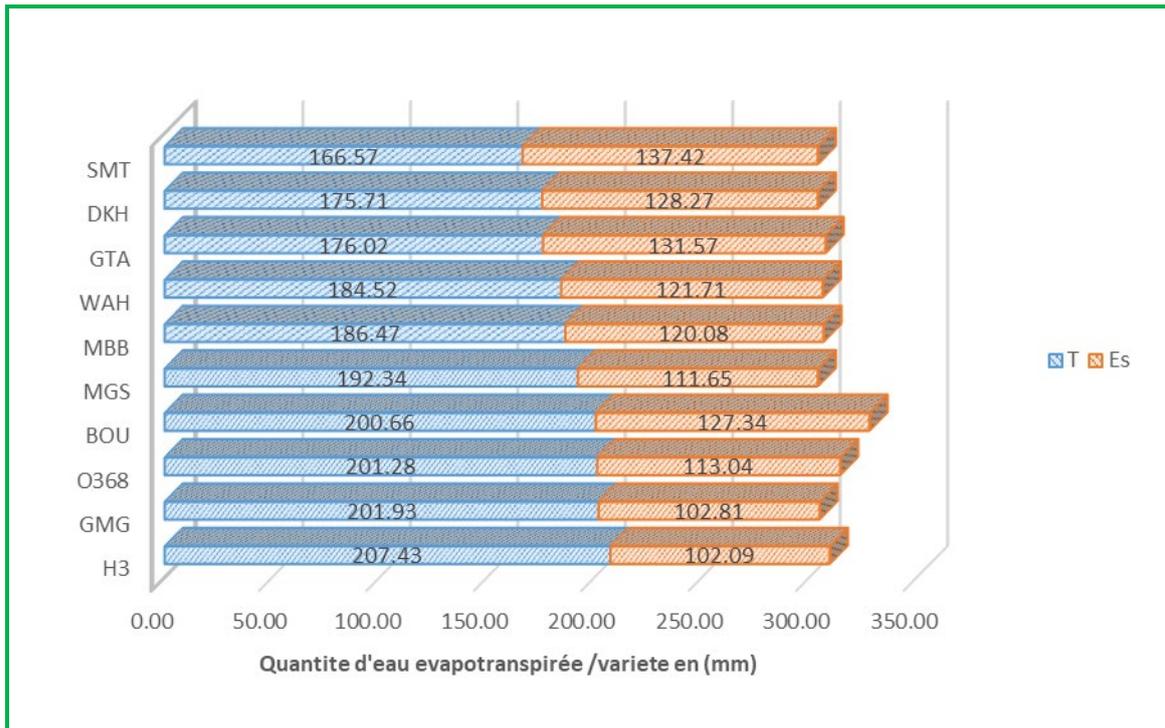


Figure 63. Transpiration de la plante (T, mm) et Evaporation de l'eau du sol (Es, mm) sous l'effet génotype sur les trois campagnes agricoles (2014, 2015 et 2016)

Ces résultats corroborent ceux élaborés par Cooper *et al.*, (1983) indiquant que l'Es varie de 120 mm à 137 mm pour un blé mené en pluvial, avec des précipitations de 372 mm, ce qui était semblable à la moyenne des précipitations dans notre étude. La valeur moyenne d'Es dans cette étude est proche des valeurs de 95.0 à 110.0mm enregistrées en Australie du Sud (French et Schultz, 1984) et en Nouvelle-Galles du Sud, Australie (Condon *et al.*, 1993).

Les résultats indiquent que l'Es saisonnière est exprimés par rapport à l'ET des variétés étudiées est de 32% pour H3, de 45% pour SMT. Ces valeurs sont proches de celles rapportées pour le blé et l'orge dans des conditions similaires dans le nord de la Syrie (Cooper *et al.*, 1987) et pour le blé dans la région aride en Australie (Condon *et al.*, 1993; Siddique *et al.*, 1990). Sadras *et al.*, (2005) souligne que l'Es/ET pour le blé varie de 33% à 59% ce qui est nettement supérieur aux valeurs que nous avons trouvées. Unkovich *et al.*, (2018) rapportent que l'Es est une composante liée directement aux conditions climatiques, au choix de la variété, au travail de sol, et à la fertilisation azotée, en fonction des pratiques de labour du sol (Belagrouz et Chennafi, 2016).

5.2. Efficacité d'utilisation de l'eau relative à RDT, PLL et BIO

L'analyse de variance indique un effet significatif du génotype, année et de l'interaction $G \times A$ pour *EUEBIO*, *EUEPLL*, *EUERDT*, *EEUEBIO*, *EEUEPLL* et *EEUERDT* (Tableau 19).

L'effet variété influence l'EUE pour réaliser les rendements en grain, la paille et la biomasse aérienne (Figure 64). Ainsi, l'efficacité d'utilisation de l'eau (*EUEBIO*) pour produire de la biomasse aérienne achevée au cours du cycle de croissance, le génotype GMG avec $23,50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ semble le plus efficace, suivi successivement par H3, OZ368, BOU, MBB avec les valeurs $23,41 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $23,01 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $23,00 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $21,08 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Et SMT marque la plus faible valeur de l'*EUEBIO* avec $19,09 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Figure 65). Ces résultats sont similaires à des travaux réalisés (Siddique *et al.*, 1990; Chennafi *et al.*, 2008; Latrèche, 2011; Ferass, 2015; Belagrouz *et al.*, 2018).

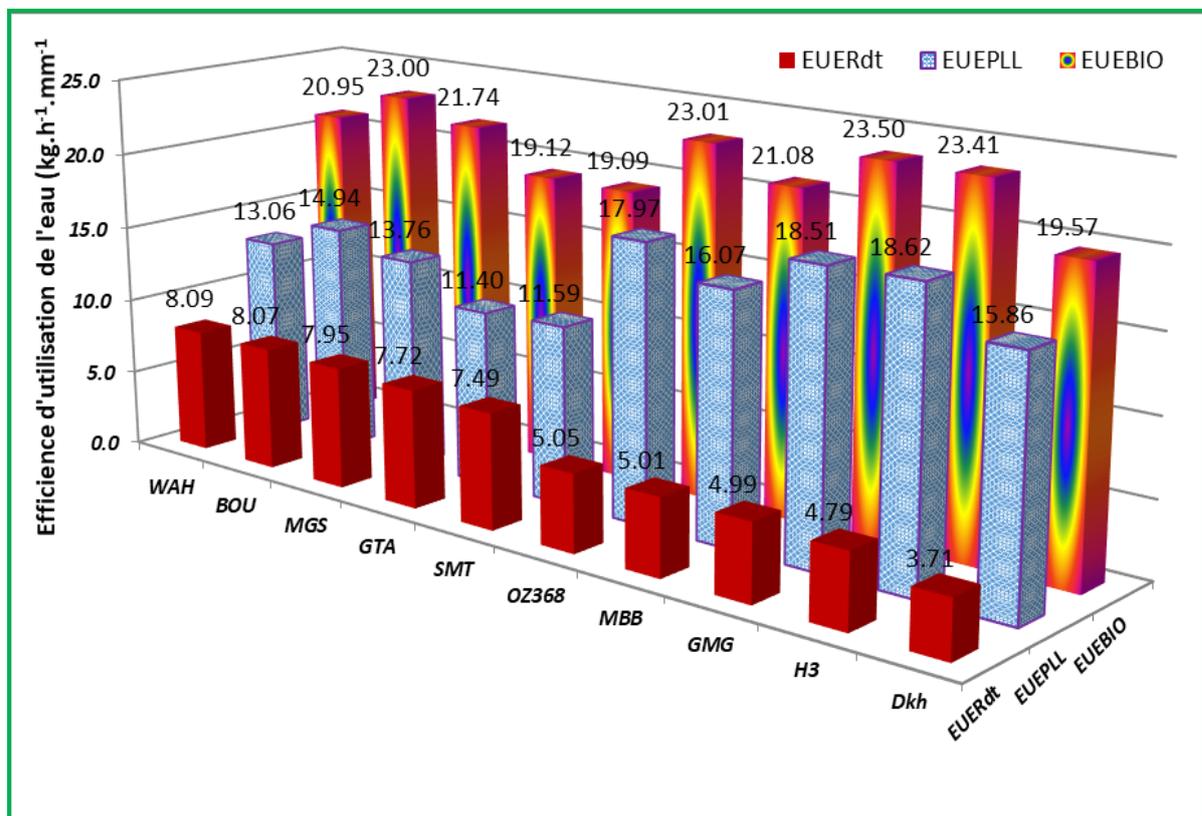


Figure 64. L'EUE ($\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) chez les variétés testées pour produire le RDT, PLL et BIO

Par ailleurs, l'efficacité d'utilisation de l'eau pour réaliser le rendement en paille (*EUEPLL*), la variété H3 apparaît valorisante pour l'eau, avec $18,86 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Figure 64). Elle est suivie par GMG qui se caractérise par $18,51 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Toutefois GTA est

considérée la moins efficace pour l'eau pour produire la paille, avec $10,40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. A travers les résultats, il semble que les variétés tardives utilisent l'eau pour produire plus de la paille que du grain, suggestion appréciée par le fait que ces variétés sont à paille haute, un cycle végétatif long coïncidant avec un stress hydrique s'installant lors des stades de maturation des grains. Cette qualification rejoint les fondements élaborés par Liu et *al.*, (2017) qui mentionnent que les variétés tardives ont la tendance à produire plus de paille que de grains dans les environnements semi arides.

Pour produire du grain, WAHA se détermine par l'EUERDT avec $8,09 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Elle est suivie respectivement par les génotypes, BOU, MGT, GTA et SMT, dont l'EUERDT prennent les niveaux de $8,07 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $7,95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $7,72 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $7,42 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Le génotype DKH se détermine comme le moins efficace pour l'eau pour RDT, avec $3,71 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, l'écart relatif est de 54,14% en son détriment et relativement à WAH (Figure 64).

5.3. Efficacité effective d'utilisation de l'eau relative à RDT, PLL et BIO

L'efficacité effective d'utilisation de l'eau par le génotype (E_{eue} , $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) représente le quotient des rendements de BIO, RDT et de PLL sur la quantité d'eau transpirée (T , mm) (Figure 65). Cette dernière est estimée à partir de la matière sèche accumulée. Les résultats montrent que la variété GMG apparaît plus efficace pour la valorisation de l'eau, avec $35,96 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ et forme un groupe indépendant avec un $\text{ppds}_{5\%} = 0,20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. La moins efficace de manière effective est GTA ($33,84 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) (Figure 65). En région semi-aride, Christy et *al.*, (2018) indiquent que E_{eueBIO} varie de 30 à $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Des résultats très proches ont été notés (Solomon et Labuschagne, 2003; Belagrouz, 2013; Ferras, 2015).

Une nette variation observée entre les cultivars testés pour l'efficacité effective d'utilisation de l'eau pour produire le rendement en paille (E_{euePLL}), le génotype H3 se distingue par la valeur moyenne de E_{euePLL} la plus élevée avec $27,96 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, il est suivi par DKH et OZ368 qui détiennent les valeurs suivantes $27,89 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ et $27,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Les plus faibles valeurs sont enregistrées par les génotypes MGS, SMT, GTA qui prennent $21,79 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $21,24 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $21,10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ respectivement (Figure 65). Ces résultats corroborent ceux mentionnés par Annichiano et *al.*, (2005). En plus Morgounov et *al.*, (2016) estiment que les variétés anciennes valorisent l'eau pour produire la paille au lieu des grains, dès lors 74 à 80% des agriculteurs céréaliers préfèrent les variétés anciennes pour

la PLL et qui se caractérise par une bonne qualité nutritionnelle, d'où la facilité de leur intégration dans le système céréales élevage.

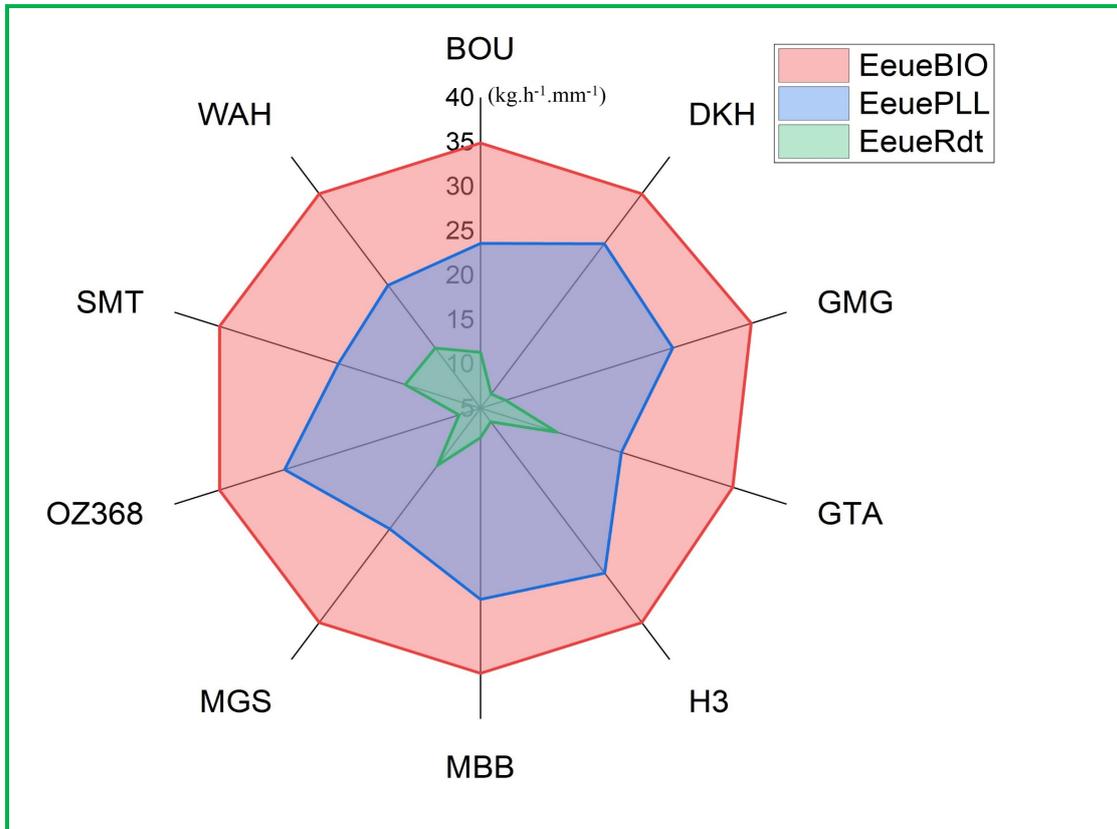


Figure 65. EeueBIO, EeuePLL et EeueRdt des variétés testées sur les trois campagnes

Les résultats sur l'efficacité effective d'utilisation de l'eau pour produire le rendement en grains (EeueRdt), déterminent une nette variabilité observée entre les cultivars testés (Figure 65). Bornant la $ppds5\% = 0,93 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, GTA, SMT, WAH et MGS engendrent un groupe indépendant et homogène, et prennent les valeurs les plus hautes avec $13,75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $13,61 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $13,377 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $12,96 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. BOU se démarque par une valeur de l'ordre de $11,92 \text{ kg.h}^{-1}.\text{mm}^{-1}$. Dans l'ensemble, il convient de noter que ces génotypes utilisent moins d'eau et convertissent efficacement cette eau en biomasse sèche et en rendement en grain à maturité. MBB, GMG, OZ368, DKH et H3 sont moins efficace de façon effective, avec $EeueRdt$ ($8,32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $7,86 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $7,44 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $6,96 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $6,88 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) (Figure 65). Chenu et al., (2018) soulignent que la disponibilité en eau est un facteur restrictif critique pour de nombreuses zones de cultures à travers le monde, sur cette base, Marris (2008) annonce que l'augmentation de l'Eeue contribue à aider les améliorateurs de blé à choisir le germoplasme qui produit «plus de grains en condition pluviale. Selon

Tardieu (2012) les effets positifs sur le rendement sont liés aux caractères de l'adaptation à la sécheresse comme (Eeue), ils dépendent du moment et de l'intensité de l'apparition du stress hydrique. Toutefois, l'Eeue se prédétermine comme un caractère complexe pour être intégré dans les programmes d'amélioration. Cette complexité s'accroît en raison de la dépendance de Eeue de facteurs environnementaux, tel le déficit de pression de vapeur (DPV) de l'atmosphère (Christy et al., 2018). Cependant, Sinclair (2012) juge qu'il est utile de le faire.

L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour le blé dur a des conséquences sur l'amélioration du rendement dans un milieu qui se caractérise par une sécheresse terminale (Zhang et al., 2010; Sikder et al., 2016; Lu et al., 2020). L'efficacité de l'utilisation de l'eau est souvent discutée en relation avec la performance des variétés dans des conditions de limitation de l'eau. Dans la présente recherche, la teneur en eau du sol, l'utilisation de l'eau et l'efficacité de l'utilisation de l'eau de divers géotypes du blé ont été mesurées pendant trois années consécutives au niveau de l'Institut Technique des Grandes Cultures. Les différentes campagnes de croissance étaient extrêmement variables, avec des précipitations et des températures différentes. En effet Huang et al., (2006) jugent que les valeurs de l'EUE varient significativement d'une campagne à l'autre, d'un étage bioclimatique à l'autre et d'une saison à l'autre, en fonction agropédoclimatiques.

L'utilisation de l'eau a été la plus élevée en 2014/2015 en raison de l'augmentation des précipitations saisonnières par rapport à 2013/2014 et 2015/2016. Cependant, l'utilisation accrue de l'eau ne s'est pas nécessairement traduite par une augmentation de la biomasse et du grain. C'est ce qui ressort clairement du fait que l'année 2015/2016 utilise 38,47 mm de moins d'eau que l'année 2014/2015 et produit une biomasse et un rendement grains supérieurs. Gharbi et Marouani (1999) soulignent que les pluies de printemps contribuent le moins à la pluviométrie annuelle; mais l'importance de ces pluies réside dans leur impact sur la croissance durant les phases critiques du cycle végétatif des céréales (épiaison, anthèse et remplissage des grains) et par conséquent sur L'EUE.

6. Etude des liaisons inter-caractères

L'analyse des corrélations entre différentes variables mesurées révèle qu'il existe des corrélations positives et négatives entre ces variables allant d'une faible à une forte (Figure 67). Les liaisons reliant les différents caractères facilitent l'identification des composantes à utiliser comme critères de sélection. Toutefois, l'étude des Corrélations (Figure 67) a révélé une corrélation positive et significative entre EUERdt, le Spad ($r= 0.76^*$), le nombre de grains

par épi ($r= 0,88^*$), le nombre de grains par mètre carré ($r= 0,89^*$), le rendement grain ($r= 0,99^{**}$) et l'indice de récolte ($r= 0,94^*$). Ces résultats suggèrent qu'un idéotype efficient en eau doit avoir un rendement en grain et un indice de récolte élevé associé à un taux de chlorophylle suffisant pour booster l'efficacité de la photosynthèse. Ils corroborent ainsi ceux de Reynolds et Tuberosa (2008), Blum (2009), Hu et *al.*, (2018).

Le rendement grain est lié positivement et significativement avec le Spad ($0,76^*$), le nombre de grain par épi ($r= 0,88$), nombre de grain par mètre carré ($r= 0,89^{**}$). Par contre, il est négativement et significativement lié à la paille ($r= -0,96^{**}$) et la hauteur de la plante ($r= -0,77^{**}$) (Figure 66). Selon Bouzid et *al.*, (2020) l'augmentation du rendement en grain intègre le nombre de grains par épi, ce caractère explique 75% des variations du rendement. Ces résultats corroborent ceux de Fellahi (2017) qui indique que le rendement en grain du blé est plus lié au nombre de grain par épi qu'au poids de mille grain. De même Sayar et *al.*, (2007) rapportent que le nombre des grains par épi participe largement au rendement en grains, surtout dans les régions semi arides, et pour les céréales menées en pluviale.

Ainsi, les résultats démontrent que la biomasse aérienne est significativement et positivement corrélée avec la paille ($r= 0,81^*$), et la transpiration ($r= 98^*$) (Figure 67). En revanche, les génotypes qui se caractérisent par une tige longue et une transpiration appréciable favorisent la production de la biomasse aérienne. Des résultats similaires ont été démontrés (Hannachi, 2017). Belagrouz et Chennafi (2016) considèrent que la transpiration est expressive pour la valorisation de l'eau pour réaliser plus de biomasse. En outre, la corrélation est positive entre l'épiaison en nombre de jour après semis, la hauteur ($r= 0,75$), la paille ($r = 0,79^*$), et l'EUEPLL ($r = 0,80^*$). Donc, les variétés tardives ont la tendance à valoriser les précipitations sous forme de paille et non pas en grains, par contre une corrélation négative et significative avec le Spade ($r = -0,85^*$). Le nombre de grains par mètre carré ($r = -0,83$), le rendement en grains ($r = -0,83^*$), l'indice de récolte ($r = -0,87^{**}$), la vitesse de remplissage des grains ($r = -0,60^*$) et EUERdt ($r = -0,82^*$). Selon Mekhlouf et *al.*, (2006), les variétés à une vitesse de croissances élevée et à maturité précoce utilisent efficacement l'eau disponible.

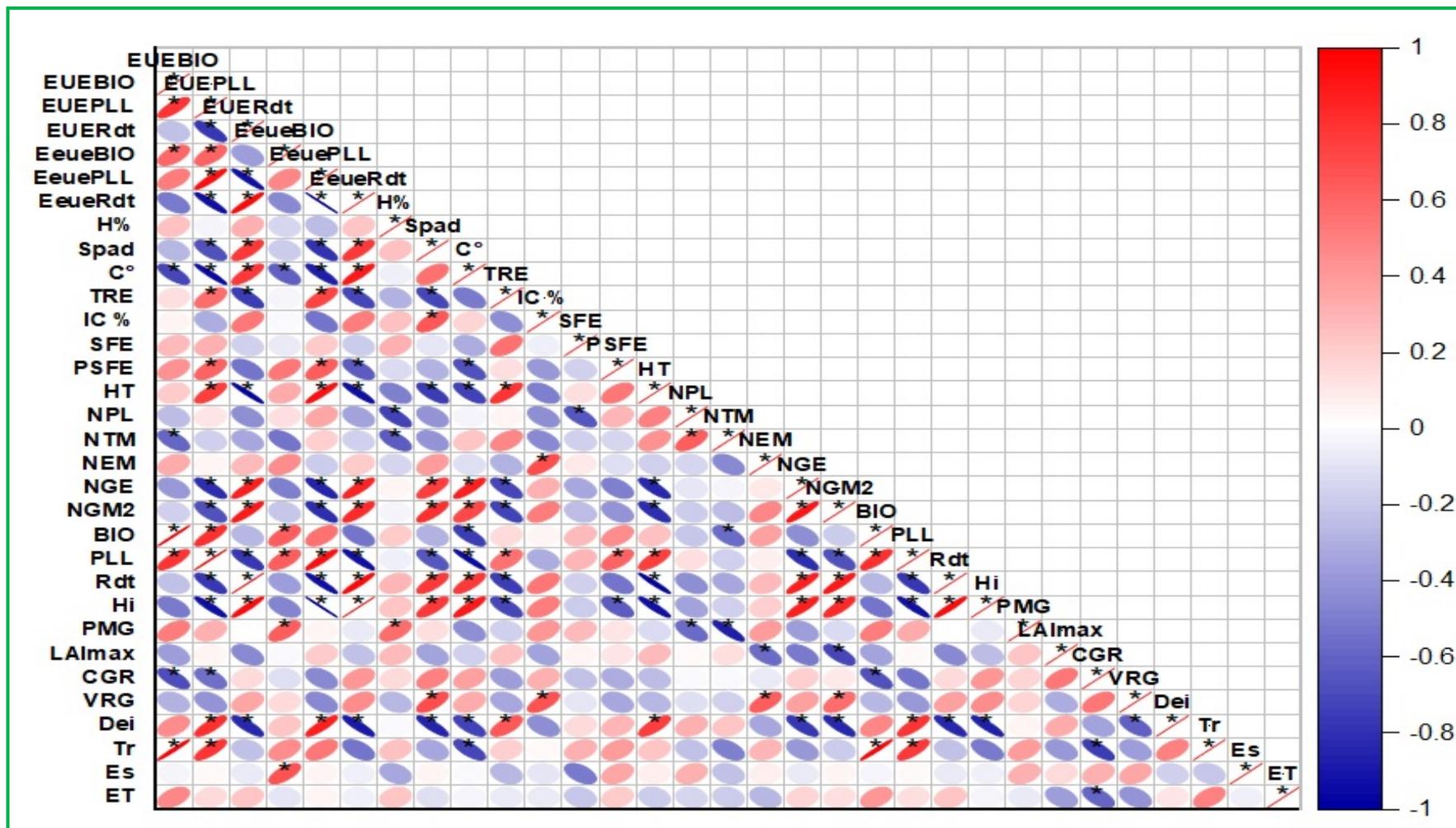


Figure 66. Matrice de corrélation des différentes variables illustrées sous forme de corrélogramme

7. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est un outil de réduction des dimensions qui peut être utilisé pour réduire un grand ensemble de variables à un petit ensemble qui contient toujours la plupart des informations dans le grand ensemble. La base de données de l'ACP regroupe des variables caractéristiques de dix variétés testées pour leurs réponses pour les caractères 1) Phéno-agronomiques, 2) Morpho-physiologiques. D'autre part, l'étude des relations possibles entre les variables mesurées au cours du cycle permettent de regrouper les cultivars testés.

