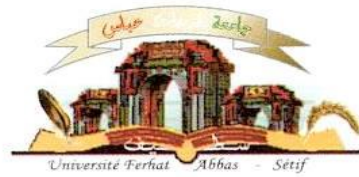


Université Ferhat Abbas Sétif 1
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة فرحات عباس سطيف 1
كلية علوم الطبيعة والحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

N°...../SNV/2022

THESE

Présentée par

M^{me} MEKAOUSSI RADHIA

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Production Végétale

THÈME

Etude de la variabilité et du contrôle génétique de la réponse aux stress hydrique et thermique du blé dur (*Triticum durum* DESF) : application des tests de la stabilité membranaire et de la rétention de l'eau des feuilles excisées.

Soutenue publiquement le 10/03/2022

DEVANT LE JURY

Président	MEKHOLOUF Abdelhamid	Pr. UFA Sétif 1
Directeur	BOUZERZOUR Hamenna	Pr. UFA Sétif 1
Co-directeur	BENMAHAMMED Amar	Pr. UFA Sétif 1
Examineurs	BENDERRADJI Laid	Pr. UMB M'sila
	BENBELKACEM Abdelkader	Dr. Rech. INRAA Constantine
	FELLAHI Zin ElAbidin	MCA. UMBI BBA

Laboratoire de Valorisation des Ressources Biologiques Naturelle (VRBN)

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

DEDICACES

ملخص

RESUME

ABSTRACT

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION.....1

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....3

1. LE BLE DUR (<i>TRITICUM DURUM</i> DESF.).....	3
1.1. ORIGINE GENETIQUE ET TAXONOMIE	3
1.2. IMPORTANCE ECONOMIQUE.....	6
1.2.1. SUPERFICIES ET RENDEMENTS.....	6
1.2.2. PRODUCTIONS ET IMPORTATIONS.....	7
2. EFFETS DU DEFICIT HYDRIQUE ET DES HAUTES TEMPERATURES SUR LA PLANTE.....	8
3. MECANISMES DEVELOPPES PAR LA PLANTE POUR CONTRER LES STRESS HYDRIQUE ET THERMIQUE.....	8
3.1. LA FERMETURE DES STOMATES.....	10
3.2. CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DES TISSUS.....	10
3.3. AJUSTEMENT OSMOTIQUE.....	11
3.4. CROISSANCE DES PARTIES AERIENNES.....	11
4. AMELIORATION DE LA TOLERANCE VIS-A-VIS DES STRESS ABIOTIQUES.....	12
4.1. INTERET.....	12
4.2. CRITERES DE SELECTION.....	12
4.2.1. CONTENU EN PROLINE.....	13
4.2.2. CONTENU EN CHLOROPHYLLE.....	14

4.2.3. REMOBILISATION DES ASSIMILAS.....	14
4.2.4. STABILITE MEMBRANAIRE.....	15
4.2.5. TENEUR RELATIVE EN EAU ET DEPERDITION D'EAU DES FEUILLES EXCISEES.....	16
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES.....	19
1. MATERIEL VEGETAL ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	19
1.1. NOTATIONS ET MESURES.....	19
1.1.1. HAUTEUR DE LA PLANTE (PHT, CM).....	19
1.1.2. DUREE DE LA PHASE VEGETATIVE (DPV, J).....	19
1.1.3. BIOMASSE AERIENNE (BIO, G/M ²).....	20
1.1.4. LE NOMBRE D'EPIS PAR M ² (NE).....	21
1.1.5. RENDEMENT GRAIN (RDT, G/M ²).....	21
1.1.6. POIDS DE 1000 GRAINS (PMG, G).....	21
1.1.7. NOMBRE DE GRAINS PAR EPI (NGE) ET PAR M ² (NGM ²).....	21
1.1.8. INDICE DE RECOLTE (HI, %).....	21
1.1.9. RENDEMENT PAILLE (PLL, G/M ²).....	22
1.1.10. RENDEMENT ECONOMIQUE (RDTECO, G/M ²).....	22
1.1.11. SURFACE DE LA FEUILLE ETENDARD (SFE, CM ²).....	22
1.1.12. POIDS SPECIFIQUE DE LA FEUILLE ETENDARD (PSFE, MG/CM ²).....	22
1.1.13. TENEUR RELATIVE EN EAU (TRE, %).....	22
1.1.14. TENEUR EN CHLOROPHYLLE DE LA FEUILLE ETENDARD (CHL, CCI).....	23
1.1.15. THERMO STABILITE MEMBRANAIRE (MTS,%).....	23
1.1.16. LA TEMPERATURE DE LA CANOPEE (TCV, C°).....	24
1.1.17. DEPERDITION D'EAU DES FEUILLES EXCISEES (ELWL, %).....	24
2. ANALYSE DES DONNEES.....	24
2.1. COMPOSANTES DE LA VARIATION, HERITABILITE ET GAIN GENETIQUE ATTENDU DE LA SELECTION.....	25
2.2. COEFFICIENTS DE VARIABILITE.....	26
2.3. RESSEMBLANCE INTER ENVIRONNEMENTS ET STABILITE VARIETALE INTER ENVIRONNEMENTS.....	27
2.4. COEFFICIENTS DE CORRELATIONS PHENOTYPIQUES.....	28

2.5.	<i>ANALYSE EN CHEMIN PAR ENVIRONNEMENT (PATH ANALYSIS)</i>	29
2.6.	<i>TYPLOGIE VARIETALE</i>	29
	CHAPITRE III- RESULTATS ET DISCUSSION	30
1.	<i>CLIMAT DES CAMPAGNES D'ETUDE (2016/17, 2017/18 ET 2018/19)</i>	30
2.	<i>ETUDE DE LA VARIABILITE DES CARACTERES MESURES</i>	31
2.1.	<i>RENDEMENT ET COMPOSANTES</i>	31
2.1.1.	<i>RENDEMENT GRAIN</i>	31
2.1.2.	<i>COMPOSANTES DU RENDEMENT GRAIN</i>	40
2.1.3.	<i>POIDS DES EPIS, BIOMASSE AERIENNE, RENDEMENTS PAILLE ET ECONOMIQUE</i>	48
2.1.4.	<i>DUREE DE LA PHASE VEGETATIVE, HAUTEUR, INDICE DE RECOLTE ET SURFACE DE LA FEUILLE ETENDARD</i>	58
2.1.5.	<i>TENEUR EN EAU, STABILITE MEMBRANAIRE, CHLOROPHYLLE ET POIDS SPECIFIQUE FEUILLE ETENDARD</i>	66
2.1.6.	<i>TEMPERATURE DE LA CANOPEE (TCV) ET PERTES D'EAU DES FEUILLES EXCISEES (ELWL)</i>	73
2.2.	<i>LIAISONS INTER CARACTERES</i>	78
2.3.	<i>ANALYSE EN CHEMIN (PATH ANALYSIS)</i>	84
2.3.1.	<i>CAMPAGNE 2016/17</i>	84
2.3.2.	<i>CAMPAGNE 2017/18</i>	89
2.3.3.	<i>CAMPAGNE 2018/19</i>	93
3.	<i>TYPLOGIE VARIETALE</i>	98
	CONCLUSION	103
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	105
	ANNEXE	120

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout **DIEU**, tout puissant, pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée et le courage pour terminer ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciement à mon directeur de thèse, **Professeur BOUZERZOUR Hamenna** de l'université de Sétif 1 pour avoir de bien voulu de m'encadrer pour son patience, son aide, ses conseils précieuses et encouragements, pour le temps qu'il ma consacré pour réaliser ce travail. Veuillez trouver ici, l'expression de mon grand respect.

Mes vifs remerciements sont adressés à mon co-directeur de thèse, **Professeur BENMAHAMMED Amar** de l'université de Sétif 1, pour son aide, ses conseils et encouragements. Veuillez trouver ici, l'expression de ma grande gratitude.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres de jury.

- **Pr. MEKHLLOUF Abdelhamid**, Professeur de l'université de Sétif 1 d'avoir présidé le jury
- **Dr. BENBELKACEM Abdelkader**, Directeur de Recherche à l'INRAA Constantine,
- **Pr. BENDERRADJI Laid**, Professeur de l'université de M'sila,
- **Dr. FELLAHI Zine El Abidine**, MCA. de l'université Bordj Bou Arréridj ,

Pour avoir accepté de faire partie du jury et pour l'intérêt de temps qu'ils consacrés pour avoir bien évalué ce travail.

Mes remerciements vont à l'équipe de **l'ITGC** personnel et ouvriers qui permit d'installer mon essai au sein de cet institut pendant trois années consécutives.

Je remercie **M^r Bachir Adel**, pour son aide précieuse durant la réalisation de l'expérimentation

Je tiens à adresser mes remerciements au laboratoire de valorisation des ressources biologiques et naturelles de l'Université de Sétif-1 avec leurs responsables ainsi que l'ingénieur de laboratoire **M^{elle} Sabrina**.

Les nombreuses personnes qui ont contribué de près ou de loin à cette Thèse par leurs attentions, et leurs collaborations, je les remercie infiniment.

Enfin

Je tiens à rendre un hommage chaleureux à :

Mon mari

Pour son confiance, son aide précieuse et son soutien moral et matériel et son contribution dans la réalisation de ce travail

Mes parents

Pour leur sacrifice, leur amour et leur aide surtout dans les différentes étapes de la réalisation de ce travail. Ils m'ont sans cesse apporté le soutien moral, durant toutes les années d'études.

A tous *MERCI*.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à des êtres qui me sont très chers, et sans les quelles
je n'aurais jamais atteint le stade où je suis actuellement.*

*Je dédie cette thèse à mon très cher mari **CHERRERI ATEF** pour son soutien
ses encouragements, précieuses conseils et aides.*

*A ma précieuse perle, celui qui ma guidé vers la voie de la réussite, pour ses
Conseils, ses aides et ses encouragements...*

*A mon père **AMMAR**.*

*A ma précieuse perle, celle qui à fait l'impossible pour me permettre de
poursuivre mes études jusqu'à ce jours...*

*A ma mère **MEKAOUSSI SALIHA**.*

*A mes très chers fils **MEHDI** et **AYOUB***

A mes beaux parents pour leurs encouragements

*A ma très chère sœur : **SIHAM**.*

*A mes très chers frères : **ABDELJALIL**, **SALAHEDDINE**, **ABDENOUR**.*

A tout ma grande famille.

A mes superbes et introuvables amies et mes collègues.

A tous ceux qui j'ai connu et je n'ai pu citer.

Radhia

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة التباين والتحكم الوراثي في الاستجابة للإجهاد المائي والحراري للقمح الصلب (*Triticum durum* Desf). أجريت التجربة في محطة المعهد التقني للمحاصيل الحقلية بسطيف .خلال ثلاث مواسم زراعية 2017/2016، 2018/2017 و 2019/2018. لوحظ تباين معقول لمعظم الصفات. تشير النتائج إلى أن معظم التباين الملاحظ هو أساساً من أصل بيئي أكثر منه وراثياً. يشير تحليل التفاعل النمط الوراثي x البيئي (GxE) إلى أن هذا التفاعل يؤثر على تعبير معظم المتغيرات .بناءً على مؤشرات الإجهاد، سواء على نطاق واسع أو نوعي، تم تحديد السلالات المتأقلمة. أشار تحليل المسار إلى الكتلة الهوائية ، ومؤشر الحصاد، وخصوبة السنابل، وعدد السنابل كمحددات للمحصول، مما يوحي أن هذه الصفات ذات أهمية في برنامج الانتخاب. أظهرت نتائج الارتباط صعوبة الانتخاب على أساس المردود وتحمل الإجهاد من خلال الصفات الفسيولوجية والمورفولوجية نظراً لعدم وجود ارتباط بين هذه الصفات. تعتبر التهجينات المتقاطعة ، بين الآباء المختار بعناية لهذه الخصائص النوعية، ضرورية لتحسين الرابط الوراثي وتوليد عشائر إنعزالية جديدة ذات تباين وراثي مرتفع لهذه الصفات.

كلمات مفتاحية : القمح الصلب ،مردود حب، تفاعل النمط الوراثي x بيئة ، الربح الوراثي ، الصفات الفسيولوجية، مؤشر التأقلم.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier la variabilité et le contrôle génétique de la réponse au stress hydrique et thermique de blé dur (*Triticum durum* Desf.). L'expérimentation a été conduite au niveau de la Station de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif durant trois campagnes 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019. Une variabilité acceptable a été observée pour la plupart des caractères. Les résultats indiquent que l'essentiel de la variation observée est surtout d'origine environnementale plus que génotypique. L'analyse de l'interaction GxE indique que cette interaction influe sur l'expression de la plupart des variables. Sur la base des indices de stress, soit largement ou spécifiquement, des lignées adaptées ont été identifiées. L'analyse en chemin indique que la biomasse aérienne, l'indice de récolte, la fertilité des épis et le nombre des épis sont déterminants du rendement, ce qui suggère que ces caractères sont d'intérêt pour le programme de sélection. Les résultats de la corrélation montrent que la sélection pour le rendement et pour la tolérance au stress est difficile via les traits physiologiques et morphologiques vu que à l'absence de liaison entre ces caractères. Les croisements complexes, entre parents soigneusement choisis pour ces caractéristiques spécifiques, sont nécessaires pour améliorer le lien génétique favorable et pour générer de nouvelles populations de ségrégation de base avec une variabilité génétique élevée pour ces traits.

Mots clés : blé dur, Rendement en grain, interaction génotype x environnement, gain génétique, traits physiologiques, indice de tolérance.

Abstract

The aim of this work is to study the variability and genetic control of the drought and thermal stress response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). The experiment was conducted at Technical Institute of Field Crops (ITGC) Station of Setif during three campaigns 2016/2017, 2017/2018 and 2018/2019. Sufficient variability was observed for most characters. The result indicates that the majority of the variation observed is mainly environmental rather than genotypic. Analysis of GxE interaction indicates that this interaction influences the expression of most variables. Based on stress indices, either widely or specifically, adapted lines were identified. Path analysis pointed out to above ground biomass, harvest index, spike fertility and spike number as yield determinants, suggesting that these traits are of interest in the breeding program. The results of the correlation show that the selection of yield and stress tolerance is difficult via physiological and morphological traits as to the absence of correlation between these characters. Complexes crosses, between parents carefully chosen for these specific characteristics, are necessary to enhance favorable genetic linkage and to generate new basic segregating populations with high genetic variability for these traits.

Keywords: Durum wheat; grain yield; genotype x environment interaction, genetic gains, physiological traits; tolerance indices.

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse en composantes principales

ANOVA : Analyse de la Variance

BIO : Biomasse aérienne accumulée à maturité

CCI : Chlorophyll Content Index

CHL : Teneur en Chlorophylle

DPV : Durée de la Phase Végétative

ELWL : déperdition d'eau des feuilles excisées

GGA : gain génétique attendu de la sélection

GxE : interaction génotype x environnement

HI : Indice de Récolte

INRAA : Institut National de la Recherche Agronomique d'Algerie

ITGC : Institut technique des Grandes Cultures

MTS : thermostabilité membranaire

NE : nombre d'épis par m²

NGE : nombres de grains par épi

NGM² : nombres de grains et par m²

PHT : Hauteur de la végétation

PLL : Poids de la paille

PMG : poids de mille grains

PNE : Poids des épis

Ppds 5% : plus petite différence significative au seuil de 5%

PSFE : poids spécifique de la feuille étandard

RDT eco : Rendement Economique

RDT : rendement en grains

SFE: Surface de la feuille étandard

TCV : Température du Couvert Végétal

TRE : Teneur Relative en Eau

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Divergence (millions d'années) des espèces de la famille des Poaceae.....	3
Figure2. Évènements de polyploïdisation ayant abouti à la formation des blés cultivés tétraploïdes et hexaploïdes	5
Figure 3 : diagramme ombrothermique de Gaussen présentant la l'évolution des températures et les pluviométries des campagnes d'étude 2016/2017 et 2017/2018 d'après ITGC-AES, Sétif.....	30
Figure 4. Performances de rendement en grains des 25 variétés évaluées au cours des trois campagnes d'étude : interaction G x E du rendement en grains.....	36
Figure 5. Interaction G x E du rendement en grains déduite des effets G et E ($G \times E = Y_{ij} - Y_i - Y_j + \mu$).....	37
Figure 6. Performances de rendement en grains des variétés aux valeurs extrêmes des indices de la stabilité P_i et W_i	40
Figure 7. Ressemblance entre PMG des variétés testées au cours des campagnes 2016/17 et 2018/19.....	41
Figure 8. Valeurs moyennes (des trois campagnes) génotypes du PMG et écarts entre la moyenne générale et les valeurs du PMG des différentes variétés évaluées.....	44
Figure 9. Moyennes du nombre d'épis/m ² des 25 variétés évaluées au cours des trois campagnes d'étude : interaction G x E de NE.	45
Figure 10. Moyennes du NGM ² des meilleures variétés sélectionnées par campagne et sur la base de l'indice P_i	47
Figure 11. Moyennes du NGE des meilleures variétés sélectionnées par campagne et sur la base de l'indice P_i	48
Figure 12. Ecarts de l'interaction $G \times E$ du PNE des meilleures variétés sélectionnées par campagne, en moyenne de trois campagnes et sur la base de l'indice P_i	53
Figure 13. Moyennes des trois campagnes par variété de la durée de la phase végétative : effet moyen génotype.....	60
Figure 14. Moyennes des trois campagnes par variété de la surface de la feuille étendard : effet moyen génotype.....	60
Figure 15. Moyennes des trois campagnes par variété de la teneur relative en eau : effet moyen génotype.....	68
Figure 16. Moyennes des trois campagnes par variété du contenu en chlorophylle : effet moyen génotype.....	68

Figure 17. Moyennes et écarts de la moyenne générale de la température de la canopée (TCV) des 25 variétés évaluées au cours de la campagne 2019.....	74
Figure 18. Moyennes et écarts de la moyenne générale du taux de déperdition de l'eau des feuilles excisées (ELWL, %) des 25 variétés évaluées au cours de la campagne 2019.....	74
Figure 19. Classification des variétés évaluées sur la base des performances de rendement des trois campagnes.	99
Figure 20. Performances de rendement en grains des différents clusters de variétés lors des trois campagnes d'études.	100
Figure 21 Réponses du rendement des trois clusters à la fertilité du milieu	100
Figure 22. Caractérisation des différents clusters (en % des moyennes du C I), identifiés sur la base du rendement en grains des trois campagnes, pour les 18 variables mesurées.	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Les différentes espèces et sous espèces de blé appartenant aux genres <i>Triticum</i> et <i>Aegilops</i> et leurs génomes correspondants.....	4
Tableau 2. Volumes des importations Algériennes des céréales au cours des campagnes 2014/15 et 2015/16.....	8
Tableau 3. Liste des génotypes de blé dur étudiés et leur randomisation en plein champ	20
Tableau 4. Squelette de la table de l'analyse de la variance du modèle additif adopté	25
Tableau 5. Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée des dix sept variables mesurées au cours des trois années d'étude.	32
Tableau 6. Pourcentage de la somme des carrés des écarts expliqué par source de variation des dix sept variables mesurées au cours des trois années d'étude.....	33
Tableau 7. Valeurs moyennes caractéristiques, plus petite différence significative, composantes de la variation, héritabilité au sens large et gain génétique attendu de la sélection en valeurs absolue et en % de la moyenne du rendement et ses composantes.....	34
Tableau 8. Valeurs de l'indice de la supériorité génotypique (P_i) et l'écovalence (W_i) du rendement en grains des différentes variétés évaluées au cours des trois campagnes d'étude.....	39
Tableau 9. Valeurs moyennes par campagne des différentes variables mesurées.....	42
Tableau 10. Valeurs moyennes par campagne du NGM^2 et du NGE , ordre de classement variétal et valeurs de l'indice P_i	46
Tableau 11. Valeurs moyennes caractéristiques, plus petite différence significative, composantes de la variation, héritabilité au sens large et gain génétique attendu de la sélection en valeurs absolue et en % de la moyenne du poids des épis (PNE), de la biomasse aérienne (BIO), de la paille (PLL) et du rendement économique (RDT_{eco}).....	50
Tableau 12. Valeurs moyennes (X_{ij}) du PNE par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice P_i et classement des valeurs différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices P_i	51
Tableau 13. Valeurs moyennes (X_{ij}) de la BIO par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice P_i et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices P_i	55
Tableau 14. Valeurs moyennes (X_{ij}) de la PLL par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice P_i et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices	56

Tableau 15. Valeurs moyennes (Xij) du RDTeco par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.	57
Tableau16. Valeurs moyennes caractéristiques, plus petite différence significative, composantes de la variation, héritabilité au sens large et gain génétique attendu de la sélection en valeurs absolue et en % de la moyenne de la durée de la phase végétative (DPV), de l'indice de récolte (HI), de la hauteur de la plante (PHT) et de la surface de la feuille étandard (SFE).	59
Tableau17. Valeurs moyennes (Xij) de laDPV par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.....	62
Tableau 18. Valeurs moyennes (Xij) de la PHT par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.....	63
Tableau 19. Valeurs moyennes (Xij) de HI par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.	64
Tableau 20. Valeurs moyennes (Xij) de la SFE par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.....	65
Tableau 21. Valeurs moyennes caractéristiques, plus petite différence significative, composantes de la variation, héritabilité au sens large et gain génétique attendu de la sélection en valeurs absolue et en % de la moyenne de la teneur relative en eau (TRE), l'intégrité cellulaire(MTS), le contenu en chlorophylle (CHL) et le poids spécifique foliaire (PSF).....	67
Tableau 22. Valeurs moyennes (Xij) de la TRE par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.....	69
Tableau 23. Valeurs moyennes (Xij) de la MTS par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.....	70
Tableau 24. Valeurs moyennes (Xij) de la CHL par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.....	71
Tableau 25. Valeurs moyennes (Xij) de la CHL par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.....	72

Tableau 26 Valeurs des coefficients de corrélations phénotypiques des différentes paires de variables mesurées par campagne d'étude.....	79
Tableau 27. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $RDT = f(NE, NGE, PMG, BIO, HI)$, des données de la campagne 2017.....	85
Tableau 28. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $BIO = f(PLL, PHT, TRE, MTS, CHL, DPV, PNE)$ des données de la campagne 2017.	88
Tableau 29. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $RDT = f(NE, NGE, PMG, BIO, HI)$, des données de la campagne 2018.....	90
Tableau 30. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $BIO = f(PLL, PHT, TRE, MTS, CHL, DPV, PNE)$ des données de la campagne 2018.....	92
Tableau 31. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $RDT = f(NE, NGE, PMG, BIO, HI)$, des données de la campagne 2018.....	94
Tableau 32. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $BIO = f(PLL, PHT, TRE, MTS, CHL, DPV, PNE)$ des données de la campagne 2018.	96

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les changements climatiques attendus présagent que le climat du pays sera moins favorable aux productions agricoles pluviales. La pluviométrie sera plus rare et les températures plus chaudes (IPCC, 2007). Dans de telles conditions, il est impératif de réfléchir comment développer des cultivars qui peuvent s'adapter à ces conditions climatiques parfois sévères et produire plus. La recherche de la capacité génétique de résister au manque d'eau et aux températures élevées devient un objectif prioritaire nécessaire pour le développement de cultivars tolérants. En effet la sélection des variétés plus aptes à tolérer le manque d'eau engendre des augmentations substantielles des rendements en grains (Clarke et McCaig, 1982).

Diverses études, assez récentes, indiquent l'obtention d'un gain génétique appréciable en termes de rendement en grains. Cependant ce gain est variable dans l'espace et dans le temps, suite à la sensibilité des nouveaux cultivars aux stress abiotiques dont le déficit hydrique et les hautes températures de fin de cycle sont les plus importants (Benmahammed et al., 2010 b; Nouar et al., 2012; Fellahi et al., 2018). Ceci suggère de créer la variabilité pour le potentiel de rendement et pour la tolérance des stress et de combiner les gènes favorables dans un même fond génétique. La sélection pour l'augmentation du rendement est basée sur le rendement lui-même et/ou sur la base des composantes, mais la sélection pour la tolérance est moins aisée suite à l'absence de caractères qui lui sont directement liées (Fellahi et al., 2019).

Les physiologistes proposent divers tests qui rendent compte de la capacité de la tolérance génotypique vis-à-vis des stress. Parmi ces tests, le test de la stabilité membranaire et celui de la capacité de rétention de l'eau des feuilles excisées sous conditions de stress thermique et hydrique discriminent nettement entre génotypes tolérants et sensibles. L'application des techniques de criblage des populations en ségrégations, à un stade végétatif précoce, permet d'éliminer le matériel végétal sensible et d'isoler le matériel résistant (Clarke et McCaig, 1982).

Ainsi certains paramètres physiologiques se sont montrés très efficaces pour identifier des génotypes qui portent des gènes de résistance. Parmi les caractères utilisés comme critères de sélection figurent, entre autres, la teneur relative en eau du feuillage, la

perte d'eau des feuilles excisées, la fréquence des stomates, la température de la canopée et l'enroulement du feuillage, qui sont plus ou moins bien corrélés avec la résistance au déficit hydrique (Clarke et McCaig, 1982; Oulmi et al., 2014). L'objet de cette recherche est d'analyser la variabilité et la reproductibilité des résultats de ces tests chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) et d'étudier le déterminisme génétique de la tolérance mesurée par ces tests.

Chapitre I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. LE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

1.1. ORIGINE GENETIQUE ET TAXONOMIE

Les blés appartiennent aux angiospermes (plantes à fleurs) monocotylédones de la famille des *Poaceae* (graminées), de la sous-famille des *Pooideae* et de la tribu des *Triticeae*. La famille des *Poaceae* compte plus de 600 genres et 10000 espèces, poussant sous des latitudes et des climats diversifiés (Kellogg, 2001). Les espèces de cette famille, qui ont été domestiquées, représentent un intérêt agronomique majeur comme le riz (*Oryza*), le maïs (*Zea*), le sorgho (*Sorghum*), l'avoine (*Avena*), le seigle (*Secale*), l'orge (*Hordeum*) et le blé (*Triticum* et *Aegilops*) (Figure 1).

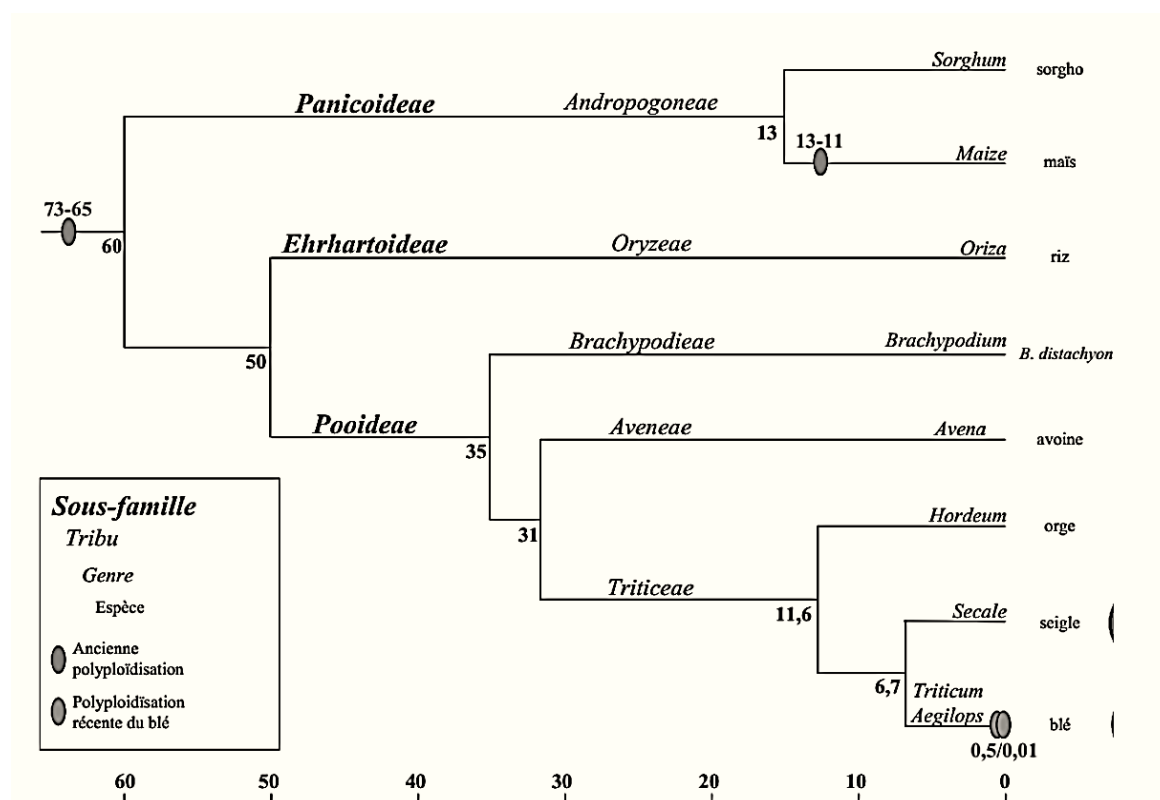


Figure 1. Divergence (millions d'années) des espèces de la famille des *Poaceae* (Chalupska et al., 2008; Charles, 2010).

On compte près de six espèces (19 sous-espèces) de blé du genre *Triticum* et 24 espèces du genre *Aegilops* (Tableau 1). Les premières études comparatives ont montré une bonne conservation des gènes et de leur ordre à l'échelle des chromosomes (synténie) au cours de l'évolution des génomes d'espèces de la famille des *Poaceae* (Moore et al., 1995).

Elles ont montré également que les espèces de cette famille ont divergé d'un ancêtre commun il y a environ 70 Ma (Figure 1 ; Prasad et al., 2005).

Tableau 1. Les différentes espèces et sous espèces de blé appartenant aux genres *Triticum* et *Aegilops* et leurs génomes correspondants

(“<http://wheat.pw.usda.gov/ggpages/GrainTax/index.shtml>,”)

<i>Triticum</i>			<i>Aegilops</i>		
Espèce	Génome	Autre appellation	Espèce	Génome	Autre appellation
Diploïdes :			Diploïdes :		
<i>Triticum monococcum</i>			<i>Aegilops markgrafii</i>	C	<i>Aegilops caudata</i>
ssp. <i>monococcum</i>	A ^m	<i>Triticum monococcum</i>	<i>Aegilops tauschii</i>	D	
ssp. <i>aegilopoides</i>	A ^u	<i>Triticum boeoticum</i>	<i>Aegilops comosa</i>	M	
<i>Triticum urartu</i>	A ^u		<i>Aegilops uniaristata</i>	N	
Tétraploïdes :			<i>Aegilops speltoides</i>	S	
<i>Triticum turgidum</i>			<i>Aegilops bicornis</i>	S ^b	
ssp. <i>durum</i>	BA ^u	<i>Triticum durum</i>	<i>Aegilops longissima</i>	S ^l	
ssp. <i>diccoides</i>	BA ^u	<i>Triticum diccoides</i>	<i>Aegilops sharonensis</i>	S ^{sh}	
ssp. <i>diccon</i>	BA ^u	<i>Triticum diccon</i>	<i>Aegilops searsii</i>	S ^s	
ssp. <i>carthlicum</i>	BA ^u	<i>Triticum carthlicum</i>	<i>Aegilops umbellulata</i>	U	
ssp. <i>turanicum</i>	BA ^u	<i>Triticum turanicum</i>	Tétraploïdes :		
ssp. <i>polonicum</i>	BA ^u	<i>Triticum polonicum</i>	<i>Aegilops triuncialis</i>	UC	
ssp. <i>paleocolchicum</i>	BA ^u	<i>Triticum karamyschevii</i>	<i>Aegilops cylindrica</i>	CD	
<i>Triticum timopheevii</i>			<i>Aegilops ventricosa</i>	DN	
ssp. <i>timopheevii</i>	GA ^u	<i>Triticum timopheevii</i>	<i>Aegilops crassa</i>	D ^c M	
ssp. <i>armeniaticum</i>	GA ^u	<i>Triticum araraticum</i>	<i>Aegilops biuncialis</i>	UM	
Hexaploïdes :			<i>Aegilops columnaris</i>	UM	
<i>Triticum aestivum</i>			<i>Aegilops kotschy</i>	US	
ssp. <i>aestivum</i>	BA ^u D	<i>Triticum aestivum</i>	<i>Aegilops peregrina</i>	SU	<i>Aegilops variabilis</i>
ssp. <i>compactum</i>	BA ^u D	<i>Triticum compactum</i>	<i>Aegilops geniculata</i>	MU	<i>Aegilops ovata</i>
ssp. <i>macha</i>	BA ^u D	<i>Triticum macha</i>	Hexaploïdes :		
ssp. <i>spelta</i>	BA ^u D	<i>Triticum spelta</i>	<i>Aegilops crassa</i>	D ^c DM	
ssp. <i>sphaerococcum</i>	BA ^u D	<i>Triticum sphaerococcum</i>	<i>Aegilops trivialis</i>	DMS	
ssp. <i>vavilovii</i>	BA ^u D	<i>Triticum vavilovii</i>	<i>Aegilops juvenalis</i>	DMU	
<i>Triticum zhukovskyi</i>	GA ^m A ^u		<i>Aegilops vavilovii</i>	DMS	
			<i>Aegilops nealecta</i>	UMN	<i>Aegilops recta</i>

La culture moderne du blé est essentiellement basée sur deux espèces allo-polyplœides : le blé dur allo-tétraploïde (2n=4x=28, BBAA) et le blé tendre allohexaploïde (2n=6x=42, BBAADD). La formation de ces espèces de blé a impliqué plusieurs étapes de polyplœidisation et de domestication (Figure 2). Les progéniteurs des génomes A et D ont été identifiés, par contre le donneur du génome B reste pour l'instant discutable (Feldman, 2001 ; Huang et al., 2002). L'amidonniér sauvage est une espèce de blé tétraploïde *T. turgidum* ssp. *Diccocoïdes* (2n=4x=28, BBAA) qui s'est formée il y a environ 0,5 millions d'années par un événement d'allopolyplœidisation entre l'espèce diploïde *T. urartu* (2n=2x=14, A_uA_u), progénitrice du génome A et une espèce de la section *Sitopsis*, progénitrice du génome B, qui reste à identifier (Huang et al., 2002; Dvorak et al., 2006) (Figure 2).

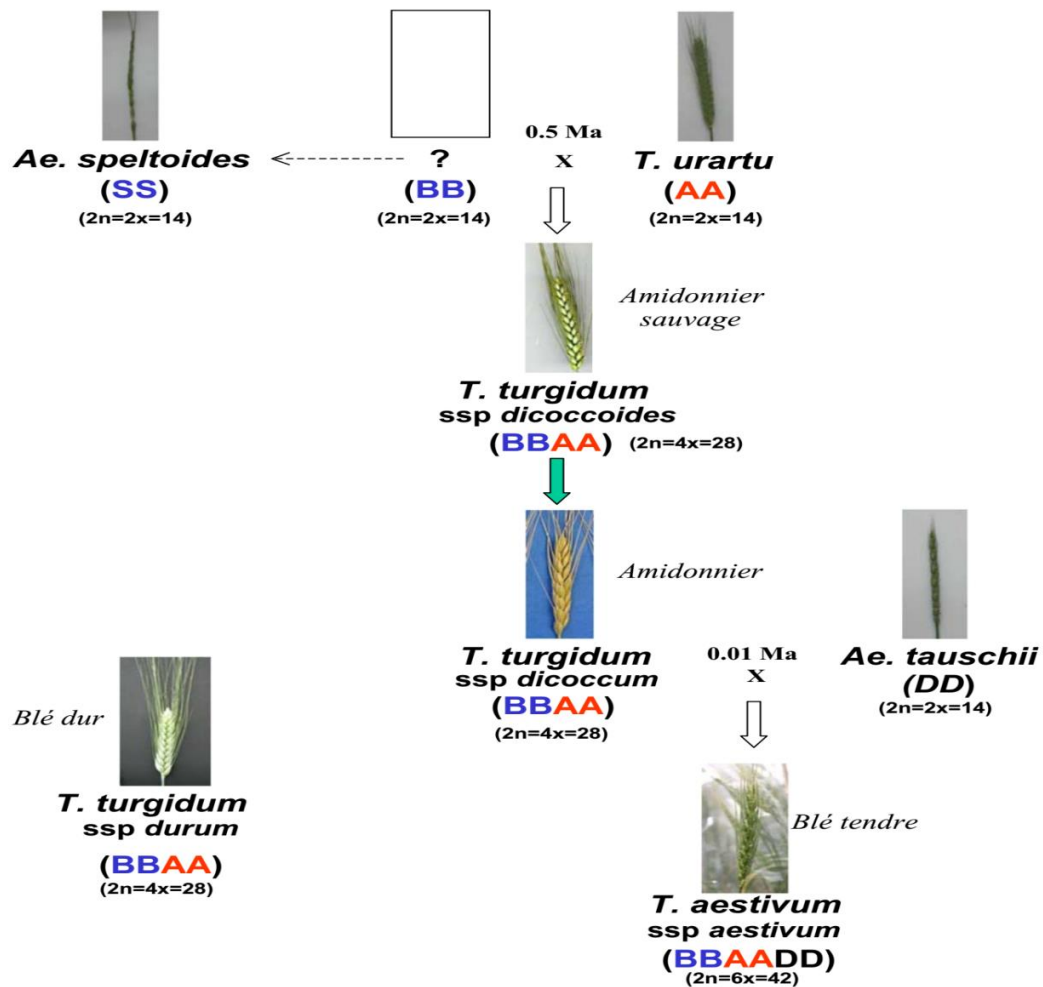


Figure 2. Évènements de polyploïdisation ayant abouti à la formation des blés cultivés tétraploïdes et hexaploïdes (Huang et al., 2002; Dvorak et al., 2006).

L'espèce la plus proche dans cette section est *Aegilops speltoides* (2n=2x=14, SS). Il y a environ 10.000-15.000 ans, l'homme a commencé à cueillir puis cultiver et sélectionner les espèces dont il a besoin: c'est le début de la domestication (Harlan, 1992). L'en grain *T. monococcum* (2n=2x=14, A_mA_m) et l'amidonnier *T. turgidum* ssp. *dicoccum* (2n=4x=28, BBAA) ont été les premières espèces de blé dur domestiquées. Elles viennent respectivement de l'en grain sauvage *T. boeoticum* (2n=2x=14, A_mA_m) et de l'amidonnier sauvage (BBAA).

Ces formes domestiquées se sont être disséminées progressivement à travers l'Asie, l'Europe et l'Afrique. L'amidonnier (BBAA) sera ainsi mis en contact avec l'espèce diploïde sauvage *Aegilops tauschii* (2n=2x=14, DD) dans la région géographique allant de l'Arménie à la côte sud-ouest de la mer Caspienne (Dubcovsky et Dvorak, 2007). Leur hybridation et dédoublement chromosomique donna le blé tendre allohexaploïde actuellement cultivé *T. aestivum* ssp. *aestivum* (2n=6x=42, BBAADD)(Feldman et al.,

1995). Le blé dur actuellement cultivé *T. turgidum* ssp. *durum* ($2n=4x=28$, BBAA) apparaît avec l'empire romain il y a environ 3000-4000 ans. Selon (Feldman et al., 1995) l'origine et la relation de cette espèce *T. turgidum* ssp. *durum* avec les premières espèces tétraploïdes *T. turgidum* ssp. *dicoccum* et *T. turgidum* ssp. *diccocoïdes* restent mal caractérisées.

1.2. IMPORTANCE ECONOMIQUE

1.2.1. SUPERFICIES ET RENDEMENTS

Historiquement la région du pourtour de la méditerranée est la principale zone de culture du blé tétraploïde (*Triticum turgidum*, var. *durum* L.) qui détient près 80% des superficies emblavées (Royo et al., 2009). Avoisine les 16.9 millions d'hectares est la moyenne des superficies emblavées en blé dur, des 10 dernières années, de par le monde, ce qui représente près de 7.9% de la superficie totale réservée à la culture des blés dur et tendre (215×10^6 ha BT et 17×10^6 ha BD= total 232×10^6 ha). Le Kazakhstan (2 280 000 ha), le Canada (1 970 000 ha), la Turquie (1 670 000 ha), l'Italie (1 417 000 ha) et l'Algérie (1 264 000 ha) sont les pays qui emblavent les 50.6 % (8 600 000 ha) de la superficie mondiale du blé dur (Ammar, 2015).

En Afrique du Nord et en Europe du Sud, les rendements sont fortement influencés par la sécheresse. La moyenne des rendements est de 2.7 t/ha pour la période 2006-2015. Les rendements les plus élevés ont enregistré en Egypte (5.69 t/ha, irrigation), au Mexique (5.67 t/ha, irrigation), en France (4.83 t/ha), au Chili (4.5 t/ha), en Arabie Saoudite (4.2 t/ha, irrigation), en Chine (4.1 t/ha), et en Italie (3.04 t/ha). Les plus faibles rendements sont enregistrés au Kazakhstan (1.04 t/ha), en Ethiopie (1.38 t/ha), au Maroc (1.46 t/ha), et en Algérie (1.56 t/ha) (Ammar, 2015).

Selon Ducellier, (1930) en 1865, les superficies consacrées aux céréales, en Algérie, étaient estimées à 2.5 millions d'ha. La variation de la production du blé dur au cours de la période 1867 à 1929 a été de 0.45 millions de tonnes obtenus en 1867 à 0.80 millions de tonnes obtenus en 1911. En 1929, les superficies ensemencées en blé dur étaient de 1 219 000 ha contre 1 431 000 ha d'orge, pour un total de 2 650 000 ha. Les rendements variaient de 0.35 à 1.03 t/ha, au cours de la période 1920 à 1929 (Ducellier, 1930). Actuellement, les emblavements du blé dur ont varié de 726 500 ha en 2007/08 à 1 372 500 ha en 2003/04, sur la période allant de 2000/01 à 2011/12 (Hamli, 2015).

1.2.2. PRODUCTIONS ET IMPORTATIONS

La production varie considérablement en fonction des années et des pays. En moyenne de la période 2006/2015, les plus grandes productions en volume ont été enregistrées au Canada (4 493 000 t), en Italie (4 281 000 t), en Turquie (3 030 000 t), au Kazakhstan (2 400 000 t), aux USA (2 305 000 t), en France (2 070 000 t) et en Algérie (2 045 000 t). Les plus faibles productions sont observées en Pakistan (331 000 t), en Ethiopie (321 000 t), en Egypte (280 000 t), en Arabie Saoudite (277 000 t), en Irak (222 000 t), en Argentine (210 000 t) et au Chili (56 000 t, Ammar, 2015).

En Algérie, le blé dur est produit dans trois régions qui sont la zone littorale dont la pluviométrie est supérieure à 600 mm, les plaines intérieures, avec une pluviométrie de 450 à 600 mm et les hauts plateaux, avec 350 à 450 mm. La majorité de la sole réservée à la culture du blé dur est localisée à l'intérieur du pays, sur les hauts plateaux (Benbelkacem, 2013).

Les besoins en blé dur des pays du bassin méditerranéen sont supérieurs à ce qu'ils produisent; ce qui fait que chaque année, plus de 5 millions de tonnes sont acheminés vers ces pays, venant pour la plupart des USA et du Canada. Afin de combler le déficit en produits céréaliers, l'Algérie recourt à des importations, à partir de la France, des Etats Unis, du Canada et de l'Argentine qui sont ses principaux fournisseurs (Ammar, 2015).

En Algérie, la variation de la production et des rendements est mise au compte de la variabilité climatique, notamment les stress hydriques et thermiques qui affectent puissamment le développement de cette culture (Chennafi et al., 2006; Mekhlouf et al., 2006; Nouar et al., 2010). Actuellement, la production nationale de blé dur est jugée insuffisante au regard des besoins du pays qui se classe parmi les grands consommateurs de blé avec une moyenne de 230 kg/hab/an (Hervieu et al., 2006).

Les importations ont augmenté depuis 1991/92. Entre 1984/85 et 1990/91, la moyenne était inférieure à 1,4 millions de tonnes/an. Pour la période 2000-2011, elle passe à 2.3 millions de tonnes/an, ce qui représente plus que le tiers de l'offre mondiale. L'Union Européenne est le principal fournisseur de l'Algérie, aussi bien pour le blé dur que pour le blé tendre (IGC, 2011). Les volumes importés sont très variables, car ils représentent les quantités consommées au cours de l'année d'importation et celles stockées et reportées pour d'autres années (Tableau 2, Onfaa, 2016).

Tableau 2. Volumes des importations Algériennes des céréales au cours des campagnes 2014/15 et 2015/16 (ONFAA, 2016).

	Importations (10 ⁶ T)		Prix US\$/T	
	2014/15	2015/1	2014/15	2015/16
Blé dur	1.2	1.4	544	437
Blé tendre	4.9	4.5	1195	877
Orge	0.6	0.76	135	135
Maïs	3.1	3.2	619	602

2. EFFETS DU DEFICIT HYDRIQUE ET DES HAUTES TEMPERATURES SUR LA PLANTE

La faiblesse des performances de la céréaliculture Algérienne a plusieurs origines dont le manque d'eau et les hautes températures de fin de cycle sont les principaux facteurs limitants. Les dommages sont variables et fonction de la période, la durée et l'intensité du manque d'eau. De plus le déficit hydrique est le plus souvent associé aux températures élevées, à une forte insolation et à des vents chauds et secs, qui exagèrent l'effet sur la plante.

Sous de telles conditions l'évapotranspiration intense inhibe totalement toute activité photosynthétique (Mekhlouf et al., 2006; Benmahammed et al., 2010a ; Laala et al., 2010; Sinclair, 2011). L'association entre ces deux stress induit la fermeture des stomates, augmente la respiration nocturne, déstabilise l'activité enzymatique, induit la sénescence prématurée, accélère l'initiation florale et cause la stérilité des grains de pollen, réduisant significativement le rendement.

3. MECANISMES DEVELOPPES PAR LA PLANTE POUR CONTRER LES STRESS HYDRIQUE ET THERMIQUE

Les plantes ont mis au point plusieurs mécanismes qui leur permettent de tolérer les stress abiotiques de nature hydrique et thermique. Ces mécanismes ont été classés par (Levitt, 1980) en trois stratégies qui sont l'esquive, l'évitement et la tolérance. Les plantes qui pratiquent l'esquive accélèrent leur rythme de développement pour permettre la

reproduction avant que le stress ne devienne trop important. Ainsi elles réduisent du risque de rendement nul (sinistre) en échange d'un rendement tout de même inférieur au maximum atteignable en absence de stress.

Ce type de stratégie est surtout basé sur la capacité génétique de modulation de la durée du cycle. Le raccourcissement de la durée du cycle a été l'élément essentiel de la mise en œuvre de cette stratégie ce qui a permis d'adapter la culture des blés à des zones qui lui était initialement peu favorables (Harlan, 1992).

La stratégie de l'évitement est basée sur la capacité génétique de la plante à se placer en situation de non contrainte alors que le milieu dans lequel elle croit, est, au contraire, contraignant. Les plantes qui pratiquent l'évitement vont éviter la déshydratation de leurs tissus tout en maintenant leur potentiel hydrique le plus élevé possible à l'aide de caractères adaptatifs permettant de réduire la perte en eau et d'avoir accès à plus d'humidité du sol. La perte en eau par transpiration est minimisée en grande partie par la fermeture des stomates, au détriment de l'assimilation du carbone atmosphérique.

Les génotypes qui déploient cette stratégie, arrivent à avoir accès à plus d'humidité du sol, en développant un système racinaire plus important, pour se rafraîchir et éviter la fermeture complète des stomates (régulation stomatique), ce qui maintient l'activité photosynthétique. Levitt, (1980) classe les plantes adoptant cette stratégie en deux catégories : les plantes économes en eau qui régulent et contrôlent leur transpiration via la variation de l'ouverture des stomates et les dimensions de leur feuillage, et les plantes dépensières d'eau qui arrivent à mobiliser plus d'eau grâce à la caractéristique de leur système racinaire, pour continuer à fonctionner sous stress. La réduction de la surface d'évaporation est obtenue par un enroulement des feuilles, l'élimination des feuilles les plus âgées, ainsi qu'une diminution de la croissance (Sharp et al., 2004). Cette stratégie permet donc une survie au détriment de la productivité.

La stratégie de la résistance est entièrement basée sur la capacité génétique de la plante à maintenir ses activités métaboliques sous conditions de stress hydrique et thermique ou sous faible potentiel hydrique foliaire. Cette stratégie est surtout basée sur la capacité d'ajustement osmotique telles que l'accumulation de solutés compatibles qui régulent les pertes d'eau via les stomates, la synthèse de nouvelles protéines de choc thermique qui jouent le rôle partiel de substituant de l'eau, et/ou la mise en œuvre des

aquaporines qui régulent le flux hydrique entre le milieu extérieur et la cellule (Talukder et al., 2014).

Chaves et al., (2003) citent la translocation des réserves comme le mécanisme le plus utilisé dans cette stratégie pour remplir le grain. La stratégie de résistance aux stress hydrique et thermique est aussi associée à une élimination efficace des espèces réactives de l'oxygène formées lors de la perturbation du métabolisme cellulaire par le stress (Barnabás et al., 2008). Cette stratégie permet le maintien du rendement maximal, sous stress modéré, mais elle augmente le risque de perte totale de rendement, sous stress sévère qui ne permet pas une alimentation hydrique convenable d'un couvert végétal trop développé ou le remplissage de grains trop nombreux (Chaves et al., 2003).

3.1. LA FERMETURE DES STOMATES

La réduction ou la fermeture des stomates est un mécanisme signalétique qui intervient lors des premières minutes d'imposition du stress. C'est un des principaux moyens mis en place par la plante pour éviter les pertes excessives en eau (Barnabás et al., 2008). La fermeture des stomates fait l'économie de l'eau par la plante mais au prix d'une diminution de l'apport en CO₂ destiné à la photosynthèse. C'est l'échange eau contre carbone. L'acide abscissique (ABA est une phytohormone signal du stress notamment hydrique). Elle est impliqué dans la régulation de l'ouverture des stomates (Kim et al., 2010).

L'ABA induit la fermeture des pores stomatiques en inhibant l'ATPase à protons, en activant les canaux du Ca²⁺ et du Cl⁻ et en inhibant les canaux K⁺ entrants. Ces événements dépolarisent les membranes des cellules de garde, induisent le flux des ions K⁺ vers le cytosol, puis du cytosol vers l'extérieur des cellules de garde. Cette sortie entraîne une baisse de la pression osmotique et provoque une sortie d'eau des cellules, associées à une diminution de la turgescence. Ceci induit la fermeture des pores stomatiques (Kim et al., 2010).

3.2. CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DES TISSUS

La modification de la conductivité hydraulique des tissus qui intervient dès le début d'un déficit hydrique, correspond à la modification du trajet de l'eau. Les échanges

transmembranaires de l'eau sont réalisés à travers des pores formés par des protéines membranaires, les aquaporines (Maurel et al., 2008). En cas de déficit hydrique, l'ouverture et la répartition des aquaporines dans les membranes sont modifiées, ce qui permet de moduler le trajet de l'eau au sein des tissus ou organes (Zhu et al., 2005) et d'adapter la conductivité hydrique, au sein de la plante, à l'eau dont elle dispose dans le sol.

3.3. AJUSTEMENT OSMOTIQUE

L'ajustement osmotique est un important mécanisme d'acclimatation qui permet le maintien des fonctions métaboliques à un degré relativement élevé et sous faible potentiel hydrique foliaire (Gilliam et Tester, 2005). Pour limiter la perte en eau, les plantes sont capables de maintenir la turgescence de leurs cellules grâce à l'accumulation contrôlée de composés organiques appelés solutés compatibles qui interviennent dans l'ajustement osmotique. Ces solutés sont des composés solubles, non chargés, à pH neutre et compatibles, même à forte concentration avec les fonctions métaboliques. Ils permettent également une stabilisation des protéines et des membranes cellulaires contre l'effet de dénaturation engendré par les stress sur les fonctions cellulaires. Leur nature est très variable et dépend de la nature du stress et de l'espèce considérée. Il peut s'agir d'acides aminés, tels que la proline, la glycine bêtaïne, de sucres, tels que le saccharose et le tréhalose, ou de polyols (Valliyodan et Nguyen, 2006).

Les résultats de nombreuses recherches apportent des évidences au sujet de la relation d'un degré élevé d'ajustement osmotique et la réalisation d'un rendement en grains ou biomasse aérienne élevés sous conditions contraignantes (Liu, et al., 2015).

3.4. CROISSANCE DES PARTIES AERIENNES

Les stress hydrique et thermique se matérialisent chez la plupart des espèces par un ralentissement de la mise en place de nouveaux organes aériens et par une réduction de la croissance des organes préexistants. Ces modifications résultent d'une diminution de la vitesse de division des cellules constituant les tissus végétaux et d'une modification des propriétés physico-chimiques des parois entourant les cellules qui deviennent plus rigides, ce qui empêche leur croissance (Cosgrove, 2005).

Ces processus, à plus long terme, limitent les surfaces d'échange entre la plante et l'air et donc les pertes d'eau par transpiration. La réduction de croissance ne serait pas une conséquence passive du manque d'eau dans les cellules mais une réponse contrôlée et programmée de la plante dont le résultat est d'anticiper les événements sévères de stress hydrique. Cette réponse est donc préventive et non subie.

4. AMELIORATION DE LA TOLERANCE VIS-A-VIS DES STRESS ABIOTIQUES

4.1. INTERET

Les changements climatiques imposent de sérieuses contraintes sur les productions végétales. Ainsi au cours du siècle dernier la concentration du dioxyde de carbone (CO₂) a évolué de 350 µmol/mol en 1980 à près de 378 µmol/mol vers la fin des années 2010. A ce rythme et avec l'augmentation de la population mondiale et donc des activités anthropiques, il est attendu que la concentration du CO₂ doublera vers la fin de ce siècle. Les conséquences sont l'augmentation de la température moyenne de surface dans la marge des 1.4 à 5.8°C, associée à de fréquents événements de stress thermiques et hydriques (IPCC, 2007).

Comme la plus part des végétaux sont relativement sensibles à ces stress, leur culture dévient problématique sous de telles conditions. Une des alternatives la plus économique pour minimiser des effets des stress hydrique et thermique sur le développement des cultures est d'identifier ou de développer des variétés tolérantes vis-à-vis de ces stress (Singh et al., 2007; Oulmi et al., 2014; Hamli et al., 2015; Fellahi et al., 2018). La difficulté pour identifier des génotypes tolérants réside dans l'absence de critère de sélection fiable et reproductible (Singh et al., 2007; Oulmi et al., 2014; Hamli et al., 2015; Fellahi et al., 2018).

4.2. CRITERES DE SELECTION

La sélection pour la résistance aux stress abiotiques est compliquée, suite à l'absence de critères de sélection efficaces pour cette caractéristique (Singh et al., 2007; Oulmi et al., 2014; Hamli et al., 2015). Seule la précocité à maturité a été utilisée efficacement pour développer des variétés qui minimisent plus ou moins les effets des stress de fin de cycle sur le rendement en grains (Nouar et al., 2010). La performance de rendement sous

conditions contraignantes est utilisée comme critère d'adaptation et donc de tolérant des stress (Gavuzzi et al., 1993).

Cette sélection directe, sur la base du rendement en grains, repose sur l'identification de génotypes capables de faire un bon rendement sous conditions contraignantes ou de minimiser la baisse de rendement sous stress relativement au rendement exprimé en absence de stress. De tels génotypes sont déclarés tolérants (El Jaafari et al., 1995; Richards et al., 2002; Benmahammed et al., 2010b; Belkharchouche et al., 2015; Hamli et al., 2015).

Sous conditions de stress, le rendement en grains n'est pas toujours le critère de sélection le plus efficient pour identifier la tolérance vis-à-vis des stress. Ceci nécessite de chercher des approches basées sur l'évaluation des caractères physiologiques liés à la tolérance des stress (Datta et al., 2011). De tels caractères peuvent être utilisés directement pour identifier les meilleurs géniteurs à croiser ou appliqués sur des générations en ségrégations pour le criblage et l'isolement des lignées tolérantes, indépendamment de leur rendement en grain (Kumar et al., 2013).

En effet sous conditions de stress la performance de rendement est généralement peu lié à la tolérance des stress (Hamli et al., 2015). Dans ce contexte les physiologistes proposent toute une série de paramètres qui sont souvent associés à la résistance vis-à-vis des stress (Richards et al., 2002; Benmahammed et al., 2010b; Belkharchouche et al., 2015; Hamli et al., 2015). Ces paramètres sont déduits des travaux qui portent sur la comparaison des réponses, à un stress donné et à une intensité spécifique, d'un nombre réduit de génotypes. Ces tests physiologiques sont le plus souvent réalisés sous conditions plus ou moins contrôlées (Hamli et al., 2015).

4.2.1. CONTENU EN PROLINE

L'ajustement osmotique aide au maintien d'un contenu relatif en eau foliaire élevé sous faible potentiel hydrique, ce qui permet la croissance, alors que la plante satisfait la demande climatique en réduisant son potentiel hydrique foliaire (Blum, 2005; Liu, et al., 2015). L'implication des acides aminés libres en réponse aux stress hydrique et thermique a été observée sur blé tendre où un mutant qui contient plus d'acides aminés, notamment la

sérine, la méthionine et l'arginine, était moins endommagé par le stress que son parent (Behl et al., 1991).

La proline a été suggérée comme une mesure métabolite du stress hydrique, et joue un important rôle comme osmolyte organique. Ce rôle a été démontré chez le coton soumis sous stress thermique et où les cultivars ayant un contenu en proline élevé présentent moins de dommages du stress thermique que les cultivars qui ont un faible contenu en proline (Ashraf et al., 1994; Roosens et al., 2002; Simon-Sarkadi et al., 2005). Nayyar et Walia, (2003) mentionnent le rôle joué par la proline sous stress hydrique. Ces auteurs observent que la proline s'accumule à un taux plus élevé chez le génotype tolérant le stress hydrique que chez le génotype sensible.

4.2.2. CONTENU EN CHLOROPHYLLE

L'activité photosynthétique est altérée par les stress hydrique et thermique qui augmentent le taux de dessèchement du feuillage (Al-Khatib et Paulsen, 1990). Au cours de la sénescence du feuillage, le contenu en chlorophylle diminue, alors que le rapport chlorophylle a/chlorophylle b augmente (Liu, et al., 2015). De la variabilité existe entre cultivars pour le degré de réduction de l'activité photosynthétique sous stress hydrique et thermique. Les génotypes tolérants présentent une activité photosynthétique, sous stress, plus stable et une plus longue durée de vie du feuillage vert (Morales et al., 2003; Todorov et al., 2003). L'effet des stress sur l'activité photosynthétique se répercute sur la quantité de biomasse aérienne accumulée qui diminue (Shah et Paulsen, 2005; Liu, et al., 2015).

4.2.3. REMOBILISATION DES ASSIMILAS

Les assimilés stockés dans les entre nœuds peuvent servir comme une source de carbone utilisable pour finir le remplissage du grain qui est fortement altéré sous stress hydrique et thermique (Blum et al., 1994). En effet la réduction du poids du dernier entre nœud au cours de la période de remplissage du grain était positivement et significativement corrélée avec le rendement en grains, le poids de 1000 grains et avec l'indice de récolte du blé tendre (Wardlaw et Willenbrink, 1994). Par contre cette réduction du poids était négativement et significativement corrélée avec le taux relatif de croissance de la tige au cours du remplissage du grain et avec la température moyenne de la période allant du semis à l'anthèse (Cruz-Aguado et al., 2000).