Une analyse en composantes principales a été réalisée à partir des 31 variables. Ainsi, le premier axe explique à lui seul 42,8% de l'information, le deuxième axe entoure 19,0% de l'information, donc ces deux axes bornent 61,8% de l'information totale (Figure 67). En conséquence ces deux premiers axes résument mieux l'information apportée par l'ensemble des variables initiales.

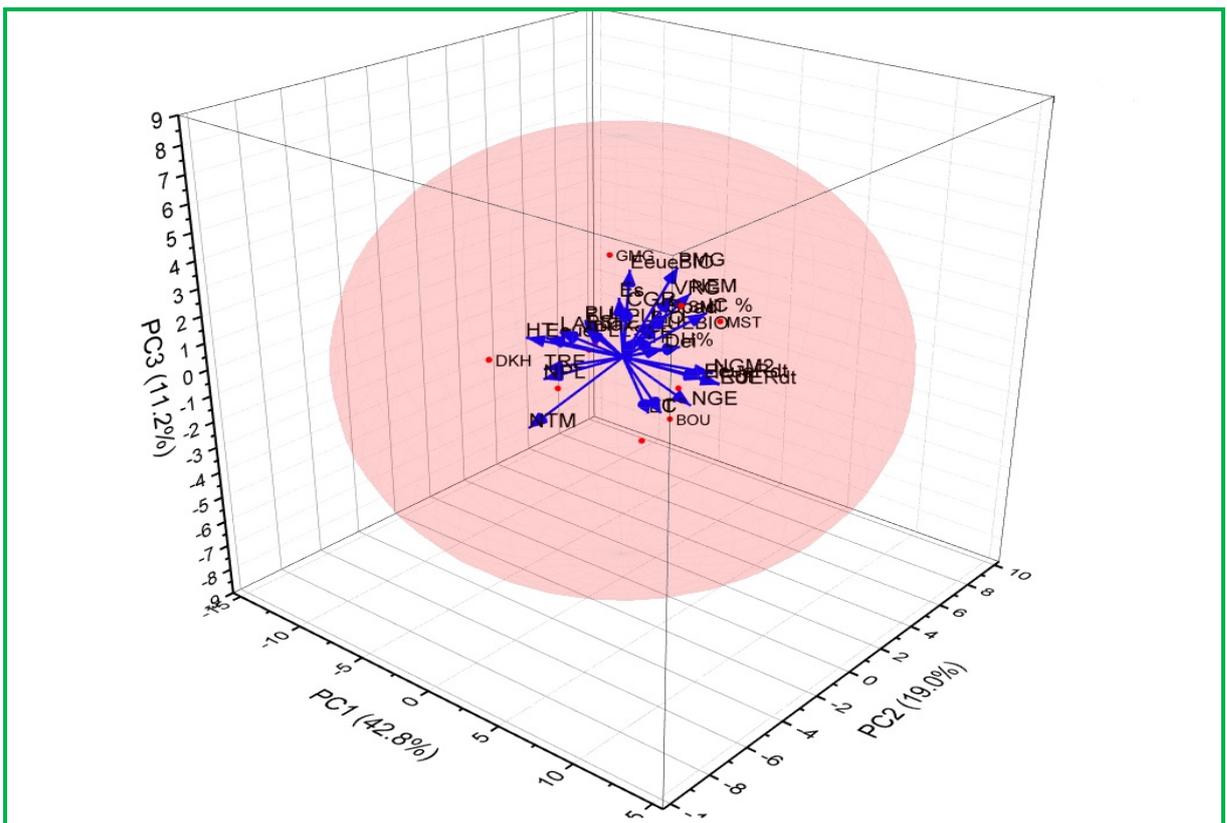


Figure 67. Représentation en trois dimensions des trois premières composantes

Du côté positif, la première composante (axe 1) porte l'information correspondante à la variation des variables (Figure 69), par la teneur relative en eau (TRE), le poids spécifique de

la feuille étandard (PSFE), la hauteur de la paille (HT), le rendement en paille (PLL), l'efficacité d'utilisation de l'eau pour le PLL (EUEPLL) et l'efficacité d'utilisation de l'eau effective pour le PLL (EeuePLL).

Au long de cet axe s'oppose le taux de chlorophylle (Spad), la température du couvert (C°), le nombre de grains par épi (NGE), le nombre de grains par mètre carré (NGM²), le rendement grain (Rdt), l'indice de récolte (Hi), l'efficacité d'utilisation de l'eau pour le Rdt (EUE Rdt), l'efficacité d'utilisation de l'eau effective pour Rdt (EeueRdt). Les variables humidité du sol (H%), nombre d'épis par mètre carré (NEM), le rendement biologique (BIO), le poids de mille grains (PMG), la quantité d'eau transpirée (Tr) et l'efficacité d'utilisation de l'eau pour BIO (EUEBIO) déterminent l'axe 2 du côté négatif, et le nombre de plants levés (NPL) ainsi le nombre de talles par mètre carré (NTM) du côté positif (Figure 67).

Pour la répartition des cultivars sur les deux composants (Figure 68), se positionnent du côté positif, OZ368, H3, et GMG et déterminent la formation de l'axe 1, et du côté négatif, SMT, MGS et WAH. Néanmoins les résultats de l'analyse montrent que les variétés DKH, MBB contribuent seules dans l'élaboration de l'axe 2 et du côté positif.

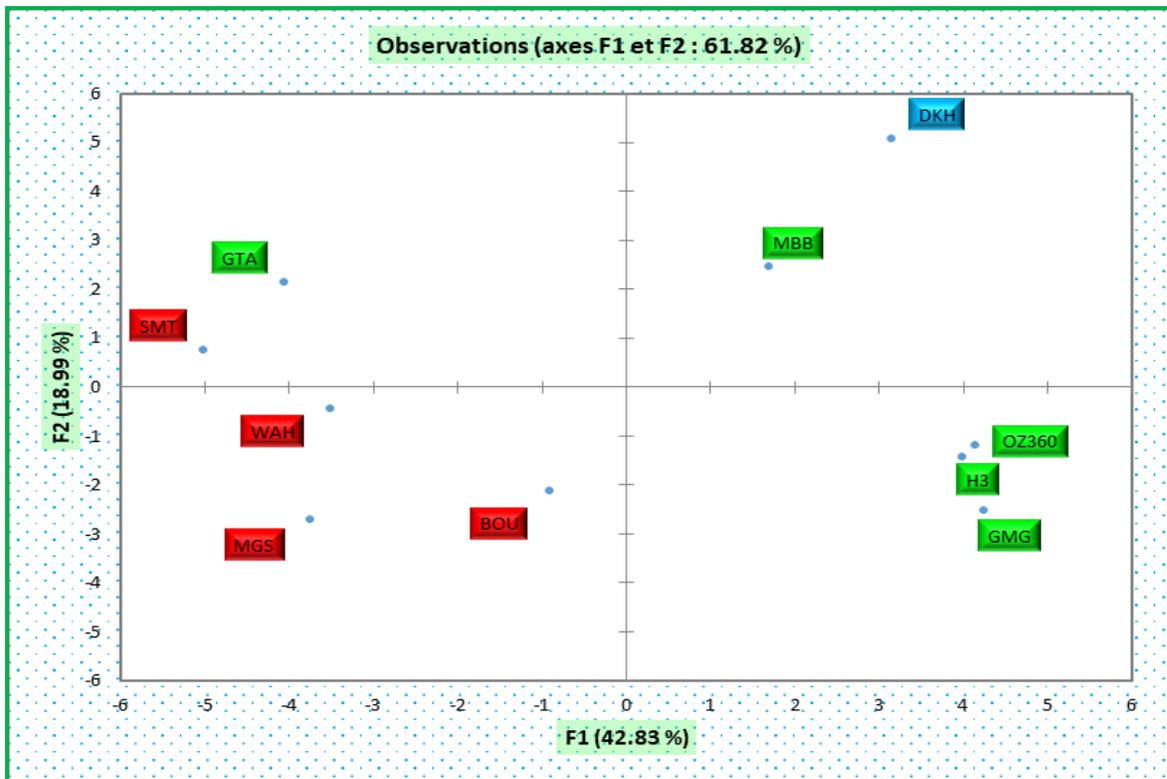


Figure 68. Projection des dix variétés étudiées, sur les plans des axes 1-2 de l'ACP sur la base des caractères Phéno agro morpho- physiologiques

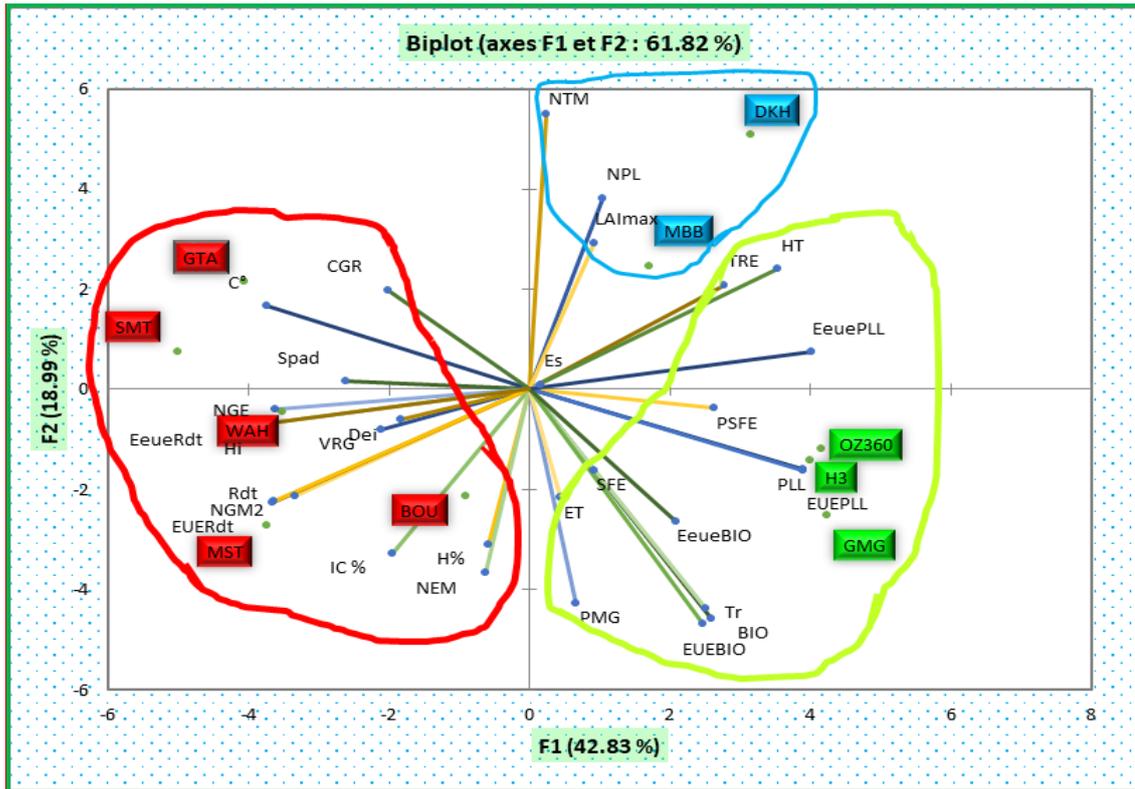


Figure 69. Projection des 10 génotypes étudiés ainsi que les variables étudiées, sur les plans des axes 1-2 de l'ACP

Sur l'axe 1 et au côté positif (Figure 69), se positionnent OZ368, H3, et GMG. Elles se caractérisent en revanche par les variables déterminées principalement par la teneur relative en eau (TRE), le poids spécifique de la feuille étendard (PSFE), la hauteur de la paille (HT), le rendement en paille (PLL), l'efficacité d'utilisation de l'eau pour le PLL (EUEPLL), l'efficacité d'utilisation de l'eau effective pour le PLL (EuePLL). Cependant, les variables qui sont moins déterminantes de la formation de l'axe sont la transpiration de l'eau par la plante (T), la biomasse aérienne (BIO), l'efficacité d'utilisation de l'eau de la biomasse aérienne (EUEBIO). La teneur en eau du sol (H%), l'indice foliaire (LAImax) et l'évapotranspiration (Et) (Figure 69). Les résultats indiquent que les variétés OZ368, H3, et GMG qui sont situées au côté positif de l'axe1 (Figure 69) sont plus performantes en production en paille et de biomasse aérienne. Ceci peut être à l'origine de la hauteur du chaume bien corrélée avec l'axe1, à la teneur relative en eau et à la valorisation de l'eau traduite à travers l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour le rendement en paille.

Sur l'axe 1 et du côté négatif (Figure 69), se délimitent les variétés SMT, MGS, WAH, GTA et BOU qui se distinguent par le taux de chlorophylle (Spad), la température du couvert(C°), le nombre de grains par épi (NGE), le nombre de grains par mètre carré (NGM²), le

rendement grain (Rdt), l'indice de récolte (IR), l'efficacité d'utilisation de l'eau pour le Rdt (EUE Rdt), l'efficacité d'utilisation de l'eau effective pour Rdt (EeueRdt), le reste des variables est moins déterminant. Sur la partie positive de l'axe 2, s'installent les cultivars DKH, et MBB qui se divergent par le nombre de plants levés (NPL) et le nombre de talles par mètre carré (NTM)

8. Classification hiérarchique ascendante (CAH)

La classification hiérarchique ascendante a conduit à structurer l'ensemble des variétés en trois groupes (Figure 70) qui se distinguent selon les caractères mesurés durant l'expérimentation (les caractères Phéno-agronomiques, morpho-physiologiques).

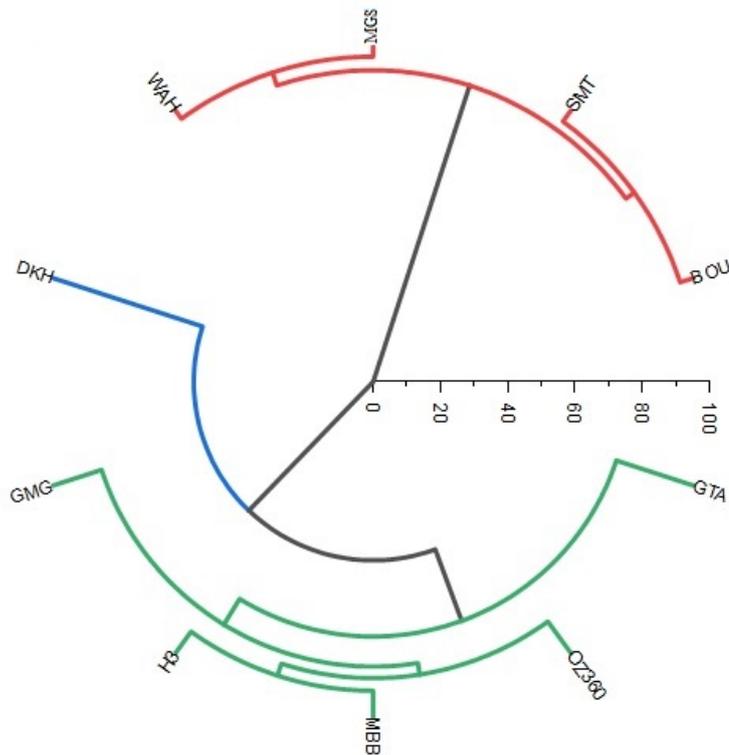


Figure 70. Classification ascendante hiérarchique des cultivars sur la base des traits Phéno-agronomiques et morpho physiologiques mesurés

Le premier groupe (G1) se compose de *BOU*, *SMT*, *WAH*, et *MGS* qui délimite leur supériorité en mesure des paramètres de production du rendement en grain et de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour Rdt qui sont le taux de chlorophylle Spad, la température de canope (C°), l'indice de récolte (Hi), efficacité effective de l'utilisation de l'eau pour le Rdt (EeueRdt), le rendement grain (Rdt), efficacité d'utilisation de l'eau pour le Rdt (EUE Rdt),

le nombre de grain par mètre carré (NGM), nombre de grains par épi (NGE), vitesse de remplissage des grains (VRG), l'indice de l'intégrité cellulaire (IC), le nombre d'épis par mètre carré (NEM), la vitesse d'accumulation de la matière sèche (CGR) (Figure 71).

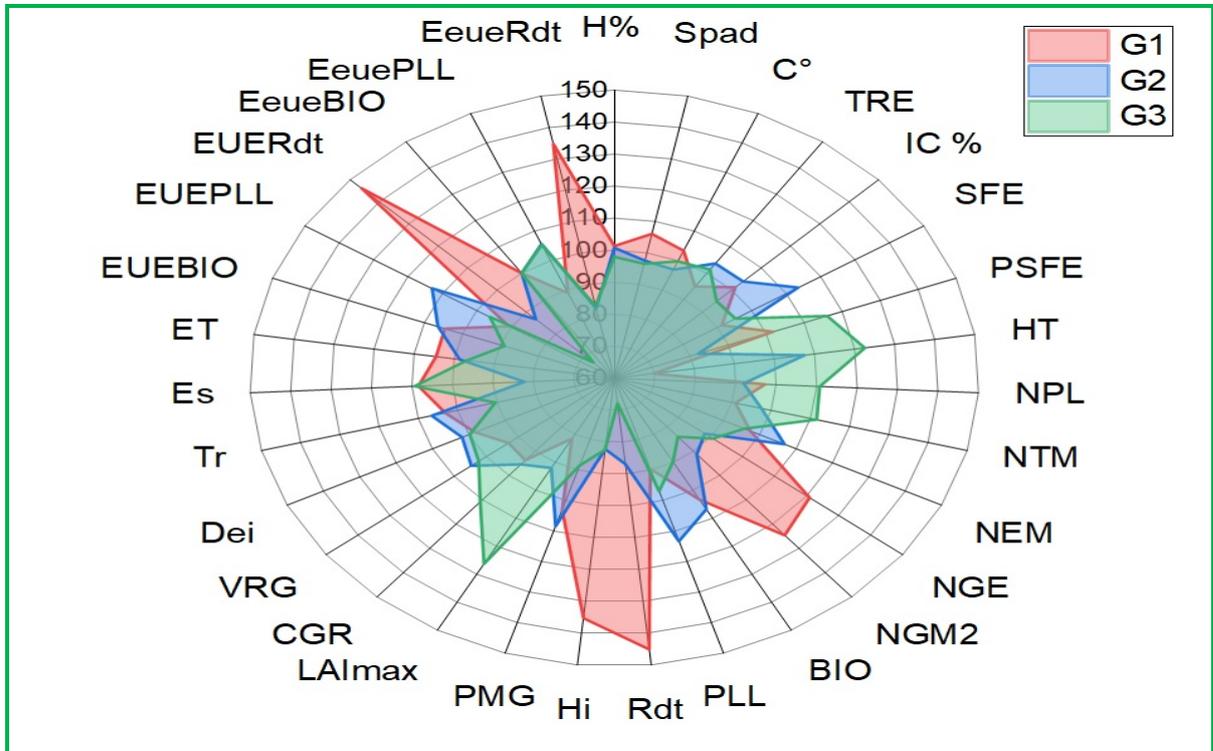


Figure 71. Écart relatif en % des variables mesurés par rapport à la moyenne de trois groupes

Le groupe deux (G2) (Figure 71) représente les cultivars *MBB*, *H3*, *OZ368*, *GMG* et *GTA*. C'est le groupe des variétés locales, tardives à l'épiaison et moins performantes, à l'exception de *GTA*. Elles se caractérisent par une supériorité des traits par la teneur relative en eau (TRE), poids spécifique de la feuille étendard (PSFE), hauteur de chaume (HT) NPL NTM, rendement biologique (BIO), rendement en paille (PLL) nombre de jours après semis pour arriver à l'épiaison (Dei), quantité d'eau transpirée (Tr), efficacité d'utilisation de l'eau pour réaliser le rendement biologique (EUEBIO), efficacité d'utilisation de l'eau pour réaliser le rendement en paille (EUEPLL), efficacité effective d'utilisation de l'eau, le rendement biologique (EeueBIO), efficacité effective d'utilisation de l'eau pour réaliser le rendement en paille (EeuePLL).

Le troisième groupe est formé exclusivement par une seule variété *DKH* (Figure 71) marquant sa divergence par un fort taux de levé exprimé en nombre de plants levés par mètre carré (NPL), et une forte capacité de tallage évaluée par le biais de nombre de talles par mètre carré (NTM), la hauteur de chaume (HT) ainsi que l'indice foliaire vert (LAImax).

CONCLUSION

Conclusion et Perspectives

Conclusion

La sélection moderne de blés performants s'acquiert sur des caractères efficaces et constitue ainsi un intérêt déterminant relativement à la sélection dite conventionnelle. En effet, l'approche de la sélection classique est orientée directement sur le rendement, qui se distingue souvent par une faible héritabilité. Cependant, celle dite moderne est structurée sur des caractéristiques de composantes dont l'héritabilité semble être efficace. Ainsi, l'une des composantes considérées déterminante est *l'efficacité d'utilisation de l'eau* par la culture. Effectivement, la croissance et le développement du blé, le rendement et ses composantes sont fortement dépendants de l'humidité du sol. En revanche, la préservation de l'eau au niveau du profil cultural valorisée par des *génotypes efficaces* représente un intérêt particulier de *management et de monitoring rationnels pour un déficit en agriculture pluviale durable* sur les Hauts Plateaux Sétifiens. En effet, sur cette zone semi-aride d'altitude, l'agriculture se distingue par un système de production en pluviale, marquée par un déficit climatique étalé sur trois saisons de l'année, engendrant donc un manque d'eau. Par conséquent, l'un des principaux objectifs conçus à travers les systèmes de cultures de l'agriculture en environnement semi-aride est l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau des cultures. Les auteurs mentionnent les principes révélés peu nombreux, mais très importants, qui sous-tendent les pratiques agricoles calant une utilisation efficace de l'eau pluviale. Effectivement, les effets du risque d'un avènement de déficit hydrique est étroitement lié au stade végétatif, au matériel végétal et au mode de pratiques culturales.

En revanche, en milieu semi-aride, *le management de la productivité* de la culture du blé dépend de la préservation de l'eau et du niveau de son efficacité d'utilisation par la plante. Dès lors, l'EUE est évaluée comme une caractéristique expressive du rendement sous stress hydrique. Par conséquent, elle acquiert la dimension de composante de résistance au déficit hydrique. Toutefois, la problématique fondée sur la délimitation des caractères spécifiques pour identifier les génotypes dont la productivité semble potentielle et dont le paramètre le plus déterminant est celui d'une valorisation efficace quant à l'utilisation de l'eau au cours du cycle de la plante, révèle une perspective spécifique de stabilité du rendement et de la biomasse. De la même vision, notre réflexion est similaire, et elle est centrée sur *l'étude des caractéristiques liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (Triticum durum Desf.)*. Pour l'appréhender, des expérimentations ont été conduites sur trois campagnes

agricoles, 2013/2014, 2014/2015 et 2015/2016, dans la région des Hauts Plateaux Sétifiens à étage bioclimatique semi-aride. En conséquent, la caractérisation de la productivité de la culture du blé dur et son efficacité à l'utilisation de l'eau ont porté sur un matériel végétal composé d'une collection de dix variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) dont l'origine est une sélection CIMMYT/ICARDA et des variétés locales provenant de l'institut Technique de Grandes Cultures de Sétif, Algérie. Elles sont dénommées, *Mohamed Ben Bachir (MBB)*, *Hedba*, *Oued-Zenati*, *Djenah Khetaifa*, *Guemgoum Rkhem*, *Gta/dur*, *Megress*, *Waha*, *Simeto* et *Bousselem*.