Les génotypes tolérants font usage d'une plus grande quantité d'assimilats stockées dans la tige que les génotypes sensibles (Shukla et al., 1997). Ainsi les génotypes tolérants perdent uniquement que 12% de leur rendement maximal sous stress comparativement aux génotypes sensibles aux stress hydrique et thermique qui perdent jusqu'à 30% (Rane et al., 2003). Yang et al., (2001) mentionnent que les stress hydrique et thermique favorisent la translocation des assimilats stockés dans la tige plus chez les génotypes tolérants que chez les génotypes sensibles. Ainsi Ehdaie et al., (2006) rapportent que relativement à la quantité totale d'assimilats remobilisée, 65, 11 et 5% ont pour source le col de l'épi, le dernier et l'avant dernier entre nœuds.

4.2.4. STABILITE MEMBRANAIRE

Les membranes cellulaires sont l'une des premières cibles de nombreux stress, dont les dommages sont associés avec l'altération du métabolisme induisant la production d'espèces réactives d'oxygène (Kocheva et al., 2014). Le maintien de leur intégrité sous stress hydrique est la composante majeure de la tolérance des plantes aux stress (Hamli et al., 2015). Le test de la stabilité de la membrane plasmique est une technique qui promet en terme de progrès en sélection pour la tolérance des stress hydriques et thermiques (Hamli et al., 2015).

La technique la plus employée pour évaluer l'intégrité de la membrane plasmique est l'estimation du pourcentage des dommages cellulaires causés par le stress, par la mesure de la fuite de l'électrolyte des cellules endommagées (Chipilski et al., 2012; Hamli et al., 2015). Ainsi la fuite de l'électrolyte est utilisée comme un marqueur de sélection pour discriminer entre les génotypes tolérants qui se caractérisent par une faible fuite d'électrolyte comparativement aux génotypes sensibles aux stress (Roy et al., 2009).

Dans ce contexte Kocheva et al., (2014) mentionnent un effet pléiotropique des gènes *Rht* sur la tolérance aux stress. En effet les génotypes nains, portant l'allèle *Rht-B1c* étaient plus tolérants au stress hydrique que les génotypes de taille normale, portant l'allèle *Rht-B1a*.

Les génotypes nains présentent une activité anti oxydante plus importante que les génotypes hauts de taille et de plus se caractérisent par une accumulation plus accrues

d'osmolytes compatibles et le maintien de l'activité photosynthétique sous stress plus longtemps.

Reynolds et al., (1998) ainsi que Craufurd et al., (2003) mentionnent que les génotypes thermo tolérants présentent une thermo stabilité membranaire plus élevée associée à une faible concentration interne de CO₂ et à un taux élevé de respiration nocturne comparativement aux génotypes sensibles. Blum et al., (2001) suggèrent la thermo stabilité membranaire comme un critère de criblage préliminaire pour écarter les lignées trop sensibles dans de larges populations en ségrégations.

4.2.5. TENEUR RELATIVE EN EAU ET DEPERDITION D'EAU DES FEUILLES EXCISEES

Les stress hydrique et thermique affectent fortement le statut hydrique de la plante. La sélection de variétés tolérantes aux stress hydrique et thermique est un important objectif de sélection dans les régions connues pour la sévérité et la fréquence élevée de ces stress, et par le spectre de changements climatiques (Araus et al., 2003).

En dehors de la synchronisation du rythme de développement de la plante avec les disponibilités en eau du milieu, plusieurs caractéristiques ont été identifiées et proposées comme traits pouvant conduire à l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques, donc utilisables dans les programmes de croisements (Mekhlouf et al., 2006; Zaman-Allah et al., 2011).

La teneur relative en eau ainsi que la perte d'eau des feuilles excisées apparaissent comme des caractères importants vu que les variétés tolérantes présentent aussi de bonnes performances de rendement en grains sous stress hydrique et thermique (Clarke et McCaig, 1982; Dhanda et Sethi, 2004). La teneur relative en eau est rapportée comme étant un bon indicateur du déficit hydrique foliaire, elle reflète directement la balance entre la fourniture d'eau au feuillage et le taux de transpiration (Lilley et Ludlow, 1996).

Le fonctionnement des stomates résulte alors de la balance entre le besoin de préserver l'état hydrique de la plante et la nécessité de maintenir un métabolisme minimal. Lors d'un déficit hydrique, l'activité physiologique de la feuille, et plus particulièrement la photosynthèse et la conductance stomatique sont affectées (Zaman-Allah et al., 2011). La réduction de la photosynthèse, liée à la diminution du potentiel hydrique foliaire, dépend à

la fois de la fermeture des stomates, avec pour conséquence une diminution de la conductance à la diffusion du CO₂ et d'une limitation biochimique du chloroplaste à fixer le CO₂ (Zaman-Allah et al., 2011).

L'évaluation des pertes d'eau des feuilles excisées semble être une caractéristique prometteuse dans la recherche de la tolérance aux stress hydrique et thermique des céréales (McCaig et Romagosa, 1991; Mir et al., 2012). Cette caractéristique est modérément héritable et peut être facilement évaluée chez de large populations soumises à la sélection (Dhanda et al., 1998; Kumar et Sharma, 2007).

Etudiant cette caractéristique chez le blé, McCaig et Romagosa, (1991) notent que les stomates se ferment au terme de 20 à 30 minutes d'exposition au stress, puis le taux de perte d'eau des feuilles excisées suit une phase linéaire qui se maintient durant plusieurs heures. Au cours de cette phase l'eau est perdue via les stomates incomplètement fermées et via la cuticule. L'importance du taux de pertes d'eau est globalement liée au rendement et à la stabilité. Dans le cas où la capacité de rétention d'eau des feuilles excisées est améliorée, il est attendu que le rendement s'améliore ou se stabilise (Kumar et Sharma, 2007).

Les travaux de Sabour et al., (1997) ainsi que ceux de Daly, (1964) montrent que la diminution de l'humidité du sol induit la déposition de cire sur la cuticule des feuilles chez certains génotypes et pas chez d'autres. Cette cire réduit des pertes d'eau foliaire. Selon Grantz, (1990) les plantes cultivées dans des environnements qui diffèrent pour l'humidité du sol présentent de la variabilité pour les caractéristiques liées à la régulation des pertes d'eau foliaire, notamment les propriétés de la cuticule et les mouvements stomatiques.

Ainsi selon Grantz, (1990), la perméabilité de la cuticule est liée à la quantité et à la qualité de la cire déposée plus qu'à l'épaisseur de la cuticule elle-même. Sabour et al., (1997) rapportent que la capacité de la plante à survivre à des déficits hydriques sévères est dépendante de sa capacité à restreindre les pertes d'eau à travers l'épiderme, une fois les stomates se ferment. Le contrôle non stomatique des pertes d'eau à travers l'épiderme foliaire dit transpiration épidermale ou résiduelle atteint jusqu'à 50% de la transpiration totale d'une plante soumise au stress hydrique durant le jour et 100% durant la nuit.

Sabour et al., (1997) notent que la transpiration épidermale, estimée par gravimétrie, chez des feuilles excisées discrimine nettement entre les génotypes qui sont tolérants et ceux qui sont sensibles au déficit hydrique. Ainsi Clarke et McCaig, (1982) rapportent une corrélation positive et significative entre le rendement en grains et la capacité de rétention de l'eau par la feuille étendard chez le blé dur.

Clarke et al., (1989) trouvent qu'un faible taux de pertes d'eau des feuilles excisées est positivement corrélé avec la performance de rendement sous conditions de stress hydrique. Sur la base de ce résultat ces auteurs proposent d'utiliser ce paramètre comme critère de sélection pour cribler les populations en ségrégations de blé dur pour la tolérance au stress hydrique et l'utilisation dans les milieux semi-arides.

Balota et al., (1995) trouvent une variabilité appréciable pour la transpiration épidermale ou cuticulaire chez les blés roumains qui sont connus pour leurs bons comportements sous conditions pluviales sèches. Clarke et Townley-Smith, (1986) rapportent que le cultivar Pelissier (Hedba3) présente une capacité élevée de rétention ou un faible taux de pertes d'eau des feuilles excisées et que ce cultivar transmet cette caractéristique à sa descendance en croisement. Mebarki et al., (2021) analysent la variabilité des pertes d'eau et de la teneur relative en eau de la feuille étendard excisée de dix variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Leurs résultats indiquent la présence de la variabilité pour les poids frais mesuré aux temps t0, t30, t60 et t90, le poids sec, la vitesse de perte de l'humidité par unité de poids sec et la teneur relative en eau de la feuille étendard, mesurés au stade épiaison. Le stress hydrique induit la réduction des variables mesurées sur la base desquelles les variétés étudiées ont été classées selon le degré de tolérance /sensibilité au stress.

Les variétés Habab, Zéina et Cucaraja se caractérisent par une bonne tolérance au stress, alors que le cultivar Waha se classe comme étant le moins désirable en termes de tolérance des stress. Mebarki et al., (2021) suggèrent l'utilisation de la teneur relative en eau et de la vitesse perte d'eau des feuilles excisées comme critères pour identifier des génotypes tolérantes au stress hydrique. Ces auteurs proposent d'utiliser les variétés tolérantes en croisements pour élargir la variabilité de la tolérance au stress hydrique et de sélectionner des variétés présentant le maximum de caractères favorables à l'expression concomitante de la tolérance et du potentiel de rendement sous stress (Mebarki et al., 2021).

Chapitre II

MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

1. MATERIEL VEGETAL ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Vingt-cinq variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) de l'essai 'répété II' du programme national des essais comparatifs de rendement de blé dur de L'INRAA-ITGC, Station de Sétif, ont été utilisées comme matériel végétal (Tableau 3). Les vingt-cinq génotypes constituant l'essai ont été semées dans un dispositif en blocs complètement randomisé avec quatre répétitions (Tableau 3) pendant trois années consécutives : 2016/17, 2017/18 et 2018/19. La parcelle élémentaire fait 5 m de long par 1.20 m de large, soit 6 rangs semés de 5 m de long. L'espace enter-blocs est de 1 m et celui inter rangs est de 0.20 m.

1.1. NOTATIONS ET MESURES

Pour ce faire la méthodologie suivie, en ce qui concerne les notations et mesures, est celle rapportée par plusieurs auteurs dont entre autres (Bahlouli et al., 2008; Belkharchouche et al., 2015; Bensemmane, 2015; Fellahi et al., 2017; Hannachi et al., 2017; Kirouani et al., 2019; Salmi et al., 2019).

1.1.1. HAUTEUR DE LA PLANTE (PHT, CM)

La hauteur des plantes est mesurée, juste avant la récolte, par trois endroits du rang central de la parcelle élémentaire. Elle est prise de la surface du sol au sommet de l'épi, barbes non incluses, à l'aide d'un ruban-mètre. La moyenne de trois lectures représente la valeur parcellaire, exprimée en cm.

1.1.2. DUREE DE LA PHASE VEGETATIVE (DPV, J)

La durée de la phase végétative est comptée en jours calendaires à partir du 1^{er} janvier jusqu'à la date d'épiaison, matérialisée par la sortie de 50% d'épis de la gaine de la feuille étendard.

Tableau 3. Liste des géotypes de blé dur étudiés et leur randomisation en plein champ.

Ordre	Variétés	R I	R II	R III	R IV
1	Waha	1	35	62	80
2	Jupare c	2	31	74	91
3	Sooty_9/rascon_37//storlom/5/toska_26/rasco	3	41	54	95
4	Ajaia_4/canelo_3/4/arment//srn_3/nigris_4/3/ca	4	39	60	79
5	Canelo_9.1/snitan/10/plata_10/6/mque/4/usda573/	5	45	67	90
6	Bellaroi/4/bicum//llaretainia/3/dukem_12/2*raiscon_21	6	47	70	85
7	Islom_1/dukem_2/tarro_3/5/crex//boy/yav_1/3	7	26	75	96
8	P91.272.3.1/3*mex175//2*jupare c	8	49	53	81
9	Guemgoum rhem/4/Stj3//Bcr/Lks4/3/Ter-3	9	29	65	98
10	Brak^2/ajaia_2//solga_3/3canelo_8//sora...	10	50	61	89
11	Sooty^9/rascon_37//stormlom/8/rissa/gan//...	11	40	55	86
12	Silk_3/dipper_6/3/ac089/dukem_4//5*ac089/4/...	12	36	57	76
13	Sooty_9/rascon_37//storlom/5/toska_2	13	32	71	97
14	Terbol975/geruftel2	14	42	66	100
15	Langdon/kucuk	15	33	56	87
16	20048 traikia(mor)/mrb5//stj3	16	44	68	94
17	T.poloxzb/lnrat69	17	48	59	83
18	Lcasylr/3/Gen//Stj/M rb3	18	30	63	99
19	Ouasloukosl/5/Aznl/4Bezaizshf/SD19539/Waha/3/Gdr2	19	37	73	88
20	Mohawk/9/usda595/3/d67.3/rabi/cra/4/al05/...	20	27	51	77
21	ICASYRL/3/Bcr/sb15/Turaru/4/13376/Bcrchl//Ossll/Stj5	21	43	69	92
22	Korifla/Aegspeltoïdessyr/Amedakul	22	46	58	82
23	Amedakull/triticum dicosyrco/Lukos	23	28	72	84
24	Terbol97-5/geruftel2	24	38	64	78
25	Ouasloukosl/5/Aznl/4BEZAIZSHF//SD19539/Waha/3/Gdr2	25	34	52	93

1.1.3. BIOMASSE AÉRIENNE (BIO, G/M²)

La biomasse aérienne est déterminée à partir de la récolte d'un échantillon de végétation d'un segment de rang long de 1 mètre linéaire. Le poids de l'échantillon est reconverti en g/m² et représente la valeur parcellaire de cette variable.

1.1.4. LE NOMBRE ET LE POID D'ÉPIS PAR M² (NE, m²) ET (PNE, G/ m²)

Le nombre d'épis est déterminé par comptage des épis de l'échantillon de végétation récolté pour estimer la biomasse aérienne. Le nombre compté est reconverti au m² (NE, m²). La moyenne des trois comptages est prise comme la valeur parcellaire analysée. Le poids des épis est déterminé par pesage des épis récoltés.

1.1.5. RENDEMENT GRAIN (RDT, G/M²)

Le rendement en grains est estimé suite au battage des épis provenant de l'échantillon de végétation récolté pour déterminer la biomasse aérienne. Les valeurs trouvées sont reconverties en g/m² et leur moyenne utilisée comme valeur parcellaire dans l'estimation de l'indice de récolte et du rendement en paille. Le rendement (RDT, g/m²) est aussi estimé par la récolte mécanique de l'essai et fait l'objet de l'analyse de la variance.

1.1.6. POIDS DE 1000 GRAINS (PMG, G)

Le poids de mille grains est déterminé après la récolte mécanique de l'expérimentation, suite au comptage et pesage de 250 graines par parcelle élémentaire. Les valeurs trouvées sont reconverties en g pour 1000 grains (PMG, g).

1.1.7. NOMBRE DE GRAINS PAR EPI (NGE) ET PAR M² (NGM²)

Les nombres de grains par épi (NGE) et par m² (NGM²) sont dérivés par calcul à partir des valeurs parcellaires du rendement en grains (RDT, g/m²) et du poids de mille grains (PMG, g), en utilisant les formules suivantes :

$$\text{NGM}^2 = [\text{RDT (g/m}^2\text{)} \times 1000] / \text{PMG (g)}$$

$$\text{NGE} = \text{NGM}^2 / \text{NE}$$

1.1.8. INDICE DE RECOLTE (HI, %)

L'indice de récolte (HI, %) est déterminé en utilisant les valeurs parcellaires du rendement en grains et de la biomasse aérienne estimées de l'échantillon de végétation récolté d'un segment de rang de 1 m de long, par parcelle élémentaire. Il est calculé par la formule suivante :

$$HI (\%) = RDT (g/m^2) / BIO (g/m^2)$$

1.1.9. RENDEMENT PAILLE (PLL, G/M²)

Le rendement en paille (PLL, g/m²) est estimé par la différence, entre la biomasse aérienne et le rendement en grains, dérivés à partir du bottillon de végétation fauché d'un segment de rang de 1 m de long par parcelle élémentaire :

$$PLL (g/m^2) = BIO (g/m^2) - RDT (g/m^2).$$

1.1.10. RENDEMENT ECONOMIQUE (RDT_{ECO}, G/M²)

Le rendement économique est calculé comme la somme du rendement en grains plus 30% du rendement en paille, d'après Annicchiarico et al., (2005), par la formule :

$$RDT_{eco} (g/m^2) = RDT (g/m^2) + 0.3*PLL (g/m^2)$$

1.1.11. SURFACE DE LA FEUILLE ETENDARD (SFE, CM²)

La surface de la feuille étendard est estimée sur un échantillon de cinq feuilles par parcelle élémentaire sur lesquelles la longueur (L) et la plus grande largeur (l) sont mesurées. La surface est estimée par la formule suivante attribuée à Spagnoletti Zeuli et Qualset, (1990) et rapportée par Fellahi et al., (2017):

$$SFE (cm^2) = 0.749 * L * l.$$

1.1.12. POIDS SPECIFIQUE DE LA FEUILLE ETENDARD (PSFE, MG/CM²)

Le poids spécifique de la feuille étendard (PSFE, mg/cm²) est déterminé par le ratio entre le poids sec de l'échantillon de 5 feuilles (PSFE, mg) sur la surface foliaire de cet échantillon (SFE, cm²). Le poids sec a été déterminé par passage des feuilles échantillonnées dans une étuve pendant 24 heures à 70°C :

$$PSFE (mg/cm^2) = PSFE (mg) / SFE (cm^2)$$

1.1.13. TENEUR RELATIVE EN EAU (TRE, %)

Un échantillon de cinq feuilles étendard par parcelle élémentaire est utilisé pour mesurer la teneur relative en eau (TRE, %), selon (Barrs, 1968). Les feuilles échantillonnées

sont immédiatement peser pour avoir le poids frais (PF). Les échantillons foliaires sont mis dans des tubes à essai contenant 10 ml d'eau distillée.

Les tubes sont mis à l'obscurité pendant 24 heures. Les échantillons foliaires, une fois sortis des tubes à essai, sont essuyés avec du papier hygiénique et pesés pour obtenir le poids turgide (PT, g). Ils sont ensuite mis dans l'étuve à 70°C pendant 48h pour obtenir le poids sec (PS, g). La teneur relative en eau (TRE, %) est calculé par la formule rapportée par (Clarke et McCaig, 1982) :

$$\text{TRE (\%)} = [(\text{PF} - \text{PS}) / (\text{PT} - \text{PS})] * 100$$

1.1.14. TENEUR EN CHLOROPHYLLE DE LA FEUILLE ETENDARD (CHL, CCI)

La chlorophylle de la feuille étendard est mesurée à l'aide d'un chlorophylle-mètre de type CCM-200 (Opti-Sciences, 8 Winn Avenue. Hudson, NH03051. USA), et exprimée en unité arbitraire ou CCI (Chlorophyll Content index). La mesure est faite sur un échantillon de trois feuilles par parcelle élémentaire.

1.1.15. THERMO STABILITE MEMBRANAIRE (MTS, %)

Le test de l'intégrité cellulaire dit membrane thermo stabilité (MTS) est effectué sur les deux dernières feuilles entièrement développées qui sont lavés à l'eau courante. Les feuilles sont découpées en morceaux de 1cm de long. Un échantillon de 10 morceaux du limbe foliaire est mis dans un tube à essai et lavé par trois avec de l'eau distillée pour enlever les poussières adhérentes qui peuvent influencer sur les résultats du test. Trois tubes sont utilisés par traitement. A chaque tube, on ajoute 10 ml d'eau distillée déminéralisée.

Les tubes, ainsi traités, sont périodiquement agités manuellement et laissés à la température ambiante du laboratoire. Une première lecture est faite (EC1) avec le conductimètre, 24 heures après. Les tubes sont ensuite mis au bain marie, dont la température est portée à 100°C, pendant 60 minutes. Une deuxième lecture de la conductivité est faite 24 heures après le passage des échantillons dans le bain marie (EC2). La stabilité de la membrane cellulaire, vis-à-vis du stress thermique est estimée, selon la procédure décrite par Bajji et al., (2001), comme suit:

$$\text{MTS (\%)} = 100 * [1 - (\text{EC1} / \text{EC2})]$$

1.1.16. LA TEMPERATURE DE LA CANOPEE (TCV, C°)

La température de la canopée (CT, °C) a été déterminée au stade épiaison, à raison de trois lectures prises entre 11 00 et 14 00 h par parcelle élémentaire en utilisant un thermomètre à infrarouge de type 'Sixth Sense LT300 infrared thermometer'. Cette variable a été mesurée au cours de deux campagnes, 2017/18 et 2018/19.

1.1.17. DEPERDITION D'EAU DES FEUILLES EXCISEES (ELWL, %)

ELWL a été mesurée au cours de la campagne 2018/19. Pour ce faire 5 feuilles sont échantillonnées par parcelle élémentaire, mises dans des sachets en plastique et ramenées rapidement après échantillonnage au laboratoire où les feuilles sont pesées pour avoir le poids frais (PF, g). Les échantillons foliaires sont mis dans une étuve à une température de 30°C pendant 6 heures, après quoi ils sont pesés pour avoir le poids frais après 6 heures (PF_{6h}, g). Les échantillons sont remis dans une étuve sous une température de 70°C, pendant 24 heures et sont pesés pour obtenir le poids sec (PS, g). La déperdition d'eau des feuilles excisées (ELWL, %) est calculée par rapport au contenu initial en eau par la formule suivante :

$$ELWL (\%) = 100 * [(PF - PF_{6h}) / (PF - PS)]$$

2. ANALYSE DES DONNEES

Les données collectées ont été soumises à une analyse de la variance combinée selon le modèle additif suivant (Steel et Torrie, 1982) :

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + E_j + b(E)_{jk} + (G \times E)_{ij} + e_{ijk}$$

Où Y_{ijk} est la valeur du caractère mesuré du génotype i , de l'environnement j et de la répétition b_k hiérarchisée dans l'environnement E_j

μ est la grande moyenne de l'expérimentation

G_i est l'effet principal du génotype G_i

E_j est l'effet principal de l'environnement E_j

$b_k(E_j)$ est l'effet de la répétition b_k hiérarchisée dans l'environnement E_j

ε_{ijk} est la résiduelle pondérée associée au génotype G_i , l'environnement E_j , la répétition b_k , de moyenne nulle (zéro) de variance σ^2 .

La comparaison des effets traitements (G, E et leur interaction GxE) est faite relativement à la plus petite différence significative au seuil de 5% (Ppds5%), donnée par le logiciel CropStat (IRRI, 2007) et qui est calculée, selon Steel et Torrie, (1982), comme suit :

$$Ppds5\% = t_{5\%} \sqrt{\frac{2\sigma^2_e}{b}},$$

où $t_{5\%}$ est la valeur du t de table au seuil de 5% pour (G-1)*(b-1)*(E) degrés de liberté de la résiduelle. σ^2_e : est la résiduelle pondérée de l'analyse de la variance combinée de la variable considérée, b : est le nombre de blocs ou répétitions.

Tableau 4. Squelette de la table de l'analyse de la variance du modèle additif adopté d'après McIntosh, (1983).

Source de variation	Ddl	CME	Test F	Espérance moyenne
Années (E)	(E-1)	M1	M1/M2	
Blocs/années (b/E)	E (b-1)	M2	M2/M5	
Génotype (G)	G-1	M3	M3/M5	$\sigma^2_e + b\sigma^2_{GE} + bE\sigma^2_G$
Génotype x années	(G-1)(E-1)	M4	M4/M5	$\sigma^2_e + b\sigma^2_{GE}$
Erreur pondérée	E(G-1)(b-1)	M5	-----	σ^2_e
Total	E*G(b-1)	-----	-----	-----

2.1. COMPOSANTES DE LA VARIATION, HERITABILITE ET GAIN GENETIQUE ATTENDU DE LA SELECTION

Les composantes de la variation ont été dérivées à partir des valeurs des espérances moyennes, indiquées au tableau 5. Ainsi la variance génotypique (σ^2_G) est déduite comme suit:

$$\sigma^2_G = (M3-M4)/bE$$

où b et E sont, respectivement, les nombres de répétitions et d'environnements (années) d'étude. Selon la même procédure la variance d'interaction génotype x environnements ($\sigma^2_{G \times E}$) et la variance phénotypique (σ^2_p) sont déduites comme suit :

$$\sigma^2_{G \times E} = (M4 - M5)/b$$

$$\sigma^2_p = [\sigma^2_G + (\sigma^2_{GE}/E) + (\sigma^2_e/b)]$$

Le degré de détermination génotypique ou héritabilité au sens large (H^2_{sl}) est déduit par la formule suivante, selon Acquaah, (2012):

$$H^2_{sl} = (\sigma^2_G / \sigma^2_p) \times 100$$

Les valeurs comprises entre 0 et 30%, sont considérées comme faibles ; celles comprises entre 30 et 60%, sont moyennes ; et celles au-delà de 60%, sont élevées selon Fellahi et al., (2017) qui citent Robinson et al., (1949).

Le gain génétique attendu de la sélection (GGA), en valeur absolue, est déterminé par la formule suivante mentionnée par Acquaah, (2012) et où $K=2.05$ pour une intensité de sélection de 5%, σ_p est l'écart-type phénotypique et H^2_{sl} est le degré de détermination au sens large:

$$GGA = k \times \sigma_p \times H^2_{sl} = 2.05 \sigma_p \times H^2_{sl}$$

Le gain génétique attendu de la sélection (GGA) est aussi exprimé en % de la moyenne du caractère (GGAM) sélectionnée :

$$GGAM (\%) = 100 * (GGA/Y_{bar})$$

2.2. COEFFICIENTS DE VARIABILITE

Les coefficients de la variabilité phénotypique (CV_p , %), génotypique (CV_g , %) et environnemental sont calculés par caractère par les formules suivantes:

$$CV_p(\%) = 100 \left(\frac{\sqrt{\sigma^2_p}}{\bar{y}} \right),$$

$$CV_g(\%) = 100 \left(\frac{\sqrt{\sigma^2_g}}{\bar{y}} \right),$$

$$CV_{res}(\%) = 100 \left(\frac{\sqrt{\sigma_e^2}}{\bar{Y}} \right)$$

Où $\bar{Y}$ est moyenne du caractère considéré

Les valeurs des coefficients de variation dont les valeurs sont comprises entre 0 et 10%, sont considérées comme faibles ; celles comprises entre 11 et 20%, sont moyennes ; et celles au-delà de 20%, sont élevées d'après Fellahi et al., (2017) qui citent Burton et DeVane, (1953).

2.3. RESSEMBLANCE INTER ENVIRONNEMENTS ET STABILITE VARIETALE INTER ENVIRONNEMENTS

Le degré de ressemblance entre environnement est mesuré par le coefficient de corrélation des rangs de Spearman, pour le caractère considéré. La stabilité des performances des génotypes évalués est déterminée par le calcul des valeurs de l'indice de supériorité génotypique P_i de Lin et Binns, (1988). Cet indice mesure la distance entre la performance du génotype considéré et celui qui est le plus performant par environnement. Il est déduit par la formule suivante:

$$P_i = \sum (X_{ij} - M_j)^2 / 2n$$

Où X_{ij} est la valeur moyenne du génotype i dans l'environnement j .

M_j est la moyenne du génotype le plus performant dans l'environnement j .

n est le nombre d'environnements testés.

Les faibles valeurs de cet indice sont indicatrices d'une faible distance entre la performance d'un génotype donné et celle du meilleur génotype par environnement. Cet indice est une mesure de la stabilité dans le sens agronomique selon (Benmahammed et al., 2010b).

La stabilité des performances des génotypes évalués est aussi mesurée par le calcul des valeurs de l'écovalence (W_i) de Wricke, (1962), qui représente la contribution du génotype considéré à la somme des carrés des écarts de l'interaction $G \times E$. W_i est calculée par la formule suivante :

$$W_i = \sum (Y_{ij} - Y_{i.} - Y_{.j} + Y_{..})^2$$

Où W_i est l'écovalence du génotype i

Y_{ij} est la valeur moyenne du caractère analysé du génotype i dans l'environnement j

$Y_{i.}$ Est la moyenne de l'ensemble des environnements du génotype i

$Y_{.j}$ est la moyenne de l'environnement j calculée sur l'ensemble des génotypes évalués.

$Y_{..}$ est la moyenne générale calculée sur l'ensemble des environnements et des génotypes testés. Les faibles valeurs de W_i indiquent la stabilité dans le sens statique.

2.4. COEFFICIENTS DE CORRELATIONS PHENOTYPIQUES

Les relations entre les variables mesurées des différentes variétés sont analysées en calculant le coefficient de rang de Spearman (r_s) selon la méthode décrite par Steel et Torrie, (1982), qui est incluse dans le logiciel Past version 3.25 (Hammer et al., 2001). Cette méthode consiste à classer numériquement les génotypes étudiés selon l'ordre de grandeur des variables X et Y dont on cherche à calculer le degré d'association. Ensuite on déduit la différence (d_i) des classements des deux variables par génotype, et on détermine le coefficient de corrélation de rang de Spearman (r_s) comme suit :

$$r_s = (6 \sum d_i^2) / [n(n^2 - 1)],$$

où n est le nombre de génotypes évalués.

La signification statistique du coefficient de rang de Spearman est testée en calculant la valeur observée du t de Student Steel et Torrie, (1982) comme suit :

$$t = (r_s * \sqrt{n - 2}) / \sqrt{1 - r_s^2}$$

La valeur observée du t de Student est à comparer avec la valeur seuil de la table du t de Student avec $n-2$ degrés de liberté. Dans le cas où la valeur observée du t de Student est supérieure à celle de la table, le coefficient de corrélation entre les deux variables est significatif.

2.5. ANALYSE EN CHEMIN PAR ENVIRONNEMENT (PATH ANALYSIS)

Les coefficients de corrélations phénotypiques entre RDT d'une part et NE, NGE, PMG, BIO et HI, d'autre part, ainsi que ceux de la BIO d'une part et PLL, PHT, TRE, MTS, CHL, PNE et DPV, d'autre part, ont été subdivisés en effets directs et indirects selon la procédure décrite par Hannachi et al., (2013) et attribuée à Dewey et Lu, (1959). Pour ce faire les variables entrant le modèle multiple, pour déduire les coefficients partiels de régression (beta) dits aussi path coefficients ou effets directs. La somme des effets indirects est déduite par la différence entre le coefficient de régression de la variable dépendante (RDT ou BIO) et les variables indépendantes ($r-\beta$).

L'effet indirect d'une variable indépendante X1 via une autre variable indépendante X2 est déterminé pour le produit de l'effet direct de la variable X2 par le coefficient de corrélation entre les deux variables X1 et X2. La somme de l'effet direct de la variable X plus ses effets indirects via les autres variables indépendante incluses dans le modèle est égale au coefficient de corrélation entre cette variable indépendante X et la variable dépendante Y.

L'analyse de l'importance des effets directs et indirects a été faite selon les préconisations de Murti, (2016) qui mentionne que les valeurs inférieures 0.100 sont négligeables, entre 0.100 et 0.300 sont faibles, entre 0.300 et 0.500 sont moyennes et au delà de 0.500 sont élevées. Les coefficients partiels de régression sont calculés en utilisant l'option 'Path analysis' incluse dans le logiciel Tnaustat (Manivannan, 2014).

2.6. TYPOLOGIE VARIETALE

Sur la base du rendement en grain des trois campagnes (GxE), les différentes variétés ont été groupées de par leur degré de ressemblance par la méthode en grappe (cluster) implémentée dans le logiciel Past (Hammer et al., 2001). Le groupage est réalisé en utilisant la méthode de Ward qui maximise les différences intergroupes au détriment des différences intra- groupes. Les groupes ainsi identifiés sont caractérisés pour les variables mesurées.

Chapitre III

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III- RESULTATS ET DISCUSSION

1. CLIMAT DES CAMPAGNES D'ETUDE (2016/17, 2017/18 ET 2018/19)

Les cumuls des précipitations enregistrés durant les trois campagnes 2016/2017, 2017/18 et 2018/19, sont de 187.5, 442.1 et 346.6mm respectivement. La campagne 2017/2018 est supérieure à la campagne 2016/2017 et 2018/2019 (Figure 3).

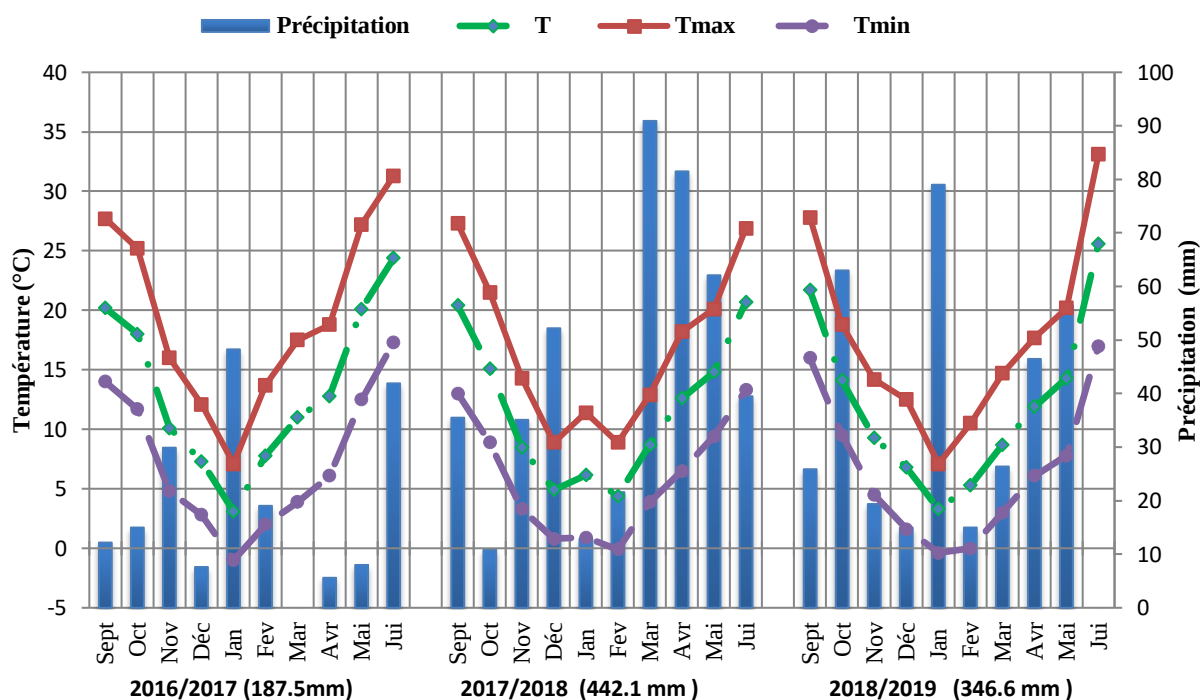


Figure 3. Diagramme ombrothermique de Gaussen présentant l'évolution des températures et les pluviométries des campagnes d'étude 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019 d'après ITGC-AES, Sétif.

Le mois le plus pluvieux en 2016/2017 est le mois de janvier (48.26mm) par contre en 2017/2018 est le mois de mars avec (90.92mm) et en 2018/2019 le mois de janvier est le plus pluvieux avec (79mm). La pluviométrie est distribuée de façon très perturbée durant la campagne 2016/2017 où on remarque le mois de mars n'a enregistré aucune précipitation. Par contre le mois de juin a enregistré une précipitation très importante (41.91mm). Alors que durant la campagne 2017/2018 la distribution des précipitations est un peu homogène où on remarque à partir du mois de mars les précipitations sont importantes et réparties d'une manière décroissante jusqu'au mois de juin qui correspond les stades critiques de la culture de blé dur.

Le mois le plus chaud est le mois de juin (24.4°C en 2016/2017), (20.7°C en 2017/2018) et (25.6°C en 2018/2019) en cours des trois campagnes d'étude, tandis que le cumule de la température est élevé (134.8°C) durant la campagne 2016/2017 comparativement aux deux campagnes 2017/2018 (116.25 °C) et 2018/2019 (121°C). La température la plus basse était le mois de janvier (3.1°C et 3.3 °C) durant les campagnes 2016/2017 et 2018/2019 respectivement, et le mois de février (4.4°C) en 2017/2018.

La campagne 2017/2018 a été la plus favorable à produire des haute rendements comparativement à la campagne 2016/2017. La pluviométrie durant les mois de mars, avril et mai est plus importante pour la culture de blé dur où dans 2016/2017 elle est absente (mars) ou rare (avril et mai). Les plantes sont stressées donc le rendement est faible. Par contre la campagne 2017/2018 a enregistré la plus forte pluviométrie en mois de mars suivi par les précipitations importantes des mois d'avril et mai, elles donnent un effet évident sur la croissance des plantes et leur rendement. Le même cas pour la campagne 2018/2019 on remarque la précipitation est importante durant les mois d'octobre, janvier et les mois où les stades importants de la culture (mars, avril et mai) ce qui fait les plantes donnent les rendements importants que la première campagne.

2. *ETUDE DE LA VARIABILITE DES CARACTERES MESURES*

2.1. *RENDEMENT ET COMPOSANTES*

2.1.1. *RENDEMENT GRAIN*

L'analyse de la variance combinée des trois années d'étude indique que l'effet principal année et l'interaction génotype x années sont hautement significatifs ; par contre l'effet principal génotype ne l'est pas (Tableau 5). Ces résultats suggèrent que les conditions pédoclimatique, qui caractérisent les trois campagnes d'étude déterminent largement le niveau d'expression du rendement, en moyenne des 25 variétés évaluées, et que le comportement des ces variétés est influencé par la spécificité de l'année considérée.

Tableau 5. Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée des dix sept variables mesurées au cours des trois années d'étude.

Source	AN (E)	Blocs/(E	GEN	G x E	Erreur pondérée
Ddl	2	9	24	48	216
RDT	11611800**	14138	54003ns	52800**	3854
NE	1069850**	2920.91	19158ns	18253**	1264
PMG	239.3**	1.2	79.3**	21.2**	1.1
NGM ²	9181.2**	9.9	61.4ns	63.8**	3.4
NGE	12985.3**	4.4	155.2ns	119.1**	4.2
PNE	31545700**	1291	57744ns	37719**	2588
DPV	5049.1**	0.5	13.8**	6.0**	0.3
BIO	38690800**	12656	406210n	380943**	7248
HI	4053.4**	37.7	111.1ns	189.6**	16.3
PLL	8121910**	13798	278876n	291894**	10373
RDT _{eco}	18029900**	10796	101101n	89945**	2694
PHT	38623.4*	415.3	32.8ns	21.5**	5.6
SFE	3574.6**	54.7	24.6**	9.4**	5.4
TRE	2146.2**	188.5*	229.9*	138.6*	87.5
MTS	29247.6*	1568.7	301.3n	221.7*	128.7
CHL	506.5ns	183.5	103.3*	22.8ns	20.9
PSF	478.1**	29.4	25.4ns	23.9ns	17.5

RDT=rendement en grains, NE= nombre d'épis/m², NGE=Nombre de grains par épi, PMG= Poids de 1000 grains, NGM²= nombre de grains par m², PHT= hauteur des plantes, PNE =poids des épis, BIO= biomasse aérienne, HI= indice de récolte, PLL= poids paille, RDTeco= rendement économique, TRE=teneur relative en eau, SFE=surface feuille étendard, PSFE=poids spécifique feuille étendard, CHL=chlorophylle, DPV= durée phase végétative. MTS= thermo stabilité membranaire, Ddl= degré de liberté. ns, *, ** = effet non significatif, et significatif au seuil de 5% et 1% respectivement.

Cet effet marqué de la campagne agricole est indiqué par l'importante de la valeur prise par le % de la somme des carrés des écarts (82.90%) qui est expliqué par cette source de variation, comparativement à celui de l'effet génotype qui n'est que 04.63% et celui de l'interaction G x E qui est de 9.05% (Tableau 6).

Tableau 6. Pourcentage de la somme des carrés des écarts expliqué par source de variation des dix sept variables mesurées au cours des trois années d'étude.

Source	AN (E)	Blocks/	GEN	G x E	Erreur
Ddl	2	9	24	48	216
RDT	82.90	0.45	4.63	9.05	2.97
NE	56.68	0.70	12.18	23.21	7.23
PMG	13.10	0.30	52.10	27.86	6.64
NGM ²	77.43	0.38	6.21	12.91	3.06
NGE	71.42	0.11	10.24	15.72	2.50
PNE	94.37	0.02	2.07	2.71	0.84
DPV	93.62	0.04	3.07	2.67	0.60
BIO	72.25	0.11	9.10	17.07	1.46
HI	34.15	1.43	11.23	38.33	14.86
PLL	41.32	0.32	17.03	35.64	5.70
RDT _{ECO}	82.93	0.22	5.58	9.93	1.34
PHT	91.94	4.45	0.94	1.23	1.45
SFE	72.50	5.00	5.99	4.58	11.94
TRE	11.59	4.58	14.89	17.96	50.99
MTS	49.45	11.94	6.11	9.00	23.50
CHL	9.43	15.37	23.07	10.18	41.95
PSF	14.15	3.91	9.02	16.98	55.93

En moyenne des variétés évaluées, c'est surtout la campagne agricole qui détermine les bons ou mauvais rendements plus que la variété. Autrement dit, les différences en termes de rendements en grains sont plus larges entre campagnes agricoles qu'entre variétés. En effet les rendements moyens des trois campagnes sont de 324.5, 1005.3 et 692.2 g/m², respectivement pour 2016/17, 2017/18 et 2018/19, avec une plus petite différence significative (Ppds5%) de 38.0 g/m² (Tableau 9).

Les valeurs moyennes des différents géotypes varient d'un minimum de 585.9 à 838.1 g/m² autour d'une moyenne de 674.0 g/m², avec des écarts de 88.1 et de 164.1 g/m²

entre la valeur minimale et la moyenne générale et entre la valeur maximale et la moyenne générale du caractère analysé, pour une Ppds5% de 188.6 g/m².

Ceci explique l'effet génotype non significatif indiqué par l'analyse de la variance combinée (Tableaux 5, 6 et 7), qui suggère, qu'en moyenne des trois années d'expérimentations, les 25 variétés présentent les mêmes capacités de rendement en grains. Les valeurs prises par les coefficients de variation environnementale (CV_E), phénotypique (CV_P) et génotypique (CV_G) sont de 9.2%, 10.6% et 1.5%, respectivement.

Tableau 7. Valeurs moyennes caractéristiques, plus petite différence significative, composantes de la variation, héritabilité au sens large et gain génétique attendu de la sélection en valeurs absolue et en % de la moyenne du rendement et ses composantes.

Paramètres	RDT	NE	PMG	NGM ²	NGE
Mini	585.9	435.4	33.1	15.1	29.2
Moy	674.0	507.8	36.1	18.8	35.5
Max	838.1	590.4	41.2	22.2	41.3
Amplitude	252.2	155.0	8.1	7.2	12.1
Ppds _{5%}	188.6	110.9	3.8	6.6	9.0
σ^2_E	3854	1264	1.1	3.4	4.2
σ^2_G	100.3	75.4	4.8	-0.2	3.0
$\sigma^2_{G \times E}$	12236.6	4247.4	5.0	15.1	28.7
σ^2_P	5142.5	1807.1	6.8	5.7	13.6
CV _E	9.2	7.0	2.9	9.8	5.8
CV _P	10.6	8.4	7.2	12.7	10.4
CV _G	1.5	1.7	6.1	0.0	4.9
H ² _{sl}	1.9	4.2	71.2	-3.5	22.1
GGA	2.9	3.6	3.8	-0.2	1.7
GGAM	0.4	0.7	10.5	-0.9	4.7

Les valeurs du CV_E et du CV_G sont faibles, étant inférieures à 10%, alors que celle du (CV_P) est juste moyenne (Tableau 7). Selon Fellahi et al., (2017) ainsi que Hannachi, (2017), les valeurs prises par les coefficients de variation phénotypiques et génotypiques supérieures à 20% sont élevées, les valeurs comprises entre 10% et 20% sont moyennes et les valeurs inférieures à 10% sont faibles.

Ces résultats indiquent que l'essentiel de la variation observée est surtout d'origine environnementale plus que génotypique. Ceci est reflété par les valeurs prises par les composantes de la variation qui indiquent que la σ^2_G représente moins de 2% de la valeur prise par la σ^2_E et moins de 1% de la valeur de la $\sigma^2_{G \times E}$ (Tableau 7).

Cet effet environnement affecte le taux de détermination génétique (H^2_{sl}) et le gain génétique attendu de la sélection (GGA) qui ne sont que de 1.9% pour H^2_{sl} et 2.9 g/m² ou 0.4% pour le GGA (Tableau 7). Dans ce contexte Fellahi et al., (2017) ainsi que Hannachi, (2017) mentionnent que les valeurs de l'héritabilité comprises entre 60 et 80 % sont élevées, entre 40 et 60% sont moyennes et inférieures à 40% sont faibles.

L'analyse de l'interaction $G \times E$ indique que les différences variétales sont peu perceptibles lors des campagnes où les conditions pédoclimatiques sont relativement sévères et de ce fait ne permettent pas au potentiel de rendement de s'exprimer. C'est le cas de la campagne 2016/17. Les différences variétales sont plus apparentes lorsque le milieu le permette. Ceci est le cas des campagnes 2017/18 et 2018/19 (Figure 4).

La lecture de la figure 4 suggère que les variétés les plus performantes de la campagne 2018/19 sont :

Terbol975/geruftel2(#24),
 Ouasloukosl/5/Aznl/4/Ezaizeshf//SD19539/Waha/3/Gdr2(#19),
 ICASYRL/3/Bcr/sb15/Turaru/4/13376/Bcrchl//Ossll/Stj5(#21),
 Sooty9/rascon37//storlom/5/toska2 (# 13),

avec des moyennes de rendement de 1026.6, 890.5, 829.0 et 827.2 g/m², respectivement. Les plus faibles rendements sont observés chez les variétés :

P_{91.272.3.1}/3*Mex₁₇₅//2*Juparec(#8),
 Waha(#1),
 Sooty9/Rascon₃₇//Storlom/5/toska₂₆/Rascon(#3),
 Canelo₉/Snitan/10/Plata₁₀/6/Mque/4/Usda₅₇₃ (#5),

avec respectivement des moyennes de rendement de 525.3, 581.8, 591.1 et 589.9 g/m² (Figure 4).

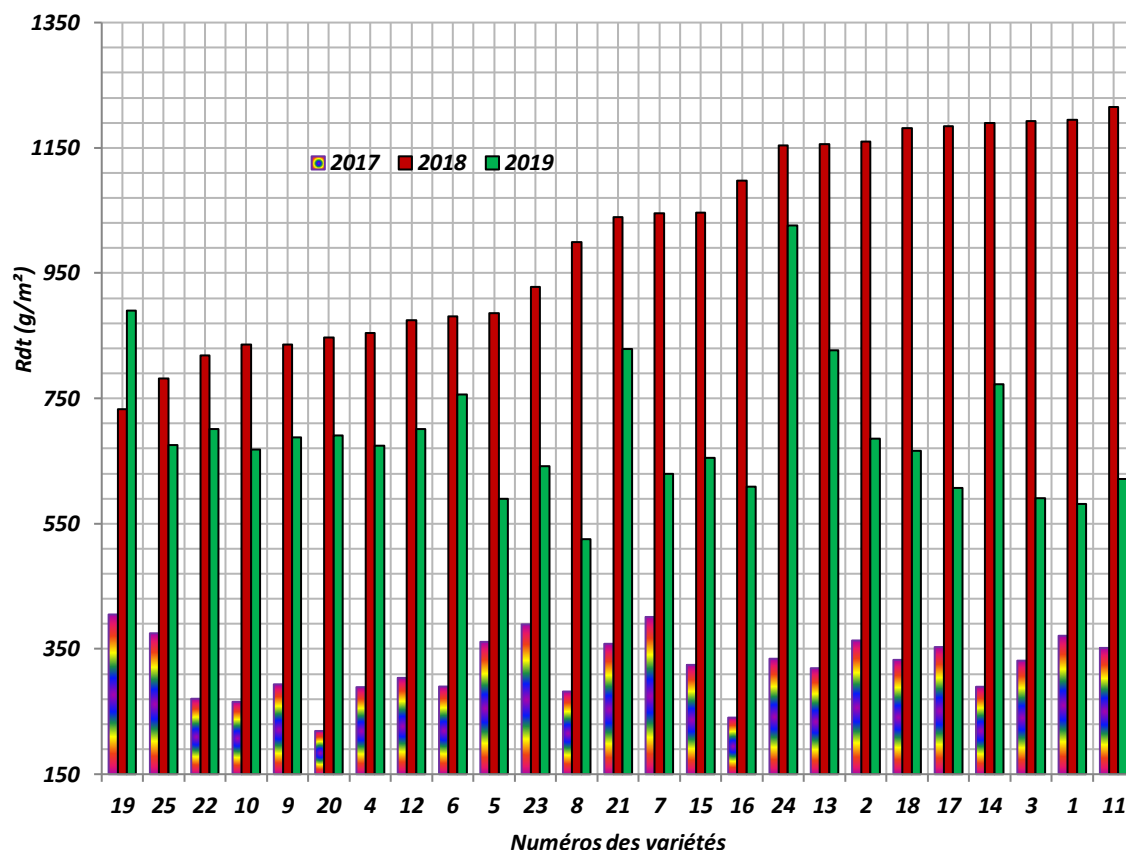


Figure 4. Performances de rendement en grains des 25 variétés évaluées au cours des trois campagnes d'étude : interaction G x E du rendement en grains.

Au cours de la campagne 2017/18, les variétés les plus performantes sont les numéros 11, 1 (cultivar Waha), 3 et 14, avec des moyennes de rendement de 1214.8, 1194.5, 1193.1 et 1189.9 g/m², respectivement. Les plus faibles rendements sont observés chez les variétés numéros 19, 25, 22 et 10, avec respectivement des moyennes de rendement de 732.9, 781.6, 818.2 et 835.8 g/m² (Figure 4). Ces résultats indiquent que chaque campagne se caractérise par son meilleur génotype particulier et aussi par son génotype le moins performant. L'exemple est celui du cultivar Waha qui se classe parmi les moins performants en 2018/2019 et parmi les plus performants en 2017/18 (Figure 4).

Les trois environnements sont peu ressemblants, comme le suggèrent les coefficients de corrélation inter-campagnes qui sont non significatifs, prenant des valeurs de 0.164^{ns}, 0.082^{ns} et 0.08^{ns}, respectivement entre 2017 et 2018 ; 2017 et 2019 et entre 2018 et 2019, pour n=23 ddl, et une valeur seuil du r de table de 0.396. Ces valeurs indiquent que le comportement d'une variété donnée change d'un environnement à l'autre, suite au peu de ressemblance en termes de conditions de croissance entre campagnes agricoles.

Les écarts de rendement causés par l'interaction $G \times E$ par rapport à la moyenne générale sont donnés en Figure 5. Cette figure présente les comportements contrastés des différentes variétés évaluées. On note que la variété qui réagit le moins aux changements d'environnements est la variété numéro 15, à l'inverse des variétés 19 et 24 qui réagissent plus fortement. Cette variation du comportement génotypique, selon les environnements, rend difficile le choix d'un cultivar donné sur la seule base du rendement en grains et pour l'ensemble des environnements.

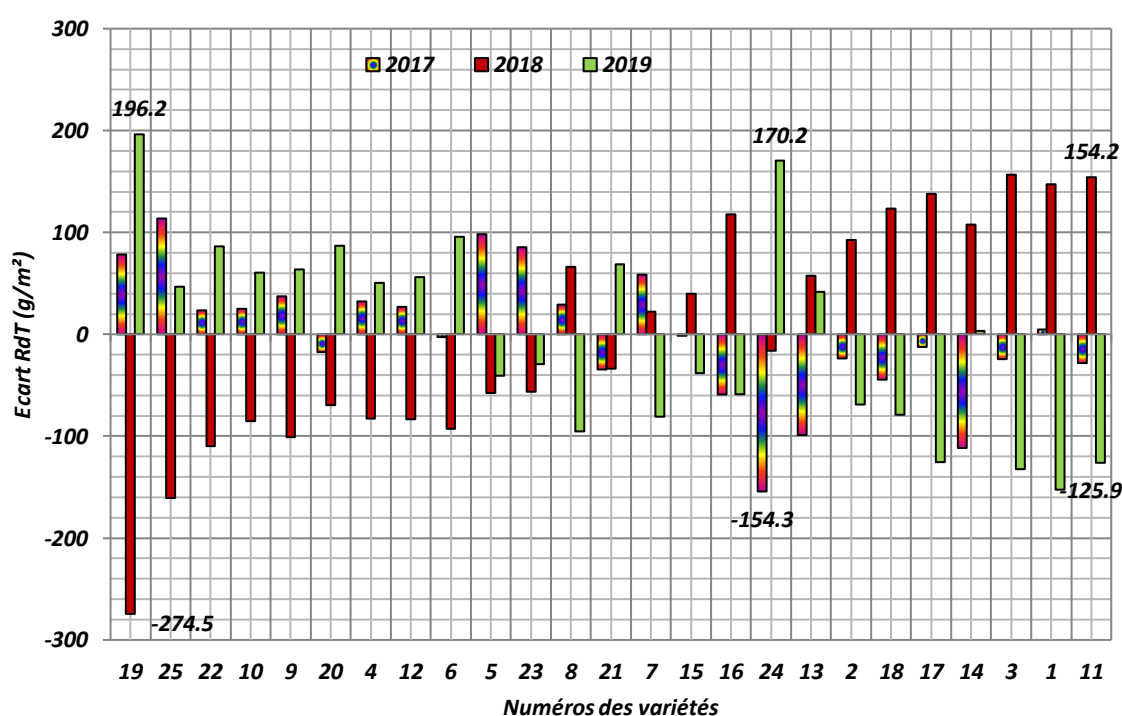


Figure 5. Interaction $G \times E$ du rendement en grains déduite des effets G et E ($G \times E = Y_{ij} - Y_i. + Y.j + \mu$).

Il est donc nécessaire, dans de telles situations, de tenir compte aussi de la régularité en même temps que du potentiel du rendement. La régularité du rendement est approchée par les indices de stabilité. L'indice P_i de la supériorité génotype de Lin et Binns, (1988) mesure la stabilité agronomique (ou réponse à la fertilité du milieu) et de ce fait associe potentiel de rendement et régularité. Par contre l'écovalence (W_i) mesure la régularité de rendement liée à la notion de stabilité statique, qui est indépendante du potentiel du rendement. Le tableau 8 présente les valeurs des indices P_i et W_i en valeurs absolues et relativement à leurs valeurs minimales.

Les valeurs de l'indice P_i varient d'un minimum de 1459.6 à un maximum de 51925.5 g²/m² (Tableau 8). Relativisées par rapport à la valeur minimale, ces valeurs varient de 1.0 à 35.6. Les variétés 24, 13, 21 et 14, présentent les plus faibles valeurs P_i et sont donc les plus performantes et les plus stables. Comparativement les variétés présentant des valeurs élevées de P_i , donc les plus instables et les moins performantes, sont les variétés 8, 5, 10 et 25

Les valeurs de l'indice W_i varient du minimum de 3027.5 à un maximum de 120001.1 g²/m² (Tableau 8). Relativisées par rapport à la valeur minimale, ces valeurs varient de 1.0 à 39.9. Les 4 variétés aux faibles valeurs W_i , qui sont donc les plus stables, sont les numéros 15, 7, 4 et 21. Comparativement les variétés présentant des valeurs élevées de W_i , et qui sont donc instables, sont les numéros 19, 24, 1 et 3. On note que la variété 21 est présentée comme étant stable par les deux indices alors que la variété 24 est stable selon l'indice P_i et instable selon l'indice W_i .

Les différences de comportement en termes de performances de rendement en grains des variétés contrastées pour les valeurs de P_i et de W_i sont données en figure 6. L'analyse de cette figure suggère que la sélection basée sur les faibles valeurs de P_i améliore la stabilité et le potentiel de rendement, par contre la sélection basée sur les faibles valeurs de l'indice W_i améliore la stabilité dans le sens statique.

Tableau 8. Valeurs de l'indice de la supériorité génotypique (Pi) et l'écovalence (Wi) du rendement en grains des différentes variétés évaluées au cours des trois campagnes d'étude.

N° génotype	Pi	Pi/Pi min	Wi	Wi/Wi min
1	33242.6	22.8	44958.4	14.9
2	20092.3	13.8	13819.1	4.6
3	32599.0	22.3	42615.6	14.1
4	44478.5	30.5	10401.9	3.4
5	50083.4	34.3	14618.2	4.8
6	33031.7	22.6	17805.5	5.9
7	31106.7	21.3	10511.6	3.5
8	52116.5	35.7	14284.9	4.7
9	45120.7	30.9	15672.3	5.2
10	48532.3	33.3	11595.5	3.8
11	27813.1	19.1	40424.6	13.4
12	38700.7	26.5	10829.5	3.6
13	8427.5	5.8	14751.4	4.9
14	13089.6	9.0	24104.3	8.0
15	28773.9	19.7	3027.5	1.0
16	35919.6	24.6	20791.8	6.9
17	29890.8	20.5	35005.8	11.6
18	22748.8	15.6	23404.9	7.7
19	41790.7	28.6	120001.1	39.6
20	46990.3	32.2	12729.0	4.2
21	11993.2	8.2	7057.9	2.3
22	46940.5	32.2	19948.7	6.6
23	38365.3	26.3	11321.8	3.7
24	1459.6	1.0	53037.8	17.5
25	51925.5	35.6	40887.5	13.5

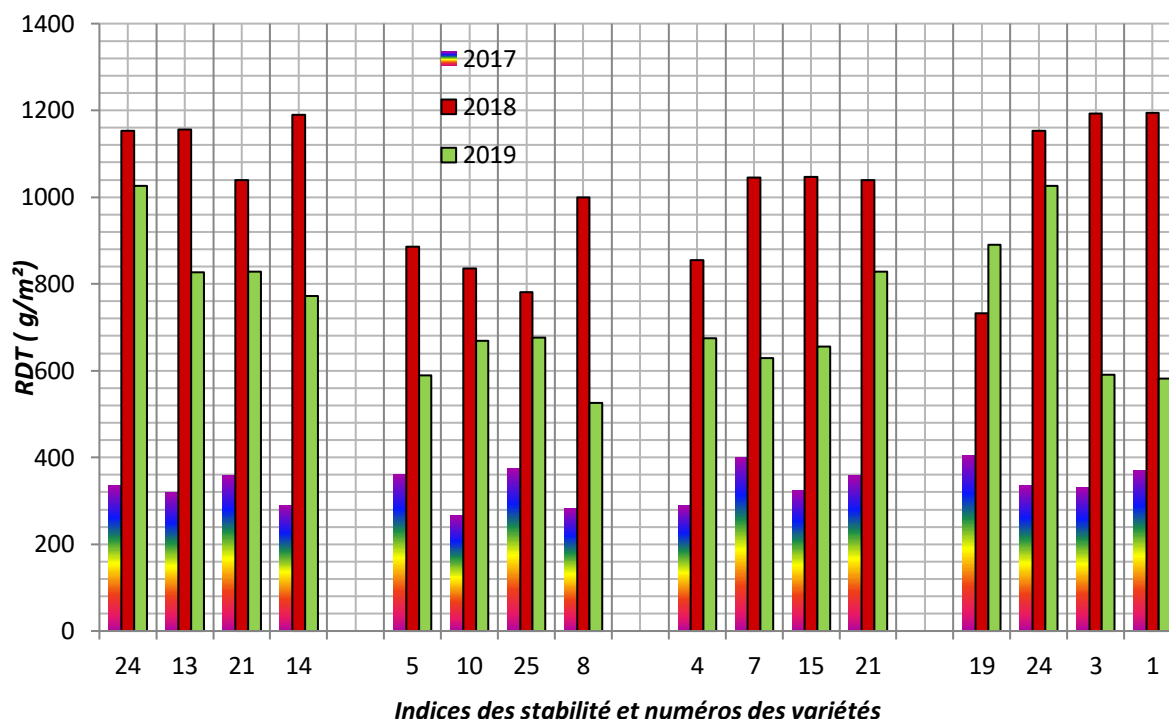


Figure 6. Performances de rendement en grains des variétés aux valeurs extrêmes des indices de la stabilité Pi et Wi

2.1.2. COMPOSANTES DU RENDEMENT GRAIN

Comme pour le rendement en grains (RDT), le nombre d'épis (NE), de grains par épi (NGE), et par m² (NGM²) et le poids de 1000 grains (PMG) présentent un effet campagne et une interaction génotype x années hautement significatifs. Par contre l'effet génotype n'est significatif que pour le PMG (Tableau 5). Ces résultats indiquent que les différences entre les moyennes de ces variables, moyennes calculées sur l'ensemble des variétés, sont très larges entre campagnes agricoles.