La région des Hauts Plateaux Sétifiens à climat méditerranéen semi-aride se distingue par un déficit climatique qui se localise sur l'année, mis à part l'hiver ; et le niveau de la précipitation de 369.6mm représente le seuil au-dessous duquel l'année est considérée sèche. Par ailleurs, la tendance à l'augmentation des températures au printemps est associée à une irrégularité et une insuffisance des précipitations. En revanche, la recherche d'éléments de valorisation de l'eau reste une priorité fondamentale pour une exploitation effective de l'eau par la plante dans le *continuum sol plante atmosphère*. La conceptualisation de ce management dans le contexte de la valorisation de l'eau par la culture du blé en zone semi-aride. Les chercheurs appréhendent les effets des risques des changements climatiques, ils considèrent qu'ils engendrent des réductions de la productivité des céréales même pour des sols dont la capacité de stockage est appréciable. Ce contexte prédit l'urgence de manifester des efforts pour la valorisation effective de l'eau par la plante, donc opérée par l'efficacité d'utilisation de l'eau. Ainsi, les résultats de cette recherche sont centrés sur les principales caractéristiques qui sont liées à l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour l'élaboration du rendement en grain, de la biomasse aérienne et de la paille, dans un environnement renommé agropastoral.

L'efficacité d'utilisation de l'eau est aperçue ainsi comme une charpente bâtie sur un arrangement de composantes

- I) **Phénotypiques ou caractères agronomiques**, par 1) *Le rendement et ses composantes*, 2) *La vitesse de l'accumulation de la matière sèche*, 3) *La vitesse de remplissage des grains*, 4) *Les dates d'épiaison, maturation*, et
- II) **Caractères morpho-physiologiques**, par 1) *La hauteur du chaume*, 2) *La surface de la feuille étendard*, 3) *La masse spécifiques de la feuille drapeau*, 4) *La teneur relative en eau*, 5) *La température de la canopée*, 6) *L'intégrité cellulaire* et 7) *La chlorophylle (SPAD)*.

Les résultats de la recherche révèlent que les caractères agronomiques restent influencés par la disponibilité en eau et l'effet du stress thermique. Cependant, le phénomène de compensation se fait distinguer entre les caractères mesurés. Les rendements considérés notables sont réalisés par les variétés Bousselem, Waha et Megress. Ils sont dans l'ordre 24.12 qha⁻¹, 23.77 qha⁻¹ et 23.64 qha⁻¹, ils sont étroitement liés aux nombres NE et NGE. Par ailleurs, la valeur de l'indice de récolte (IR), représente aussi un révélateur de rendement grains. En effet, ce paramètre exprime le niveau de capacité du génotype à transformer la matière sèche accumulée en rendement grains. Ces trois composantes représentent une résultante qui génère une plateforme de sélection de cultivars à rendement potentiel. Sur la base de cette suggestion, *Waha*, *Megress* et *Bousselem*, apparaissent relativement des *génotypes performants*. L'indice de récolte *IR* mesure la *productivité effective* sous l'effet de l'interaction entre les génotypes, l'environnement et la gestion des cultures. En conséquent, il détermine une base génétique de sélection du blé.

En outre, l'augmentation des gains génétiques en milieu semi-aride, se focalise sur l'adoption d'une stratégie de synchronisation des stades phénologiques positionnés selon la distribution des précipitations. De cette manière, en fonction des dates d'épiaison et de maturité exprimées en NJAS, les résultats indiquent que les variétés précoces, *Megress*, *Waha* et *Semito* s'échappent du risque de l'effet des stress hydrique et thermique dont l'occurrence de l'avènement apparaît avant le stade épiaison. Ainsi, les résultats indiquent que MBB, Hadba03 et Oued Zenati considérées des variétés tardives se sont révélées fortement affectées sous les effets engendrés par les hautes températures et le stress hydrique. Les résultats des trois campagnes d'étude indiquent que les variétés précoces ont épié à 135 JAS, cependant, celles considérées tardives et durant les trois campagnes d'expérimentation sont MBB et Hadba03 se sont démarquées par 144 JAS. La précocité à l'épiaison est une caractéristique révélatrice de la capacité à l'adaptation des génotypes du blé tolérants à la sécheresse et efficaces à l'utilisation de l'eau en condition pluviale.

Par ailleurs, les informations décelées à travers l'esquisse des composantes physiologiques et morphologiques affichent les variétés anciennes, *Mohamed Ben Bachir (MBB)*, *Hedba*, *Oued-Zenati*, *Djenah Khetaiifa* et *Guemgoum Rkhem* par leur capacité à maintenir une température autour des feuilles de valeur moyenne de 27,24 C° plus basse de 6,8% relativement aux cultivars dits modernes, *Gta/dur*, *Megress*, *Waha*, *Simeto* et *Bousselem*. Les variétés anciennes se distinguent aussi par une teneur relative en eau (TRE) appréciable, de 85,09%. En conséquent, elles affichent une tolérance aux fortes températures par le maintien

de l'intégrité cellulaire avec un indice de 81,94%. La hauteur de la plante est de 81,61 cm, les feuilles sont larges, ces caractères témoignent l'adaptation au milieu semi-aride. Ces variétés apparaissent se singulariser comme source de variabilité génétique pour créer des idéotypes tolérants au stress hydrique.

Alors, les indications relatives à l'efficacité d'utilisation de l'eau par les géotypes testés et sur les trois expérimentations, révèlent que l'EUE pour réaliser le rendement biologique (*RDTBIO*) et le rendement en grain (Rdt) varie significativement sous l'effet du géotype, la campagne agricole et de celui de l'interaction *GXA*. Alors, pour l'*EUBIO*, sur les trois campagnes, *Guemgoum Rkhem* apparaît plus efficace avec 23,50 kg $ha^{-1}mm^{-1}$. Cependant, le moins efficace *Simeto* s'est caractérisé par une *EUEBIO* de 19,09 kg $ha^{-1}mm^{-1}$. A l'avenant, pour l'*EUERdt* *Waha* affiche 8,09 kg $ha^{-1}mm^{-1}$, et semble plus valorisante pour l'eau pluviale. En effet, *Waha*, variété précoce s'adapte au milieu des Hauts Plateaux Sétifiens et se singularise par une effective efficacité à l'eau. Le géotype le moins efficace à l'eau pour réaliser du Rdt est *Djenah Khetifa*, avec 3,71 kg $ha^{-1}mm^{-1}$, accusant ainsi une dévalorisation de l'utilisation de l'eau de 54.14% relativement à *Waha*.

En outre, l'étude des corrélations entre les caractères mesurés indique que l'efficacité d'utilisation de l'eau pour produire le rendement en grain est corrélé positivement et significativement avec le RdT ($r= 0,99^{**}$), l'IR ($r= 0,94^{*}$), le NGE ($r= 0,88^{*}$), le NGM ($r= 0,89^{*}$) et le SPAD ($r= 0,76^{*}$). Cependant, l'EUE est négativement et significativement corrélée avec la hauteur du chaume (HT) ($r= -0,77^{**}$), le rendement en paille (PLL) ($r= -0,96^{**}$), le NJAS pour épier (Dei) ($r= -0,83^{*}$). En revanche, l'idéotype efficace recherché pour valoriser l'eau dans la région des Hauts Plateaux à climat semi-aride, se démarque par 1) Une épiaison précoce, 2) Un chaume intermédiaire, 3) Un nombre de grains par mètre carré (NGM) et par conséquent 4) Un rendement en grain appréciable. Aussi, il s'avère utile de mentionner l'indice de récolte (IR), réalisé par une production de biomasse précoce plus une capacité de la transformer en rendement grain.

Par ailleurs, l'étude typologique basée sur l'analyse hiérarchique ascendante et l'analyse en composantes principale illustrent la diversité génétique focalisée sur les traits agro-phénologiques et morpho physiologiques. Les résultats affichent trois groupes différents. De la sorte, le premier groupe (G1) semble diverger par rapports aux deux autres. Il intègre *Waha*, *Sémito*, *Megress* et *Bousselem*. Il se démarque par 1) Le SPAD (31.4), 2) La température de la canopée (28.67C°), 3) L'indice de récolte (IR= 32.36%), 4) L'EueRdt (11.29 kg $ha^{-1}mm^{-1}$), 5) Le Rdt (23.77 q ha^{-1}), 6) L'EUERdt (8.06 kg.h $^{-1}.mm^{-1}$), 7) Le NGM

(6198.70), 8) La fertilité de l'épi (NGE, 30.65), 9) La vitesse de remplissage du grain (VRG, $1.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$), 10) L'indice d'intégrité cellulaire (IC, 85.74%) et 11) Le NE (197.15). Le second groupe (G2) insère *MBB*, *Hedba*, *Oued-Zenati*, *Guemgoum Rkhem* et *Gta/dur*. Ils s'individualisent par 1) La TRE (88.25 %), 2) Le PSFE ($9.86 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$), 3) La HT du chaume (91.03 cm), 4) Le NPL (192.52), 5) Le NT (493.47), 6) Le RDTBIO (70.71 qha^{-1}), 7) Le RDTPLL (56.47 qha^{-1}), 8) La Dei (144 JAS), 9) La Tr (207.43mm), 10) L'EUEBIO ($23.41 \text{ kgha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$), 11) L'EUEPLL ($18.62 \text{ kgha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$), 12) L'EuePLL ($27.96 \text{ kgha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$). Le troisième groupe (G3) est formé exclusivement par la variété *Djenah Khetaifa*, il apparaît similaire au groupe (G2). Par conséquent, en conditions pluviales d'altitude, les résultats distinguent deux groupes de variétés. Elles divergent par le niveau valorisation effective de l'eau pluviale. Le premier valorise l'eau pluviale pour réaliser le rendement en grain. En revanche, spécifiquement ce sont les génotypes dénommés modernes, donc considérés améliorés et précoces qui se démarquent par cette capacité productive. Se localise, à leur rencontre le second groupe repéré par les génotypes valorisants la précipitation pour élaborer le rendement en paille. Alors, ce sont les variétés qualifiées de tardives et qui sont désignées anciennes.

Perspectives

En agriculture pluviale, l'approche de la conception problématique des perspectives quant à la valorisation de l'utilisation de l'eau requiert une attention toute particulière sur les Hauts Plateaux Sétifiens à vocation agropastorale. De la sorte que la relance du débat sur l'importance et l'utilité des résultats obtenus par notre recherche énonce un outil fondamental de perception de modèles de faisabilité adaptés à un management pour une utilisation effective de l'eau dans un agrosystème productif et durable. En revanche, l'amélioration de la production céréalière en zone semi-aride d'altitude recommande des géotypes performants par leurs tolérances aux stress hydrique et thermique. Donc, à travers la recherche réalisée sur les caractères mesurés sur des variétés locales et améliorées, et qui interfèrent à l'efficacité d'utilisation de l'eau, les résultats révèlent que l'EUE est une *composante synthétique d'adaptation* aux contraintes du milieu semi-aride. De manière similaire, l'EUE est un caractère *physiologiquement et génétiquement complexe et peut être défini à plusieurs échelles*.

Alors, la collection du matériel végétal testé se spécifie par sa variabilité génétique, œuvrant ainsi la voie à la création d'idéotypes s'adaptant à l'environnement semi aride des Hauts Plateaux Sétifiens. Toutefois, il est recommandé d'opter pour un monitoring pour le management d'un ensemble prédéterminé par des composantes assurant l'amélioration de l'EUE. En revanche, les suggestions sont délimitées par

- 1) La sélection de matériel végétal performant tenant compte de l'interaction Géotype*environnement,
- 2) L'Insertion de l'application technologique, par la biologie moléculaire dans la sélection pour le repérage de la diversité génétique par le biais des QTL (Quantitative Trait Loci) où par la pratique de la sélection assistée par les marqueurs moléculaires,
- 3) La pratique l'amélioration accélérée des plants (Speed breeding) pour acquérir trois à quatre générations de variétés, réduisant donc la durée d'obtention, et technique plus économe en temps et financièrement,
- 3) La création d'une banque de gènes pour préserver le patrimoine génétique, particulièrement les variétés locales. les auteurs témoignent que l'amélioration de l'EUE s'opère par la synthèse de nouvelles connaissances résultant des progrès du phénotypage, de la modélisation, de la physiologie, de la génétique et de la biologie moléculaire. Toutefois, à ces éléments, s'associe

4) Le monitoring du développement et de la croissance supervisée par la technologie de contrôle de l'agrosystème, par les pratiques culturales et les appareils de mesures. Effectivement, ces suggestions sont conçues dans

5) Un contexte de perspectives dynamiques dont le but est la régulation des contraintes environnementales pour gouverner le principe du développement durable en milieu des Hauts Plateaux Sétifiens, intégrant l'avènement du risque des effets d'un éventuel changement climatique et le contexte socioéconomique environnemental.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

Reference bibliographiques

- Abbassenne, F., Bouzerzour, H., & Hachemi, L. (1998). Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride. *Ann. Agron. INA*, 18, 24-36.
- Acevedo, E. H., Silva, P. C., Silva, H. R., & Solar, B. R. (1999). Wheat production in Mediterranean environments. *Wheat: ecology and physiology of yield determination*, 295-331.
- Adjab, M. (2002). Recherche des traits morphologiques, physiologiques et biochimiques d'adaptation au déficit hydrique chez différents géotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire de magister, fac. Des Sciences, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, 84p.
- Afridi, K., Khan, N. U., Mohammad, F., Shah, S. J. A., Gul, S., Khalil, I. A., ... & Khan, S. M. (2017). Inheritance pattern of earliness and yield traits in half-diallel crosses of spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 97(5), 865-880.
- Aidaoui, A., & Hartani, T. (2000). Gestion de l'irrigation du blé dur par des indicateurs de l'état hydrique. *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges. Options Méditerranéennes, série A*, (40), 579-582.
- Alem, C., Labhilili, M., Brahmi, K., Jlibene, M., Nasrallah, N., & Filali-Maltouf, A. (2002). Adaptations hydrique et photosynthétique du blé dur et du blé tendre au stress salin. *Comptes rendus biologies*, 325(11), 1097-1109.
- Ali, H. E., & Saad, Z. H. (2020). The effect of drought on chlorophyll, proline and chemical composition of three varieties of egyptian rice. *Environ. Sci*, 15(1), 21-30.
- Ali, Z., Salam, A., Azhar, F. M., & Khan, I. A. (2007). Genotypic variation in salinity tolerance among spring and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) accessions. *South African Journal of Botany*, 73(1), 70-75.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 2-13.
- Amigues, J. P., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., ... & Uesc, E. S. C. (2006). Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. *Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport*.
- Annicchiarico, P., Abdellaoui, Z., Kelkouli, M., & Zerargui, H. (2005). Grain yield, straw yield and economic value of tall and semi-dwarf durum wheat cultivars in Algeria. *The Journal of Agricultural Science*, 143, 57.
- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J. L., & Royo, C. (2000). Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, 92(1), 83-91.

- Apolo-Apolo, O. E., Pérez-Ruiz, M., Martínez-Guanter, J., & Egea, G. (2020). A mixed data-based deep neural network to estimate leaf area index in wheat breeding trials. *Agronomy*, 10(2), 175.
- Araus, J. L., & Labrana, X. (1991). Leaf photosynthesis and chloroplast senescence patterns in wheat flag leaves during grain filling. *Photosynthetica (Praha)*, 25(1), 33-37.
- Araus, J. L., Slafer, G. A., Royo, C., & Serret, M. D. (2008). Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Critical Reviews in Plant Science*, 27(6), 377-412.
- Araus, J. L., Villegas, D., Aparicio, N., Del Moral, L. G., El Hani, S., Rharrabti, Y., ... & Royo, C. (2003). Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Crop Science*, 43(1), 170-180.
- Asada, H., & Matsumoto, J. (2009). Effects of rainfall variation on rice production in the Ganges-Brahmaputra Basin. *Climate Research*, 38(3), 249-260.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., ... & Reynolds, M. P. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature climate change*, 5(2), 143-147.
- Asseng, S., Martre, P., Ewert, F., Dreccer, M. F., Beres, B. L., Reynolds, M., ... & Baenziger, P. S. (2019). Model-Driven Multidisciplinary Global Research to Meet Future Needs: The Case for "Improving Radiation Use Efficiency to Increase Yield". *Crop Science*, 59(3), 843-849.
- Asseng, S., Turner, N. C., Botwright, T., & Condon, A. G. (2003). Evaluating the impact of a trait for increased specific leaf area on wheat yields using a crop simulation model. *Agronomy Journal*, 95(1), 10-19.
- Baburai Nagesh, A. K. (2006). The physiological and genetic bases of water-use efficiency in winter wheat (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- Bacon, M. (2009). *Water Use Efficiency in Plant Biology* (Wiley-Blac; B. Mark, Ed.). Wiley-Blackwell.332P
- 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. *BASE*.
- 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. *Journal of Agronomy*.
- Bajji, M., Lutts, S., & Kinet, J. M. (2001). Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. *Plant Science*, 160(4), 669-681.

- Baker, J. T., Gitz, D. C., Payton, P., Wanjura, D. F., & Upchurch, D. R. (2007). Using leaf gas exchange to quantify drought in cotton irrigated based on canopy temperature measurements. *Agronomy Journal*, 99(3), 637-644.
- Baldy C. (1974). Etude fréquentielle du climat. Influence sur la production des zones céréalières en Algérie. Document MARA, pp. 52.
- Baldy, C. (1986). Comportement des blés dans les climats méditerranéens. *Ecologia mediterranea*, 12(3), 73-88.
- Balota, M., Green, A. J., Griffey, C. A., Pitman, R., & Thomason, W. (2017). Genetic gains for physiological traits associated with yield in soft red winter wheat in the Eastern United States from 1919 to 2009. *European Journal of Agronomy*, 84, 76-83.
- Balota, M., Payne, W. A., Evett, S. R., & Peters, T. R. (2008). Morphological and physiological traits associated with canopy temperature depression in three closely related wheat lines. *Crop Science*, 48(5), 1897-1910.
- Bannayan, M., & Rezaei, E. E. (2014). Future production of rainfed wheat in Iran (Khorasan province): climate change scenario analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for global change*, 19(2), 211-227.
- Barrs, H. D. (1968). Effect of cyclic variations in gas exchange under constant environmental conditions on the ratio of transpiration to net photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, 21(5), 918-929.
- Bates, T. R., & Lynch, J. P. (2001). Root hairs confer a competitive advantage under low phosphorus availability. *Plant and Soil*, 236(2), 243-250.
- Bazargani, M. M., Hajirezaei, M. R., Salekdeh, G. H., Bushehri, A. A. S., Falahati-Anbaran, M., Moradi, F., ... & Ehdaie, B. (2012). A view on the role of metabolites in enhanced stem reserves remobilization in wheat under drought during grain filling. *Australian Journal of Crop Science*, 6(12), 1613.
- Beche E., Benin D., Da Silva C.L., Munaro L.B., Marchese J.A. (2014) Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. *European Journal of Agronomy* 61:49-59.
- Belagrouz, A. (2013). Analyse du comportement du blé tendre, variété WIFAK (*Triticum aestivum* L.) conduite en labour conventionnel, travail minimum et semis direct sur les hautes plaines sétifiennes. Mémoire de Magister, Université Ferhat ABBAS–Sétif1-87 p.
- Belagrouz, A., & Chennafi, H. (2016). Analyse du comportement Du Blé Tendre sous labours contrastes. Éditions universitaires européennes.
- Belagrouz, A., Chennafi, H., Bouzerzour, H., Hakimi, M., Razem, R., & SAHRAOUI, H. (2018). Relationships among water use efficiency and the physio-agronomic traits in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars assessed under rainfed conditions of the

- Eastern High Plateaus of Algeria. *Agriculture & Forestry/Poljoprivreda i Sumarstvo*, 64(3).
- Belkherchouche, H., Fellah, S., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., & Chellal, N. (2009). Vigueur de croissance, translocation et rendement en grains du blé dur (*Triticum durum* Desf) sous conditions semi arides. *Courrier du savoir*, 9, 17-24.
- Beltrano, J., & Ronco, M. G. (2008). Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: Effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20(1), 29-37.
- Ben-Amar, A., V&ery, A. A. E., Sentenac, H. E., Bouizgaren, A., Mahboub, S., Nsarellah, N. E., & El Bouhmadi, K. (2020). Role of leaf rolling on agronomic performances of durum wheat subjected to water stress. *African Journal of Agricultural Research*, 16(6), 791-810.
- Ben-David, R., Amram, A., Nashef, K., & Peleg, Z. (2014). Genetic improvement of durum wheat establishment under fluctuating environmental conditions. In *Proceedings of the International Symposium on Genetics and Breeding of Durum Wheat*; Porceddu, E., Qualset, CO, Damania, AB, Eds (pp. 147-149).
- Benderradji, L., Bouzerzour, H., Kellou, K., Ykhlef, N., Brini, F., Masmoudi, K., & Djekoun, A. (2010). Etude des mécanismes de tolérance a la salinité chez deux variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) soumises a un stress salin. *Sciences & Technologie. C, Biotechnologies*, 23-30.
- Benmahammed A., M. Kribaa, H. Bouzerzour, A. Djekoun. 2008. Relationships between F2, F3 and F4-derived lines for above ground biomass and harvest index of three barley (*Hordeum vulgare* L.) crosses in a Mediterranean-type environment. *Agricultural Journal*, 3: 313-318.
- Bernard R. 2006. *L'eau et la vie*. (éd).Dauphin. Paris : 13- 59 p.
- Berndtsson, R., Nodomi, K., Yasuda, H., Persson, T., Chen, H., & Jinno, K. (1996). Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand. *Journal of Hydrology*, 185(1-4), 221-240.
- Berry P.M., Kendall S., Rutterford Z. (2015) Historical analysis of the effects of breeding on the height of winter wheat (*Triticum aestivum*) and consequences for lodging. *Euphytica* 203:375.
- Bertolino, L. T., Caine, R. S., & Gray, J. E. (2019). Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world. *Frontiers in plant science*, 10, 225.
- Bessaoud, O. (2018). L'Algérie et le marché des céréales [ou] La question céréalière en Algérie et les marchés mondiaux.

- Bessaoud, O., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W. (2019). Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie.
- Bi, H., Kovalchuk, N., Langridge, P., Tricker, P. J., Lopato, S., & Borisjuk, N. (2017). The impact of drought on wheat leaf cuticle properties. *BMC plant biology*, 17(1), 85.
- Bidinger, F. R., & Witcombe, J. R. (1989). Evaluation of specific dehydration tolerance traits for improvement of drought resistance. *Drought resistance in cereals*, CAB International, Wallingford, 151-164.
- Bishaw, Z., Struik, P. C., & Van Gastel, A. J. G. (2015). Wheat and barley seed system in Syria: How diverse are wheat and barley varieties and landraces from farmer's fields. *International Journal of Plant Production*, 9(1), 117-150.
- Blum, A. (2005). Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1159-1168.
- Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field crops research*, 112(2-3), 119-123.
- Blum, A. (2018). Plant breeding for stress environments. In CRC Press (Ed.), *Plant Breeding For Stress Environments* (1st Editio). <https://doi.org/10.1201/9781351075718>
- Blum, A., & Ebercon, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat I. *Crop Science*, 21(1), 43-47.
- Blum, A., & Ribaut, J. M. (2006). Drought adaptation in cereal crops: a prologue. *Drought adaptation in cereals*, 3-15.
- Bodson, B., De Proft, M., & Watillon, B. (2019). *Livre Blanc Céréales* (Gembloux, ed.). Agro Bio Tech.P364
- Bogard, M., Jourdan, M., Allard, V., Martre, P., Perretant, M. R., Ravel, C., ... & Gaju, O. (2011). Anthesis date mainly explained correlations between post-anthesis leaf senescence, grain yield, and grain protein concentration in a winter wheat population segregating for flowering time QTLs. *Journal of experimental botany*, 62(10), 3621-3636.
- Bognár, Z., Láng, L., & Bedő, Z. (2007). Effect of environment on the plant height of wheat germplasm. *Cereal Research Communications*, 35(2), 281-284.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.10.011>.
- Bouchemal, K., Bouldjadj, R., Belbekri, M., Ykhlef, N., & Djekoun, A. (2018). Pigments photosynthétiques, enzymes antioxydantes et potentiel osmotique foliaire de dix

- génotypes de blé dur (*Triticum durum*): effet du stress hydrique. *Phytoprotection*, 98(1), 13-24.
- Boufenar-Zaghouane, F., & Zaghouane, O. (2006). Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine). Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC), Algérie.
- Bouguendouz, A. (2011). Effet de trois itinéraires techniques sur l'élaboration du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) sous conditions semi arides des hauts plateaux sétifiens. *Options méditerranéennes Série A*, 96, 221226.
- Boulal, H., Zaghouane, O., El Mourid, M., & Rezgui, S. (2007). Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blés et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). TIGC, INRA, ICARDA, Algérie, 176.
- Bousba, R., Djekoun, A., Dura, S., & Ykhlef, N. (2013). Caractérisation moléculaire et association marqueur SSR phénotype pour la tolérance au stress hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *European Scientific Journal*, 9(12), 204-219.
- Bousba, R., Ykhlef, N., & Djekoun, A. (2009). Water use efficiency and flat leaf photosynthetic in response to water deficit of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *World journal of agricultural sciences*, 5(5), 609-616.
- Bouzerzour, H. (1990). Caractéristiques d'adaptation des orges destinées aux hauts plateaux. *Céréaliculture*, 23, 11-18.
- Bouzerzour, H., & Benmahammed, A. (2009). Variation in early growth, canopy temperature, translocation and yield of four durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi-arid conditions. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 5(2), 142-154.
- Bouzerzour, H., & Dekhili, M. (1995). Heritabilities, gains from selection and genetic correlations for grain yield of barley grown in two contrasting environments. *Field Crops Research*, 41(3), 173-178.
- Bouzerzour, H., & Refoufi, B. (1992). Effect of sowing date and rate, and site environment on the performance of barley cultivars grown in the Algerian high plateaux. *Rachis*, 11(1/2), 19.
- Bouzerzour, H., Mahnane, S., & Makhlof, M. (2006). Une association pour une agriculture de conservation sur les hautes plaines orientales semi-arides d'Algérie. *Options Méditerranéennes, Série A*, (69), 107-111.
- Bouzerzour, H., Zerargui, H., & Dekhili, M. (1994). Relationships among duration of vegetative and grain filling periods, yield components and grain yield in durum wheat. *Awamia*, 75, 15-23.
- Bouzidi, A., Mahdadi, M., Belagrouz, A., Bachir, A., Mehdaoui, W., & Bouzerzour, H. (2020). Etude comparative des variétés élites de blé dur [*Triticum turgidum* (L.)