Les différences entre les moyennes variétales, calculées sur l'ensemble des campagnes, ne sont significatives que pour le PMG et ne le sont pas pour le NE, NGE et NGM². Par contre le classement des moyennes de ces variables change d'une campagne à l'autre suite à l'effet interactif des variétés avec leurs environnements. Ainsi un génotype donné se comporte au cours des trois campagnes comme trois génotypes différents, suite à ses changements de classement inter variétale.

Cet effet marqué de la campagne agricole, surtout pour NE, NGM², et NGE est indiqué par l'importance de la valeur prise par le % de la somme des carrés des écarts (56.68%, 77.43% et 71.42%, respectivement pour NE, NGM² et NGE) qui est expliquée par ces sources de variation, comparativement à celui de l'effet génotype (12.18%, 06.21% et 10.24% respectivement pour NE, NGM² et NGE) et celui de l'interaction G x E (23.21%, 12.91% et 15.72% respectivement pour NE, NGM² et NGE, Tableau 6).

L'effet année du PMG est relativement moindre suggérant que les différences entre variétés pour ce caractère, sont perceptibles en moyenne des trois campagnes ce qui est indiqué par l'effet génotype significatif (Tableaux 5 et 6). Cette moindre sensibilité de classement variétale du PMG à l'effet environnement est aussi suggérée par une meilleure ressemblance entre années comme indiquée par l'analyse des coefficients de corrélations inter campagnes pour cette variable et qui prennent les valeurs de 0.343^{ns}, 0.678** et 0.490**, respectivement entre 2017 et 2018, 2017 et 2019 (Figure 7) et 2018 et 2019 (n-2 = 23 ddl, r seuil = 0.396*).

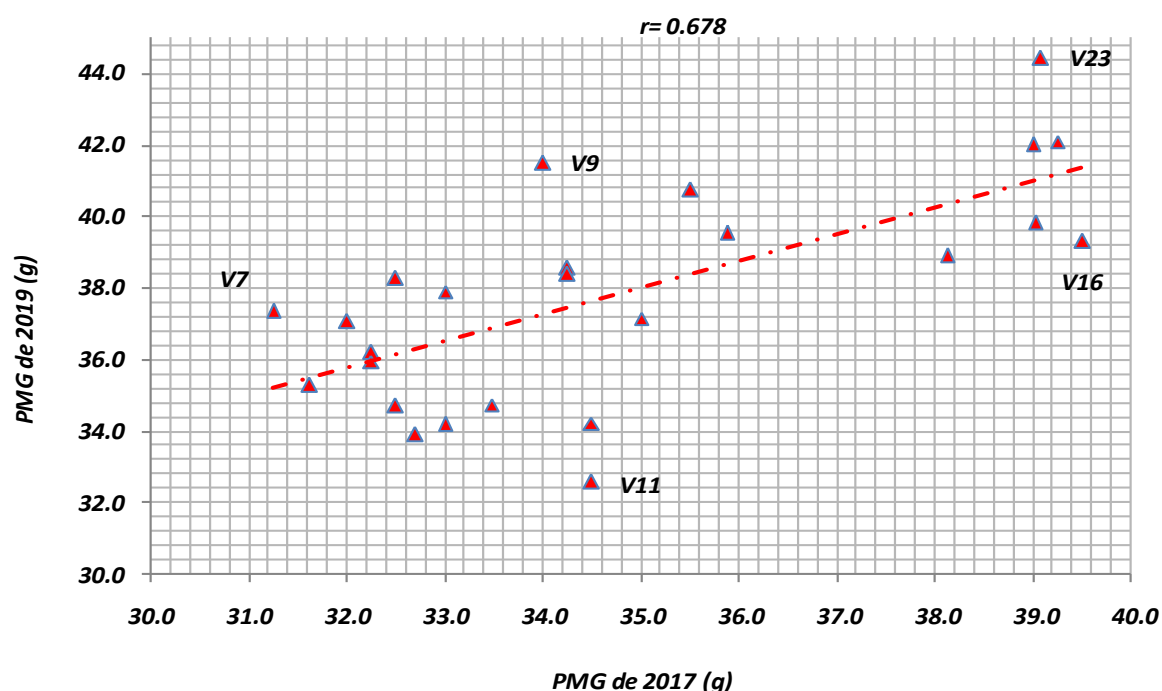


Figure 7. Ressemblance entre PMG des variétés testées au cours des campagnes 2016/17 et 2018/19.

Par contre le degré de ressemblance entre campagnes, du NE, NGM² et NGE, approché par l'analyse des coefficients de corrélations inter campagnes, est non significatif, prenant les valeurs de 0.136^{ns}, -0.09^{ns} et 0.001^{ns}, pour NE ; 0.169^{ns}, -0.006^{ns} et -0.149^{ns}, pour

NGM² ; et 0.094^{ns}, -0.166^{ns} et 0.259^{ns}, pour NGE, respectivement entre 2017 et 2018, 2017 et 2019, et 2018 et 2019. Les performances moyennes enregistrées par campagne pour ces variables sont indiquées au tableau 9. Elles sont de 396.6, 601.2 et 525.5 épis pour NE ; 34.7, 35.8 et 37.8 g pour PMG ; 9.4, 28.6 et 18.4 milliers de graines pour NGM² et 24.2, 47.0 et 35.4 graines pour NGE. Les valeurs prises par la Ppds5% sont de 17.3 épis/m², 0.4 g, 1.0 millier de graines et 0.7 graines, respectivement pour NE, PMG, NGM² et NGE (Tableau 9).

Tableau 9. Valeurs moyennes par campagne des différentes variables mesurées.

Environne	2017	2018	2019	Ppds5%
RDT	324.5	1005.3	692.2	38.0
NE	396.6	601.2	525.5	17.3
PMG	34.7	35.8	37.8	0.4
NGM ²	9.4	28.6	18.4	1.0
NGE	24.2	47.0	35.4	0.7
PNE	458.5	1212.5	114.3	11.5
DPV	107.0	118.1	120.2	0.2
BIO	973.8	2204.6	1746.1	36.0
HI	33.5	46.2	40.7	2.0
PLL	649.2	1199.2	1053.8	37.6
RDT _{ECO}	519.3	1365.1	1008.4	33.2
PHT	49.7	88.9	66.3	6.5
SF	11.7	20.7	23.1	2.4
TRE	80.9	80.1	72.5	4.4
MTS	78.6	44.5	63.7	12.7
CHL	40.4	36.9	41.1	4.3
PSF	35.9	31.5	33.7	1.7

Les valeurs moyennes du NE, NGM² et NGE des différents génotypes varient de 435.4 à 590.4 autour d'une moyenne générale de 507.8 épis/m². Les moyennes du NGM² varient quant à elles de 15.1 à 22.2 milles graines/m² avec une moyenne globale de 18.8 milles graines. Les moyennes du NGE varient de 29.2 à 41.3 grains par épi avec une grande moyenne de 35.3 graines/épi (Tableau 7). Les différences entre les valeurs extrêmes est la

moyenne générale ne sont pas significatives comme le suggère l'effet génotype non significatif de l'analyse de la variance (Tableau 5).

En effet les valeurs prises par la Ppds 5% sont de 110.8 épis/m², 6.6 milles graines/m² et 9.0 graines par épi, alors que les écarts entre les valeurs extrêmes et la moyenne générale sont de 72.4 et 82.6 épis/m² pour NE, 3.7 et 3.4 milles graines pour NGM² et 6.3 et 5.8 graines par épi pour NGE. Ces écarts sont plus faibles que les valeurs prises par la Ppds5% (Tableau 7). Ces résultats de l'effet génotype indiquent, qu'en moyenne des trois années d'expérimentations, les 25 variétés évaluées présentent les mêmes performances pour NE, NGM² et NGE. Ceci suggère que les moyennes des trois campagnes de ces variables ne sont pas discriminantes entre les variétés évaluées.

Pour le PMG, les valeurs caractéristiques sont de 33.1 et 41.2g avec une moyenne générale de 36.1 g. Les écarts entre les valeurs extrêmes et la moyenne générale sont de 3.0 et 5.1 g, comparativement à la Ppds5% de 3.8 g. Ceci suggère la présence de variétés qui présentent un PMG significativement plus élevé que la moyenne générale, par contre il n'existe pas de variétés dont le PMG est significativement inférieur à la moyenne générale (Figure 8). Les variétés 24, 21 et 23 ont des écarts supérieurs à 4.0 g de ce fait elles se présentent comme des géniteurs de bonnes valeurs pour améliorer le PMG.

Les valeurs prises par CV_E et CV_G des quatre variables sont faibles, ainsi que le CV_P du NE et du PMG, étant inférieurs à 10%. Seul le CV_P du NGM² et du NGE sont moyens, dont les valeurs sont situées entre 10% et 20% (Tableau 7). Ces résultats suggèrent le peu d'emprise de la sélection pour améliorer ces variables suite à l'effet masquant de l'environnement. L'analyse des valeurs de H²sl et du GGA confirme le faible progrès escomptable suite à la sélection de ces variables hormis le PMG qui présente une H²sl élevée et un GGA exploitable en sélection (Tableau 7).

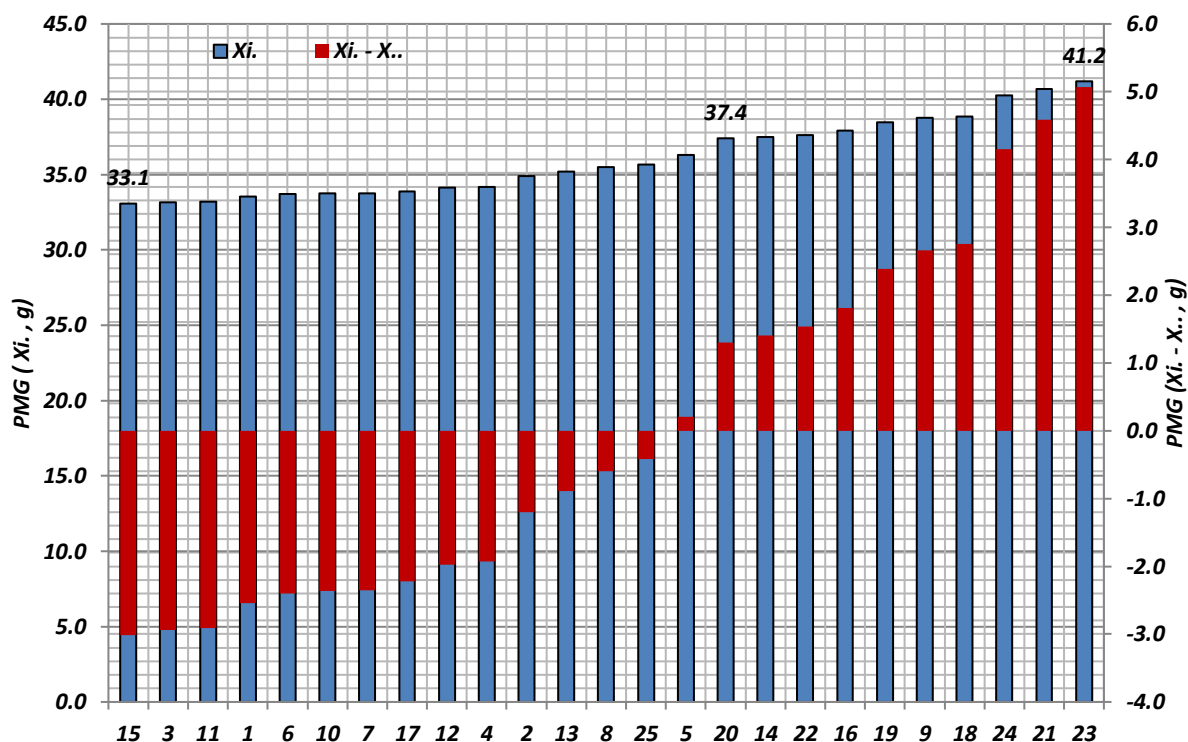


Figure 8. Valeurs moyennes (des trois campagnes) génotypes du PMG et écarts entre la moyenne générale et les valeurs du PMG des différentes variétés évaluées.

Les moyennes du NE, des différentes variétés, mesurées au cours des trois campagnes sont données en figure 12. L'analyse de cette figure indique la présence de l'interaction G x E. Cette interaction est suggérée par le changement de classement des variétés d'une campagne à l'autre. Ainsi et à titre d'exemple la variété 24 se classe 13^{ième} position lors de la campagne 2016/17 avec 697.5 épis/m², améliore son score lors de la campagne 2017/18 pour se classer en 4^{ième} position avec 717.5 épis/m² et finit en première position avec 656.3 épis lors de la campagne 2018/19.

Les différences du NE entre campagnes pour cette même variété sont 20.0 épis/m² entre 2017 et 2018, 61.2 épis/m² entre 2018 et 2019 et 41.2 épis/m² entre 2017 et 2019. La Ppds5% pour les différences entre les moyennes génotypiques d'une même campagne ou les différences entre les moyennes des campagnes d'un génotype donné est de 49.3 épis/m². Donc le changement d'ordre de classement est aussi accompagné des différences significatives des performances. La même tendance est notée chez la variété 14 qui se classe en 25^{ième} position lors de la campagne 2016/17 avec 340.0 épis/m², améliore son score lors de la campagne 2017/18 pour se classer en 5^{ième} position avec 702.5 épis /m² et finit en seconde position avec 640.2 épis lors de la campagne 2018/19.

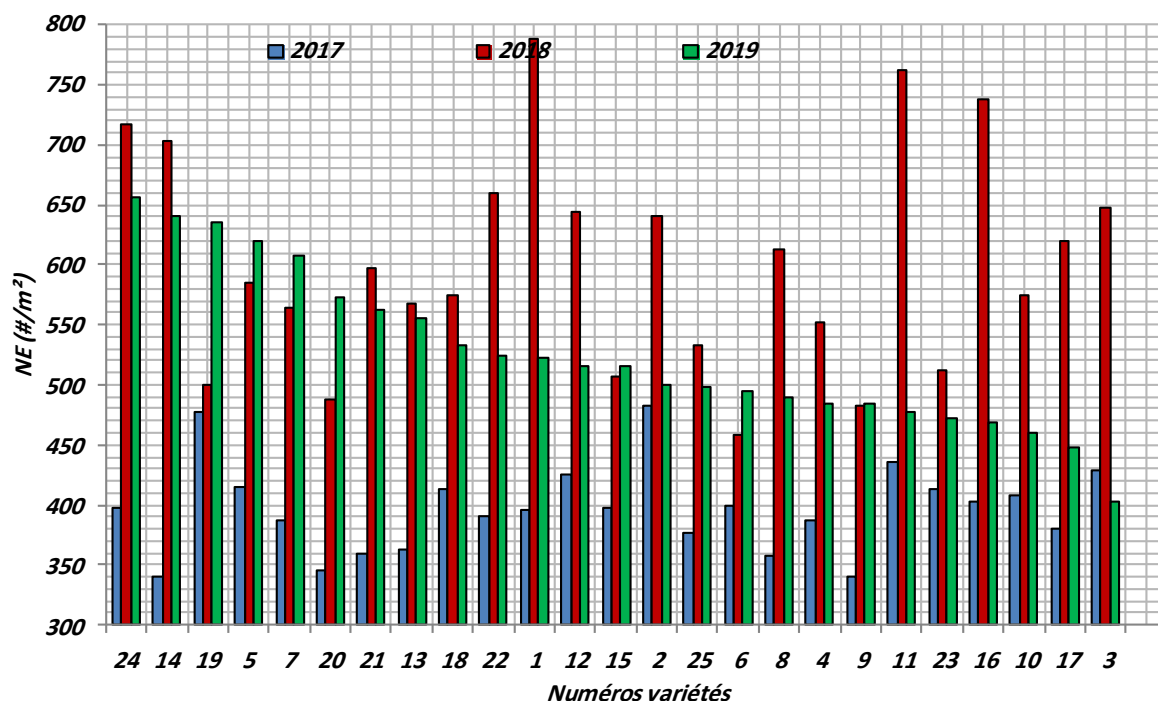


Figure 9. Moyennes du nombre d'épis/m² des 25 variétés évaluées au cours des trois campagnes d'étude : interaction G x E de NE.

Par contre la variété Waha (# 1) se classe en 14^{ième} position lors de la campagne 2016/17 avec 395.0 épis/m², améliore son score lors de la campagne 2017/18 pour se classer en 1^{ière} position avec 787.5 épis /m² et puis chute à la 11^{ième} position avec 522.5 épis/m² lors de la campagne 2018/19. Alors que la variété 3 se classe en 6^{ième} position avec 429.5 épis, puis passe à la 7^{ième} position avec 6447.5 épis/m² et finit en 25^{ième} position avec 402.5 épis/m², lors des trois campagnes successives (Figure 9).

Tableau 10. Valeurs moyennes par campagne du NGM² et du NGE, ordre de classement variétal et valeurs de l'indice Pi.

Numéro	NGM ²							NGE						
	Moyenne			Classement			Pi	Moyenne			Classement			Pi
Variété	2017	2018	2019	2017	2018	2019		2017	2018	2019	2017	2018	2019	
1	11.6	37.8	15.7	3	2	22	77.3	27.3	45.2	32.7	4	14	19	394
2	10.4	35.6	18.5	7	4	13	48.8	21.6	52.4	35.5	20	7	13	292
3	10.3	38.5	16.3	8	1	21	71.6	23.9	59.5	40.6	12	2	4	121
4	8.4	25.3	19.7	19	17	6	216.5	21.7	45.7	40.7	19	13	3	378
5	11.1	21.3	17.0	5	21	17	354.3	27.1	36.4	27.5	5	22	24	879
6	8.7	26.8	21.8	16	15	3	161.6	21.7	57.2	42.8	18	3	2	169
7	12.8	32.1	16.8	1	8	19	99.0	34.4	56.7	27.6	1	5	23	273
8	8.2	29.7	13.7	20	12	25	213.4	23.0	48.5	26.6	15	9	25	560
9	8.6	20.5	16.6	17	22	20	402.7	27.0	45.1	35.8	6	15	12	343
10	8.1	24.6	19.5	22	18	7	240.1	21.6	46.1	43.8	21	12	1	359
11	10.2	37.4	19.1	9	3	10	36.0	23.3	48.1	40.0	13	10	5	282
12	9.2	27.8	18.5	13	14	12	161.8	20.9	41.7	38.0	22	21	9	555
13	9.3	35.0	21.6	12	6	4	32.0	26.2	56.7	39.0	7	4	6	101
14	8.2	32.8	18.9	21	7	11	83.3	23.2	46.7	29.6	14	11	22	508
15	9.9	32.0	19.3	11	9	8	75.5	25.0	60.1	38.5	10	1	8	116
16	6.1	31.4	15.5	25	10	23	174.4	15.0	42.7	33.9	25	18	16	777
17	10.9	35.4	16.9	6	5	18	69.0	28.2	54.8	37.3	3	6	10	109
18	8.7	29.9	17.1	15	11	16	144.6	22.1	51.9	33.8	17	8	17	319
19	11.3	18.3	22.5	4	25	2	412.6	24.9	34.3	34.8	11	25	14	838
20	6.7	20.4	18.1	24	23	14	402.8	20.7	43.7	31.7	23	17	20	605
21	9.2	25.3	19.8	14	16	5	208.4	25.6	44.4	34.7	8	16	15	406
22	6.9	24.1	17.6	23	19	15	288.8	17.9	36.4	33.5	24	23	18	944
23	9.9	23.3	14.5	10	20	24	338.8	25.5	42.5	30.7	9	20	21	562
24	8.5	29.3	24.4	18	13	1	102.5	22.5	42.6	37.2	16	19	11	492
25	11.9	19.5	19.2	2	24	9	391.1	33.9	34.4	38.5	2	24	7	690
X.j	9.4	28.6	18.4					24.2	47.0	35.4				
X..	18.8							35.5						
Ppds5%	2.55							2.9						

Ces résultats indiquent que le comportement d'une variété donnée change d'un environnement à l'autre, suite au peu de ressemblance entre campagnes en termes de conditions de croissance. Ceci pose problème en sélection, où on cherche la persistance des performances d'une campagne à l'autre et que le meilleur d'une campagne donnée reste le meilleur des campagnes qui suivent. Les moyennes du NGM² et du NGE par campagne sont données au tableau 10. La sélection des meilleures 10% sur la base des résultats du NGM² de la première campagne identifie les variétés 7 et 25 qui se classent en 1^{ière} et 2^{ème} position avec des moyennes de 18.7 et 11.9 milles graines (Figure 10).

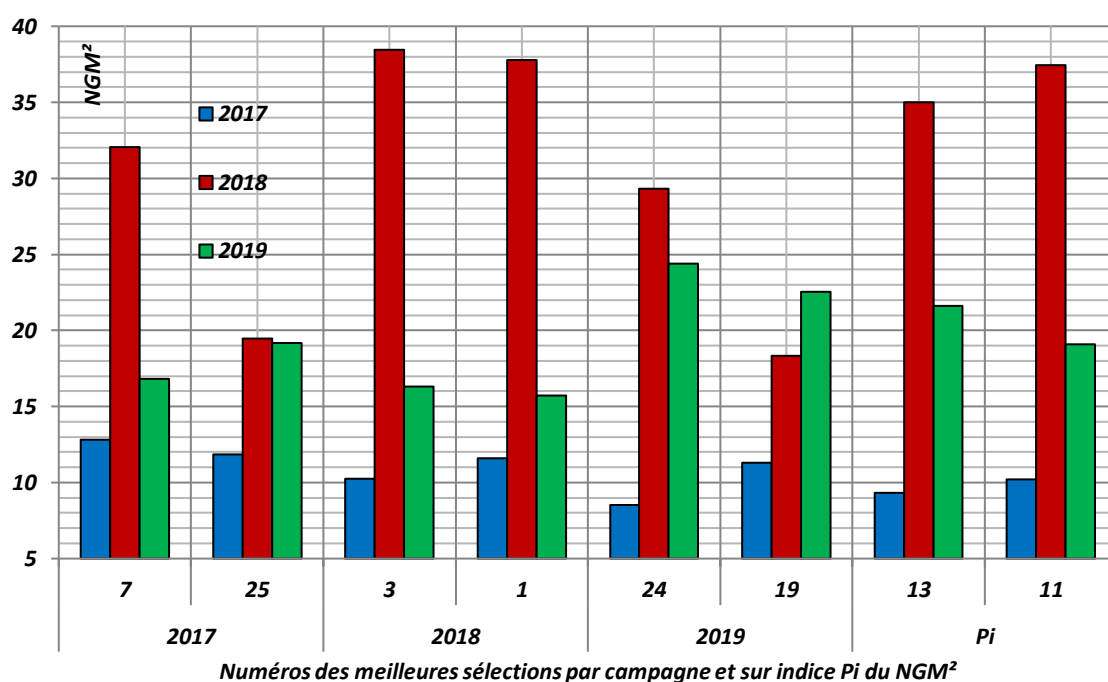


Figure 10. Moyennes du NGM² des meilleures variétés sélectionnées par campagne et sur la base de l'indice Pi

Lors de la seconde campagne ces sélections se classent en 8^{ème} et 24^{ème} positions avec des moyennes de 32.1 et 19.5 milles graines ; et en troisième campagne en 19^{ème} et 9^{ème} positions avec des moyennes de 16.8 et 19.2 milles graines. Alors que les meilleures variétés par campagne sont la 3 avec 38.8 milles graines et la 24 avec 24.4 mille graines, respectivement en 2017/18 et 2018/19 (Tableau 10, Figure 10).

La sélection sur la base des résultats de la deuxième campagne ou de la moyenne des deux premières campagnes aboutit aux mêmes résultats : l'instabilité de classement et des performances des variétés sélectionnées, rendant la décision relative aux génotypes à retenir moins aisée voire peu convaincante. La sélection sur la base du NGE de la première campagne identifie les variétés 7 et 25 qui se classent en 1^{ière} et 2^{ème} position avec des moyennes de 34.4 et 33.9 graines/épi. Lors de la seconde campagne ces deux sélections

changent de classement pour occuper la 5^{ème} et la 24^{ème} position, suggérant la présence de l'interaction (Tableau 10, Figure 11).

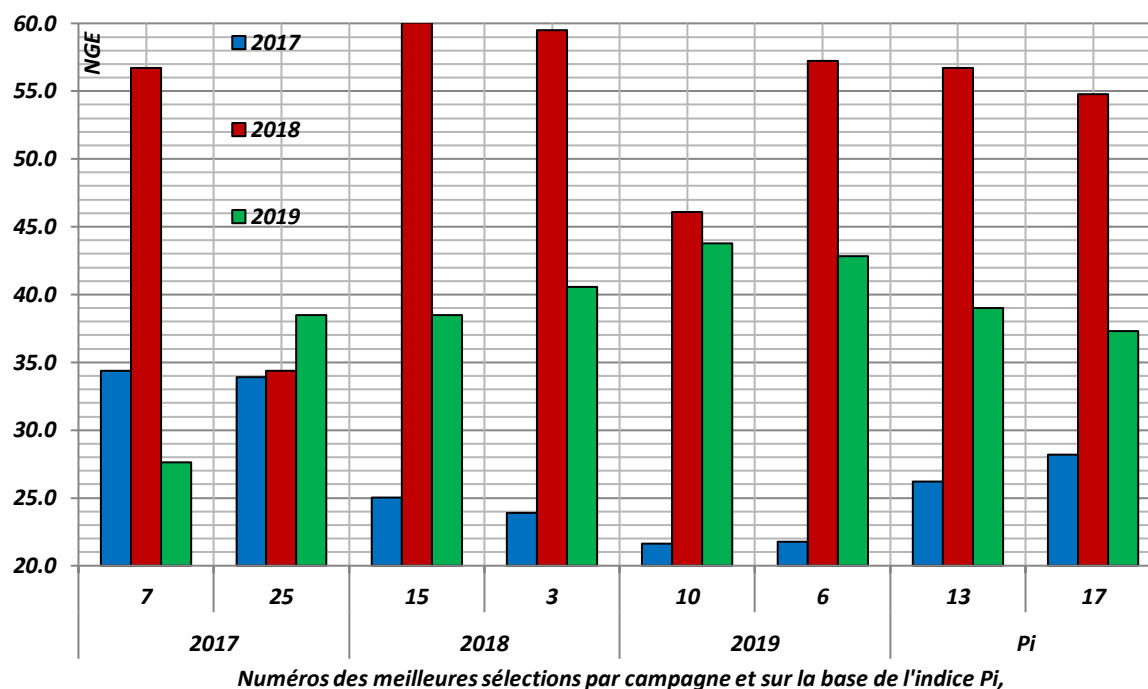


Figure 11. Moyennes du NGE des meilleures variétés sélectionnées par campagne et sur la base de l'indice Pi .

Dans de telles situations, la sélection sur indice qui tient compte de la stabilité est moins onéreuse, car elle identifie des génotypes aux performances acceptable et plus réguliers (Benmahammed et al., 2010 a). La sélection sur la base de l'indice Pi identifie les variétés 11 et 13 pour le NGM² et 13 et 17 pour le NGE (Tableau 10). Les performances des ces deux sélections comparées avec celles des sélections faites par campagne sont indiquées en figure 10 pour le NGM² et la figure 11 pour le NGE. On note que les sélections faites sur la base de l'indice Pi minimisent l'écart qui les sépare de la meilleure variété par environnement.

2.1.3. POIDS DES EPIS, BIOMASSE AERIENNE, RENDEMENTS PAILLE ET ECONOMIQUE

L'analyse de la variance combinée du poids des épis (PNE), de la biomasse aérienne (BIO), de la paille (PLL) et du rendement économique (RDT_{eco}) indique un effet moyen campagne et une interaction génotype x années significatifs, l'effet moyen génotype n'est pas significatif (Tableau 5).

Le % de la somme des carrés des écarts, expliqué par la source de variation campagne, est de 94.37, 72.25, 41.32 et 82.93% pour PNE, BIO, PLL et RDT_{eco},

respectivement. Celui induit par l'interaction G x E est de 2.71, 17.07, 35.64 et 9.93%, respectivement pour ces caractères dans l'ordre cité ci-dessus (Tableau 6).

Les valeurs moyennes du PNE des trois campagnes sont de 458.5, 1212.5 et 114.3 g/m², respectivement pour 2016/17, 2017/18 et 2018/19, avec une Ppds5% de 11.5 g/m². Pour la BIO ces valeurs sont de 986.5, 2172.1 et 1631.0 g/m², respectivement pour les trois campagnes dans l'ordre cité ci-dessus ; la Ppds5% prend la valeur de 36.0 g/m².

Les moyennes de la PLL et du RDT_{eco}, par campagne sont 649.2, 1199.2, et 1053.8 g/m², avec une Ppds5% de 37.6 ; et celles du RDT_{eco}, sont de 519.3, 1365.1, et 1008.4 g/m², avec une Ppds5% de 33.2 g/m², respectivement pour 2016/17, 2017/18 et 2018/19. L'effet génotype non significatif suggère, qu'en moyenne des trois campagnes, les variétés évaluées présentent les mêmes performances pour PNE, BIO, PLL et RDT_{eco}.

Les valeurs moyennes génotypiques varient de 493.1 à 803.5, avec une grande moyenne de 595.1 et une Ppds5% de 159.4 g/m² pour PNE ; pour BIO, ces valeurs sont 1335.0, 1976.4, 1641.5 et une Ppds5% de 506.6 g/m². Les valeurs de la PLL sont 732.7, 1227.1 et 967.4 et une Ppds5% de 443.4 g/m² ; et celles du RDT_{eco} sont 820.1, 1118.4 et 964.3 avec une Ppds5% égale à 246.2 g/m² (Tableau 11).

Les écarts des valeurs extrêmes de la moyenne générale de chaque variable ne sont significativement différents de la Ppds5%, ce qui est indiqué par l'effet moyen génotype non significatif de l'analyse de la variance (Tableau 5). Le CV_E prend une valeur inférieure à 10% pour PNE, BIO et RDT_{eco} et juste égale à 10.5% pour la PLL. Par contre le CV_G est inférieur à 10.0% pour les quatre variables alors que le CV_P prend des valeurs supérieures à 10.0% pour PNE, BIO et PLL et une valeur inférieure à 10.0% pour RDT_{eco}.

Tableau 11. Valeurs moyennes caractéristiques, plus petite différence significative, composantes de la variation, héritabilité au sens large et gain génétique attendu de la sélection en valeurs absolue et en % de la moyenne du poids des épis (PNE), de la biomasse aérienne (BIO), de la paille (PLL) et du rendement économique (RDT_{eco}).

Paramètres	PNE	BIO	PLL	RDT _{eco}
Mini	493.1	1335.0	732.7	820.0
Moy	595.1	1641.5	967.4	964.3
Max	803.5	1976.4	1227.1	1118.4
Amplitude	310.3	641.4	494.4	298.4
Ppds5%	159.4	506.6	443.4	246.2
σ^2_e	2588.3	7247.7	10373.0	2693.5
σ^2_G	1668.8	2105.6	-1084.8	929.7
$\sigma^2_{G \times E}$	8782.7	93423.8	70380.3	21812.9
σ^2_P	5243.4	35058.8	24968.5	8874.0
CV _E	8.5	5.2	10.5	5.4
CV _P	12.2	11.4	16.3	9.8
CV _G	6.9	2.8	0.0	3.2
H ² _{sl}	31.8	6.0	-4.3	10.5
GGA	47.2	23.1	-14.1	20.2
GGAM	7.9	1.4	-1.5	2.1

Les faibles valeurs de la variance génotype induisent de faibles valeurs de H²_{sl} et du GGA, notamment pour BIO, PLL et RDT_{eco}. GGA de PNE est comparativement appréciable prenant une valeur de 47.2 g/m² soit 7.9% de la valeur de la grande moyenne de cette variable (Tableau 11). Les moyennes variétales par campagne, la moyenne des trois campagnes, les valeurs de l'indice Pi et le classement variétal par campagne du PNE sont données au tableau 12.

Tableau 12. Valeurs moyennes (Xij) du PNE par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des valeurs différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

PNE	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
1	532.3	1708.9	169.3	803.5	1914.1	7	1	1	1	1
7	574.8	1312.4	148.8	678.6	157673.3	2	4	2	4	4
24	465.5	1193.3	142.3	600.4	278834.2	11	12	3	7	9
5	430.8	1199.2	132.8	587.6	282221.7	14	11	4	10	11
8	322.3	1185.1	126.4	544.6	340649.6	25	14	5	21	17
14	432.5	1192.0	126.2	583.6	289635.9	13	13	6	11	12
19	576.0	1012.9	124.9	571.2	486461.4	1	24	7	17	24
10	403.0	1106.3	122.9	544.0	395225.4	21	20	8	22	21
2	567.3	1538.3	122.6	742.7	31364.6	3	3	9	2	2
21	468.0	1161.1	121.6	583.6	314076.5	10	16	10	12	16
13	411.8	1178.9	117.7	569.5	310538.0	18	15	11	18	14
25	488.0	1119.5	115.6	574.4	358018.4	8	19	12	15	18
15	474.8	1199.9	112.0	595.5	272618.7	9	10	13	9	7
11	566.0	1154.2	110.2	610.1	311335.1	4	17	14	6	15
6	405.5	1215.3	109.2	576.6	276378.0	19	7	15	14	8
9	399.8	975.5	104.2	493.1	573246.4	22	25	16	25	25
23	541.5	1090.1	103.8	578.4	388460.4	5	23	17	13	20
4	453.3	1239.9	101.8	598.3	239582.1	12	5	18	8	5
3	424.0	1573.3	99.5	698.9	46372.1	15	2	19	3	3
20	385.5	1091.4	99.0	525.3	422535.1	23	22	20	24	23
22	415.8	1128.9	97.4	547.3	367250.4	17	18	21	20	19
18	533.3	1219.7	94.9	616.0	246673.6	6	6	22	5	6
17	418.3	1208.5	90.8	572.5	281440.4	16	8	23	16	10
12	405.5	1106.1	86.1	532.5	399427.3	20	21	24	23	22
16	368.5	1201.2	78.3	549.3	309105.6	24	9	25	19	13
X.j	458.5	1212.5	114.3	X.. = 595.1						
Ppds5%	70.9									

L'analyse de ce tableau indique que les deux meilleures variétés classées, en 2017, sont les variétés #7 et # 19, dont les moyennes du PNE sont de 576.0 et 574.8 g/m², respectivement. Ces deux variétés qui occupent la 1^{ière} et 2^{ième} place, en 2017, passent à la 4^{ième} et à la 24^{ième} places en 2018, et à la 2^{ième} et 7^{ième} position, en 2019. Ce changement de classe est indicateur de la présence de l'interaction GxE. Les deux meilleures variétés classées, en 2018, sont les variétés #1 et # 3, dont les moyennes du PNE sont de 1708.9 et 1573.3 g/m², respectivement.

Ces deux variétés qui occupent la 1^{ière} et 2^{ième} place, en 2018, occupent à la 7^{ième} et la 15^{ième} place en 2017, et la 1^{ière} et 19^{ième} position, en 2019. Les deux meilleures variétés classées, en 2019, sont les variétés #1 et # 7, dont les moyennes du PNE sont de 169.3 et 148.8 g/m², respectivement. Ces deux variétés qui occupent la 1^{ière} et 2^{ième} place, en 2019, occupent la 1^{ière} et la 4^{ième} place en 2018, et la 7^{ième} et la 2^{ième} place, en 2017. La sélection basée sur les moyennes des trois campagnes identifie les mêmes variétés, #1 et # 2, dont les moyennes sont de 803.5 et 742.7 g/m² que la sélection basées sur les valeurs de l'indice Pi (Tableau 12).

Les écarts de toutes les variétés sélectionnées, hormis celles de la campagne 2017, s'écartent significativement de la moyenne générale ($X_{..} = 595.1$ g/m²) en comparaison avec la ppds5% dont la valeur est de 70.9 g/m². Ces résultats indiquent que la sélection d'une seule campagne n'est pas efficace, comparativement à la sélection basée sur la moyenne des trois campagnes et celle basée sur les valeurs de l'indice Pi. Les écarts ($X_{ij} - X_{i.} - X_{.j} + X_{..}$) du PNE induits par l'interaction GxE des variétés sélectionnées sont schématisés en Figure 12.

Seules les variétés 1 et 2 présentent les meilleurs écarts de l'interaction GxE, (232.0 et 171.2 g/m²) comparativement aux variétés #19 (-0.3 g/m²), #7 (107.1 g/m²) et #3 (127.4 g/m²), qui se caractérisent par de faibles écarts voire des écarts négatifs (Figure 12). Exprimés en % de la grande moyenne, ces gains sont de 39.0% pour la variété #1 et de 28.8% pour la variété #2. Les performances moyennes par campagne, en moyenne des trois campagnes, les valeurs de l'indice Pi et le classement variétal par campagne du PNE sont données aux tableaux 13, 14 et 15, pour la BIO, la PLL et le RDT_{eco}, respectivement.

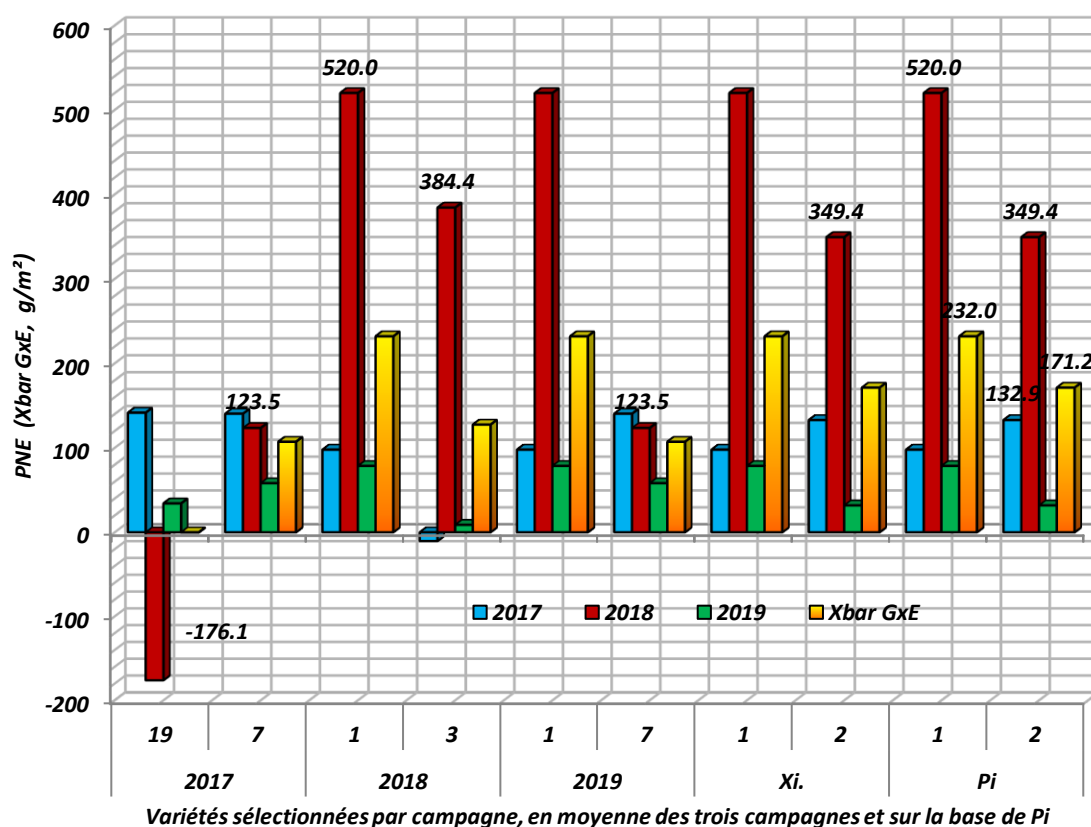


Figure 12. Ecarts de l'interaction GxE du PNE des meilleures variétés sélectionnées par campagne, en moyenne de trois campagnes et sur la base de l'indice Pi .

Les deux variétés qui se distinguent par une meilleure performance de la BIO, sont les variétés #2 (1174.3 g/m²) et # 19 (1126.0 g/m²) lors de la campagne 2017, les variétés #2 (2980.4 g/m²) et # 14 (2924.2 g/m²) lors de la campagne 2018 et les variétés #7 (2394.8 g/m²) et # 5 (2188.6 g/m²) lors de la campagne 2019. Le classement des ces variétés change d'une campagne à l'autre.

La variété #2 occupe la 1^{ière} classe en 2017 et en 2018 puis se classe en 13^{ième} position en 2019. La variété # 19 se classe en 2^{ième}, 22^{ième} et 4^{ième} position, en 2017, 2018 et 2019. La variété # 14 occupe la 23^{ième}, la 2^{ième} et la 3^{ième} places ; alors que la variété #7 se classe en 17^{ième}, 10^{ième} et 1^{ière} places au cours des trois campagnes 2017, 2018 et 2019, respectives. La variété # 5 occupe les 13^{ième}, 6^{ième} et 2^{ième} places. Les variétés #2 et #14 sont les plus performantes, en moyenne des trois campagnes, avec 1963.8 et 1976.4 g/m², alors que l'indice Pi indique que les variétés 7 et 14 sont les meilleures (Tableau 13).

Le changement de classement d'une campagne à l'autre est un signe de la présence de l'interaction GxE, ce qui rend la sélection sur la base des résultats d'une seule

campagne, de la moyenne des trois campagnes ou sur la base de l'indice Pi inefficace, dans la mesure le meilleur génotype est spécifique à chaque environnement. Cependant la sélection basée sur l'indice Pi offre l'avantage d'identifier les variétés qui minimisent l'écart par rapport au meilleur génotype spécifique à chaque campagne.

Les deux variétés qui se distinguent par une meilleure performance de la PLL, sont les variétés #2 (810.8 g/m²) et # 10 (822.5 g/m²) lors de la campagne 2017, les variétés #2 (1820.0 g/m²) et # 4 (1916.4 g/m²) lors de la campagne 2018 et les variétés #7 (1765.8 g/m²) et # 5 (1598.7 g/m²) lors de la campagne 2019. Les variétés #14 (1225.8 g/m²) et # 2 (1227.1 g/m²) sont les meilleures classées selon la moyenne des trois environnements. Les variétés #14 et # 5 sont les meilleures de par l'indice Pi (Tableau 14).

Le classement des ces variétés change aussi d'une campagne à l'autre comme pour les autres variables discutées ci-dessus. A titre d'exemple pour la variable PLL, la variété 14 occupe les 22^{ième}, 3^{ième} et 5^{ième} positions lors des campagnes 2017, 2018 et 2019. Le classement des autres variétés retenues sont données au tableau 14. Les deux variétés qui se distinguent par une meilleure performance du RDT_{eco} sont les variétés #2 (606.7 g/m²) et # 19 (621.3 g/m²) en 2017 ; #2 (1706.4 g/m²) et #14 (1710.1 g/m²) en 2018, #24 (1219.6 g/m²) et #19 (1266.9 g/m²) en 2019, #14(1118.4 g/m²) et #2 (1104.8 g/m²), en moyenne des trois campagnes et #14 et #24 de par les valeurs de l'indice Pi (Tableau 15).

Tableau 13. Valeurs moyennes (X_{ij}) de la BIO par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

BIO	X _{ij}					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
7	921.0	2277.1	2394.8	1864.3	93378	17	10	1	4	1
14	827.0	2924.2	2178.0	1976.4	807156	23	2	3	1	2
5	957.0	2303.5	2188.6	1816.4	832149	13	9	2	6	3
13	783.0	2374.0	2123.8	1760.3	1072590	24	6	6	8	4
19	1126.0	1793.2	2145.0	1688.1	1143310	2	22	4	10	5
11	1118.8	2347.8	2063.0	1843.2	1277486	4	7	7	5	6
25	938.0	1624.2	2126.0	1562.7	1293787	14	23	5	17	7
21	1047.5	2308.8	1983.5	1779.9	1583525	8	8	8	7	8
12	914.0	1544.0	1924.5	1460.8	2081670	18	25	9	21	9
1	985.5	2875.4	1788.3	1883.1	2247656	11	3	10	3	10
2	1174.3	2980.4	1736.6	1963.8	2436240	1	1	13	2	11
22	897.0	2073.4	1759.4	1576.6	2499675	19	16	11	15	12
15	1024.8	2193.3	1743.5	1653.8	2517386	10	14	12	12	13
24	1063.5	2264.0	1670.1	1665.9	2778248	7	12	14	11	14
23	1030.5	2052.3	1646.2	1576.3	2929455	9	17	15	16	15
20	886.5	1806.3	1629.4	1440.7	3090669	21	20	16	22	16
6	880.8	1938.9	1610.8	1476.8	3113805	22	19	17	20	17
9	894.0	1799.5	1506.4	1400.0	3568308	20	21	18	23	18
18	1122.3	2173.3	1437.2	1577.6	3701515	3	15	19	14	19
17	984.0	2267.1	1414.4	1555.2	3772540	12	11	20	18	20
16	933.8	2257.9	1351.4	1514.3	4025890	15	13	22	19	21
10	1088.0	1572.9	1408.7	1356.5	4035914	6	24	21	24	22
8	717.3	1958.8	1329.0	1335.0	4226635	25	18	23	25	23
3	930.8	2632.8	1254.5	1606.0	4342636	16	5	24	13	24
4	1099.3	2771.3	1238.3	1702.9	4384977	5	4	25	9	25
X _j	986.5	2172.1	1631.0	1596.6						
Ppds5%	118.637									

Tableau 14. Valeurs moyennes (Xij) de la PLL par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

PLL	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
14	537.4	1734.3	1405.6	1225.8	40701	22.0	3.0	5.0	2.0	1.0
5	595.8	1417.2	1598.7	1203.9	54765	19.0	6.0	2.0	3.0	2.0
1	614.5	1680.8	1206.5	1167.3	68598	15.0	4.0	9.0	5.0	3.0
2	810.8	1820.0	1050.4	1227.1	86871	2.0	2.0	13.0	1.0	4.0
7	520.0	1231.3	1765.8	1172.4	93478	23.0	9.0	1.0	4.0	5.0
11	767.2	1133.0	1441.4	1113.9	120335	5.0	13.0	4.0	6.0	6.0
21	689.3	1269.3	1154.5	1037.7	135033	10.0	7.0	10.0	8.0	7.0
13	463.8	1218.0	1296.6	992.8	139447	24.0	10.0	6.0	10.0	8.0
22	626.6	1255.2	1058.8	980.2	162594	14.0	8.0	12.0	11.0	9.0
19	721.0	1060.3	1254.5	1011.9	167457	7.0	17.0	7.0	9.0	10.0
15	700.3	1147.0	1088.0	978.4	177716	8.0	12.0	11.0	12.0	11.0
23	641.3	1123.9	1004.2	923.1	206834	12.0	14.0	14.0	14.0	12.0
25	563.0	842.6	1450.1	951.9	220009	21.0	23.0	3.0	13.0	13.0
4	810.3	1916.4	563.6	1096.8	240896	3.0	1.0	25.0	7.0	14.0
3	599.5	1439.7	663.4	900.9	248719	18.0	5.0	23.0	15.0	15.0
6	590.8	1058.4	854.8	834.7	269977	20.0	18.0	16.0	20.0	16.0
20	667.5	958.7	938.2	854.8	271032	11.0	22.0	15.0	17.0	17.0
16	693.4	1159.9	742.9	865.4	272577	9.0	11.0	21.0	16.0	18.0
17	631.0	1082.9	807.0	840.3	275137	13.0	16.0	18.0	19.0	19.0
18	789.8	992.1	771.3	851.1	307406	4.0	19.0	20.0	18.0	20.0
9	600.5	963.5	818.6	794.2	309090	17.0	20.0	17.0	23.0	21.0
12	610.3	669.6	1223.6	834.5	315590	16.0	25.0	8.0	21.0	22.0
24	729.2	1110.5	643.6	827.7	319605	6.0	15.0	24.0	22.0	23.0
8	435.3	959.1	803.7	732.7	332036	25.0	21.0	19.0	25.0	24.0
10	822.5	737.1	740.0	766.5	407206	1.0	24.0	22.0	24.0	25.0
MG	649.2	1199.2	1053.8	967.4						
Ppds5%	141.9									

Tableau 15. Valeurs moyennes (Xij) du RDT_{eco} par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

RDT _{eco}	Xij					Classement variétal				
Geno	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
14	450.8	1710.1	1194.1	1118.4	5728.0	22.0	1.0	4.0	1.0	1.0
24	553.1	1486.6	1219.6	1086.4	9473.7	9.0	8.0	2.0	3.0	2.0
13	458.4	1521.4	1216.2	1065.3	10784.9	21.0	6.0	3.0	5.0	3.0
2	606.7	1706.4	1001.3	1104.8	11793.1	2.0	2.0	13.0	2.0	4.0
11	581.7	1554.7	1054.0	1063.5	11838.8	3.0	5.0	10.0	6.0	5.0
21	565.0	1420.3	1175.4	1053.5	15923.5	6.0	12.0	5.0	7.0	6.0
7	557.0	1415.1	1158.8	1043.6	17137.6	7.0	13.0	6.0	8.0	7.0
1	555.4	1698.8	943.7	1066.0	18155.7	8.0	3.0	16.0	4.0	8.0
15	534.6	1390.4	981.8	968.9	31832.1	13.0	14.0	14.0	13.0	9.0
18	569.4	1478.8	897.3	981.8	32135.3	5.0	9.0	19.0	9.0	10.0
5	540.0	1311.5	1069.5	973.7	34077.7	12.0	15.0	8.0	12.0	11.0
17	542.3	1509.1	849.5	967.0	36808.3	11.0	7.0	21.0	14.0	12.0
3	511.1	1625.0	790.1	975.4	41123.8	16.0	4.0	24.0	11.0	13.0
4	532.1	1429.8	843.8	935.2	44265.3	14.0	11.0	22.0	15.0	14.0
16	448.4	1446.0	831.4	908.6	48222.7	23.0	10.0	23.0	17.0	15.0
23	581.6	1265.6	943.3	930.1	50657.4	4.0	17.0	17.0	16.0	16.0
6	467.2	1198.0	1012.5	892.6	58451.7	19.0	18.0	12.0	19.0	17.0
22	458.4	1194.7	1018.3	890.5	58990.5	20.0	19.0	11.0	20.0	18.0
19	621.3	1051.0	1266.9	979.7	72408.7	1.0	24.0	1.0	10.0	19.0
20	419.3	1135.2	972.6	842.4	76320.2	24.0	20.0	15.0	23.0	20.0
12	486.8	1075.3	1068.0	876.7	76774.9	17.0	22.0	9.0	21.0	21.0
8	412.6	1287.4	766.4	822.1	78788.3	25.0	16.0	25.0	24.0	22.0
9	473.7	1125.0	933.4	844.0	79225.7	18.0	21.0	18.0	22.0	23.0
25	543.9	1034.4	1110.9	896.4	81152.5	10.0	25.0	7.0	18.0	24.0
10	512.3	1056.9	890.7	820.0	96679.0	15.0	23.0	20.0	25.0	25.0
Moyenne	519.3	1365.1	1008.4	964.3						
Ppds5%	72.3									

2.1.4. DUREE DE LA PHASE VEGETATIVE, HAUTEUR, INDICE DE RECOLTE ET SURFACE DE LA FEUILLE ETENDARD

L'analyse de la variance combinée de la DPV, de la PHT, de l'indice de récolte (HI) et de la SFE indique un effet moyen campagne et une interaction génotype x années significatifs. Parmi ces quatre variables, l'effet moyen génotype n'est significatif que pour la DPV et la SFE (Tableau 5). Pour ces deux variables le classement des variétés en moyennes des trois campagnes est représentatif des classements par campagne malgré la présence de l'interaction GxE.

Autrement dit, la sélection sur la base des moyennes d'une campagne est similaire à celle faite sur la base des moyennes des trois campagnes. Alors que pour PHT et HI, le classement variétal change selon la campagne, et de faite la sélection d'une campagne ne sont pas nécessairement les mêmes que celles d'une autre campagne ou celles faites sur la base des moyennes des trois campagnes. Le % de la somme des carrés des écarts, expliqué par la source de variation campagne, est de 93.62, 34.15, 91.94 et 72.50% pour DPV, HI, PHT et SFE, respectivement. Celui induit par l'interaction G x E est de 2.67, 38.33, 1.23 et 4.58%, respectivement pour ces caractères dans l'ordre cité ci-dessus (Tableau 6).

Les valeurs moyennes de la DPV par campagne sont de 107.0, 118.1 et 120.2 jours, respectivement pour 2016/17, 2017/18 et 2018/19, avec une Ppds5% de 0.2 jour. Pour HI ces valeurs sont de 33.5, 46.2 et 40.7%, respectivement pour les trois campagnes dans l'ordre cité ci-dessus, avec une Ppds5% de 2.0%. Les moyennes de la PHT sont 49.7, 88.9, et 66.3cm, avec une Ppds5% de 6.5 cm. Les moyennes de la SFE sont de 11.7, 20.7, et 23.1cm², avec une Ppds5% de 2.4 cm², respectivement pour 2016/17, 2017/18 et 2018/19. Ces résultats suggèrent que les différences entre campagnes engendrent des différences dans l'expression des caractères plus importantes que celles qui existent entre variétés. Ces différences sont de 13 jours pour la DPV, 13% pour HI, 39.2 cm pour la PHT et 11.4 cm pour la SFE. La campagne 2016/17 semble être la plus pénalisante pour l'expression de ces variables, suivie de la campagne 2018/19 et la campagne 2017/18 est la plus favorable, relativement.

L'effet génotype non significatif de la PHT, et de HI suggère, qu'en moyenne des trois campagnes, les moyennes les variétés évaluées ne diffèrent pas significativement de la moyenne générale. Les moyennes générales génotypiques de ces deux caractères 68.3 cm et

40.2%, variant de 65.2 à 71.2 cm pour la PHT et de 34.5 à 47.5% pour HI. La Ppds5% est de 3.8 cm et 11.3% (Tableau 16).

Tableau 16. Valeurs moyennes caractéristiques, plus petite différence significative, composantes de la variation, héritabilité au sens large et gain génétique attendu de la sélection en valeurs absolue et en % de la moyenne de la durée de la phase végétative (DPV), de l'indice de récolte (HI), de la hauteur de la plante (PHT) et de la surface de la feuille étendard (SFE).

Paramètres	DPV	HI	PHT	SFE
Mini	113.3	34.5	65.2	17.0
Moy	115.1	40.2	68.3	18.5
Max	117.3	47.5	71.2	22.0
Amplitude	4.0	13.1	5.9	5.0
Ppds5%	2.0	11.3	3.8	2.5
σ^2_e	0.3	16.3	5.6	5.4
σ^2_G	0.7	-6.5	0.9	1.3
$\sigma^2_{G \times E}$	1.4	43.3	4.0	1.0
σ^2_P	1.2	12.0	3.7	3.0
CVe	0.5	10.1	3.5	12.6
CVp	1.0	8.6	2.8	9.3
CVg	0.7	0.0	1.4	6.1
H ² sl	54.2	-54.6	25.6	42.8
GGA	1.2	-3.9	1.0	1.5
GGAM	1.1	-9.6	1.5	8.2

Les moyennes de la DPV et de la SFE varient de 113.3 à 117.3 jours au tour d'une valeur moyenne de 115.1 jours et de 17.0 à 22.0 cm² avec une moyenne générale de 18.5 cm². Les moyennes des trois campagnes par variété de la DPV et la SFE sont indiquées en Figures 13 et 14.

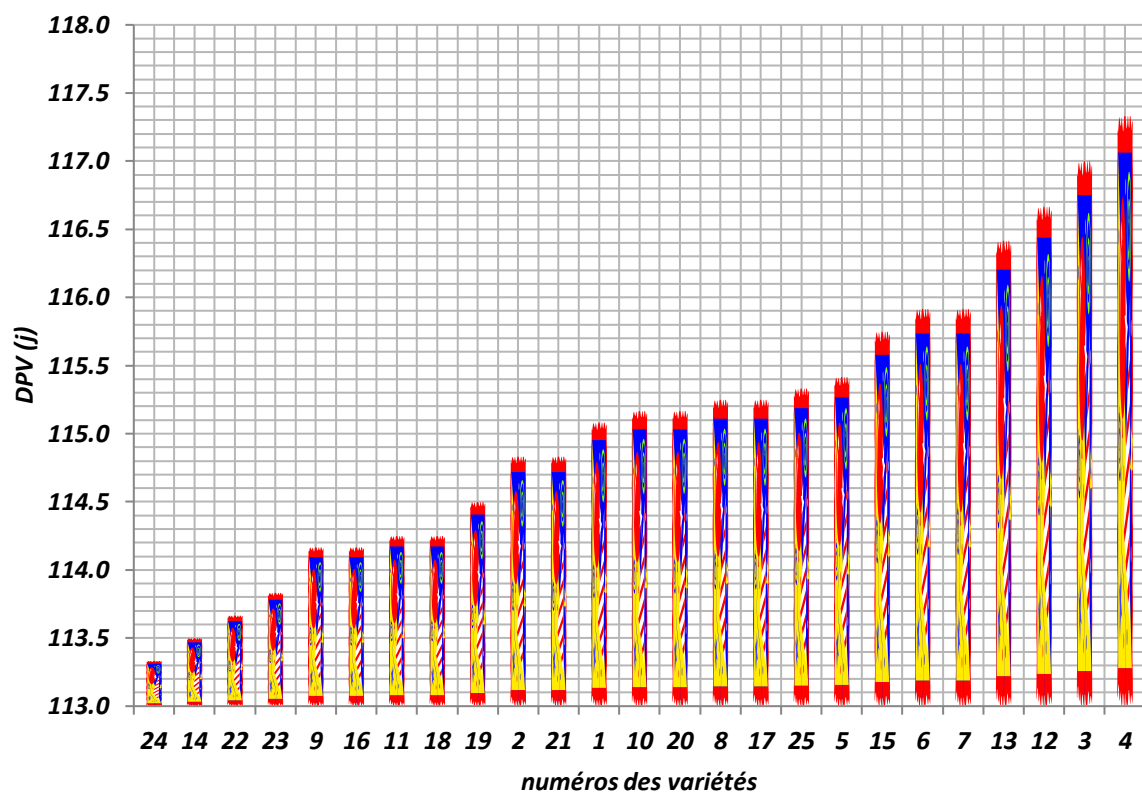


Figure 13. Moyennes des trois campagnes par variété de la durée de la phase végétative : effet moyen génotype.