Thell.ssp. *turgidum*conv. *durum* (Desf.) MacKey] sous conditions semi-arides des hautes plaines orientales. Amina. REVUE AGRICULTURE, 11(1), 41–50.

Boyeldieu J. (1999). Blé tendre, Techniques Agricoles-Fascicule n°2020, Paris.

Broetto, F., Duarte, H. M., & Lüttge, U. (2007). Responses of chlorophyll fluorescence parameters of the facultative halophyte and C3–CAM intermediate species *Mesembryanthemum crystallinum* to salinity and high irradiance stress. *Journal of plant physiology*, 164(7), 904-912.

Calderini, D. F., Savin, R., Abeledo, L. G., Reynolds, M. P., & Slafer, G. A. (2001). The importance of the period immediately preceding anthesis for grain weight determination in wheat. *Euphytica*, 119(1-2), 199-204.

Cammarano, D., Hawes, C., Squire, G., Holland, J., Rivington, M., Murgia, T., ... & Ronga, D. (2019). Rainfall and temperature impacts on barley (*Hordeum vulgare* L.) yield and malting quality in Scotland. *Field Crops Research*, 241, 107559.

Cao, H. X., Zhang, Z. B., Xu, P., Chu, L. Y., Shao, H. B., Lu, Z. H., & Liu, J. H. (2007). Mutual physiological genetic mechanism of plant high water use efficiency and nutrition use efficiency. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 57(1), 1-7.

Carof, M. (2006). Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré (Doctoral dissertation).

Carvalho, H. D., Heilman, J. L., McInnes, K. J., Rooney, W. L., & Lewis, K. L. (2020). Epicuticular wax and its effect on canopy temperature and water use of Sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 284, 107893.

Castro Campos, B., Ren, Y., & Loy, J. P. (2020). Scarce water resources and cereal import dependency: The role of integrated water resources management. *Water*, 12(6), 1750.

Catell, F. (2006). Fonctionnement hydrique et physiologique de la plante. Tiercelin J. R. et Vidal A. *Traité d'irrigation*, 147-61.

Charmet, G., Robert, N., Branlard, G., Linossier, L., Martre, P., & Triboï, E. (2005). Genetic analysis of dry matter and nitrogen accumulation and protein composition in wheat kernels. *Theoretical and Applied Genetics*, 111(3), 540-550.

Chaves, M. M., Pereira, J. S., Maroco, J., Rodrigues, M. L., Ricardo, C. P. P., Osório, M. L., ... & Pinheiro, C. (2002). How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. *Annals of botany*, 89(7), 907-916.

Chaves, M., & Davies, B. (2010). Drought effects and water use efficiency: improving crop production in dry environments. *Functional Plant Biology*, 37(2), iii-vi.

- Chehat, F. Analyse macroéconomique des filières, la filière blés en Algérie. Projet PAMLIM «Perspectives agricoles et agroalimentaires Maghrébines Libéralisation et Mondialisation» Alger, 2007, p. 7-9.
- Chen, D., Yin, L., Deng, X., & Wang, S. (2014). Silicon increases salt tolerance by influencing the two-phase growth response to salinity in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta physiologiae plantarum*, 36(9), 2531-2535.
- Chen, S. P., Bai, Y. F., & Han, X. G. (2003). Variations in composition and water use efficiency of plant functional groups based on their water ecological groups in the Xilin River Basin. *ACTA BOTANICA SINICA-CHINESE EDITION*-, 45(10), 1251-1260.
- Chenafi, A., Bachir Bey, M., & Chennafi, H. (2020). Influence of regulated drip irrigation on productivity and physicochemical traits of tomato 'Tofane' under hot desert climate. *Journal of Horticultural Research*, 1(ahead-of-print).
- Chennafi H., 2012. Amélioration de la Productivité du Blé en Environnement déficitaire en eau. *Revue Agriculture* N°3. Pp 24-27.
- Chennafi, H., Aïdaoui, A., Bouzerzour, H., & Saci, A. (2006). Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi arid growth conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*.
- Chennafi, H., Bouzerzour, H., Aidaoui, A., & Chenafi, A. (2008). Positionnement des exigences en eau de la culture du blé dur avec l'avènement du déficit climatique en milieu semi-aride des Hautes Plaines Sétitiennes (Algérie). In *Proceedings of the 5th International Conference on Land Degradation*. Valenzano, Bari, Italy, 18-22 September (pp. 59-62).
- Chennafi, H., Bouzerzour, H., Saci, A., Chenafi, A., & Laib, M. A. (2008). Amélioration de l'agriculture pluviale en environnement semi-aride. *Proceedings du séminaire national sur les contraintes à la production du blé dur en Algérie*. Université Chlef, 62-68.
- Chennafi, H., Hannachi, A., Touahria, O., Fellahi, Z. E. A., Makhoulouf, M., & Bouzerzour, H. (2011)a. Tillage and residue management effect on durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) Thell. ssp. *turgidum* conv. *durum* (Desf.) MacKey] growth and yield under semi arid climate. *Advances in Environmental Biology*, 3231-3241.
- Chennafi, H., Saci, A., Harkati, N., Adjabi, A., & Mébarkia, A. (2011). L'optimisation du rendement de la culture du blé sous l'effet du précédent cultural et l'outil de labour en environnement semi-aride. Bouzerzour H., Irekti H. & Vadon B. Quatrièmes rencontres méditerranéennes du Semis Direct. Options méditerranéennes. Série A: Séminaires Méditerranéens. Ed. CIHEAM Zaragoza, 96, 213.
- Chenu, K., Van Oosterom, E. J., McLean, G., Deifel, K. S., Fletcher, A., Geetika, G., ... & Hammer, G. L. (2018). Integrating modelling and phenotyping approaches to identify and screen complex traits: transpiration efficiency in cereals. *Journal of experimental botany*, 69(13), 3181-3194.

- Cherfia, R. (2010). Etude de la variabilité morpho-physiologique et moléculaire d'une collection de blé dur algérien (*Triticum durum* Desf.). Thèse de magister
- Choong, M. F., Lucas, P. W., Ong, J. S. Y., Pereira, B., Tan, H. T. W., & Turner, I. M. (1992). Leaf fracture toughness and sclerophylly: their correlations and ecological implications. *New Phytologist*, 121(4), 597-610.
- Choudhary, V. K., Kumar, P. S., & Bhagawati, R. (2013). Response of tillage and in situ moisture conservation on alteration of soil and morpho-physiological differences in maize under Eastern Himalayan region of India. *Soil and Tillage Research*, 134, 41-48.
- Christopher, J., Richard, C., Chenu, K., Christopher, M., Paccapello, V., Borrell, A., & Hickey, L. (2020). Combining Trait Physiology, Crop Modelling and Molecular Genetics to Improve Wheat Adaptation to Terminal Water-Stress Targeting Stay-Green and Root Traits. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 36(1), 196.
- Christy, B., Tausz-Posch, S., Tausz, M., Richards, R., Rebetzke, G., Condon, A., ... & O'Leary, G. (2018). Benefits of increasing transpiration efficiency in wheat under elevated CO₂ for rainfed regions. *Global Change Biology*, 24(5), 1965-1977.
- Christy, B., Tausz-Posch, S., Tausz, M., Richards, R., Rebetzke, G., Condon, A., ... & O'Leary, G. (2018). Benefits of increasing transpiration efficiency in wheat under elevated CO₂ for rainfed regions. *Global Change Biology*, 24(5), 1965-1977.
- Clarke, B. C., Moran, L. B., & Appels, R. (1989). DNA analyses in wheat breeding. *Genome*, 32(2), 334-339.
- Clarke, J. M., Richards, R. A., & Condon, A. G. (1991). Effect of drought stress on residual transpiration and its relationship with water use of wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 71(3), 695-702.
- Clement R; Galand A (1979). Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression. Eyrolles, Paris.
- CNCC (2018). Liste des variétés de céréales autogames autorisées à la production et à la commercialisation. Document de vulgarisation, El Harrach, Alger.
- Colom, M. R., & Vazzana, C. (2003). Photosynthesis and PSII functionality of drought-resistant and drought-sensitive weeping lovegrass plants. *Environmental and Experimental Botany*, 49(2), 135-144.
- Comas, L., Becker, S., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in plant science*, 4, 442.
- Condon A.G., Richards R.A. and Farquhar G.D. 1993. Relationships between carbon isotope discrimination, water use efficiency and transpiration efficiency for dryland wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 44:1693–1711. doi:10.1071/AR9931693

- Condon, A. G., Richards, R. A., & Farquhar, G. D. (1993). Relationships between carbon isotope discrimination, water use efficiency and transpiration efficiency for dryland wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 44(8), 1693-1711.
- Condon, A. G., Richards, R. A., Rebetzke, G. J., & Farquhar, G. D. (2004). Breeding for high water-use efficiency. *Journal of experimental botany*, 55(407), 2447-2460.
- Cooper, P. J. M., & Gregory, P. J. (1987). Soil water management in the rain-fed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use and Management*, 3(2), 57-62.
- Cooper, P. J. M., Keatinge, J. D. H., & Hughes, G. (1983). Crop evapotranspiration—a technique for calculation of its components by field measurements. *Field Crops Research*, 7, 299-312.
- Cramer, G. R. (1994). Response of maize (*Zea mays* L.) to salinity. *Handbook of plant and crop stress*, 449-459.
- Dai, J., Bean, B., Brown, B., Bruening, W., Edwards, J., Flowers, M., ... & Ransom, J. (2016). Harvest index and straw yield of five classes of wheat. *Biomass and Bioenergy*, 85, 223-227.
- De Vita, P., Mastrangelo, A. M., Matteu, L., Mazzucotelli, E., Virzi, N., Palumbo, M., ... & Cattivelli, L. (2010). Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy. *Field Crops Research*, 119(1), 68-77.
- Desclaux, D., Chiffolleau, Y., & Nolot, J. M. (2013). From ideotype to realtype concept: Dynamic management of plant breeding by a multidisciplinary and participatory way. Example of organic durum wheat. *Innovations Agronomiques*, 32, 455-466.
- Divashuk M.G., Beshpalova L.A., Vasilyev A.V. (2013) Reduced height genes and their importance in winter wheat cultivars grown in southern Russia. *Euphytica* 190:137.
- Djanaguiraman, M., Narayanan, S., Erdayani, E., & Prasad, P. V. (2020). Effects of high temperature stress during anthesis and grain filling periods on photosynthesis, lipids and grain yield in wheat. *BMC Plant Biology*, 20(1), 1-12.
- Donald, C. T. (1968). The breeding of crop ideotypes. *euphytica*, 17(3), 385-403.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for prediction of crop water requirements. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, Italy, 144 pp.
- Duan, T., Chapman, S. C., Holland, E., Rebetzke, G. J., Guo, Y., & Zheng, B. (2016). Dynamic quantification of canopy structure to characterize early plant vigour in wheat genotypes. *Journal of Experimental Botany*, 67(15), 4523-4534.
- Dubcovsky, J., & Dvorak, J. (2007). Genome plasticity a key factor in the success of polyploid wheat under domestication. *Science*, Vol. 316, pp. 1862–1866. <https://doi.org/10.1126/science.1143986>

- DuPont, F. M., & Altenbach, S. B. (2003). Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *Journal of cereal science*, 38(2), 133-146.
- Durand J. H., 1983. - Les sols irrigables. Ed. Agence de coopération culturelle et technique. 312 pages
- Duveiller, G., Weiss, M., Baret, F., & Defourny, P. (2011). Retrieving wheat Green Area Index during the growing season from optical time series measurements based on neural network radiative transfer inversion. *Remote Sensing of Environment*, 115(3), 887-896.
- Eagles, H. A., Cane, K., & Vallance, N. (2009). The flow of alleles of important photoperiod and vernalisation genes through Australian wheat. *Crop and Pasture Science*, 60(7), 646-657.
- Egli, D. B. (2017). Seed biology and yield of grain crops. In CABI (Ed.), *Seed biology and yield of grain crops* (2eme Editi). <https://doi.org/10.1079/9781780647708.0000>
- Ehdaie, B. (1995). Variation in water-use efficiency and its components in wheat: II. Pot and field experiments. *Crop Science*, 35(6), 1617-1626.
- Ehdaie, B., Alloush, G. A., Madore, M. A., & Waines, J. G. (2006). Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat: II. Postanthesis changes in internode water-soluble carbohydrates. *Crop science*, 46(5), 2093-2103.
- El Hafid, R., El Mourid, M., Samir, K., & Bakoulou, B. (1996). Caractérisation de certaines variétés de blé, d'orge et du triticale sous différentes situations hydriques en conditions de champs et simulées. *Al awamia*, 93, 7-26.
- Eliard, J.L. 1974 -Manuel d'agriculture générale. Bases de la production végétale. Ed. Baillière, Paris, 344 p.
- Evans, L. T. (1978). The influence of irradiance before and after anthesis on grain yield and its components in microcrops of wheat grown in a constant daylength and temperature regime. *Field Crops Research*, 1, 5-19.
- Ewert, F., & Pleijel, H. (1999). Phenological development, leaf emergence, tillering and leaf area index, and duration of spring wheat across Europe in response to CO₂ and ozone. *European journal of Agronomy*, 10(3-4), 171-184.
- FAO, F. (2016). Agriculture Organization, 2016. Livestock Primary. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Faostat, F. A. O. (2017). Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data.QC> (accessed on January 2018).
- FAOStat. (2020). Statistics Data: the Food and Agriculture Organization of the United Nations. Official website. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data>

- Feddal, M. A. (2015). Problématique de l'introduction des techniques culturales simplifiées pour la mise en place des grandes cultures en Algérie (Doctoral dissertation, ENSA).
- Feillet, P. (2000). Le grain de blé. In Librairie Quae : des livres au coeur des sciences (INRAE). Librairie Quae : des livres au coeur des sciences.
- Fellahi, Z. E. A. (2017). Analyse génétique d'un croisement line x tester, réponse à la sélection et tolérance des stress du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) sous conditions semi-arides. Université Ferhat Abbas Sétif 1.260p
- Ferras K., (2015). L'efficacité d'utilisation de l'eau pluviale chez des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en environnement semi-aride. Mémoire Magister en sciences agronomiques, Université de Sétif, 102 p.
- Fischer, R. A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science Cambridge*.
- Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897-912.
- Flohr, B. M., Hunt, J. R., Kirkegaard, J. A., & Evans, J. R. (2017). Water and temperature stress define the optimal flowering period for wheat in south-eastern Australia. *Field Crops Research*, 209, 108-119.
- Flohr, B. M., Hunt, J. R., Kirkegaard, J. A., Evans, J. R., Trevaskis, B., Zwart, A., ... & Rheinheimer, B. (2018). Fast winter wheat phenology can stabilise flowering date and maximise grain yield in semi-arid Mediterranean and temperate environments. *Field Crops Research*, 223, 12-25.
- Foley, D. J., Thenkabail, P. S., Aneece, I. P., Teluguntla, P. G., & Oliphant, A. J. (2020). A meta-analysis of global crop water productivity of three leading world crops (wheat, corn, and rice) in the irrigated areas over three decades. *International Journal of Digital Earth*, 13(8), 939-975.
- Fotovat, R., Valizadeh, M., & Toorchi, M. (2007). Association between water-use efficiency components and total chlorophyll content (SPAD) in wheat (*Triticum aestivum* L.) under well-watered and drought stress conditions. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 5(3/4), 225.
- Frederick, J. R., & Bauer, P. J. (1999). Physiological and numerical components of wheat yield. *Wheat: Ecology and physiology of yield determination*, 45-65.
- French, R. J., & Schultz, J. E. (1984). Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Australian Journal of Agricultural Research*, 35(6), 743-764.
- Fuchs, M., & Tanner, C. B. (1966). Infrared thermometry of vegetation 1. *Agronomy Journal*, 58(6), 597-601.

- Fukuda, A., Kondo, K., Ikka, T., Takai, T., Tanabata, T., & Yamamoto, T. (2018). A novel QTL associated with rice canopy temperature difference affects stomatal conductance and leaf photosynthesis. *Breeding science*, 17129.
- Gaillard, C., & Sourisseau, J. M. (2009). Système de culture, système d'activité (s) et rural livelihood: enseignements issus d'une étude sur l'agriculture kanak (Nouvelle-Calédonie) (No. 129, pp. 279-294). Société des océanistes.
- Gallais A. & Bannerot H., 1992. Amélioration des espèces végétales cultivées : objectifs et critères de sélection – INRA. pp 379-391
- Gao F., Ma D., Yin G., Rasheed A., Dong Y., Xiao Y., Xia X., Wu X., He Z. (2017) Genetic Progress in Grain Yield and Physiological Traits in Chinese Wheat Cultivars of Southern Yellow and Huai Valley since 1950. *Crop Science* 57:760-773.
- Gate, P. (1995). *Ecophysiologie du blé*. Tec & Doc-Lavoisier.
- Gate, P., & Bousquet, N. (2008). La photosynthèse du blé Une source d'énergie vita. *Perspectives Agricoles*, 350(11), 26–28.
- Gate, P., Gouache, D., & Garcia, C. (2007). Revoir dates et densité pour éviter la sécheresse. *Perspectives agricoles*, (337), 48.
- Gauffreteau, A. (2018). Using ideotypes to support selection and recommendation of varieties. *OCL*, 25(6), D602.
- Gautier J., 1991. *Notions d'agriculture*. Ed. Lavoisier Tec & Doc. Paris. 575p.
- Gharbi, A. M. M., & Marouani, A. (1999). Etude des rapports des pluies saisonnières et annuelles avec les rendements et la production des céréales dans les régions sub-humides et semi-arides de la Tunisie. *Medit*, 10, 36-44.
- Gilbert, M. E., & Hernandez, M. I. (2019). How should crop water-use efficiency be analyzed? A warning about spurious correlations. *Field Crops Research*, 235, 59-67.
- Gitelson, A. A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., & Schepers, J. S. (2016). Efficiency of chlorophyll in gross primary productivity: A proof of concept and application in crops. *Journal of plant physiology*, 201, 101-110.
- Giunta, F., Motzo, R., & Deidda, M. (1993). Effect of drought on yield and yield components of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 33(4), 399-409.
- González, A., & Ayerbe, L. (2010). Effect of terminal water stress on leaf epicuticular wax load, residual transpiration and grain yield in barley. *Euphytica*, 172(3), 341-349.
- Gooding, M. J., Ellis, R. H., Shewry, P. R., & Schofield, J. D. (2003). Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science*, 37(3), 295-309.

- Gréco J. (1979). La Défense des sols contre l'érosion. Ed : la Maison rustique.183p.
- Gregory, P. J. (2009). Agronomic approaches to increasing water use efficiency. *Water use efficiency in plant biology*, (Wiley-Blac; B. Mark, Ed.) 142-170.
- Gregory, P. J., Ingram, J. S., & Brklacich, M. (2005). Climate change and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2139-2148.
- Grover G., Sharma A., Gill H.S., Srivastava P., Bains N.S. (2018) Rht8 gene as an alternate dwarfing gene in elite Indian spring wheat cultivars. *PLoS ONE* 13:1-11.
- Guendouz, A., & Maamari, K. (2012). Grain-filling, chlorophyll content in relation with grain yield component of durum wheat in a Mediterranean environment. *African Crop Science Journal*, 20(1).
- Hamada, A., Nitta, M., Nasuda, S., Kato, K., Fujita, M., Matsunaka, H., & Okumoto, Y. (2012). Novel QTLs for growth angle of seminal roots in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil*, 354(1-2), 395-405.
- Hannachi, A. (2013). Analyse diallèle de quelques caractères associés à l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. Mémoire de Magister, Université Saad Dahlab-Blida, 100.
- Hannachi, A. (2018). Aptitude à la combinaison, sélection mono et multi caractères et adaptabilité du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux conditions semi-arides. Thèse de Doctorat université de Ferhat abbes.260p.
- Hargas, H. (2007). Identification et sélection des caractères de résistance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions semi-arides des hauts plateaux de Sétif (Doctoral dissertation, INA).
- Hébert, J. C. (1976). Pour obtenir des hauts rendements, connaître la physiologie du blé. *Fermes modernes, n hors série, le blé, céréale d'avenir*, 83-88.
- Henin, S. (1977). Cours de physique du sol. Volume II: L'eau et le sol-Les propriétés mécaniques-La chaleur et le sol. Paris, 14p.
- Hikosaka, K., Ishikawa, K., Borjigidai, A., Muller, O., & Onoda, Y. (2006). Temperature acclimation of photosynthesis: mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate. *Journal of experimental botany*, 57(2), 291-302.
- HOUSSA, A. A., DRISSI, S., ASEHRAOU, A., ASFERS, A., OUBAKI, L., & CHRAIBI, H. (2017). Changements climatiques au Maroc: quels systèmes de culture et quelles biotechnologies pour s'y adapter?. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 5(3).

- Hu, C., Sadras, V. O., Lu, G., Zhang, R., Yang, X., & Zhang, S. (2019). Root pruning enhances wheat yield, harvest index and water-use efficiency in semiarid area. *Field Crops Research*, 230, 62-71.
- Hu, C., Zheng, C., Sadras, V. O., Ding, M., Yang, X., & Zhang, S. (2018). Effect of straw mulch and seeding rate on the harvest index, yield and water use efficiency of winter wheat. *Scientific reports*, 8(1), 1-8.
- Huang, R., Birch, C. J., & George, D. L. (2006, February). Water use efficiency in maize production-the challenge and improvement strategies. In *Proceeding of 6th Triennial Conference*, Maize Association of Australia.
- Hussain, S. B., Bakhsh, A., & Zubair, M. (2020). Cell Membrane Stability as a Measure of Heat Tolerance in Hexaploid and Tetraploid Wheat. *Journal of Experimental Agriculture International*, 16-22.
- Inagaki, M. N., Valkoun, J., & Nachit, M. M. (2007). Effect of soil water deficit on grain yield in synthetic bread wheat derivatives. *Cereal Research Communications*, 35(4), 1603-1608.
- Jäger, K., Fábrián, A., Eitel, G., Szabó, L., Deák, C., Barnabás, B., & Papp, I. (2014). A morpho-physiological approach differentiates bread wheat cultivars of contrasting tolerance under cyclic water stress. *Journal of plant physiology*, 171(14), 1256-1266.
- Jonard, P., Koller, J., & Vincent, A. (1952). Evolution de la tige et de l'épi chez la variété de blé Vilmorin 27 au cours de la période de reproduction. *Ann. Amélior. Plant*, 2(1), 31-54.
- Jones, H. (2009). What is water use efficiency? In *Water use efficiency in plant biology* (Wiley-Black; B. Mark, Ed.), 27-41.
- Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications*. Oxford university press.
- Joudi M., Ahmadi A., Mohammadi V. (2014) Genetic changes in agronomic and phenologic traits of Iranian wheat cultivars grown in different environmental conditions. *Euphytica* 196:237.
- Kadi, Z. (2018). Sélection de l'orge hordeum vulgare l. pour la tolérance aux stress abiotiques (Doctoral dissertation). Thèse de doctorat. Université de setif.
- Kadra N. (1976). Les mauvaises herbes en grandes cultures. *Mem. Ing., INA Alger*, 59p.
- Kambou, D., Xanthoulis, D., Ouattara, K., & Degré, A. (2014). Concepts d'efficacité et de productivité de l'eau (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(1).