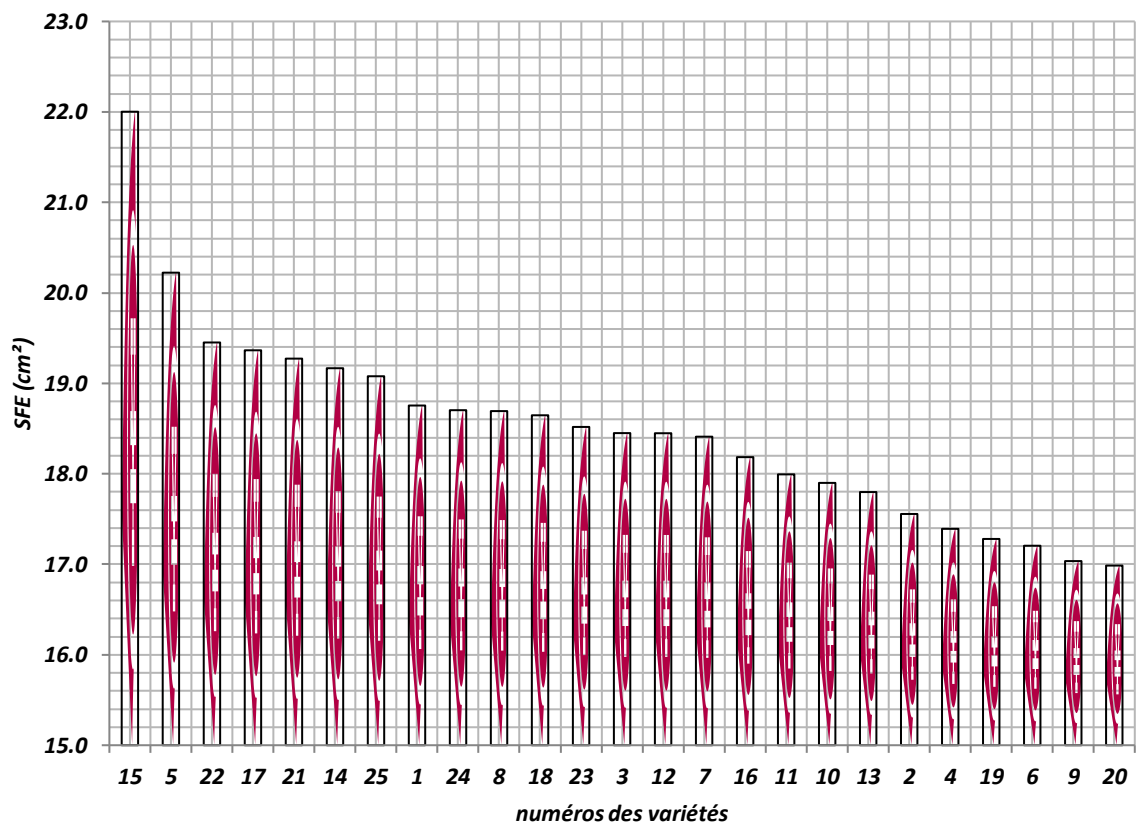


Figure 14. Moyennes des trois campagnes par variété de la surface de la feuille étandard : effet moyen génotype.

Les coefficients de variation CV_E , CV_P et CV_G sont faibles étant inférieurs à 10% ; la variance génétique est nulle pour HI suggérant que la variation observée pour cette variable est d'origine environnementale et que la sélection pour cette variable est peu efficace.

Le degré d'héritabilité au sens large est faible pour PHT et, SFE, nul pour HI et moyen pour DPV, dont le gain génétique attendu est de 1.2 jours en valeur absolue soit 1.1% en pourcent de la moyenne générale de ce caractère (Tableau 16).

Malgré la présence d'une interaction significative pour la DPV et la SFE, la sélection peut se faire sur la base des moyennes génotypiques des trois campagnes par variété (effet moyen génotype). L'interaction GxE est étudiée par l'analyse des moyennes et des classements des variétés.

Les moyennes variétales par campagne, la moyenne des trois campagnes, les valeurs de l'indice P_i et le classement variétal par campagne de la DPV, PHT, HI et SFE sont données aux tableaux 17, 18, 19 et 20.

Les meilleures variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indice P_i , sont les numéros 24, 14, 22, 9 et 11, pour la durée de la phase végétative (DPV) ; les numéros 9, 12, 14, 22, 24 et 19 pour la hauteur de la plante (PHT) ; les numéros 24, 17, 18, 13, 12 et 7 pour l'indice de récolte (HI) ; et les numéros 5, 21, 15, 23 et 18 pour la surface de la feuille étendard. Ces sélections changent de classement d'une campagne à l'autre suite à la présence significative de l'interaction (Tableaux 17, 18, 19 et 20).

Tableau 17. Valeurs moyennes (Xij) de la DPV par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

DPV	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
24	105	116	119.0	113.3	0.17	4	4	1	1	1
14	105	116	119.5	113.5	0.21	1	3	3	2	2
22	105	117	119.0	113.7	0.67	2	5	2	3	3
23	105	117	119.5	113.8	0.71	3	6	4	4	4
16	106	117	119.5	114.2	0.88	6	7	5	5	5
18	106	117	119.8	114.3	0.93	7	8	8	7	6
9	107	115	120.5	114.2	1.04	14	2	15	6	7
19	106	118	119.5	114.5	1.71	8	9	6	9	8
21	106	118	120.5	114.8	2.04	9	10	16	11	9
2	107	118	119.5	114.8	2.21	11	11	7	10	10
10	107	118	120.5	115.2	2.54	15	13	17	13	11
20	107	118	120.5	115.2	2.54	17	15	18	14	12
8	107	118	120.8	115.3	2.68	13	12	20	15	13
17	107	118	120.8	115.3	2.68	16	14	21	16	14
1	106	119	120.3	115.1	3.09	5	17	12	12	15
25	106	119	121.0	115.3	3.50	10	18	23	17	16
5	107	119	120.3	115.4	3.59	12	19	13	18	17
11	109	113	120.8	114.3	3.84	23	1	19	8	18
15	109	118	120.3	115.8	4.43	25	16	11	19	19
7	108	119	120.8	115.9	4.68	19	20	22	21	20
6	109	119	119.8	115.9	5.43	22	21	9	20	21
13	108	121	120.3	116.4	7.76	20	22	14	22	22
12	109	121	120.0	116.7	8.83	24	23	10	23	23
3	108	122	121.0	117.0	10.33	18	24	24	24	24
4	109	122	121.0	117.3	11.50	21	25	25	25	25
Moyenne	106.9	118.1	120.2	115.1						
Ppds5%	0.76									

Tableau 18. Valeurs moyennes (Xij) de la PHT par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

PHT	Xij					Classement variétal				
Geno	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
9	48.3	93.8	67.8	70.0	2.4	19	2	6	4	1
12	48.3	91.8	69.3	69.8	2.6	20	5	3	6	2
14	50.5	91.2	71.3	71.0	2.7	8	6	1	3	3
15	48.9	92.1	68.2	69.7	3.3	15	4	5	7	4
22	48.3	95.1	66.4	69.9	4.1	21	1	11	5	5
24	54.1	91.0	68.4	71.2	4.4	2	7	4	1	6
5	49.2	92.4	66.3	69.3	5.6	13	3	13	9	7
10	53.2	89.2	70.7	71.0	6.1	3	12	2	2	8
25	50.3	89.1	66.4	68.6	10.2	9	13	12	10	9
1	50.1	89.7	65.3	68.4	11.0	11	9	15	12	10
13	45.6	88.3	66.5	66.8	11.6	25	14	10	22	11
2	47.3	89.4	65.2	67.3	11.8	23	11	17	18	12
20	50.2	87.4	67.8	68.5	12.0	10	17	7	11	13
7	48.7	90.4	64.0	67.7	12.7	16	8	22	14	14
23	47.4	88.3	65.2	66.9	14.3	22	15	18	20	15
17	48.7	89.7	63.8	67.4	14.4	17	10	23	15	16
8	48.4	87.3	66.2	67.3	14.6	18	18	14	17	17
19	54.2	86.5	67.7	69.4	14.7	1	20	8	8	18
11	50.9	85.9	67.7	68.2	16.4	6	21	9	13	19
4	49.9	87.8	64.4	67.4	16.9	12	16	21	16	20
16	50.6	84.9	65.3	66.9	23.6	7	23	16	21	21
21	49.0	84.8	64.6	66.1	25.3	14	24	20	23	22
6	47.0	86.8	62.0	65.2	26.2	24	19	24	25	23
18	52.6	83.3	65.0	67.0	29.9	4	25	19	19	24
3	51.4	85.3	61.8	66.1	31.5	5	22	25	24	25
Moyenne	49.7	88.9	66.3	68.3						
Ppds5%	3.3									

Tableau 19. Valeurs moyennes (Xij) de HI par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

HI	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
24	31.6	51.1	59.9	47.5	30.1	17.0	6.0	1.0	1.0	1.0
17	36.1	52.3	43.5	44.0	57.7	8.0	4.0	9.0	2.0	2.0
3	35.7	45.4	47.3	42.8	58.6	9.0	15.0	4.0	6.0	3.0
18	29.6	54.5	46.4	43.5	64.6	21.0	2.0	6.0	3.0	4.0
6	33.1	45.3	46.9	41.8	68.8	14.0	16.0	5.0	9.0	5.0
9	33.0	46.9	45.7	41.9	69.2	15.0	13.0	7.0	8.0	6.0
8	39.3	51.0	39.6	43.3	77.5	4.0	7.0	15.0	4.0	7.0
13	40.9	48.7	39.0	42.9	84.5	2.0	8.0	17.0	5.0	8.0
10	24.4	53.0	47.8	41.7	89.1	25.0	3.0	3.0	10.0	9.0
21	34.2	45.0	41.7	40.3	93.1	12.0	18.0	11.0	12.0	10.0
23	37.8	45.2	39.1	40.7	100.0	6.0	17.0	16.0	11.0	11.0
16	25.8	48.6	45.0	39.8	101.6	23.0	9.0	8.0	14.0	12.0
19	36.2	40.9	41.5	39.5	107.6	7.0	20.0	12.0	15.0	13.0
12	33.3	56.7	36.4	42.1	110.4	13.0	1.0	19.0	7.0	14.0
15	31.8	47.7	37.5	39.0	121.1	16.0	11.0	18.0	16.0	15.0
20	24.8	46.9	42.5	38.1	126.5	24.0	12.0	10.0	18.0	16.0
25	40.1	48.4	31.8	40.1	145.1	3.0	10.0	22.0	13.0	17.0
22	30.3	39.4	39.8	36.5	147.6	20.0	22.0	13.0	23.0	18.0
2	31.0	39.0	39.6	36.5	148.6	19.0	23.0	14.0	22.0	19.0
14	35.2	40.7	35.7	37.2	152.4	10.0	21.0	20.0	21.0	20.0
4	26.3	30.8	54.6	37.2	167.3	22.0	25.0	2.0	20.0	21.0
1	34.6	41.6	32.6	36.3	176.4	11.0	19.0	21.0	24.0	22.0
11	31.5	51.9	30.1	37.8	177.3	18.0	5.0	23.0	19.0	23.0
7	43.8	46.0	26.5	38.7	205.5	1.0	14.0	25.0	17.0	24.0
5	37.9	38.5	26.9	34.5	242.2	5.0	24.0	24.0	25.0	25.0
Moyenne	33.5	46.2	40.7	40.2						
Ppds5%	5.6									

Tableau 20. Valeurs moyennes (Xij) de la SFE par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

SFE	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
5	12.41	25.28	22.98	20.22	0.6	9	2	14	2	1
21	11.59	23.43	22.80	19.27	2.1	13	3	17	5	2
22	12.23	22.67	23.46	19.45	2.6	10	5	12	3	3
12	11.24	22.38	21.73	18.45	3.3	16	6	20	14	4
15	13.63	25.87	26.50	22.00	3.4	2	1	1	1	5
17	13.21	21.33	23.56	19.37	4.0	4	7	11	4	6
1	13.01	21.01	22.24	18.75	4.1	5	9	18	8	7
14	12.76	20.97	23.77	19.17	4.8	7	10	8	6	8
8	9.59	22.90	23.59	18.69	5.1	25	4	10	10	9
7	11.56	20.76	22.91	18.41	5.5	14	11	16	15	10
23	13.99	20.17	21.39	18.52	5.5	1	13	23	12	11
25	12.59	20.26	24.39	19.08	6.5	8	12	4	7	12
3	10.02	21.11	24.22	18.45	7.2	23	8	5	13	13
11	11.37	19.71	22.91	17.99	7.6	15	16	15	17	14
19	12.94	19.90	19.01	17.28	7.6	6	15	25	22	15
4	11.01	19.65	21.51	17.39	8.0	19	18	22	21	16
6	10.00	19.90	21.71	17.21	8.6	24	14	21	23	17
24	13.48	18.73	23.90	18.70	9.1	3	22	7	9	18
9	11.77	18.87	20.46	17.04	9.4	12	21	24	24	19
18	11.11	19.69	25.14	18.65	9.4	17	17	2	11	20
16	11.08	19.29	24.18	18.18	9.4	18	20	6	16	21
13	10.07	19.56	23.76	17.80	9.7	22	19	9	19	22
20	10.32	18.54	22.10	16.99	11.2	20	23	19	25	23
10	10.29	18.54	24.87	17.90	12.6	21	24	3	18	24
2	11.98	17.39	23.30	17.56	12.9	11	25	13	20	25
Moyenne	11.73	20.72	23.06	18.50						
Ppds5%	3.25									

2.1.5. TENEUR EN EAU, STABILITE MEMBRANAIRE, CHLOROPHYLLE ET POIDS SPECIFIQUE FEUILLE ETENDARD

L'analyse de la variance combinée indique un effet campagne significatif pour la TRE, la MTS, et le PSF. L'effet génotype est significatif pour la TRE, et la CHL, et l'interaction GxE est significative pour la TRE et la MTS (Tableau 5). Ces résultats indiquent que le contenu en chlorophylle est peu sensible à l'environnement, et que le choix variétal se fait en tenant compte de l'interaction GxE pour la TRE et la MTS et sur la base de l'effet moyen génotype pour le contenu en chlorophylle et le poids spécifique foliaire.

A l'inverse des autres variables ci-dessus discutées, le % de la somme des carrés des écarts, expliqué par la source de variation campagne, est plus faible et de 11.59, 49.45, 9.43 et 14.15% pour TRE, MTS, CHL et PSF, respectivement. Le % de la variation expliqué par l'interaction G x E est de 17.96, 9.00, 10.18 et 16.98%, pour ces caractères cités dans l'ordre ci-dessus. Les valeurs prises par l'erreur pondérée suggèrent une faible précision de mesure de ces variables (Tableau 6).

Les valeurs moyennes de la TRE, la MTS, le contenu en CHL et le PSF, par campagne sont de 80.9, 80.1 et 72.5% ; 78.6, 44.5 et 63.8% ; 40.4, 36.9 et 41.0 CCI ; et 35.9, 31.5 et 33.7 mg/cm² respectivement pour 2016/17, 2017/18 et 2018/19. Les valeurs prises par la Ppds5% de ces variables sont 4.4%, 12.7%, 4.3 CCI et 1.7 mg/cm². L'effet campagne engendre des différences de 8.4% pour la TRE, 34.0% pour la MTS, 4.2 CCI pour la CHL et 4.4 mg/cm² pour le PSF.

L'effet génotype non significatif de la MTS et le PSF suggère, qu'en moyenne des trois campagnes, les moyennes des variétés évaluées ne diffèrent pas significativement de la moyenne générale. Les moyennes générales génotypiques de ces deux caractères 62.3 % et 33.7mg/cm². La Ppds5% est de 12.2% et 4.0 mg/cm² (Tableau 21). Les moyennes génotypiques de la TRE varient de 66.9 à 83.0 % au tour d'une valeur moyenne des 25 variétés de 77.9% et une valeur de la Ppds5% de 9.7%. Les moyennes génotypiques de la CHL varient de 33.8 à 46.4 CCI autour d'une valeur moyenne des 25 variétés de 39.4 CCI et une valeur de la Ppds5% de 3.9 CCI (Tableau 21).

Tableau 21. Valeurs moyennes caractéristiques, plus petite différence significative, composantes de la variation, héritabilité au sens large et gain génétique attendu de la sélection en valeurs absolue et en % de la moyenne de la teneur relative en eau (TRE), l'intégrité cellulaire (MTS), le contenu en chlorophylle (CHL) et le poids spécifique foliaire (PSF).

Paramètres	TRE	MTS	CHL	PSF
Mini	66.9	49.4	33.8	30.8
Moy	77.9	62.3	39.4	33.7
Max	83.0	71.4	46.4	36.8
Amplitude	16.1	22.0	12.6	6.1
Ppds5%	9.7	12.2	3.9	4.0
σ^2_e	87.5	128.7	20.9	17.5
σ^2_G	7.6	6.6	6.7	0.1
$\sigma^2_{G \times E}$	12.8	23.3	0.5	1.6
σ^2_P	33.7	46.6	12.1	5.0
CV _e	12.0	18.2	11.6	12.4
CV _P	7.5	11.0	8.8	6.7
CV _G	3.5	4.1	6.6	1.0
H ² _{sl}	22.6	14.2	55.5	2.5
GGA	2.7	2.0	4.0	0.1
GGAM	3.4	3.2	10.0	0.3

Les meilleures variétés pour la TRE, prennent des valeurs moyennes supérieures à 80.0%. Ces variétés sont les numéros 18 (83.0%), 16 (82.9%), 2 (82.7%), 21 (82.6%), 6 (81.8%), 9 (81.6%), 23 (80.9%), 12 (80.7%) et 10 (80.6%). Les variétés aux faibles valeurs sont les numéros 8 (67.1%) et 14 (66.9% ; Figure 15).

Les meilleures variétés pour la CHL, prennent des valeurs moyennes supérieures à 43.0 CCI. Ces variétés sont les numéros 17 (46.4 CCI), 25 (43.9 CCI) et 18 (43.0 CCI). Les variétés aux faibles valeurs sont les numéros 2 (33.8 CCI), 9 (35.1 CCI) et 15 (35.9 CCI) et une Ppds% égale à 3.9 CCI (Figure 16).

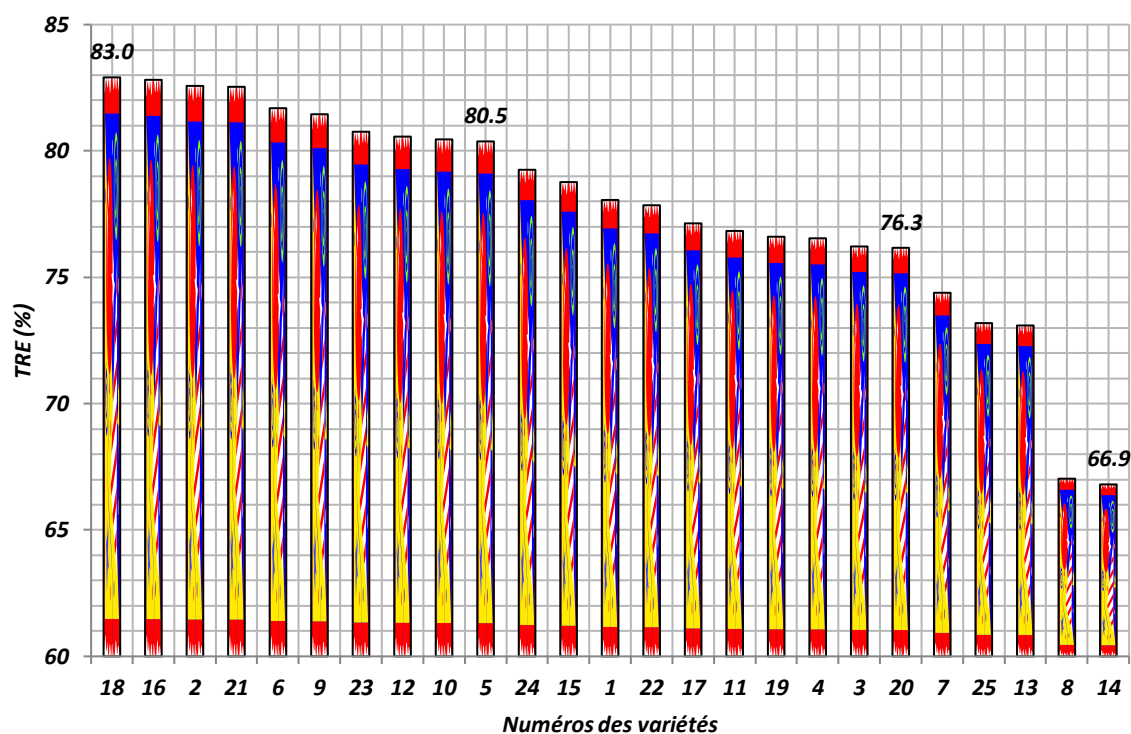


Figure 15. Moyennes des trois campagnes par variété de la teneur relative en eau : effet moyen génotype.

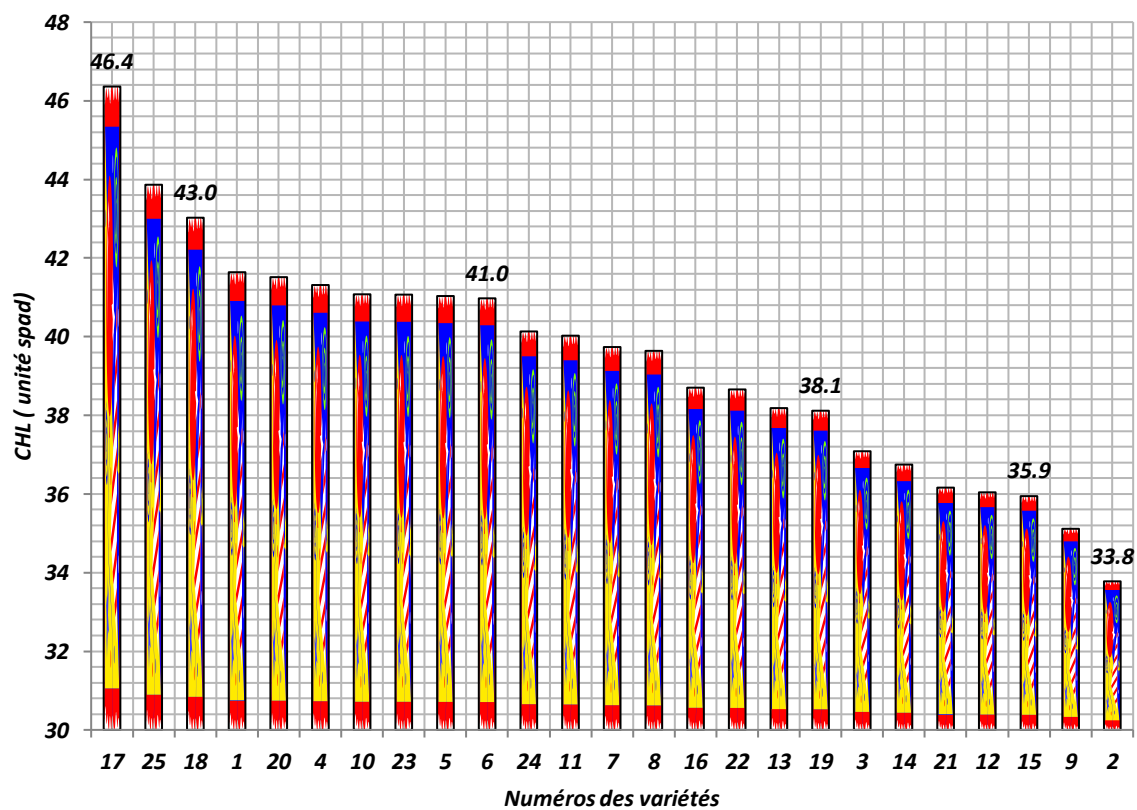


Figure 16. Moyennes des trois campagnes par variété du contenu en chlorophylle : effet moyen génotype.

Tableau 22. Valeurs moyennes (Xij) de la TRE par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

TRE	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
18	90.5	82.4	76.1	83.0	5.1	1.0	14.0	5.0	1.0	1.0
16	85.6	86.8	76.4	82.9	5.6	6.0	1.0	4.0	2.0	2.0
21	85.0	85.7	77.2	82.6	6.1	9.0	4.0	2.0	4.0	3.0
9	86.5	82.9	75.2	81.6	8.2	3.0	12.0	8.0	6.0	4.0
6	86.3	85.3	73.8	81.8	8.8	5.0	5.0	11.0	5.0	5.0
2	83.4	85.1	79.5	82.7	9.0	12.0	7.0	1.0	3.0	6.0
23	86.4	82.4	73.8	80.9	11.5	4.0	15.0	10.0	7.0	7.0
5	83.5	82.5	75.4	80.5	14.0	11.0	13.0	7.0	10.0	8.0
12	81.8	83.0	77.1	80.7	15.8	13.0	11.0	3.0	8.0	9.0
10	80.3	85.7	75.7	80.6	19.9	17.0	3.0	6.0	9.0	10.0
24	87.0	78.9	72.2	79.4	21.4	2.0	19.0	15.0	11.0	11.0
1	81.6	79.2	73.6	78.2	28.5	15.0	18.0	12.0	13.0	12.0
22	85.6	75.2	73.0	78.0	33.3	7.0	22.0	14.0	14.0	13.0
17	79.8	78.3	73.5	77.2	36.8	18.0	20.0	13.0	15.0	14.0
15	76.7	86.0	73.9	78.9	37.0	20.0	2.0	9.0	12.0	15.0
19	81.8	77.9	70.4	76.7	39.6	14.0	21.0	19.0	17.0	16.0
11	79.7	83.1	68.1	76.9	43.7	19.0	10.0	22.0	16.0	17.0
4	84.5	83.2	62.3	76.6	57.7	10.0	9.0	25.0	18.0	18.0
20	74.4	84.0	70.4	76.3	58.4	21.0	8.0	18.0	20.0	19.0
3	73.7	85.2	70.1	76.3	62.4	22.0	6.0	20.0	19.0	20.0
7	81.0	74.9	67.6	74.5	62.4	16.0	23.0	24.0	21.0	21.0
25	70.2	81.8	67.8	73.3	95.4	23.0	17.0	23.0	22.0	22.0
13	67.1	81.9	70.6	73.2	108.6	24.0	16.0	16.0	23.0	23.0
8	66.0	64.9	70.5	67.1	193.5	25.0	24.0	17.0	24.0	24.0
14	85.1	46.5	69.2	66.9	293.7	8.0	25.0	21.0	25.0	25.0
Moyenne	80.9	80.1	72.5	77.8						
Ppds5%	13.0									

Tableau 23. Valeurs moyennes (Xij) de la MTS par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

MTS	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
21	87.1	54.1	73.1	58.8	227.8	5.0	3.0	4.0	1.0	1.0
23	72.3	65.0	53.9	53.6	243.6	21.0	1.0	23.0	5.0	2.0
6	73.8	56.2	55.5	47.9	311.8	19.0	2.0	22.0	19.0	3.0
16	87.9	48.1	68.7	55.2	312.0	3.0	7.0	8.0	3.0	4.0
9	86.1	48.8	63.9	52.0	318.2	6.0	5.0	13.0	8.0	5.0
14	90.8	46.7	74.1	56.4	324.5	1.0	10.0	3.0	2.0	6.0
11	80.1	48.2	70.3	52.4	325.8	13.0	6.0	5.0	6.0	7.0
4	88.0	46.4	68.8	51.8	336.9	2.0	11.0	7.0	9.0	8.0
24	78.0	48.0	65.2	53.8	349.6	17.0	8.0	12.0	4.0	9.0
5	80.2	46.1	74.9	51.5	351.6	12.0	12.0	2.0	11.0	10.0
10	85.9	51.2	50.8	49.5	364.2	7.0	4.0	25.0	14.0	11.0
18	74.6	46.8	61.2	50.2	399.0	18.0	9.0	15.0	13.0	12.0
25	79.8	44.4	59.1	52.1	421.7	14.0	14.0	19.0	7.0	13.0
20	78.3	42.9	60.2	50.3	446.4	16.0	16.0	17.0	12.0	14.0
3	87.2	40.9	61.2	48.1	450.3	4.0	17.0	16.0	18.0	15.0
17	71.5	43.5	65.5	49.4	450.5	22.0	15.0	9.0	15.0	16.0
1	81.9	38.7	65.4	46.8	480.9	10.0	19.0	10.0	21.0	17.0
22	83.4	37.4	63.9	51.7	506.2	9.0	21.0	14.0	10.0	18.0
12	79.1	38.9	58.4	47.1	518.4	15.0	18.0	20.0	20.0	19.0
2	80.9	35.1	75.2	48.3	533.6	11.0	24.0	1.0	16.0	20.0
19	84.0	37.7	52.2	48.2	565.5	8.0	20.0	24.0	17.0	21.0
8	56.8	46.1	59.6	42.6	566.6	24.0	13.0	18.0	24.0	22.0
13	70.1	35.3	65.3	45.9	600.2	23.0	23.0	11.0	22.0	23.0
7	72.8	31.0	68.8	44.9	656.5	20.0	25.0	6.0	23.0	24.0
15	55.2	35.5	57.6	40.8	772.2	25.0	22.0	21.0	25.0	25.0
Moyenne	78.6	44.5	63.8	62.3						
Ppds5%	15.8									

Tableau 24. Valeurs moyennes (Xij) de la CHL par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

CHL	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
17	45.7	43.7	49.8	46.4	1.15	2.0	1.0	1	1	1
25	45.5	42.3	40.9	42.9	14.75	3.0	2.0	13	3	2
18	48.3	39.3	41.5	43.0	14.79	1.0	9.0	9	2	3
1	42.9	40.9	41.1	41.6	18.73	7.0	5.0	11	4	4
4	41.7	40.2	42.1	41.3	19.29	10.0	6.0	7	6	5
5	41.0	39.4	42.7	41.0	20.37	11.0	8.0	6	9	6
10	42.6	39.5	41.1	41.1	20.92	8.0	7.0	12	7	7
20	44.0	40.9	39.6	41.5	21.68	5.0	4.0	18	5	8
6	42.3	34.9	45.8	41.0	21.71	9.0	18.0	2	10	9
23	44.8	34.3	44.1	41.1	22.19	4.0	19.0	4	8	10
11	40.3	35.3	44.6	40.0	27.23	12.0	17.0	3	12	11
7	43.6	35.9	39.7	39.7	30.78	6.0	13.0	17	13	12
8	39.0	38.8	41.2	39.6	30.96	15.0	10.0	10	14	13
24	38.9	41.5	40.1	40.1	31.53	17.0	3.0	16	11	14
16	40.2	35.3	40.6	38.7	36.78	13.0	16.0	15	15	15
22	38.9	38.1	39.0	38.7	39.50	16.0	11.0	20	16	16
19	39.2	35.9	39.3	38.1	42.47	14.0	14.0	19	18	17
13	37.1	33.4	44.0	38.2	44.07	18.0	22.0	5	17	18
3	35.3	34.0	41.9	37.1	54.05	24.0	20.0	8	19	19
14	36.2	35.6	38.4	36.7	56.84	23.0	15.0	21	20	20
21	37.1	34.0	37.4	36.2	62.26	19.0	21.0	23	21	21
15	36.9	30.2	40.7	35.9	65.74	20.0	25.0	14	23	22
12	36.3	36.2	35.6	36.0	66.92	22.0	12.0	24	22	23
9	36.8	31.0	37.5	35.1	73.97	21.0	24.0	22	24	24
2	34.5	31.3	35.6	33.8	91.29	25.0	23.0	25	25	25
Moyenne	40.4	36.9	41.0	39.4						
Ppds5%	6.4									

Tableau 25. Valeurs moyennes (Xij) de la PSFE par campagne, moyennes des trois campagnes, valeurs de l'indice Pi et classement des différentes variétés par campagne, en moyenne des trois campagnes et selon les valeurs de l'indices Pi.