- Kane, K. (2012). Études des changements physiologiques et moléculaires du blé (*Triticum aestivum* L.) en réponse aux concentrations élevées de CO₂ durant l'acclimatation au froid (Doctoral dissertation, Université du Québec à Montréal).
- Karkour L. (2012). La dynamique des mauvaises herbes sous l'effet des pratiques culturales dans la zone des plaines intérieures. Thèse de Magister en production végétal et agriculture de conservation, Université de Sétif, Sétif, 159 p.
- Karrou, M., & Oweis, T. (2012). Water and land productivities of wheat and food legumes with deficit supplemental irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 107, 94-103.
- Katerji, N. (1989). Exploration et analyse de l'hétérogénéité spatiale au champ de deux indicateurs de l'état hydrique de la plante: la résistance stomatique et le potentiel hydrique foliaire. In L'expérimentation agricole et l'alimentation en eau des plantes. Colloque Versailles, AFMEX (pp. 25-26).
- Kellou-Harbouze, R. (2010). Les exportateurs cerealiers français sur le marché Algérien du blé: Opportunités et contraintes. *les cahiers du cread*, 94, 77-104.
- Kenney, A. M., McKay, J. K., Richards, J. H., & Juenger, T. E. (2014). Direct and indirect selection on flowering time, water-use efficiency (WUE, $\delta^{13}C$), and WUE plasticity to drought in *Arabidopsis thaliana*. *Ecology and evolution*, 4(23), 4505-4521.
- Khayatnezhad, M., Gholamin, R., Jamaati-e-Somarin, S., & Zabihi-e-Mahmoodabad, R. (2011). The leaf chlorophyll content and stress resistance relationship considering in corn cultivars (*Zea mays*). *Adv. Environ. Biol*, 5(1), 118-122.
- Khazaei, H., Monneveux, P., Hongbo, S., & Mohammady, S. (2010). Variation for stomatal characteristics and water use efficiency among diploid, tetraploid and hexaploid Iranian wheat landraces. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 57(2), 307-314.
- Kilic, 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. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 38(1), 164-170.
- Kinet, J. M. (2018). *The Physiology of Flowering: Volume III: The Development of Flowers*. CRC Press.
- Kirkegaard, J. A., Lilley, J. M., Howe, G. N., & Graham, J. M. (2007). Impact of subsoil water use on wheat yield. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58(4), 303-315.
- Kramer, P. J. (1969). *Plant and soil water relationships: A modern synthesis*. Plant and soil water relationships: a modern synthesis.
- Kukal, M. S., & Irmak, S. (2020). Characterization of water use and productivity dynamics across four C3 and C4 row crops under optimal growth conditions. *Agricultural Water Management*, 227, 105840.

- Kulkarni, M., Soolanayakanahally, R., Ogawa, S., Uga, Y., Selvaraj, M. G., & Kagale, S. (2017). Drought response in wheat: key genes and regulatory mechanisms controlling root system architecture and transpiration efficiency. *Frontiers in chemistry*, 5, 106.
- Kumar, A., Kumar, B., Brar, N. S., & Verma, H. K. (2020). Improvement in productivity and profitability of farmers through soil chiseling practices in wheat in Majha region of Indian Punjab. *IJCS*, 8(3), 2681-2687.
- Kumari, A., Ranjan, R. D., Roy, C., Pal, A. K., & Kumar, S. (2020). Effect of Heat Stress on Inter-relationship of Physiological and Biochemical Traits with Grain Yield in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Current Journal of Applied Science and Technology*, 19-29.
- Kuotsu, K., Das, A., Lal, R., Munda, G. C., Ghosh, P. K., & Ngachan, S. V. (2014). Land forming and tillage effects on soil properties and productivity of rainfed groundnut (*Arachis hypogaea* L.)–rapeseed (*Brassica campestris* L.) cropping system in northeastern India. *Soil and Tillage Research*, 142, 15-24.
- Lahmar, R., & Bouzerzour, H. (2011). Shifting from earthy mulch towards organic mulch. Revisiting the dry-farming to help ensure the transition towards sustainable agriculture in the High Plains of Algeria. *Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires Méditerranéens*, (96), 99-106.
- Lambers, H. A. N. S., & Poorter, H. (1992). Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences. In *Advances in ecological research* (Vol. 23, pp. 187-261). Academic Press.
- Large, E. C. (1954). Growth stages in cereals. Illustration of the Feekes scale. *Plant pathology*, 3, 128-129.
- Le Mouel, C., Forslund, A., Marty, P., Manceron, S., Marajo-Petizon, E., Caillaud, M. A., & Schmitt, B. (2015). Addressing agricultural import dependence in the middle east-Nord-Africa region through the year 2050.
- Leakey, A. D., Ferguson, J. N., Pignon, C. P., Wu, A., Jin, Z., Hammer, G. L., & Lobell, D. B. (2019). Water use efficiency as a constraint and target for improving the resilience and productivity of C3 and C4 crops. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 781-808.
- Leclère, D., Havlík, P., Fuss, S., Schmid, E., Mosnier, A., Walsh, B., ... & Obersteiner, M. (2014). Climate change induced transformations of agricultural systems: insights from a global model. *Environmental Research Letters*, 9(12), 124018.
- Lemerle, D., Gill, G. S., Murphy, C. E., Walker, S. R., Cousens, R. D., Mokhtari, S., ... & Lockett, D. J. (2001). Genetic improvement and agronomy for enhanced wheat competitiveness with weeds. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52(5), 527-548.
- Lemerle, D., Verbeek, B., Cousens, R. D., & Coombes, N. E. (1996). The potential for selecting wheat varieties strongly competitive against weeds. *Weed Research*, 36(6), 505-513.

- Lerner, H. R. (2018). Introduction to the response of plants to environmental stresses. In *Plant responses to environmental stresses* (pp. 1-26). Routledge.
- Lev-Yadun, S., Gopher, A., & Abbo, S. (2000). The Cradle of Agriculture. *Science*, 288(5471), 1602–1603. <https://doi.org/10.1126/science.288.5471.1602>.
- Li, B., Wang, L., Kaseke, K. F., Li, L., & Seely, M. K. (2016). The impact of rainfall on soil moisture dynamics in a foggy desert. *PLoS one*, 11(10), e0164982.
- Li, Y., Johnson, D. A., Su, Y., Cui, J., & Zhang, T. (2005). Specific leaf area and leaf dry matter content of plants growing in sand dunes. *Bot. Bull. Acad. Sin.*, 46(127), e134.
- Liang, L., Qin, Z., Zhao, S., Di, L., Zhang, C., Deng, M., ... & Liu, Z. (2016). Estimating crop chlorophyll content with hyperspectral vegetation indices and the hybrid inversion method. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13), 2923-2949.
- Lipiec, J., Doussan, C., Nosalewicz, A., & Kondracka, K. (2013). Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *International Agrophysics*, 27(4), 463-477.
- Liu Y., Zhang J., Hu Y.G., Chen J. (2017) Dwarfing genes *Rht4* and *Rht-B1b* affect plant height and key agronomic traits in common wheat under two water regimes. *Field Crops Research* 204:242-248.
- Liu, B., Asseng, S., Liu, L., Tang, L., Cao, W., & Zhu, Y. (2016). Testing the responses of four wheat crop models to heat stress at anthesis and grain filling. *Global Change Biology*, 22(5), 1890-1903.
- Liu, B., Liu, L., Tian, L., Cao, W., Zhu, Y., & Asseng, S. (2014). Post-heading heat stress and yield impact in winter wheat of China. *Global change biology*, 20(2), 372-381.
- Liu, H., Yu, L., Luo, Y., Wang, X., & Huang, G. (2011). Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 98(4), 483-492.
- Lopes M.S., Reynolds M.P., Manes Y., Singh R.P., Crossa J., Braun H.J. (2012) Genetic Yield Gains and Changes in Associated Traits of CIMMYT Spring Bread Wheat in a “Historic” Set Representing 30 Years of Breeding. *Crop Science* 52:1123-1131.
- López-Castañeda, C., & Richards, R. A. (1994). Variation in temperate cereals in rainfed environments III. Water use and water-use efficiency. *Field Crops Research*, 39(2-3), 85-98
- López-Castañeda, C., Richards, R. A., Farquhar, G. D., & Williamson, R. E. (1996). Seed and seedling characteristics contributing to variation in early vigor among temperate cereals. *Crop Science*, 36(5), 1257-1266.
- Lovelli, S., Perniola, M., Di Tommaso, T., Ventrella, D., Moriondo, M., & Amato, M. (2010). Effects of rising atmospheric CO₂ on crop evapotranspiration in a Mediterranean area. *Agricultural water management*, 97(9), 1287-1292.

- Lu, Y., Duursma, R. A., Farrior, C. E., Medlyn, B. E., & Feng, X. (2020). Optimal stomatal drought response shaped by competition for water and hydraulic risk can explain plant trait covariation. *New Phytologist*, 225(3), 1206-1217.
- Ludwig, F., & Asseng, S. (2010). Potential benefits of early vigor and changes in phenology in wheat to adapt to warmer and drier climates. *Agricultural Systems*, 103(3), 127-136.
- Lugojan, C., & Ciulca, S. (2011). Evaluation of relative water content in winter wheat. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 15(2), 173-177.
- Lugojan, C., & Ciulca, S. (2011). Evaluation of relative water content in winter wheat. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 15(2), 173-177.
- Ma, J., Ding, P., Liu, J., Li, T., Zou, Y., Habib, A., ... & Chen, G. (2019). Identification and validation of a major and stably expressed QTL for spikelet number per spike in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 132(11), 3155-3167.
- 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 Thèse de magister.
- Machane, Y. (2008). Efficacité des herbicides les plus utilisés dans la culture du blé dur, de la région de Sétif. Université de setif 1. Thèse de Magister.
- Mackwell, S. J., Simon-Miller, A. A., Harder, J. W., & Bullock, M. A. (Eds.). (2014). *Comparative Climatology of Terrestrial Planets*. University of Arizona Press.
- Madeline, P., François, B., & Cantat, O. (2019). Changement climatique et céréaliculture en Normandie: quelles perspectives pour 2100?.
- MADR (Ministère de l'Agriculture et du développement rural) (2007). Rapport sur la situation du secteur agricole. Alger : MADR.
- Maes, W. H., & Steppe, K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13), 4671-4712.
- Mafakheri, A., Siosemardeh, A. F., Bahramnejad, B., Struik, P. C., & Sohrabi, Y. (2010). Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Australian journal of crop science*, 4(8), 580.
- Mahpara, S., Hussain, S. T., & Farooq, J. (2015). Drought tolerance studies in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cercetari Agronomice in Moldova*, 47(4), 133-140.
- Maize, D. I. I. (2017). Relationships Between Stomatal Conductance And Yield Under. *Journal Of Experimental Biology*, 5, 1.
- Malhi, N., Gill, M., & Dhillon, B. (2004). 10 plant improvement strategies for drought management. *Drought Management Strategies in India*, 242.

- Malhi, S. S., Johnston, A. M., Schoenau, J. J., Wang, Z. L., & Vera, C. L. (2006). Seasonal biomass accumulation and nutrient uptake of wheat, barley and oat on a Black Chernozem soil in Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(4), 1005-1014.
- Manschadi, A. M., Manske, G. G. B., & Vlek, P. L. G. (2013). Root architecture and resource acquisition: wheat as a model plant. *Plant roots: The hidden half*, 1-22.
- Marcussen, T., Sandve, S. R., Heier, L., Spannagl, M., Pfeifer, M., Jakobsen, K. S., ... Praud, S. (2014). Ancient hybridizations among the ancestral genomes of bread wheat. *Science*, 345(6194). <https://doi.org/10.1126/science.1250092>
- Marković, S. M., Knežević, D., & Djukić, N. H. (2020). Effect of genotype and phenological stages on the accumulation rate of dry matter in wheat. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 44(2), 7647–7656.
- Marris, E. (2008). More crop per drop: farmers' yields in the developing world are often limited by unreliable rains. Improving their harvests will require plant breeders, agronomists and geneticists to pull together--but can these experts work out their differences?. *Nature*, 452(7185), 273-278.
- Martre, P., Bogeat-Triboulot, M. B., & Durand, J. L. (1999). Measurement of a growth-induced water potential gradient in tall fescue leaves. *New Phytologist*, 142(3), 435-439.
- Mascher, R., Nagy, E., Lippmann, B., Hörnlein, S., Fischer, S., Scheiding, W., ... & Bergmann, H. (2005). Improvement of tolerance to paraquat and drought in barley (*Hordeum vulgare* L.) by exogenous 2-aminoethanol: effects on superoxide dismutase activity and chloroplast ultrastructure. *Plant Science*, 168(3), 691-698.
- Maydup, M. L., Antonietta, M., Guiamet, J. J., & Tambussi, E. A. (2012). The contribution of green parts of the ear to grain filling in old and modern cultivars of bread wheat (*Triticum aestivum* L.): evidence for genetic gains over the past century. *Field Crops Research*, 134, 208-215.
- Mayer, P. M., Groffman, P. M., Striz, E. A., & Kaushal, S. S. (2010). Nitrogen dynamics at the groundwater–surface water interface of a degraded urban stream. *Journal of Environmental Quality*, 39(3), 810-823.
- Mefti, M. (2012). Etude de la réponse des graminées fourragères, fétuque (*Festuca arundinacea* Schreb) et dactyle (*Dactylis glomerata* L.) au déficit hydrique (Doctoral dissertation).
- Megherbi, A., Mehdadi, Z., Toumi, F., Moueddene, K., & Bouadjra, S. E. B. (2012). Tolérance à la sécheresse du blé dur (*Triticum durum* Desf.) et identification des paramètres morpho-physiologiques d'adaptation dans la région de Sidi Bel-Abbès (Algérie occidentale). *Acta botanica gallica*, 159(1), 137-143.

- Mekhlouf, A., & Bouzerzour, H. (2000). Déterminisme génétique et associations entre le rendement et quelques caractères à variation continue chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Recherche Agronomique, INRAA*, 7, 37-49.
- Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Sahraoui, A. H., & Harkati, N. (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Science et Changements Planétaires / Sécheresse*, 17(4), 507–513. <https://doi.org/10.1684/SEC.2006.0054>
- Mekhlouf, A., Dehbi, F., Hannachi, A., & Harbi, M. (2012). Réponses du blé dur aux basses températures en relations avec la capacité de production *Revue Agriculture* N°3. Pp 13-21
- Menad, A. (2009). Rythme de développement, utilisation de l'eau et rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) dans l'étage bioclimatique semi-aride (Doctoral dissertation).
- Merah, O. (2001). Potential importance of water status traits for durum wheat improvement under Mediterranean conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 137(2), 139-145.
- Mermoud, A. (2006). Cours de physique du sol. Etat de l'eau du sol. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- Mesrane, Dihia. L'évolution de la production de blé dur (*Triticum durum*) dans la Daïra de Bouira et El Hachimia. 2018. Thèse de doctorat. Université de Bouira.
- M'hamed, H. C., Rezig, M., & Naceur, M. B. (2015). Water use efficiency of durum wheat (*Triticum durum* Desf) under deficit irrigation. *Journal of Agricultural Science*, 7(8), 238.
- Michalcová, E., Potocká, E., Chmelová, D., & Ondrejovič, M. (2019). Study of wheat protein degradation during germination. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2019, 1437-1449.
- Mirosavljević, M., Momčilović, V., Denčić, S., Mikić, S., Trkulja, D., & Pržulj, N. (2018). Grain number and grain weight as determinants of triticale, wheat, two-rowed and six-rowed barley yield in the Pannonian environment. *Spanish journal of agricultural research*, 16(3), 17.
- Mkhabela, M. S., Mkhabela, M. S., & Mashinini, N. N. (2005). Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1-2), 1-9.
- Mondal, S., Dutta, S., Crespo-Herrera, L., Huerta-Espino, J., Braun, H. J., & Singh, R. P. (2020). Fifty years of semi-dwarf spring wheat breeding at CIMMYT: Grain yield progress in optimum, drought and heat stress environments. *Field Crops Research*, 250, 107757.

- Monneveux, P., Rekika, D., Acevedo, E., & Merah, O. (2006). Effect of drought on leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, transpiration efficiency and productivity in field grown durum wheat genotypes. *Plant Science*, 170(4), 867-872.
- Monneveux, P., Reynolds, M. P., González-Santoyo, H., Pena, R. J., Mayr, L., & Zapata, F. (2004). Relationships between grain yield, flag leaf morphology, carbon isotope discrimination and ash content in irrigated wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 190(6), 395-401.
- Morgounov, A. I., Ozdemir, F., Keser, M., Akin, B., Payne, T. S., & Braun, H. J. (2019). International Winter Wheat Improvement Program: history, activities, impact and future. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*.
- Moser, S. B., Feil, B., Jampatong, S., & Stamp, P. (2006). Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. *Agricultural Water Management*, 81(1-2), 41-58.
- Motzo, R., Pruneddu, G., & Giunta, F. (2013). The role of stomatal conductance for water and radiation use efficiency of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *European journal of agronomy*, 44, 87-97.
- Mou, B., & Kronstad, W. E. (1994). Duration and rate of grain filling in selected winter wheat populations: I. Inheritance. *Crop Science*, 34(4), 833-837.
- Mouret J.C., Conesa A., Gaid A. et Monneveux P., 1988. Identification des facteurs de variabilité du rendement de blé dur en conditions hydriques limitantes dans la région de Sidi Bel' Abbas. *Céréaliculture* 23, 1-9.
- Moutonnet, P., & Bois, J. F. (1982). Efficacité comparée de l'eau transpirée par le maïs, le tournesol et le riz. *Agricultural Meteorology*, 27(3-4), 209-215.
- Mullan, D., & Pietragalla, J. (2012). Leaf relative water content. *Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping. Mexico: CIMMYT*, 25-27.
- Munns, R. (2002). Salinity, growth and phytohormones. In *Salinity: environment-plants-molecules* (pp. 271-290). Springer, Dordrecht.
- Munns, R., & Termaat, A. (1986). Whole-plant responses to salinity. *Functional Plant Biology*, 13(1), 143-160.
- Munns, R., Schachtman, D. P., & Condon, A. G. (1995). The significance of a two-phase growth response to salinity in wheat and barley. *Functional Plant Biology*, 22(4), 561-569.
- Nageswara Rao, R. C., Talwar, H. S., & Wright, G. C. (2001). Rapid assessment of specific leaf area and leaf nitrogen in peanut (*Arachis hypogaea* L.) using a chlorophyll meter. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186(3), 175-182.

- Nakhforoosh, A., Bodewein, T., Fiorani, F., & Bodner, G. (2016). Identification of water use strategies at early growth stages in durum wheat from shoot phenotyping and physiological measurements. *Frontiers in plant science*, 7, 1155.
- Naresh, R. K., Timsina, J., Dwivedi, A., Kumar, V., Singh, V., Shukla, A. K., ... & Gupta, R. K. (2017). Water footprint of rice from both production and consumption perspective assessment using remote sensing under subtropical India: A review. *Int J Chem Stu*, 5(1), 343-350.
- Nowsherwan, I., Shabbir, G., Malik, S. I., Ilyas, M., Iqbal, M. S., & Musa, M. (2018). Effect of drought stress on different physiological traits in bread wheat. *SAARC Journal of Agriculture*, 16(1), 1-6.
- Ollier, C. et Poirée, M. (1981). *Irrigation, les réseaux d'irrigation théorie, technique et économie des arrosages*. Eyrolles, Paris.
- Osmond, C. B. (1980). Integration of photosynthetic carbon metabolism during stress. In *Genetic engineering of osmoregulation* (pp. 171-185). Springer, Boston, MA.
- Ouattara, K., Ouattara, B., Assa, A., & Sédogo, P. M. (2006). Long-term effect of ploughing, and organic matter input on soil moisture characteristics of a Ferric Lixisol in Burkina Faso. *Soil and tillage research*, 88(1-2), 217-224.
- Ouyang, W., Struik, P. C., Yin, X., & Yang, J. (2017). Stomatal conductance, mesophyll conductance, and transpiration efficiency in relation to leaf anatomy in rice and wheat genotypes under drought. *Journal of Experimental Botany*, 68(18), 5191-5205.
- Oweis, T., Hachum, A., & Kijne, J. (1999). *Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas* (Vol. 7). IWMI.
- Oweis, T., Zhang, H., & Pala, M. (2000). Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agronomy Journal*, 92(2), 231-238.
- Pang, J., Palta, J. A., Rebetzke, G. J., & Milroy, S. P. (2014). Wheat genotypes with high early vigour accumulate more nitrogen and have higher photosynthetic nitrogen use efficiency during early growth. *Functional Plant Biology*, 41(2), 215-222.
- Passioura, J. (2006). Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. *Agricultural water management*, 80(1-3), 176-196.
- Passioura, J.B. 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*. 43, 117-120.
- Paynter, B. H., & Hills, A. L. (2008). Mixing feed barley cultivars did not decrease leaf disease or increase grain yield. *Australasian Plant Pathology*, 37(6), 626-636.

- Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural water management*, 57(3), 175-206.
- Peycru, P., D. Grandperrin, C. Perrier (Dir.), B. Augère, J.-F. Beaux, F. Cariou, P. Carrère, T. Darribère, J.-M. Dupin, C. Escuyer, J.-F. Fogelgesang, S. Maury, É. Quéinnec, E. Salgueiro & C. Van Der Rest (2014). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année*. Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2007)
- Picard, D., & Combe, L. (1994). *Elaboration du rendement des principales cultures annuelles*. Editions Quae.
- Pietragalla, J., Pask, A. J. D., Mullan, D., & Reynolds, M. (2012). Canopy temperature. *Physiological breeding II: A field guide to wheat phenotyping*. DF, Mexico: CIMMYT, 10-14.
- Polley, H.W., 2002. Implications of atmospheric and climatic change for crop yield and water use efficiency. *Crop Sci.* 42, 131–140.
- Pommel, B., Gallais, A., Coque, M., Quilleré, I., Hirel, B., Prioul, J. L., ... & Floriot, M. (2006). Carbon and nitrogen allocation and grain filling in three maize hybrids differing in leaf senescence. *European Journal of Agronomy*, 24(3), 203-211.
- Porker, K., Straight, M., & Hunt, J. R. (2020). Evaluation of G× E× M Interactions to Increase Harvest Index and Yield of Early Sown Wheat. *Frontiers in plant science*, 11, 994.
- Pour-Aboughadareh, A., Ahmadi, J., Mehrabi, A. A., Etmnan, A., Moghaddam, M., & Siddique, K. H. (2017). Physiological responses to drought stress in wild relatives of wheat: implications for wheat improvement. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(4), 106.
- Pradhan, S., Babar, M. A., Robbins, K., Bai, G., Mason, R. E., Khan, J., ... & Bhatta, M. (2019). Understanding the genetic basis of spike fertility to improve grain number, harvest index, and grain yield in wheat under high temperature stress environments. *Frontiers in plant science*, 10, 1481.
- Prasad, P. V. V., Djanaguiraman, M., Jagadish, S. V. K., & Ciampitti, I. A. (2019). Drought and high temperature stress and traits associated with tolerance. *Sorghum: A State of the Art and Future Perspectives*, 58, 241-265.
- Prasad, P. V., & Djanaguiraman, M. (2014). Response of floret fertility and individual grain weight of wheat to high temperature stress: sensitive stages and thresholds for temperature and duration. *Functional Plant Biology*, 41(12), 1261-1269.
- Pržulj, N., & Momčilović, V. (2011). Characterization of vegetative and grain filling periods of winter wheat by stepwise regression procedure: I. Vegetative period. *Genetika*, 43(2), 349-359.
- Purbajanti, E., Kusmiyati, F., & Fushkah, E. (2020). Water use efficiency and nutrient uptake of rice under soil water stress condition. *Jurnal Pertanian Tropik*, 7(1, April), 72-81.

- Qin, J., Yang, K., Lu, N., Chen, Y., Zhao, L., & Han, M. (2013). Spatial upscaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*, 138, 1-9.
- R. Sforza, M. C. Bon. (2008) Proceedings of the XII International Symposium on Biological Control of Weeds: La Grande Motte, France, 22-27 April. Wallingford ; Cambridge, MA: CABI. [Web.] Retrieved from the Library of Congress, <https://lccn.loc.gov/2009275907>.
- Rabti, A., Mekaoussi, R., Fellahi, Z. E. A., Hannachi, A., Benbelkacem, A., Benmahammed, A., & Bouzerzour, H. (2020). Characterization of Old And Recent Durum Wheat [*Triticum turgidum* (L.) Tell. convar. Durum (Desf.) Mackey] Varieties Assessed under South Mediterranean Conditions. *Egyptian Journal of Agronomy*, 0(0), 0-0. <https://doi.org/10.21608/agro.2020.43329.1230>
- Radhouane, L. (2008). Caractéristiques hydriques du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) en présence de contraintes hydriques. *Comptes Rendus Biologies*, 331(3), 206-214.
- Ramesh, K., Rao, A. N., & Chauhan, B. S. (2017). Role of crop competition in managing weeds in rice, wheat, and maize in India: A review. *Crop protection*, 95, 14-21.
- Ramírez, D. A., Yactayo, W., Rens, L. R., Rolando, J. L., Palacios, S., De Mendiburu, F., ... & Zotarelli, L. (2016). Defining biological thresholds associated to plant water status for monitoring water restriction effects: Stomatal conductance and photosynthesis recovery as key indicators in potato. *Agricultural Water Management*, 177, 369-378.
- Rastoin, J. L., & Benabderrazik, H. (2014). Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb: pour un co-développement de filières territorialisées.
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2), 34.
- Rebetzke, G. J., Botwright, T. L., Moore, C. S., Richards, R. A., & Condon, A. G. (2004). Genotypic variation in specific leaf area for genetic improvement of early vigour in wheat. *Field Crops Research*, 88(2-3), 179-189.
- Rebetzke, G. J., Bruce, S., & Kirkegaard, J. A. (2005). Genotypic increases in coleoptile length improves emergence and early vigour with crop residues. *Plant Soil*, 270, 87-100.
- Rebetzke, G. J., Ellis, M. H., Bonnett, D. G., Mickelson, B., Condon, A. G., & Richards, R. A. (2012). Height reduction and agronomic performance for selected gibberellin-responsive dwarfing genes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research*, 126, 87-96.
- Rebetzke, G. J., Jimenez-Berni, J. A., Bovill, W. D., Deery, D. M., & James, R. A. (2016). High-throughput phenotyping technologies allow accurate selection of stay-green. *Journal of experimental botany*, 67(17), 4919-4924.

- Rebetzke, G. J., Rattey, A. R., Farquhar, G. D., Richards, R. A., & Condon, A. T. G. (2013). Genomic regions for canopy temperature and their genetic association with stomatal conductance and grain yield in wheat. *Functional Plant Biology*, 40(1), 14-33.
- Rebetzke, G. J., Richards, R. A., Fischer, V. M., & Mickelson, B. J. (1999). Breeding long coleoptile, reduced height wheats. *Euphytica*, 106(2), 159-168.
- Reich, P. B., Walters, M. B., Ellsworth, D. S., Vose, J. M., Volin, J. C., Gresham, C., & Bowman, W. D. (1998). Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional groups. *Oecologia*, 114(4), 471-482.
- Rensburg, L. V., & Krüger, G. H. J. (1994). Applicability of abscisic acid and (or) proline accumulation as selection criteria for drought tolerance in *Nicotiana tabacum*. *Canadian Journal of Botany*, 72(10), 1535-1540.
- Reynolds MP, Kazi MA, Sawkins M (2005) Prospects for utilising plant-adaptive mechanisms to improve wheat and other crops in drought- and salinity-prone environments. *Annals of Applied Biology* 146, 239–259.
- Reynolds, M., & Tuberosa, R. (2008). Translational research impacting on crop productivity in drought-prone environments. *Current opinion in plant biology*, 11(2), 171-179.
- 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 science*, 42(1), 111-121.
- Richards, R. A., Rebetzke, G. J., Watt, M., Condon, A. T., Spielmeier, W., & Dolferus, R. (2010). Breeding for improved water productivity in temperate cereals: phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Functional Plant Biology*, 37(2), 85-97.
- Rickman, R. W., & Klepper, B. (1991). Environmentally driven cereal crop growth models. *Annual Review of Phytopathology*, 29(1), 361-380.
- Rodrigues, O., Lhamby, J. C. B., Didonet, A. D., & Marchese, J. A. (2007). Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: yield improvement and associated changes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(6), 817-825.
- Roselló, M., Royo, C., Sanchez-Garcia, M., & Soriano, J. M. (2019). Genetic dissection of the seminal root system architecture in mediterranean durum wheat landraces by genome-wide association study. *Agronomy*, 9(7), 364.
- Royo C., Álvaro F., Martos V., Ramdani A., Isidro J., Villegas D., Garcia Del Moral L.F. (2007) Genetic changes in durum wheat yield components and associated traits in Italian and Spanish varieties during the 20th century. *Euphytica* 155:259–270.

- Royo, C., Abaza, M., Blanco, R., & del Moral, L. F. G. (2000). Triticale grain growth and morphometry as affected by drought stress, late sowing and simulated drought stress. *Functional Plant Biology*, 27(11), 1051-1059.
- Royo, C., Alvaro, F., Martos, V., Ramdani, A., Isidro, J., Villegas, D., & Del Moral, L. F. G. (2007). Genetic changes in durum wheat yield components and associated traits in Italian and Spanish varieties during the 20th century. *Euphytica*, 155(1-2), 259-270.
- Royo, C., Dreisigacker, S., Soriano, J. M., Lopes, M. S., Ammar, K., & Villegas, D. (2020). Allelic variation at the vernalization response (*Vrn-1*), photoperiod sensitivity (*Ppd-1*) genes, and their association with the development of durum wheat landraces and modern cultivars. *Frontiers in plant science*, 11, 838.
- Royo, C., Villegas, D., Del Moral, L. G., Elhani, S., Aparicio, N., Rharrabti, Y., & Araus, J. L. (2002). Comparative performance of carbon isotope discrimination and canopy temperature depression as predictors of genotype differences in durum wheat yield in Spain. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53(5), 561-569.
- Ryser, P. (1996). The importance of tissue density for growth and life span of leaves and roots: a comparison of five ecologically contrasting grasses. *Functional Ecology*, 717-723.
- Sadeghi-Tehran, P., Sabermanesh, K., Virlet, N., & Hawkesford, M. J. (2017). Automated method to determine two critical growth stages of wheat: heading and flowering. *Frontiers in Plant Science*, 8, 252.
- Sadras, V. O., & Angus, J. F. (2006). Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in dry environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(8), 847-856.
- Sadras, V. O., O'Leary, G. J., & Roget, D. K. (2005). Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*, 91(2-3), 131-148.
- Salam, M. A., Kabir, M. M., Yee, L. F., & Khan, M. S. (2019). Water quality assessment of perak river, Malaysia. *Pollution*, 5(3), 637-648.
- Sanchez-Garcia, M., Alvaro, F., Peremarti, A., Trevaskis, B., Martin-Sanchez, J. A., & Royo, C. (2015). Breeding effects on dry matter accumulation and partitioning in Spanish bread wheat during the 20th century. *Euphytica*, 203(2), 321-336.
- Santín-Montanyá, M. I., Gandía-Toledano, M. L., Zambrana, E., & Tenorio, J. L. (2020). Effects of tillage systems on wheat and weed water relationships over time when growing together, in semiarid conditions. *Annals of Applied Biology*, 177(2), 256-265.
- Sarieva, G. E., Kenzhebaeva, S. S., & Lichtenthaler, H. K. (2010). Adaptation potential of photosynthesis in wheat cultivars with a capability of leaf rolling under high temperature conditions. *Russian Journal of Plant Physiology*, 57(1), 28-36.

- Savić, J., Kandić, V., Rančić-Pećinar, I., Šešlija, A., Ivanović, D., Bratković, K., & Dodig, D. (2017). Association of agronomical, morphological and anatomical traits with compensatory effect of stem reserve mobilization in common wheat genotypes under drought stress. *Italian Journal of Agrometeorology*, 22(3), 5-12.
- Sayar, R., Khemira, H., & Kharrat, M. (2007). Inheritance of deeper root length and grain yield in half-diallel durum wheat (*Triticum durum*) crosses. *Annals of Applied Biology*, 151(2), 213-220.
- Sayed, M. A., Hamada, A., Lèon, J., & Naz, A. A. (2017). Genetic mapping reveals novel exotic QTL alleles for seminal root architecture in barley advanced backcross double haploid population. *Euphytica*, 213(1), 2.
- Schuppler, U., He, P. H., John, P. C., & Munns, R. (1998). Effect of water stress on cell division and Cdc2-like cell cycle kinase activity in wheat leaves. *Plant physiology*, 117(2), 667-678.
- Sebillotte, M. (1990). Systeme de culture, un concept operatoire pour les agronomes. INRA, 1990, Un Point sur. - INRA, 2-7380-0256-0. (hal-02852812)
- Seidler-Lozykowska, K., Bandurska, H., & Bocianowski, J. (2010). Evaluation of cell membrane injury in caraway [*Carum carvi* L.] genotypes in water deficit conditions. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 79(2), 95-99.
- Sezen, S. M., Yazar, A., & Eker, S. (2006). Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper. *Agricultural Water Management*, 81(1-2), 115-131.
- Shani, U., & Dudley, L. M. (2001). Field studies of crop response to water and salt stress. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), 1522-1528.
- Sharma, S., Xu, S., Ehdaie, B., Hoops, A., Close, T. J., Lukaszewski, A. J., & Waines, J. G. (2011). Dissection of QTL effects for root traits using a chromosome arm-specific mapping population in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 122(4), 759-769.
- Shavrukov, Y., Kurishbayev, A., Jatayev, S., Shvidchenko, V., Zotova, L., Koekemoer, F., ... & Langridge, P. (2017). Early flowering as a drought escape mechanism in plants: How can it aid wheat production?. *Frontiers in plant science*, 8, 1950.
- Shewry, P. R. (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 60, pp. 1537–1553. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp058>
- Shin, N. H., Trang, D. T., Hong, W. J., Kang, K., Chuluuntsetseg, J., Moon, J. K., ... & Yoo, S. C. (2020). Rice Senescence-Induced Receptor-Like Kinase (OsSRLK) Is Involved in Phytohormone-Mediated Chlorophyll Degradation. *International journal of molecular sciences*, 21(1), 260.
- Sikder, S., Qiao, Y., Baodi, D., Shi, C., & Liu, M. (2016). Effect of water stress on leaf level gas exchange capacity and water-use efficiency of wheat cultivars. *Indian Journal of Plant Physiology*, 21(3), 300-305.

- Silvestri, V., Soulie, M., Lafleur, J., Sarkis, G., & Bekkouche, N. (1990). Foundation problems in Champlain clays during droughts. I: rainfall deficits in Montréal (1930–1988). *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 285-293.
- Simane, B., Peacock, J. M., & Struik, P. C. (1993). Differences in developmental plasticity and growth rate among drought-resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Plant and soil*, 157(2), 155-166.
- Simane, B., Peacock, J. M., & Struik, P. C. (1993). Differences in developmental plasticity and growth rate among drought-resistant and susceptible cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Plant and soil*, 157(2), 155-166.
- Sinclair, T. R. (2012). Is transpiration efficiency a viable plant trait in breeding for crop improvement?. *Functional Plant Biology*, 39(5), 359-365.
- Sinclair, T. R. (2018). Effective water use required for improving crop growth rather than transpiration efficiency. *Frontiers in plant science*, 9, 1442.
- Singh, M. K., Sharma, P. K., Tyagi, B. S., & Singh, G. (2014). Heterosis for yield component traits and protein content in bread wheat under normal and heat-stress environment. *Cereal Research Communications*, 42(1), 151-162.
- Slafer, G. A., Andrade, F. H., & Satorre, E. H. (1990). Genetic-improvement effects on pre-anthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. *Field Crops Research*, 23(3-4), 255-263.
- Slama, A., Ben Salem, M., Ben Naceur, M., & Zid, E. (2005). Les céréales en Tunisie: production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Sécheresse*, 16(3), 225-229.
- Sofi, P. A., Ara, A., Gull, M., & Rehman, K. (2019). Canopy temperature depression as an effective physiological trait for drought screening. In *Drought-Detection and Solutions*. IntechOpen.
- Solomon, K. F., & Labuschagne, M. T. (2003). Variation in water use and transpiration efficiency among durum wheat genotypes grown under moisture stress and non-stress conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 141(1), 31.
- Soltner, D. (2016). LES GRANDES PRODUCTION VEGETALES (22e EDITIO; science et techniques agricoles, ed.). Science et techniques agricoles.p 76 .
- Spagnoletti Zeuli, P. L., & Qualset, C. O. (1990). Flag leaf variation and the analysis of diversity in durum wheat. *Plant Breeding*, 105(3), 189-202.
- Steinfort, U., Fukai, S., Trevaskis, B., Glassop, D., Chan, A., & Dreccer, M. F. (2017). Vernalisation and photoperiod sensitivity in wheat: the response of floret fertility and grain number is affected by vernalisation status. *Field Crops Research*, 203, 243-255.

- Stewart, B. A., & Steiner, J. L. (1990). Water-use efficiency. In *Advances in soil science* (pp. 151-173). Springer, New York, NY.
- Stewart, B. A., Musick, J. T., & Dusek, D. A. (1983). Yield and Water Use Efficiency of Grain Sorghum in a Limited Irrigation-Dryland Farming System 1. *Agronomy Journal*, 75(4), 629-634.
- Sugár, E., Berzsenyi, Z., Bónis, P., & Árendás, T. (2017). Growth analysis of winter wheat cultivars as affected by nitrogen fertilization/Wachstumsanalyse von Winterweizensorten in Abhängigkeit von Stickstoffdüngung. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 68(1), 57-70.
- Svoray, T., Mazor, S., & Bar, P. (2007). How is shrub cover related to soil moisture and patch geometry in the fragmented landscape of the Northern Negev desert?. *Landscape Ecology*, 22(1), 105-116.
- Tambussi, E. A., Bort, J., & Araus, J. L. (2007). Water use efficiency in C3 cereals under Mediterranean conditions: a review of physiological aspects. *Annals of Applied Biology*, 150(3), 307-321.
- Tandonnet, J. P., Marguerit, E., Cookson, S. J., & Ollat, N. (2018). Genetic architecture of aerial and root traits in field-grown grafted grapevines is largely independent. *Theoretical and applied genetics*, 131(4), 903-915.
- Tao, Z. Q., Wang, D. M., Yang, Y. S., Zhao, G. C., & Chang, X. H. (2018). Light interception and radiation use efficiency response to tridimensional uniform sowing in winter wheat. *Journal of integrative agriculture*, 17(3), 566-578.
- Tardieu, F. (2003). Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in plant science*, 8(1), 9-14.
- Tardieu, F. (2012). Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. *Journal of experimental botany*, 63(1), 25-31.
- Tardieu, F., Lafarge, T., & Simonneau, T. H. (1996). Stomatal control by fed or endogenous xylem ABA in sunflower: interpretation of correlations between leaf water potential and stomatal conductance in anisohydric species. *Plant, Cell & Environment*, 19(1), 75-84.
- Tardieu, F., Parent, B., Caldeira, C. F., & Welcker, C. (2014). Genetic and physiological controls of growth under water deficit. *Plant Physiology*, 164(4), 1628-1635.
- Tataw, J. T., Baier, F., Krottenthaler, F., Pachler, B., Schwaiger, E., Wyhlidal, S., ... & Zaller, J. G. (2016). Climate change induced rainfall patterns affect wheat productivity and agroecosystem functioning dependent on soil types. *Ecological research*, 31(2), 203-212.
- Tausz-Posch, S., Norton, R. M., Seneweera, S., Fitzgerald, G. J., & Tausz, M. (2013). Will intra-specific differences in transpiration efficiency in wheat be maintained in a high CO₂ world? A FACE study. *Physiologia Plantarum*, 148(2), 232-245.

- Tavakkoli, A. R., & Oweis, T. Y. (2004). The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. *Agricultural Water Management*, 65(3), 225-236.
- Tewolde, H., Fernandez, C. J., & Erickson, C. A. (2006). Wheat cultivars adapted to post-heading high temperature stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(2), 111-120.
- Thapa, S., Reddy, S. K., Fuentealba, M. P., Xue, Q., Rudd, J. C., Jessup, K. E., ... & Liu, S. (2018). Physiological responses to water stress and yield of winter wheat cultivars differing in drought tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204(4), 347-358.
- Thomas, Z., Molénat, J., Caubel, V., Grimaldi, C., & Mérot, P. (2008). Simulating soil-water movement under a hedgerow surrounding a bottomland reveals the importance of transpiration in water balance. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(5), 577-585.
- Torres, A. M., Palacios, S. A., Yerkovich, N., Palazzini, J. M., Battilani, P., Leslie, J. F., ... & Chulze, S. N. (2019). Fusarium head blight and mycotoxins in wheat: Prevention and control strategies across the food chain. *World Mycotoxin Journal*, 12(4), 333-355.
- Trethowan, R. M. (2014). Defining a genetic ideotype for crop improvement. In *Crop Breeding* (pp. 1-20). Humana Press, New York, NY.
- Triboi, E., Blanchon, J., & Magné, J. (1985). Déterminisme du poids moyen du grain chez le blé. Effet sur la variation du rendement. *Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France*, 71(8), 871-886.
- Tuberosa, R. (2004). Molecular approaches to unravel the genetic basis of water use efficiency. *Water use efficiency in plant biology*, 228-301.
- Tuberosa, R., Giuliani, S., Parry, M. A. J., & Araus, J. L. (2007). Improving water use efficiency in Mediterranean agriculture: what limits the adoption of new technologies?. *Annals of Applied Biology*, 150(2), 157-162.
- Turk L. 1978. Sècheresse du sol. Index physique des réserves d'eau et signification agronomique des déficits d'humidité dans le sol. *Bulletin du BRGM*:197-202.
- Turner, N. C. (1981). Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and soil*, 58(1-3), 339-366.
- Uddin, M. N., & Marshall, D. R. (1989). Effects of dwarfing genes on yield and yield components under irrigated and rainfed conditions in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 42(1-2), 127-134.
- Unkovich, M., Baldock, J., & Farquharson, R. (2018). Field measurements of bare soil evaporation and crop transpiration, and transpiration efficiency, for rainfed grain crops in Australia—A review. *Agricultural water management*, 205, 72-80.

- USDA, N. (2018). The plants database (<http://plants.usda.gov>, May 2018). National Plant Data Team, Greensboro.
- USDA, N. (2020). The plants database (<http://plants.usda.gov>, May 2011). National Plant Data Team, Greensboro.
- Vile, D., Garnier, E., Shipley, B., Laurent, G., Navas, M. L., Roumet, C., ... & Midgley, G. F. (2005). Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves. *Annals of botany*, 96(6), 1129-1136.
- Vilibić, I., Horvath, K., & Palau, J. L. (2019). Meteorology and Climatology of the Mediterranean and Black Seas: Introduction. In *Meteorology and Climatology of the Mediterranean and Black Seas* (pp. 1-5). Birkhäuser, Cham.
- Villegas, D., Aparicio, N., Nachit, M. M., Araus, J. L., & Royo, C. (2000). Photosynthetic and developmental traits associated with genotypic differences in durum wheat yield across the Mediterranean basin. *Australian Journal of Agricultural Research*, 51(7), 891-901.
- Vita P., Li Destri Nicosia O., Nigro F., Platani C., Riefolo C., Di Fonzo N., Cattivelli L. (2007) Breeding progress in morpho-physiological, agronomical and qualitative traits of durum wheat cultivars released in Italy during the 20th century. *European Journal of Agronomy* 26:39–53.
- Walton, C., & Parnell, T. (1996). Weeds as quarantine pests. In *Proceedings Eleventh Australian Weeds Conference* (pp. 462-463).
- Wang, H. G., Yu, Z. W., Zhang, Y. L., Wang, D., Shi, Y., & Xu, Z. Z. (2011). Effects of supplemental irrigation based on measuring soil water content on wheat photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and allocation. *Ying Yong Sheng tai xue bao= The Journal of Applied Ecology*, 22(10), 2495-2503.
- Wang, R. X., Hai, L., Zhang, X. Y., You, G. X., Yan, C. S., & Xiao, S. H. (2009). QTL mapping for grain filling rate and yield-related traits in RILs of the Chinese winter wheat population Heshangmai × Yu8679. *Theoretical and Applied Genetics*, 118(2), 313-325.
- Wang, S., Fu, B. J., Gao, G. Y., Yao, X. L., & Zhou, J. (2012). Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2883.
- Wasson, A. P., Richards, R. A., Chatrath, R., Misra, S. C., Prasad, S. S., Rebetzke, G. J., ... & Watt, M. (2012). Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of experimental botany*, 63(9), 3485-3498.
- Watanabe, N. (2017). Breeding opportunities for early, free-threshing and semi-dwarf *Triticum monococcum* L. *Euphytica*, 213(8), 201.
- Whaley, J. M., Sparkes, D. L., Foulkes, M. J., Spink, J. H., Semere, T., & Scott, R. K. (2000). The physiological response of winter wheat to reductions in plant density. *Annals of Applied Biology*, 137(2), 165-177.

- Xie, Q., Mayes, S., & Sparkes, D. L. (2015). Carpel size, grain filling, and morphology determine individual grain weight in wheat. *Journal of experimental botany*, 66(21), 6715-6730.
- Xie, Q., Mayes, S., & Sparkes, D. L. (2016). Optimizing tiller production and survival for grain yield improvement in a bread wheat × spelt mapping population. *Annals of Botany*, 117(1), 51-66.
- Xu, H. L., Qin, F., Du, F., Xu, R., Xu, Q., Tian, C., ... & Wang, F. (2009). Photosynthesis in different parts of a wheat plant. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(3&4), 399-404.
- Xynias, I. N., Mylonas, I., Korpetis, E. G., Ninou, E., Tsballa, A., Avdikos, I. D., & Mavromatis, A. G. (2020). Durum wheat breeding in the Mediterranean region: Current status and future prospects. *Agronomy*, 10(3), 432.
- Yang, J., & Zhang, J. (2006). Grain filling of cereals under soil drying. *New phytologist*, 169(2), 223-236.
- Yang, L., Wei, W., Chen, L., & Mo, B. (2012). Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 475, 111-122.
- Yoro, G., & Godo, G. (1990). Les méthodes de mesure de la densité apparente: analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. *Cahiers-ORSTOM. Pédologie*, 25(4), 423-429.
- Yu, X., Li, B., Wang, L., Chen, X., Wang, W., Wang, Z., & Xiong, F. (2015). Systematic analysis of pericarp starch accumulation and degradation during wheat caryopsis development. *PLoS One*, 10(9), e0138228.
- Yudina, L., Sukhova, E., Gromova, E., Nerush, V., Vodeneev, V., & Sukhov, V. (2020). A light-induced decrease in the photochemical reflectance index (PRI) can be used to estimate the energy-dependent component of non-photochemical quenching under heat stress and soil drought in pea, wheat, and pumpkin. *Photosynthesis Research*, 1-13.
- Yue, B., Xue, W., Xiong, L., Yu, X., Luo, L., Cui, K., ... & Zhang, Q. (2006). Genetic basis of drought resistance at reproductive stage in rice: separation of drought tolerance from drought avoidance. *Genetics*, 172(2), 1213-1228.
- Zacharias, M., Singh, S. D., Naresh Kumar, S., Harit, R. C., & Aggarwal, P. K. (2010). Impact of elevated temperature at different phenological stages on the growth and yield of wheat and rice. *Indian Journal of Plant Physiology*, 15(4), 350.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421.
- Zerner, M. C., Gill, G. S., & Vandeleur, R. K. (2008). Effect of height on the competitive ability of wheat with oats. *Agronomy journal*, 100(6), 1729-1734.

- Zhang Y., Xu W., Wang W., Dong H., Qi X., Zhao M., Fang Y., Gao Y., Hu L. (2016) Progress in genetic improvement of grain yield and related physiological traits of Chinese wheat in Henan Province. *Field Crops Research* 199:117-128.
- Zhang, G., Liu, C., Xiao, C., Xie, R., Ming, B., Hou, P., ... & Li, S. (2017). Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China. *Field Crops Research*, 211, 137-146.
- 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.
- Zhang, X., Chen, S., Sun, H., Wang, Y., & Shao, L. (2010). Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97(8), 1117-1125.
- Zhao, Z., Rebetzke, G. J., Zheng, B., Chapman, S. C., & Wang, E. (2019). Modelling impact of early vigour on wheat yield in dryland regions. *Journal of experimental botany*, 70(9), 2535-2548.
- Zhou, W., & Lin, X. (1995). Effects of waterlogging at different growth stages on physiological characteristics and seed yield of winter rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research*, 44(2-3), 103-110.
- Zhou, Y., Zhu, H. Z., Cai, S. B., He, Z. H., Zhang, X. K., Xia, X. C., & Zhang, G. S. (2007). Genetic improvement of grain yield and associated traits in the southern China winter wheat region: 1949 to 2000. *Euphytica*, 157(3), 465-473.

ANNEXE

**Abdenour¹ BELAGROUZ, Houria CHENNAFI, Hamena BOUZERZOUR
Mohamed HAKIMI, Rabie RAZEM, A.krim HADJ SAHRAOUI**

**RELATIONSHIPS AMONG WATER USE EFFICIENCY AND THE
PHYSIO-AGRONOMIC TRAITS IN DURUM WHEAT (*TRITICUM
DURUM* DESE.) CULTIVARS ASSESSED UNDER RAINFED
CONDITIONS OF THE EASTERN HIGH PLATEAUS OF ALGERIA.**

SUMMARY

Genetic advances in grain yield under rainfed conditions have been low, slowed by genotype x environment interaction arising from unpredictable rainfall in drought prone areas. A good understanding of factors regulating yield provides the opportunity to identify and select for physiological and agronomic traits that increase both water use efficiency and grain yield under rainfed conditions. The results of this investigation exhibited large variation for physiological and agronomic traits among varieties and cropping seasons. Modern varieties had high harvest index, grain yield, and leaf chlorophyll content, low leaf relative water content, and were shorter than varieties derived from land races. Total dry matter and specific leaf area differences, among groups of varieties, were not significant. Water use efficiency for total dry matter showed no significant correlations with the measured physiological and agronomic traits, while water use efficiency for grain yield was significantly correlated with harvest index, plant height and to a lesser extent with leaf chlorophyll content. Path analysis, based on phenotypic correlations, showed the consistent direct and indirect effects of harvest index and to a lesser extent those of plant height. Selecting for plant height and harvest index could improve both water use efficiency and grain yield under drought prone environments.

Key words: *Triticum durum*, water use efficiency, harvest index, grain yield, path analysis, rainfed.

INTRODUCTION

Durum wheat cultivation, in Algeria, is practiced in a fallow-wheat rotation, relying on stored water during the fallow period, in addition to the cropping season's rainfall. Annual precipitations, inherently low in amount, varied quantitatively and qualitatively, mainly on the high plateaus area, where nearly 70% are received during the cold winter months. Under such growing conditions, the occurrence of intermittent drought stress limits grain yield and

¹ Abdenour belagouz (corresponding author: abdenour_19@yahoo.fr), Houria Chennafi, Hamena Bouzeour, Faculty of Natural and Life Sciences, Department of Agronomy, LVRBN laboratory University of Setif, 19000 Setif, ALGERIA. Mohamed Hakimi, Rabie Razem, A.krim HadjSahraoui National Center of Control and Certification of Seeds and Plants. Setif, ALGERIA

Notes: The authors declare that they have no conflicts of interest. Authorship Form signed online

renders water scarcity as the most penalizing production factor (Chennafi *et al.*, 2006). The high plateaus area belongs to a vast geographical region where agriculture has been forecast to be at greater risk due to an increase in the frequency and severity of drought episodes (Sahnoune *et al.*, 2013). Selection of drought tolerant cultivars is sought to minimize the effects of water scarcity and to sustain crop production. The release of improved cultivars requiring lower amounts of water per unit yield and characterized by high yield potential is essential for more sustainable agricultural practices, particularly in rainfed, drought prone areas. Water conserving breeding strategy could combine high yield, high WUE and good drought resistance traits in one variety (Zhang *et al.*, 2004). Water use efficiency (WUE) is seen as an important determinant of yield under stress and as a component of crop drought resistance (Ehdaie, 1995 ; Kirda *et al.*, 1999). This trait remains among the most appropriate strategies to cope with drought stress under rainfed conditions. Several studies have shown that selection based on this trait improved grain yield potential (Rebetzke *et al.*, 2002, Franks *et al.*, 2015). Zhang *et al.* (2005) reported that grain yield improved by 50%, resulting in significant WUE increases. Studies are needed to focus on plant traits that are beneficial to both grain yield and WUE improvement.

Besides crop husbandry, numerous plant characteristics are reported to affect WUE and grain yield (GY). In fact GY and WUE, due to their close association with harvest index (HI), could be improved by manipulating this trait (Ehdaie and Waines, 1993; Zhang *et al.*, 2008). Siddique *et al.* (1990) reported that WUE of modern cultivars was higher than old cultivars among Australian tested wheat varieties, because of significant changes in plant stature and crop cycle duration, leading to improved HI and stress escaping. Slafer and Araus (1998) reported that the improved crop performance may be achieved by improvements in water use (WU), WUE and HI. Several plant traits such as chlorophyll content, osmotic adjustment, relative water content, translocation of stem stored carbohydrate, stay green, early seedling vigor, earliness, canopy temperature, carbon isotopic discrimination, coleoptile length, stem and leaf waxiness, leaf and root architecture as well as the amount of soil moisture available to the crop and its partitioning between evaporation and transpiration are reported to related to WUE and GY(Quin *et al.*, 2013; Richard *et al.*, 2015; Farjam *et al.*, 2015; Nakhforoosh *et al.*, 2016; Christy *et al.*, 2018; Rashid *et al.*, 2018; Abdolahi *et al.*,2018). The present investigation aimed to analyze the association between some physio-agronomic traits and WUE in eight durum wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties, belonging to two different eras, evaluated under semi-arid conditions during three cropping seasons.

MATERIAL AND METHODS

Plant material and experimental design

The experiment was carried out at the Field Crop Institute-Agricultural Experimental Station of Setif (ITGC-AES, 36°12' N and 05°24' E, 1080 masl, Algeria), under rainfed conditions during three growing seasons (2013/14-

2015/16). Eight durum wheat varieties were evaluated (Table 1). Waha and Gaviota durum are selections from Cimmyt-Icarda joint durum wheat breeding program. Simeto is an Italian cultivar while Megress is an ITGC-AES Setif selection. These varieties proved to be well adapted to the Setif region and are classified as early-heading genotypes (Haddad *et al.*, 2016). Mohamed Ben Bachir (MBB), Hedba₃, Guemgoum Rkhem, and Oued Zenati₃₆₈ are old varieties selected from land races. MBB is selected from a land race native to the Setif region. Hedba₃, alias Pelissier, is a drought tolerant cultivar. Guemgoum Rkhem is native from Tiaret region (Western Algeria), while Oued Zenati₃₆₈ is a selection from a population native to the Guelma region (Eastern Algeria). Varieties derived from landraces are taller and late maturing compared to recently released ones (Nouar *et al.* 2012).

Table 1. Name of varieties evaluated during the 2013/14 - 2015/16 cropping seasons at the ARS-ITGC, Setif, Algeria.

Variety name	Abv	Cross name	Origin (released year)
Waha	WAH	Plc/Ruff//Gta/3/Rolett e	Cimmyt-Icarda (1985)
Gaviota durum	GTA	Crane/4/Polonicum PI ₁₈₅₃₀₉ // <i>T.glutin</i> <i>enano</i> /2* Tc60/3/Gll	Cimmyt-Icarda (1985)
Simeto	SMT	Capecti ₈ /Valvona	Italy
Megress	MGS	Ofanto/Waha//MBB	ITGC- AES, Setif (2015)
Med Ben Bachir	MBB	Local variety	INRA Algeria (1950)
Hedba ₃	H ₃	Local variety	INRA Algeria (1950)
Guemgoum Rkhem	GMG	Local variety	INRA Algeria (1950)
Oued Zenati ₃₆₈	OZ ₃₆₈	Local variety	INRA Algeria (1950)

The experiment was arranged according to a randomized complete block design, with four replications. Soil site is a silt-clay soil with calcium carbonate and organic matter contents of 30.4 % and 1.4%, respectively. Sowing dates were 09/12/2013, 15/2014, 29/11/2015 for 2013/14, 2014/15 and 2015/16 cropping seasons, respectively. Recommended cultural practices for the area were followed to raise a good crop. Monoammonium phosphate (52% P₂O₅ + 12% N) with 80 kg ha⁻¹ was applied just before sowing and 80 kg ha⁻¹ of urea (46%) were broadcasted at the tillering stage. Weeds were controlled chemically by application of 150 g ha⁻¹ of Zoom [*Dicamba* 66% *Triasulfuron* 4%] and 1.2 L ha⁻¹ of Traxos [22.5 g/l *de Pinoxaden*, 22.5 g/l *Clodinafop-propargyl*, 6.5g/l *de Cloquintocet-méxyl*] herbicides.

Measurements

At the heading stage, leaf relative water content (LRWC), leaf chlorophyll content (LCHC) and specific leaf area (SLA) were measured. LRWC was determined by the method of Barrs and Weatherly (1962) described by Pask *et al.*, (2012). Four leaves were sampled per plot and immediately weighed to

obtain the fresh weight. Leaf samples were then placed in test tubes containing distilled water, and let to stand for four hours, under dim light at laboratory ambient temperature. Leaf samples were then reweighed to obtain the leaf turgid weight. Leaf samples were then oven dried at 80°C for 48 h for leaf dry weight determination. The LRWC was calculated according to the following formulae reported by Pask *et al.*, (2012):

$$\text{LRWC} = \left[\frac{\text{FW} - \text{DW}}{\text{TW} - \text{DW}} \right] \times 100$$

where FW is the sample fresh weight, TW is the sample turgid weight, and DW is the sample dry weight. SPAD chlorophyll meter (Minolta SPAD-502 meter, Tokyo, Japan) was used to estimate leaf chlorophyll content. Three readings were taken per leaf from a sample of five fully expanded flag leaves per plot. Readings were averaged to get the plot mean SPAD value. The same leaf samples were used to estimate the specific leaf area, which was measured with an image scanner software (Mesurim pro, version 3.4). Leaf dry weight (LDW) was determined after oven-drying at 80 °C for 48 hours. SLA, derived as leaf area (LA) per unit leaf dry weight ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), was calculated using the following formulae reported by Rashid *et al.*, (2018):

$$\text{SLA} = \frac{\text{LA}(\text{cm}^2)}{\text{LDW}(\text{g})}$$

At crop maturity, 2-row segments, 2 m long, were sampled per plot to estimate plant height, measured from ground level to the tip of the terminal spikelet, awns excluded; total dry matter, grain yield, and harvest index, derived as the ratio of grain yield over total dry matter yield. The amount of water evaporated and that transpired by each variety during the cropping cycle (water used =WU) was determined as the sum of the soil moisture available at seeding minus soil moisture available at harvest, plus the accumulated rainfall, from seeding to harvest. Soil available moisture (ASM, mm), at sowing and at harvest was deduced by the following formulae: $\text{ASM}(\text{mm}) = [(\text{H}\% - \text{WP}) \times \text{h} \times \text{pb}] / 100$, where $\text{H}\% = 100(\text{wet soil weight} - \text{dry soil weight}) / \text{dry soil weight}$, $\text{WP} = \text{wilting point} = 12\%$, average of the soil of the experimental site, $\text{h} = \text{soil profile depth in mm}(600 \text{ mm})$, and $\text{pb} = \text{bulk density} = 1.23$ (Chennafi *et al.* 2011; Belagrouz *et al.*, 2016). Water use efficiency for total dry matter (WUE_{TDM} , $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) and grain yield (WUE_{GY} , $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) were derived according to Cheikh M'hamed *et al.*, (2015) as follow:

$$\text{WUE}_{\text{TDM}} = \frac{\text{TDM}}{\text{WU}}$$

$$\text{WUE}_{\text{GY}} = \frac{\text{GY}}{\text{WU}}$$

Where TDM= total dry matter (kg ha^{-1}) and GY=grain yield (kg ha^{-1}).

Data analysis

Collected data were subjected to a combined analysis of variance using balanced anova subroutine implemented in Cropstat software package (Cropstat, 2007). Years, replications within years, and genotype by year interaction effects were considered as random and genotype effect was considered as fixed. Year main effect was tested against the replication hierarchized within years, while the genotype main effect was tested against the interaction which was tested against the residual. Mean comparisons were performed using the Fisher's protected least significant difference test at 5% probability level. Relationships among the measured traits were computed using Pearson's simple correlation test implemented in Past software (Hammer *et al.*, 2001). Path coefficient analysis was performed to divide the correlation coefficient between WUE and the physio-agronomic traits (r_{iy}) into direct (p_{iy}) and indirect effects ($r_{ij} p_{jy}$) according to the following equation reported by Garcia del Moral *et al.*, (2003):

$$\mathbf{r}_{iy} = \mathbf{P}_{iy} + \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{P}_{jy}$$

RESULTS AND DISCUSSION

1. Physiological characteristics

The combined analysis of variance indicated significant year main effect for leaf chlorophyll content and leaf relative water content, but not for specific leaf area. Genotype main effect was significant only for leaf chlorophyll content, while the genotype x year interaction was significant for the three measured physiological traits (Table 2). The significant interaction indicated that ranking order of the varieties changed between years suggesting that differences existed for the same trait between varieties within year and varied significantly also for the same variety among years.

Table 2. Combined analysis of variance mean squares of the measured traits.

Traits	Year (Y)	Rep/year	Variety (V)	V x Y	Residual
<i>Physiological traits</i>					
LCHC	3280.00**	24.0	150.25**	25.87*	10.80
LRWC	2346.00**	56.7	78.80 ^{ns}	85.10**	29.80
SLA	10.90 ^{ns}	5.7	24.60 ^{ns}	24.30**	2.40
<i>Agronomic traits</i>					
PHT	4632.89**	17.10	1980.10**	346.30**	17.40
TDM	25930.32**	68.50	364.10 ^{ns}	232.10**	24.10
GY	3173.52**	3.40	247.26**	27.21**	5.60
HI	1225.98**	14.70	947.82**	30.09**	8.20
<i>Water use efficiency</i>					
WUE _{TDM}	3397.67**	8.10	36.30 ^{ns}	22.70**	2.80
WUE _{GY}	436.32**	0.40	28.40**	3.60**	0.61

*, ** = Significant effect at the 5 and 1% probability level, respectively; LCHC= Leaf chlorophyll content, LRWC= Leaf relative water content, SLA = Specific leaf area, PHT = Plant height, TDM= Total dry matter, GY= Grain yield, HI = Harvest index, WUE_{TDM}= Water use efficiency for total dry matter, WUE_{GY}= Water use efficiency for grain yield.

Leaf chlorophyll content values, averaged over varieties, varied from 25.6 to 45.8 spad units indicating that 2013/14 cropping season was less favorable to the expression of high chlorophyll content compared to the 2014/15 cropping season. Averaged over cropping seasons, chlorophyll index values ranged from 32.7 spad units, measured in GMG, to 42.3 Spad units, measured in MGS. This indicated that MGS possesses higher potential for chlorophyll content expression than GMG. Per cropping season, GMG, in 2013/14, (20.3 spad units), MBB, in 2014/15 (43.0 spad units), and H3, in 2015/16, (31.6 spad units), expressed the lowest leaf chlorophyll content. SMT, in 2013/14, (30.3 spad units), and MGS, in 2014/15 and 215/16, (49.8 and 47.1 spad units), exhibited the highest chlorophyll content mean values (Table 3).

Table 3. Mean values of the three measured physiological traits, averaged over years (variety main effect), averaged over varieties (year main effect), variety mean value per cropping season and the least significant difference at 5% probability level.

Varieties	LCHC				LRWC				SLA			
	Cropping seasons			Variety effect	Cropping seasons			Variety effect	Cropping seasons			Variety effect
	2014	2015	2016		2014	2015	2016		2014	2015	2016	
GMG	20.3	45.5	32.4	32.7	74.6	90.1	78.8	81.1	10.8	12.5	8.9	10.7
OZ3	25.4	45.8	31.9	34.4	77.7	93.4	88.5	86.5	9.5	15.4	8.6	11.2
H3	23.3	45.2	31.6	33.3	76.3	88.7	91.3	85.4	9	5.3	10.2	8.2
MBB	24.5	43.0	32.1	33.2	78.6	85.4	86.3	83.4	9.8	10.7	6.9	9.1
SMT	30.3	47.3	43.1	40.2	74.3	83.8	88.2	82.1	9.9	5.4	8	7.8
WAH	26.3	45.5	39.8	37.2	69.3	90.4	90.1	83.3	9.6	7.8	7.6	8.3
GTA	25.1	44.7	35.7	35.1	68.7	97.2	90.8	85.6	9.2	3.5	8.6	7.1
MGS	29.9	49.8	47.1	42.3	69.3	89.6	77.7	78.9	9.2	11.1	8.9	9.7
Lsd5%		4.6		4.5		7.7		8.1		2.2		4.3
Year effect	25.6	45.8	36.7		73.6	89.8	86.5		9.6	9	8.5	
Lsd5%		2.5				4.3				1.4		

LCHC= Leaf chlorophyll content, LRWC= Leaf relative water content, SLA = Specific leaf area. GMG =Guengoum Rkhem, OZ₃₆₈= Oued Zenati 368, H₃= Hedba3, MBB= Mohammed ben Bachir, SMT= Simeto, WAH= Waha, GTA= Gaviota, MGS= Megress, LSD5%= Least significant difference at the 5% probability level.

Leaf relative water content mean values, averaged over varieties, varied from 73.6 to 89.8% indicating that 2013/14 cropping season was less favorable to the expression of high leaf relative water content compared to the 2014/15 cropping season. Averaged over cropping seasons, leaf relative water content mean values ranged from 78.9%, in MGS, to 86.5%, in OZ₃₆₈. The range among varieties main effect was not statistically significant when compared to the value of 8.1% taken by the least significant difference at 5% probability level. Per cropping season, GTA, in 2013/14, (68.7%), SMT, in 2014/15 (83.8%), and MGS, in 2015/16, (77.7%), expressed the lowest leaf relative water content. MBB, in 2013/14, (78.6%), GTA, in 2014/15, (97.2%), and H₃, in 215/16, (91.3%), showed the highest leaf relative water content mean values.

Differences among extreme mean values were statistically significant as indicated by the significant genotype x cropping season interaction (Tables 2 and 3). Differences among cropping seasons (average over varieties) and among varieties (average over cropping seasons) main effects were not statistically significant for specific leaf area, whose mean values ranged from 8.5 to 9.6 cm² g⁻¹, among cropping seasons and from 7.1 to 11.2 cm² g⁻¹ among varieties main effect. Per cropping season, GMG, in 2013/14, (10.8 cm² g⁻¹), SMT, in 2014/15, (83.8%), and MGS, in 2015/16, (77.7%), expressed the lowest leaf relative water content. Meanwhile MBB, in 2013/14, (78.6%), GTA, in 2014/15, (97.2%), and H3, 215/16, (91.3%), showed the highest leaf relative water content mean values. Differences among extreme varieties mean values were statistically significant as indicated by the significant genotype x cropping season interaction (Tables 2 and 3). These results indicated that the expression of the physiological traits was strongly affected by the environment and to a lesser extent by the genotype.

2. Agronomic performances

The combined analysis of variance indicated significant year main effect for the four measured agronomic traits. Plant height, grain yield and harvest index showed significant genotype main effect. The genotype x year interaction was significant for the four measured agronomic traits (Table 2). The 2015/16 cropping season was the most favorable environment for the expression of the potential of plant height, total dry matter and grain yield. The less favorable environment for the expression of these traits were the 2014/15 for plant height and the 2013/14 for both grain yield and total dry matter. Plant height was reduced from the favorable to less favorable environments by 23.4 cm which represents 29.3% of plant height mean value recorded under favorable environment (Table 4). Total dry matter and grain yield were reduced by 56.6 and 17.5 q ha⁻¹, respectively, which represents 59.8 and 57.4 % of the mean values recorded under favorable environment for total dry matter and grain yield (Table 4). The best mean value of harvest index (34.3 %) was expressed under the 2013/14 cropping season, which was less favorable to the expression of grain yield and total dry matter. The lowest harvest index mean value (22.9%) was recorded in 2014/15 cropping season. These results suggested that the measured respectively (Table 4).

Even though the small set of varieties assessed, the results showed the presence of variability for all the measured traits. Globally, newly released varieties were shorter, high grain yielding and allocating more dry matter to the grain than old varieties. Difference in terms of total dry matter produced was not significant. This corroborated results of Waddington et al., (1987) whom mentioned that increases in HI have accounted, in many instances, for the grain yield improvement in wheat since new high-yielding wheat varieties have higher HI than older ones. Samarrai et al. (1987) reported that HI is influenced by environment, as the results of the present study suggested.

Table 4. Mean values of the four measured agronomic traits, averaged over years (variety main effect), averaged over varieties (year main effect), variety mean value per cropping season (year) and the least significant difference at 5% probability level.

	PHT				TDM			
	Cropping seasons			Variety	Cropping seasons			Variety
Varieties	2014	2015	2016	main effect	2014	2015	2016	main effect
GMG	70.1	60.3	97.9	76.1	35.3	47.1	90.1	57.5
OZ3	72.8	59.0	96.0	75.9	42.8	57.0	106.9	68.9
H3	75.5	73.5	106.4	85.1	39.9	70.2	102.0	70.7
MBB	62.5	58.5	101.1	74.0	33.4	60.0	97.1	63.5
SMT	54.6	54.5	57.9	55.7	36.6	45.9	88.7	57.1
WAH	59.3	54.3	58.3	57.3	40.1	59.4	89.9	63.1
GTA	54.8	48.3	57.0	53.3	34.5	80.4	98.9	71.3
MGS	53.9	41.5	62.2	52.5	43.9	68.1	85.5	65.8
Lsd5%		5.9		16.3		6.9		13.3
Year main effect	62.9	56.2	79.6		38.3	61.0	94.9	
Lsd5%		2.3				4.7		
	GY				HI			
	Cropping seasons			Variety	Cropping seasons			Variety
Varieties	2014	2015	2016	main effect	2014	2015	2016	main effect
GMG	9.1	12.8	23.0	15.0	27.6	16.0	23.3	22.3
OZ3	9.4	10.3	25.2	15.0	22.2	18.1	23.6	21.3
H3	8.2	10.0	24.5	14.2	20.7	14.2	24.0	19.7
MBB	9.0	11.3	24.4	14.9	27.1	19.0	25.1	23.7
SMT	16.5	13.8	36.2	22.2	45.1	30.2	40.9	38.7
WAH	17.0	18.0	37.4	24.1	42.6	30.3	41.5	38.1
GTA	15.4	14.2	39.0	22.9	44.1	30.1	43.3	39.2
MGS	19.7	17.0	34.2	23.6	44.9	25.2	40.1	36.7
Lsd5%		3.3		4.6		4.1		4.8
Year main effect	13.0	13.4	30.5		34.3	22.9	32.7	
Lsd5%		1.0				2.2		

PHT = Plant height,(cm) TDM= Total dry matter,(q ha⁻¹) GY= Grain yield, ,(q ha⁻¹), HI = Harvest index, (%) WUE_{TDM}= Water use efficiency for total dry matter, (kg ha⁻¹ mm⁻¹) WUEGY= Water use efficiency for grain yield (kg ha⁻¹ mm⁻¹). GMG =Guemgoum Rkhem, OZ₃₆₈= Oued Zenati 368, H₃= Hedba3, MBB= Mohammed ben Bachir, SMT= Simeto, WAH= Waha, GTA= Gaviota, MGS= Megress, LSD5%= Least significant difference at the 5% probability level.

3. Water use efficiency

Total rainfall, accumulated from sowing to harvest, reached 251.9, 299.4 and 237.7 mm in 2013/2014, 2014/2015 and 2015/16, respectively. Compared to the long term average of 321.2 mm reported by Mekhlouf *et al.*, (2006), these figures appeared to be very low, mainly during the 2013/14 and 2015/16 cropping seasons, suggesting a strong drought stress effect during the course of the experiment. At sowing, soil relative humidity, in the 600 mm profile, reached 19.0, 18.3 and 18.6%, in 2013/14, 2014/15 and 2015/16 cropping seasons,

respectively. These figures are the equivalents of 51.6, 46.7 and 48.9 mm soil moisture available to the plant. This soil moisture resulted from early autumn rain showers and from moisture stored during the fallow season. Soil relative humidity, measured at harvest, was below the wilting point and thus the available moisture left in the soil was assumed to be nil. Water available for use (evapotranspiration) by the crop during the growing cycle reached 303.6, 346.1 and 286.7 mm, in 2013/14, 2014/15 and 2015/16 cropping seasons, respectively.

Table 5. Mean values of water use efficiency for total dry matter and for grain yield, averaged over years (variety main effect), averaged over varieties (year main effect), variety mean value per cropping season (year) and the least significant difference at 5% probability level.

	WUE _{TDM}				WUE _{GY}			
	Cropping seasons			Variety	Cropping seasons			Variety
Varieties	2014	2015	2016	main effect	2014	2015	2016	main effect
GMG	11.6	13.6	31.4	18.9	3.0	3.7	8.0	4.9
OZ ₃₆₈	11.4	23.2	34.5	23.0	5.1	4.1	13.6	7.6
H ₃	13.1	20.3	35.6	23.0	2.7	2.9	8.5	4.7
MBB	11.0	17.3	33.9	20.7	3.0	3.3	8.5	4.9
SMT	14.4	19.7	29.8	21.3	6.5	4.9	11.9	7.8
WAH	14.1	16.5	37.3	22.6	3.1	3.0	8.8	5.0
GTA	12.0	13.3	30.9	18.8	5.4	4.0	12.6	7.4
MGS	13.2	17.2	31.4	20.6	5.6	5.2	13.0	7.9
Lsd5%		2.4		4.2		1.1		2.2
Year main effect	12.6	17.6	33.1		4.3	3.9	10.6	
Lsd5%		1.6				0.4		

WUE_{TDM}= Water use efficiency for total dry matter, (kg ha⁻¹ mm⁻¹) WUE_{GY}= Water use efficiency for grain yield (kg ha⁻¹ mm⁻¹). GMG =Guemgoum Rkhem, OZ₃₆₈= Oued Zenati 368, H₃= Hedba3, MBB= Mohammed ben Bachir, SMT= Simeto, WAH= Waha, GTA= Gaviota, MGS= Megress, LSD5%= Least significant difference at the 5% probability level.

Water use efficiency data analysis indicated significant cropping season main and genotype x cropping season interaction, for both total dry matter and grain yield. Variety main effect was significant for grain yield only (Table 2). Among cropping seasons, WUE_{TDM} and WUE_{GY} varied from 12.6 (2013/14) to 33.1 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (2015/16), and from 3.9 (2014/15) to 10.6 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (2015/16), respectively. These figures were in line with those reported by Sadras and Angus *et al.*, (2006) whom reported that average wheat grain yield per unit water use was 9.9 kg grain ha⁻¹ mm⁻¹ for southeastern Australia, 9.8 kg grain ha⁻¹ mm⁻¹ for the China Loess Plateau, 8.9 kg grain ha⁻¹ mm⁻¹ for the northern Great Plains of North America, 7.6 kg grain ha⁻¹ mm⁻¹ for the Mediterranean Basin, and 5.3 kg grain ha⁻¹ mm⁻¹ for the southern-central Great Plains. Averaged over cropping seasons, GTA showed lower WUE_{TDM} (18.8 kg ha⁻¹ mm⁻¹) and both, H₃ (23.0 kg ha⁻¹ mm⁻¹) and OZ₃₆₈ (23.0 kg ha⁻¹ mm⁻¹), had high WUE_{TDM} mean

values. Low WUE_{GY} ($4.7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) was noted for H_3 and high WUE_{GY} mean value ($7.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) was exhibited by MGS (Table 5). MBB, in 2013/14 ($11.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), GTA, in 2014/15 ($13.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) and SMT, in 2015/16 ($29.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) exhibited low WUE_{TDM} . High WUE_{TDM} mean values were expressed by SMT, in 2013/14 ($14.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), OZ_{368} , in 2014/15 ($23.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) and WAH, in 2015/16 ($37.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$). Lower WUE_{GY} were noted in 2013/14 and 2014/15 (2.7 and $2.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) for H_3 , and for GMG ($8.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) in 2015/16; while high WUE_{GY} mean values were exhibited by SMT, MGS and OZ_{368} , in 2013/14, 2014/15 and 2015/16, respectively (Table 5). Ancient varieties tented to have lower WUE_{GY} ($5.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) than newly realized ones ($7.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), while no clear differences appeared for WUE_{TDM} ($21.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ vs $20.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, respectively). These supported results reported by Zhang *et al.*, (2016) whom carried out studies to understand the genetic gains in yield and WUE and their associated physiologic and agronomic traits for winter wheat and found that WUE increased substantially from 1.0 to 1.2 kg m^{-3} for cultivars from the early 1970s to 1.4 – 1.5 kg m^{-3} for recently released cultivars. Genotypic differences in WUE_{GY} were also reported by van den Boogaard *et al.* (1997), and Zhang *et al.* (2010).

4. Relationships between WUE and the physio-agronomic traits

The correlation coefficients relating WUE_{TDM} to the measured physio-agronomic traits were statistically no significant, except the correlation coefficient between LCHC and WUE_{TDM} , measured in 2015/16, which reached significance and had a negative sign (Table 6).

Table 6. Simple correlation coefficients between water use efficiency for total dry matter and grain yield and physio-agronomic traits.

		LCHC	LRWC	SLA	PHT	HI	WUE_{TDM}
WUE_{TDM}	2013/14	0.398	-0.171	-0.507	0.141	-0.008	
	2014/15	-0.087	0.602	-0.429	-0.184	0.134	
	2015/16	-0.772	0.598	0.247	0.565	-0.540	
WUE_{GY}	2013/14	0.792	-0.836	-0.277	-0.876	0.950	0.295
	2014/15	0.512	0.078	-0.199	-0.746	0.767	0.081
	2015/16	0.720	0.230	-0.240	-0.977	0.990	-0.435

PHT = Plant height, (cm), HI = Harvest index, (%) WUE_{TDM} = Water use efficiency for total dry matter, ($\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) WUE_{GY} = Water use efficiency for grain yield ($\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), LCHC = Leaf chlorophyll content, LRWC = Leaf relative water content, SLA = Specific leaf area, $r_{5\%} = 0.666$.

These results suggested that, among the measured physio-agronomic traits, no one could be able to predict WUE_{TDM} , and to be used as selection criterion for screening purposes. Correlation coefficients of SLA and TDM with WUE_{GY} were non-significant, suggesting that these two traits were of little value for WUE_{GY} prediction. Results about SLA didn't supported findings of van den Boogaard *et al.* (1997) whom studied wheat plant growth and water-use

efficiency and found that WUE was higher for plants with higher leaf area per unit plant weight. Richards *et al.* (2002) suggested using specific leaf area as an indirect selection criterion for yield potential in wheat. Atta (2013) found that specific leaf area was negatively correlated with WUE and grain yield and suggested that selection against this trait may be effective in raising grain yield. The relationship between WUE_{GY} and LRWC was unreliable, being dependent on the environment for its expression. However PHT and HI, and to a lesser extent LCHC were reproducible and significantly correlated with WUE_{GY}. These traits appeared to be useful for WUE_{GY} improvement (Table 6). In this context, Zhang *et al.*, (2016) found no significant correlations between WUE_{GY} and LCHC, or LRWC, but significant correlations were found between WUE_{GY} and HI. Through multiple regression analysis Atta (2013) identified several key traits that contribute to improve WUE among which leaf traits, plant height, total dry matter at maturity, harvest index and grain yield which corroborated partially the results of this study.

Taking LCHC, LRWC, PHT and HI as causing traits and WUE_{GY} as caused trait, path analysis indicated that direct and indirect effects were inconsistent and varied from one environment to another (Table 7).

Table 7. Direct and indirect effects of the physio-agronomic traits on WUE_{GY}.

	LCHC	LRWC	PHT	HI	riy
2013/14 cropping season					
LCHC	0.450	0.170	0.008	0.164	0.792
LRWC	-0.161	-0.475	-0.008	-0.196	-0.840
PHT	-0.321	-0.325	-0.011	-0.224	-0.881
HI	0.313	0.394	0.010	0.236	0.953
2014/15 cropping season					
LCHC	0.200	0.002	0.196	0.152	0.512
LRWC	-0.018	-0.023	0.064	0.054	0.078
PHT	-0.143	0.005	-0.275	-0.365	-0.746
HI	0.059	-0.002	0.195	0.514	0.767
2015/16 cropping season					
LCHC	-0.080	-0.036	0.315	0.520	0.720
LRWC	0.027	0.108	0.019	0.075	0.230
PHT	0.065	-0.005	-0.389	-0.648	-0.977
HI	-0.063	0.012	0.383	0.658	0.990

LCHC= Leaf chlorophyll content, LRWC= Leaf relative water content, PHT = Plant height,(cm), HI = Harvest index, (%) , WUE_{GY}= Water use efficiency for grain yield (kg ha⁻¹ mm⁻¹).

Hence LCHC exhibited a large positive direct effect (0.450) in 2016/14, which lessened in the second cropping season (0.200) then vanished (-0.080) in the third one. This trait acted indirectly via HI during the three cropping seasons (0.164, 0.152, 0.520), via LRWC, in one season (0.170) and via PHT during two seasons (0.196, 0.315). The positive sign of the direct and indirect effects of LCHC suggested that higher LCHC was desirable to improve WUE_{GY}, either

directly (but depending on the environment) or indirectly via HI and to lesser extent via PHT. Recently released cultivars expressed consistently high LCHC and HI compared to old ones which explain their observed high WUE_{GY} (Table 3). Similarly LRWC exhibited a large direct effect (-0.475) associated to sizeable indirect effects via LCHC (-0.161) and HI (-0.196) in one season, and both direct and indirect effects vanished during the two other seasons (Table 7). High LRWC was expressed by local varieties which had lower HI and LCHC, but the effect of this trait were inconsistent depending on the environment. PHT expressed a direct effect variable which was lower than the consistent indirect effects via HI. Taller varieties tended to have low HI and WUE_{GY}. HI expressed a consistent positive direct effect; the indirect effects, either via PHT or via LCHC and LRWC, were inconsistent (Table 7).

CONCLUSIONS

Experiment results revealed that modern cultivars are more efficient users of rain water than all others in semi-arid conditions, It is also revealed that those varieties, which use more water, produce hi harvest index value and give more grain yields. Our studies demonstrated that LCHC, LRWC, PHT and HI are more important traits linked to the WUE_G in semi-arid regions. Thus, path analysis, based on phenotypic correlations between WUE_{GY} and HI, PHT, LRWC, LCHC, showed the consistent direct and indirect effects of HI and to a lesser extent those of PHT. Selecting for PHT and HI could improve both WUE_{GY} and grain yield under variable environments. The high WUE_{GY} genotypes identified in the current study can be used to develop more efficient cultivars that increase grain yield per unit of water used, in drought prone areas. However, selection for high HI, to improve GY and WUE_{GY}, will reduce plant height and biomass production under severe drought conditions. Conversely grain yield, at excessive crop height, can be reduced because of poor HI and increased lodging. It is suggested to select for tall, high-yielding plants within dwarf segregating populations.

REFERENCES

- Abdolahi, M., Shekari, F., Saba, J., & Zangani, E. (2018). Seed Priming with Salicylic Acid Enhanced Gas Exchanges Parameters And Biological Yield Of Wheat Under Late Sowing Date Summary. *Agriculture & Forestry*, 64(1), 145–157. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.64.1.17>
- Atta, M.B. (2013). The basis of improved water use efficiency and adaptation in hexaploid wheat. A PhD thesis, Faculty of Agriculture and Environment, Plant Breeding Institute, Cobbitty, The University of Sydney.
- Barrs, H., & Weatherley, P. (1962). A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15(3), 413. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>
- Belagrouz, A., Chennafi, H., Hakimi, M., Razem, R., Boutalbi, W., & Ferras, K. (2016). Conductivité Hydraulique et Densité Apparente sous Labours de Conservation du Sol. *Revue Agriculture Numéro Spécial 1, 1*(May), 100–105.
- Cheikh M'hamed, H., Rezig, M., & Ben Naceur, M. (2015). Water Use Efficiency of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf) under Deficit Irrigation. *Journal of Agricultural Science*, 7(8), 238. <https://doi.org/10.5539/jas.v7n8p238>

- Chennafi, H., Aidaoui, A., Bouzerzour, H., & Saci, A. (2006). Yield Response of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Cultivar Waha to Deficit Irrigation under Semi Arid Growth Conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5(5), 854–860. <https://doi.org/10.3923/ajps.2006.854.860>
- Chennafi, H., Hannachi, A., Touahria, O., Fellahi, Z. E. A., Makhlof, M., & Bouzerzour, H. (2011). Tillage and residue management effect on durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) thell. ssp. *turgidum* conv. *durum* (desf.) mackey] growth and yield under semi-arid climate. *Advances in Environmental Biology*, 3231–3241.
- Christy, B., Tausz-Posch, S., Tausz, M., Richards, R., Rebetzke, G., Condon, A., ... O'Leary, G. (2018). Benefits of increasing transpiration efficiency in wheat under elevated CO₂ for rainfed regions. *Global Change Biology*, 24(5), 1965–1977. <https://doi.org/10.1111/gcb.14052>
- Cropstat 7.2. (2007). Free Software package for windows. International Rice Research Institute. IRRI. Manila.
- Ehdaie, B. (1995). Variation in Water-Use Efficiency and Its Components in Wheat: II. Pot and Field Experiments. *Crop Science*, 35(6), 1617. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500060017x>
- Ehdaie, B. J.G. Waines. (1993). Variation in water-use efficiency and its components in wheat: I. well-watered pot experiment, *Crop Sci* 33 294–299.
- Farjam, S., Kazemi-Arbat, H., Siosemardeh, A., Yarnia, M., & Rokhzadi, A. (2015). Effects of salicylic and ascorbic acid applications on growth, yield, water use efficiency and some physiological traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under reduced irrigation. *Legume Research - An International Journal*, 38(1), 66. <https://doi.org/10.5958/0976-0571.2015.00011.9>
- Franks, P. J., W. Doheny-Adams, T., Britton-Harper, Z. J., & Gray, J. E. (2015). Increasing water-use efficiency directly through genetic manipulation of stomatal density. *New Phytologist*, 207(1), 188–195. <https://doi.org/10.1111/nph.13347>
- García del Moral, L.F., Y. Rharrabti, S. Elhani, V. Martos, C. Royo. (2005). Yield Formation in Mediterranean durum wheats under two contrasting water regimes based on path-coefficient analysis. *Euphytica*:146: 203–212
- Haddad L., , Hamenna Bouzerzour , Amar Benmahammed , Houcine Zerargui , Abderrahmane Hannachi , Adel Bachir , Manel Salmi , Abdelmalek Oulmi , Zine El Abidine Fellahi , Hind Nouar, Zahra Laala' (2016). Analysis of Genotype × Environment Interaction for Grain Yield in Early and Late Sowing Dates on Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Genotypes. *Jordan Journal of Biological Sciences*. 9:139-146.
- Hammer, O., D.A.T. Harper, P.D. Ryan. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia electronica* 4:1-9
- Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C., & Nielsen, D. (1999). *Crop yield response to deficit irrigation: report of an FAO/IAEA co-ordinated research program by using nuclear techniques*: (CEVAT KIRDA, P. Moutonnet, C. Hera, & D.R. Nielsen, Eds.) (Springer Netherlands). Kluwer Academic Publishers. Retrieved from <http://www.springer.com/gp/book/9780792352990>
- Mekhlof, A., Hamenna Bouzerzour, Amar Benmahammed, Abdelkrim Hadj Sahraoui , Nadir Harkati. (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sécheresse* 2006 ; 17 (4) : 507-13
- Nakhforoosh, A., Bodewein, T., Fiorani, F., & Bodner, G. (2016). Identification of Water Use Strategies at Early Growth Stages in Durum Wheat from Shoot Phenotyping and Physiological Measurements. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1155. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01155>
- Nouar, H., Bouzerzour, H., Haddad, L., Menad, M., Hazmoune, H. and Zerargui, H. (2012) Genotype x environment interaction assessment in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) using AMMI and GGE models. *Advances in Environmental Biology*. 6: 3007 - 3015.

- Pask, A. J. D., Pietragalla, J., Mullan, D. M., and Reynolds, M. P. (2012). Physiological Breeding II: A field guide to wheat phenotyping. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- Quin, W., B. Chi, O. Oenema. (2013). Long-term monitoring of rainfed wheat yield and soil water at the Loess plateau reveals low water use efficiency. *Plos one* 8:.....
- Rashid, M. A., Andersen, M. N., Wollenweber, B., Zhang, X., & Olesen, J. E. (2018). Acclimation to higher VPD and temperature minimized negative effects on assimilation and grain yield of wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 119–129. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.09.018>
- Rebetzke, G. J., Condon, A. G., Richards, R. A., & Farquhar, G. D. (2002). Selection for Reduced Carbon Isotope Discrimination Increases Aerial Biomass and Grain Yield of Rainfed Bread Wheat. *Crop Science*, 42(3), 739–745. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2002.7390>
- Richard, C., Hickey, L. T., Fletcher, S., Jennings, R., Chenu, K., & Christopher, J. T. (2015). High-throughput phenotyping of seminal root traits in wheat. *Plant Methods*, 11(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0055-9>
- Richards RA, Rebetzke GJ, Condon AG, Herwaarden AFv (2002) Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Science* 42, 111-121.
- Sadras, V.O., P. Grassini and P. Steduto. (2006). Status of water use efficiency of main crops?? FAO-SOLAW Background Thematic Report - TR07
- Sahnoune, F., M. Belhamel, M. Zelmat, R. Kerbachi. (2013). Climate Change in Algeria: Vulnerability and Strategy of Mitigation and Adaptation. *Energy Procedia* 36 :1286 – 1294
- Samarraï, S.M., S.M. Syeam, H.R. Mian, and A.A. Dafie. (1987). Growth periods, harvest index and grain yield relationships in barley. *Rachis* 6:21-24.
- Siddique KHM, Tennant D, Perry MW, Belford RK (1990) Water use and water use efficiency of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 41, 431-447.
- Slafer GA, Araus JL (1998) The challenge: one billion tons of wheat by 2020. In 'Proceedings of the Ninth International Wheat Genetics Symposium, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 2-7 August 1998'. (Ed. AE Slinkard) pp. 201-213. (University Extension Press, Extension Division, University of Saskatchewan).
- Van den Boogaard R, Alewijnse D, Veneklaas EJ, Lambers H (1997) Growth and water-use efficiency of 10 *Triticum aestivum* cultivars at different water availability in relation to allocation of biomass. *Plant, Cell and Environment* 20, 200-210.
- Waddington, S.R., M. Osmanzai, M. Yoshida, and J.K. Ransom. (1987). The yield of durum wheats released in Mexico between 1960 and 1984. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 108: 469-477.
- Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, Wang Y M, Shao L W. (2010). Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97(8): 1117– 1125
- Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. (2004) Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. *Hydrological Processes*, 18(12): 2275–2287
- Zhang X, Chen S, Liu M, Pei D, Sun H (2005) Improved water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China Plain. *Agronomy Journal* 97, 783- 790.
- Zhang, X., Chen, S., Sun, H., Pei, D., & Wang, Y. (2008). Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat. *Irrigation Science*, 27(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0131-2>
- Zhang, X., Wenli QIN, Juanna XIE. (2016). Improving water use efficiency in grain production of winter wheat and summer maize in the North China Plain: a review. *Front. Agr. Sci. Eng.* 3(1): 25–33

دراسة الخصائص المتعلقة بكفاءة استغلال الماء لدى القمح الصلب (*Triticum durum Desf*)

ملخص:

يعتبر الاجهاد المائي العائق الأكبر تحدي بمنطقة الهضاب العليا بسطيف، إذ يآثر مباشرة على إنتاجية القمح. غير أن استخدام الموارد الجينية المناسبة لتحمل الجفاف يمنح نوع من القدرة على إدارة الزراعة المطرية وكذلك يعتبر وسيلة رصد للمحافظة على البيئة. وهكذا فإن النهج مصمم على اختيار تقاوي من القمح تتميز بخصائص تحمل الجفاف. ويعكس هذا التفكير قدرة قيّمة على استخدام رطوبة التربة بكفاءة في مراحل نُذرة التساقطات. وعلى هذا الأساس أجريت تجارب على مستوى محطة البرهنة وإنتاج البذور التابعة للمعهد التقني للمحاصيل الكبرى بسطيف خلال المواسم الفلاحية 2014/2013، 2015/2014، و2016/2015. ويتمثل المبدأ في اختبار مجموعة من تقاوي القمح الصلب (*Triticum durum Desf*). وذلك عن طريق تقدير مستوى ثمينها للماء المستهلك عن طريق قياس الخصائص الزراعية، الفينولوجية، المورفولوجية والفسولوجية. لذلك فإن هذه المنهجية تظهر أهمية في البحث عن تقاوي مثلى والتي تعتبر متكيفة مع الوسط العالي الشبه الجاف. المواد النباتية المستعملة تتألف من 10 تقاوي من القمح الصلب وهي على فئتين التقاوي القديمة والتقاوي الحديثة. وقد تم تنظيم التقاوي على شكل التصميم العشوائي الكامل بالأجنحة والذي ضم أربعة أجنحة. أظهرت النتائج إن صنف واحة يتميز بكفاءة عالية لاستغلال الماء لإنتاج المرود الحبي، فُدرت ب 8,09 كغ/م²، بالنسبة لصنف جناح الخطيفة، فنقل نسبة كفاءة استغلال الماء لإنتاج المرود الحبي ب 54,14% مقارنة بصنف واحة. كما أنه سجلت ارتباطات إيجابية ومعنوية بين مؤشر (ك إ م ح)، و المرود الحبي (م ح)، ومؤشر الحصاد (مأ حد) وعدد الحبات لكل سنبل (ع ح س) وعدد الحبات في المتر المربع (ع ح م 2) ومحتوى الكلوروفيل (سباد). ومن ناحية أخرى فإن هذا المؤشر كان سلبيا ومتربطاً إلى حد كبير مع طول النبات (طن) والمرود القشي (م ق) وعدد الأيام بعد الزرع للوصول إلى مرحلة التسنبل (ع ا ب ز تس). لذا فإن النموذج الفعال للإنتاجية الصادرة عن الكفاءة العالية لاستغلال الماء على مستوى الهضاب العليا والتي تنتمي إلى المناطق شبه القاحلة، يتميز بتسنبل مبكر وبالتالي إنتاجية فائقة. وعليه، تعتبر هذه الخصائص على النتيجة التي عليها تقام عمليات الانتقاء والاستنباط.

الكلمات المفتاحية: قمح صلب، فعالية استعمال الماء، صنف، شبه جاف، خصائص، أداء فعال.

Etude des caractéristiques liées à l'efficience d'utilisation de l'eau chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*)

Résumé

Sur les Hauts Plateaux Sétifiens, le stress hydrique reste la contrainte la plus redoutable affectant l'élaboration de la productivité de la culture du blé. Toutefois, le recours aux ressources génétiques adaptées à la sécheresse représente un outil de management de l'agriculture pluviale, et aussi de monitoring pour la préservation de son environnement. Donc, l'approche est conçue sur la sélection de cultivars de blé dotés de caractéristiques de tolérance à la sécheresse. Cette réflexion trahit un pouvoir de valorisation quant à l'utilisation efficiente de l'eau du sol, à des stades d'avènement du déficit hydrique. Dès lors, des expérimentations ont été conduites sur le site de la Ferme de Démonstration et de Production de Semences, ITGC de Sétif, au cours des campagnes agricoles de 2013/2014, 2014/2015 à 2015/2016. Le principe consiste à tester des génotypes de blé dur (*Triticum durum Desf.*) à leurs réponses à l'efficience d'utilisation de l'eau (EUE). Le niveau de valorisation de l'eau par le matériel végétal est appréhendé à travers les composantes agronomiques, phénologiques, morphologiques et physiologiques. Donc, au préalable cette méthodologie manifeste un intérêt qui tend vers la recherche d'idéotypes productifs, considérés adaptés au milieu semi-aride d'altitude. Ainsi, le matériel végétal est constitué de dix cultivars de blé dur répartis en deux catégories, cultivars anciens et cultivars modernes. Pour être expérimentés, les génotypes ont été organisés dans un dispositif expérimental en blocs complètement randomisés avec quatre répétitions. Les résultats révèlent que la variété waha se démarque par une performante efficiente pour l'utilisation de l'eau, de 8,09 kg/ha-Imm-1. Par contre, pour le génotype Djenah Khetifa, l'EUE se réduit de 54,14% relativement à waha. Par ailleurs, l'EUE est corrélée positivement et significativement avec le rendement en grain (RDT), l'indice de récolte (IR), le nombre de grain par épi (NGE), celui de grains par mètre carré (NGM) et avec la teneur en chlorophylle (SPAD). D'autre part, cette composante apparaît être négativement et significativement corrélée avec la hauteur du chaume (HT), le rendement en paille (PLL), le nombre de jours après semis pour épi (JASEp). Donc l'idéotype recherché efficient pour l'eau pour la productivité en zones semi-aride des Hauts Plateaux Sétifiens, se révèle par une précocité à l'épiaison et donc une productivité performante. En revanche, ces caractères expriment la résultante sur laquelle s'opère la sélection.

Mots clés Blé dur, efficience d'utilisation de l'eau, semi-aride, génotype, performance efficiente