PSFE	Xij					Classement variétal				
GEN	2017	2018	2019	Xi.	Pi	2017	2018	2019	Xi.	Pi
8	44.3	32.4	33.7	36.8	5.1	1.0	5.0	12.0	1.0	1.0
18	38.4	31.8	38.5	36.2	7.6	5.0	11.0	2.0	2.0	2.0
12	40.2	31.9	34.1	35.4	8.0	2.0	10.0	10.0	4.0	3.0
6	37.4	31.2	38.6	35.7	10.4	6.0	14.0	1.0	3.0	4.0
1	36.3	34.3	34.0	34.9	14.2	11.0	2.0	11.0	5.0	5.0
14	35.7	30.7	36.4	34.2	16.5	12.0	20.0	5.0	8.0	6.0
9	38.6	29.1	32.8	33.5	16.9	4.0	24.0	15.0	12.0	7.0
3	34.9	31.0	37.6	34.5	17.9	17.0	17.0	3.0	6.0	8.0
7	35.0	32.7	34.2	34.0	18.6	15.0	4.0	8.0	11.0	9.0
10	38.8	30.1	30.9	33.2	19.2	3.0	22.0	22.0	15.0	10.0
16	37.2	31.0	31.5	33.2	19.7	9.0	15.0	20.0	16.0	11.0
22	37.3	32.2	30.6	33.4	20.1	8.0	6.0	24.0	14.0	12.0
21	33.9	32.2	36.6	34.2	20.2	21.0	7.0	4.0	9.0	13.0
2	35.2	31.9	33.3	33.5	20.2	14.0	9.0	13.0	13.0	14.0
20	36.8	35.1	30.5	34.1	20.4	10.0	1.0	25.0	10.0	15.0
13	37.4	31.4	30.8	33.2	20.4	7.0	13.0	23.0	17.0	16.0
17	35.4	31.0	32.9	33.1	21.3	13.0	16.0	14.0	18.0	17.0
23	33.1	34.3	35.7	34.4	22.3	23.0	3.0	6.0	7.0	18.0
5	34.1	30.9	34.1	33.0	23.7	19.0	18.0	9.0	19.0	19.0
11	34.9	30.7	32.2	32.6	24.6	16.0	21.0	17.0	20.0	20.0
19	33.9	31.7	32.1	32.6	26.9	20.0	12.0	19.0	21.0	21.0
24	34.5	30.9	31.3	32.3	27.6	18.0	19.0	21.0	22.0	22.0
25	33.7	26.9	34.4	31.7	32.8	22.0	25.0	7.0	23.0	23.0
4	31.9	30.0	32.1	31.4	36.8	24.0	23.0	18.0	24.0	24.0
15	27.6	32.0	32.7	30.8	53.9	25.0	8.0	16.0	25.0	25.0
Moyenne	35.9	31.5	33.7	33.7						
Ppds5%	5.8									

Le coefficient de variation résiduel (CV_E) prend des valeurs supérieures à 10%, suggérant un effet environnement. Les CV_P et CV_G sont faibles étant inférieurs à 10%. En dehors du contenu en chlorophylle dont H^2sl est juste moyenne, celles de la TRE, la MTS et le PSF sont faibles engendrant des gains génétiques attendus en sélection inférieurs à 4% (Tableau 21).

2.1.6. TEMPERATURE DE LA CANOPEE (TCV) ET PERTES D'EAU DES FEUILLES EXCISEES (ELWL)

L'analyse de la variation des valeurs relatives à la température de la canopée (TCV, °C) et à la perte relative d'eau des feuilles excisées (ELWL, %) indique un effet génotype significatif. Les valeurs moyennes variétales ainsi que les écarts de la moyenne générale de chaque caractère sont donnés en figures 17 et 18. Les moyennes de la TCV varient de 20.2°C (variété Waha # 1) à 24.9°C (variété # 20, Figure 17), avec une moyenne globale de 22.8°C et une Ppds5% de 1.4°C.

Les variétés #1, #9 et #24, enregistrent une température moyenne inférieure de 1.5 à 2.7°C par rapport à la moyenne générale des 25 variétés évaluées. Ces variétés qui sont relativement moins stressées par la température ambiante attirent l'attention sur leur utilisation comme porteuses de gènes contrôlant la tolérance au stress thermique et leur possible emploi comme géniteurs capable de transférer ces gènes à des variétés élites. Comparativement les variétés les plus sensibles affichent des écarts positifs variant de 1.6°C (variété #16) à 2.1°C (Variété #20).

Les moyennes de la perte d'eau des feuilles excisées varient de 23.6% (variété # 3) à 55.3% (variété # 16, Figure 18), avec une moyenne globale de 37.1% et une Ppds5% de 2.3%. Les variétés #3, #6 et #7, enregistrent une perte moyenne relative de -13.8, -13.3 et -10.8% par rapport à la moyenne générale des 25 variétés évaluées.

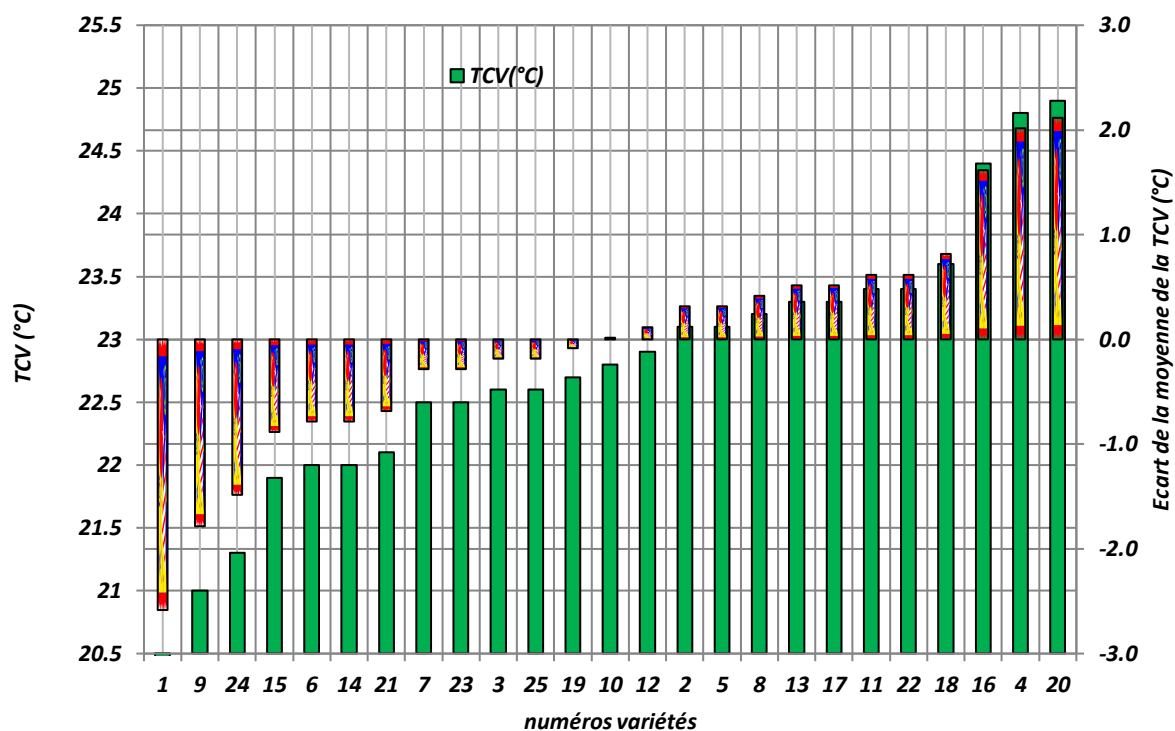


Figure 17. Moyennes et écarts de la moyenne générale de la température de la canopée (TCV) des 25 variétés évaluées au cours de la campagne 2019.

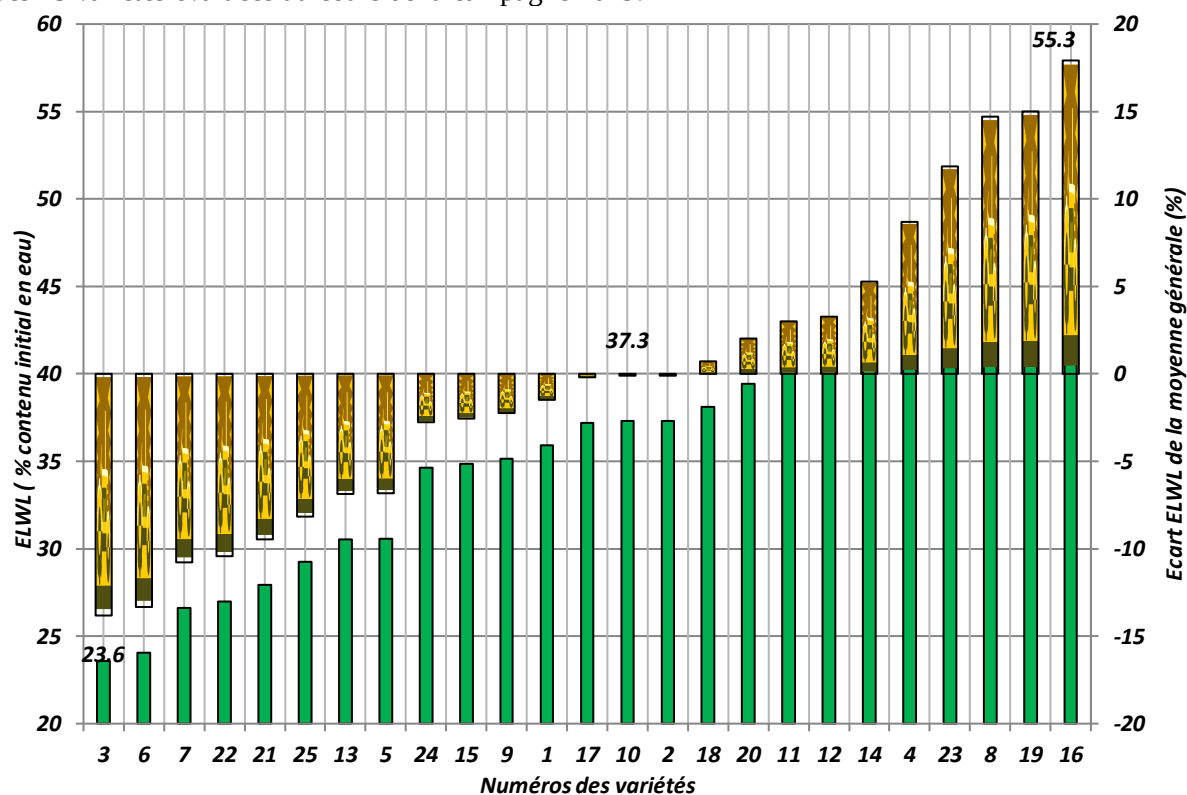


Figure 18. Moyennes et écarts de la moyenne générale du taux de déperdition de l'eau des feuilles excisées (ELWL, %) des 25 variétés évaluées au cours de la campagne 2019.

Ces variétés montrent une capacité à tolérer les stress thermique et hydrique. Elles limitent les pertes en eau par transpiration et maintiennent leur statut hydrique en économisant l'eau qu'elles contiennent. Comme cette caractéristique est sous contrôle génétique, ces variétés peuvent servir de géniteurs pour améliorer la tolérance des stress abiotiques chez le matériel végétal plus performants mais sensible. Comparativement les variétés les plus sensibles affichent des écarts positifs variant de 14.7% (variété #8) à 17.9% de perte du contenu en eau (Variété #16, Figure 18).

En ce qui concerne l'étude de la variabilité des variables mesurées, les résultats de la présente étude indiquent que les conditions pédoclimatiques déterminent largement le niveau d'expression des variables mesurées dont l'effet environnement est hautement significatif, en dehors de celui du contenu en chlorophylle (CHL) de la feuille étendard. L'effet marquant de l'environnement est suggéré par l'importance de la contribution de cette source de variation à l'explication de la variation totale pour le RDT (82.90%), le NE (56.28%), le NGM² (77.43%), le NGE (71.42%), le PNE (94.37%), la DPV (93.62%), la BIO (72.25%), le RDTeco (82.93%), la PHT (91.94%) et la SFE (72.50%). En moyenne de l'ensemble des caractères analysés, l'effet génotype explique 8.67% et l'interaction contribue pour 12.2% à l'explication de la variation totale.

L'effet résiduel, notamment celui des variables mesurant la tolérance des stress (MTS, TRE, CHL et PSF), est relativement élevé, variant de 23.50 à 55.93% , suggérant qu'il faut augmenter le nombre de répétitions pour améliorer la précision de mesure de ces variables et pouvoir détecter les différences génotypiques significatives. L'effet génotype n'est significatif que pour la DPV, le PMG et la SFE, suggérant que la sélection de ces caractères pour l'adaptation générale est possible, alors que pour le reste des variables analysés la signification statistique de l'interaction GxE signifie que la sélection doit se faire pour l'adaptation spécifique.

Comme l'environnement est représenté par l'effet campagne la sélection pour l'adaptation spécifique est onéreuse laissant la place à la recherche d'une meilleure stabilité des performances, associée à la minimisation des écarts entre le génotype sélectionné et le génotype le plus performant par environnement.

Les valeurs prises par le coefficient de la variation résiduelle est faible (<10%) pour HI (10.1 %), le NGM² (9.8 %), le RDT(9.2 %), le PNE(8.5 %), le NE(7.0 %), le NGE(5.8 %), le RDTeco(5.4%), la BIO(5.2%), la PHT(3.5%), le PMG(2.9%), et la DPV(0.5%), suggérant une meilleure maîtrise des mesures de la variabilité de ces caractères. Par contre les valeurs du CVe des variables physiologiques dont la CHL (11.6 %), la TRE (12.0 %), le PSFE (12.4 %), la SFE (12.6 %) et la MTS (18.2 %) sont élevées (>10%). L'augmentation du nombre de répétitions est suggérée pour ces variables pour détecter des différences génotypiques.

Le CVg est globalement faible en valeurs pour l'ensemble des variables analysées. Il est nul pour PLL, HI et NGM², induisant une H²sl, un GGA nuls. La variation observée de ces dernières variables citées est surtout d'origine environnementale vu que la variance génétique est nulle en valeur. Le ratio CVg/CVe n'est supérieur à l'unité que pour le PMG (2.0) et la DPV (1.5) suggérant pour ces deux variables une plus grande variabilité d'origine génétique qu'environnementale. Fellahi et al., (2018) mentionnent une faible valeur de ratio CVg/CVe est un indicateur de l'effet dominant de l'environnement sur la plante. Selon Fellahi et al., (2018) la durée effective de la phase végétative est fortement réduite sous conditions stressantes de fin de cycle de la culture en conditions semi arides, ceci affecte la variabilité de cette variable qui est la DPV.

Les valeurs de H²sl de la plupart des variables analysées dans la présente étude sont faibles. Ces résultats s'opposent à ceux de Salmi et al., (2019) qui trouvent une héritabilité au sens large élevée pour la durée de la phase végétative et la hauteur de la végétation, moyenne pour le nombre de grains par épi et le nombre d'épis et faible pour le rendement en grains et la biomasse aérienne. Ces différences des résultats peuvent résulter de l'origine du matériel étudiée, de la nature de l'unité mesuré, plante ou unité de surface, et de la présence ou l'absence de l'interaction GxE qui affecte fortement H²sl.

Les résultats montrent aussi que l'expression de la plupart des variables analysées est sujette à l'interaction GxE. Cette interaction s'exprime sous forme de performances significativement différentes d'un environnement à l'autre associées à des changements de rangs des génotypes évalués. Dans ce contexte la présence de l'interaction GxE est mentionnée par plusieurs auteurs dont (Kang et al., 2006; Yan et al., 2007; Sharma et al., 2012; Kebede et Getahun, 2017). Benmahammed et al., (2010b) ont étudié le rendement de 15 génotypes, Ils ont noté que le changement de classement des génotypes d'une année à l'autre

et notamment ceux qui présentent les meilleurs rendements grains. Ce qui indique la présence de l'interaction GxE. Les résultats de la présente étude est corroboré avec celle Hannachi et al., (2019) qui ont trouvé un effet significatif de l'interaction $G \times E$, et les effets de l'environnement est hautement significatifs. Ces derniers rapportent que l'environnement est le facteur principal qui influence les rendements du blé dur. L'interaction GxE complique la sélection puisqu'elle ne permet pas d'identifier le génotype qui se classe le mieux quelque soit l'environnement.

Yan et al., (2007) mentionnent que l'expression des performances génotypiques est généralement influencée par l'effet environnement (E), l'effet génotype (G) et leur interaction (GxE). Ces auteurs suggèrent que l'interaction GxE doit être étudiée pour déterminer les génotypes potentiellement performants et stables. Haddad et al., (2016) ainsi que Kebede et Getahun, (2017) rapportent que la présence de l'interaction GxE significative réduit la corrélation entre phénotype et génotype et la confiance placée dans un génotype ciblé, rendant la sélection moins efficace.

Ces résultats rejoignent ceux de Kebede et Getahun, (2017) qui rapportent que les effets environnement, génotype et leur interaction contribuent respectivement pour 69.80%, 8.80% et 21.40%, à l'explication de la variation totale du rendement. Haddad et al., (2016) trouvent que les effets E, G et l'interaction GxE expliquent 79.98%, 6.19% et 13.83% du total de la variation observée du rendement. En présence d'une interaction GxE significative Kang et al., (2006) suggèrent de sélectionner pour l'adaptation spécifique au détriment de l'adaptation générale. Ceci n'est pas possible lorsque l'environnement est représenté par l'année, obligeant de cibler les génotypes à large adaptation, comme c'est le cas de la présente étude.

Suite au peu de ressemblance entre environnement, la sélection par campagne identifie différentes variétés comme étant les meilleures par caractère, suggérant l'inefficacité d'une telle approche. Par contre la sélection basée sur la moyenne des trois campagnes est proche de la sélection basée sur l'indice Pi. Rares sont les variétés qui accumulent plusieurs caractéristiques désirables à la fois, ainsi sur les 25 variétés évaluées 17 (#1, 2, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 21, 23, 24 et 25) ont été sélectionnées au moins sur la base d'une des 17 variables mesurées. Parmi ces variétés, les génotypes #2, #14 et #24 ont été sélectionnées pour plus de 5 caractères. L'avantage de la sélection sur la base de l'indice Pi associe le potentiel de rendement à la régularité de la production d'un environnement à l'autre.

2.2. LIAISONS INTER CARACTERES

Les valeurs des coefficients de corrélations phénotypiques, calculés par campagne vu que l'interaction GxE est significative, sont données au tableau 26. L'analyse de ces coefficients indique, qu'indépendamment de la campagne d'étude, RDT est lié positivement et significativement avec NE, NGM² et avec RDT_{eco}. La liaison de ce caractère (RDT) avec NGE, BIO, PNE n'est significative et positive que deux campagnes sur trois années ; alors que la liaison avec le PMG, la DPV, HI, SFE et PSFE n'est significative qu'une campagne sur trois. La variabilité du RDT est indépendante de PLL, PHT, TRE, MTS, et CHL, dont les liaisons avec ces variables sont non significatives quelque soit la campagne d'étude considérée (Tableau 26).

Les résultats de cette étude suggèrent que NE, caractère qui peut être aisément visuellement apprécié, se présente comme un bon indicateur de la capacité de rendement et discrimine efficacement entre variétés pour cette caractéristique. NGM² et RDT_{eco}, semblent jouer le même rôle mais ils sont plus complexes à mesurer. Le plus souvent NGE, BIO et PNE sont révélateurs du potentiel de rendement alors PMG, la DPV, HI, SF et PSF ne le sont qu'occasionnellement (Tableau 26).

Tableau 26. Valeurs des coefficients de corrélations phénotypiques des différentes paires de variables mesurées par campagne d'étude.

		<i>RDT</i>	<i>NE</i>	<i>PMG</i>	<i>NGM²</i>	<i>NGE</i>	<i>PNE</i>	<i>DPV</i>	<i>BIO</i>	<i>HI</i>	<i>PLL</i>	<i>RECO</i>	<i>PHT</i>	<i>SF</i>	<i>TRE</i>	<i>MTS</i>	<i>CHL</i>
<i>NE</i>	2017	0.447	1.000														
	2018	0.641	1.000														
	2019	0.615	1.000														
<i>PMG</i>	2017	-0.099	0.071	1.000													
	2018	-0.392	-0.385	1.000													
	2019	0.421	0.326	1.000													
<i>NGM²</i>	2017	0.902	0.348	-0.512	1.000												
	2018	0.905	0.638	-0.739	1.000												
	2019	0.860	0.470	-0.096	1.000												
<i>NGE</i>	2017	0.701	-0.169	-0.533	0.838	1.000											
	2018	0.583	-0.077	-0.587	0.689	1.000											
	2019	0.232	-0.469	-0.457	0.531	1.000				r table							
<i>PNE</i>	2017	0.793	0.566	0.056	0.655	0.395	1.000			5%	0.396						
	2018	0.593	0.484	-0.538	0.701	0.420	1.000			1%	0.505						
	2019	0.165	0.517	-0.003	0.159	-0.307	1.000										
<i>DPV</i>	2017	-0.096	0.132	-0.595	0.160	0.053	-0.084	1.000									
	2018	-0.158	-0.229	-0.327	0.044	0.206	0.356	1.000									
	2019	-0.503	-0.412	-0.539	-0.254	0.175	0.017	1.000									
<i>BIO</i>	2017	0.409	0.665	0.236	0.235	-0.070	0.685	-0.028	1.000								
	2018	0.693	0.510	-0.326	0.659	0.348	0.722	0.085	1.000								
	2019	0.292	0.661	0.026	0.301	-0.301	0.464	-0.092	1.000								
<i>HI</i>	2017	0.661	-0.084	-0.282	0.698	0.760	0.220	-0.027	-0.397	1.000							
	2018	0.211	0.079	-0.070	0.171	0.202	-0.267	-0.238	-0.546	1.000							
	2019	0.437	-0.163	0.223	0.357	0.468	-0.305	-0.212	-0.718	1.000							
<i>PLL</i>	2017	-0.022	0.519	0.305	-0.166	-0.406	0.398	0.014	0.904	-0.745	1.000						
	2018	0.386	0.331	-0.221	0.390	0.154	0.627	0.188	0.933	-0.804	1.000						
	2019	-0.037	0.481	-0.117	0.020	-0.394	0.429	0.076	0.945	-0.900	1.000						
<i>RECO</i>	2017	0.839	0.663	0.082	0.677	0.376	0.881	-0.074	0.839	0.158	0.525	1.000					
	2018	0.912	0.622	-0.388	0.843	0.500	0.718	-0.034	0.927	-0.201	0.730	1.000					
	2019	0.741	0.794	0.244	0.672	-0.087	0.414	-0.334	0.859	-0.270	0.644	1.000					
<i>PHT</i>	2017	0.032	0.258	0.165	-0.044	-0.133	0.201	-0.310	0.470	-0.356	0.500	0.299	1.000				
	2018	-0.274	-0.011	-0.039	-0.184	-0.213	-0.142	-0.085	-0.083	-0.181	0.031	-0.189	1.000				
	2019	0.293	0.392	0.113	0.254	-0.044	0.106	-0.232	0.276	-0.080	0.188	0.351	1.000				
<i>SF</i>	2017	0.543	0.155	0.201	0.389	0.304	0.495	-0.464	0.368	0.187	0.148	0.542	0.133	1.000			
	2018	-0.051	-0.010	-0.043	-0.016	-0.003	-0.018	0.172	-0.021	-0.062	-0.001	-0.038	0.291	1.000			
	2019	-0.203	-0.171	-0.290	-0.081	0.116	-0.049	0.073	-0.150	-0.006	-0.088	-0.215	0.069	1.000			
<i>TRE</i>	2017	0.054	0.214	0.531	-0.175	-0.300	0.290	-0.298	0.496	-0.382	0.518	0.328	0.210	0.368	1.000		
	2018	-0.178	-0.256	0.023	-0.121	0.076	0.042	0.217	-0.258	0.139	-0.241	-0.239	-0.247	-0.130	1.000		
	2019	0.002	-0.097	0.259	-0.145	-0.037	-0.132	-0.433	-0.118	0.022	-0.123	-0.082	0.050	0.129	1.000		

<i>MTS</i>	2017	-0.114	0.093	0.209	-0.176	-0.223	0.056	-0.283	0.257	-0.359	0.335	0.085	0.358	-0.031	0.450	1.000	
	2018	-0.143	-0.148	0.424	-0.321	-0.200	-0.345	-0.319	-0.203	0.100	-0.188	-0.190	-0.300	-0.129	0.083	1.000	
	2019	-0.040	0.261	0.007	-0.077	-0.329	0.190	0.018	0.278	-0.247	0.304	0.174	-0.106	0.105	-0.004	1.000	
<i>CHL</i>	2017	0.124	-0.105	-0.084	0.151	0.267	0.187	-0.160	0.155	-0.023	0.112	0.167	0.185	0.091	0.113	-0.155	1.000
	2018	-0.109	0.182	0.176	-0.170	-0.377	0.001	0.098	-0.144	0.095	-0.130	-0.138	-0.020	-0.069	-0.132	0.064	1.000
	2019	-0.246	-0.339	-0.384	-0.039	0.245	-0.122	0.316	-0.164	0.001	-0.088	-0.247	-0.403	0.151	-0.315	-0.181	1.000
<i>PSF</i>	2017	-0.429	-0.214	0.014	-0.377	-0.278	-0.505	-0.075	-0.498	-0.012	-0.344	-0.552	-0.089	-0.601	-0.164	-0.024	0.011
	2018	0.167	0.056	-0.068	0.159	0.138	0.252	0.026	0.155	-0.053	0.115	0.175	-0.105	0.101	-0.014	-0.067	-0.064
	2019	-0.134	-0.102	0.082	-0.184	-0.072	0.005	0.053	-0.008	-0.081	0.038	-0.077	-0.458	0.036	0.139	0.013	0.092

RDT=rendement en grains, NE= nombre d'épis/m², NGE=Nombre de grains par épi, PMG= Poids de 1000 grains, NGM²= nombre de grains par m², PNE =poids des épis, BIO= biomasse aérienne, HI= indice de récolte, PLL= poids paille, RDTeco= rendement économique, TRE=teneur relative en eau, SFE=surface feuille étandard, PSFE=poids spécifique feuille étandard, MTS= thermostabilité membranaire.

En plus de ses effets sur RDT, le NE semble être révélateur du PNE, de la BIO et du RDT_{eco} , avec qui il présente des liaisons significatives et positives quelque soit la campagne d'étude. Au cours de deux campagnes sur trois il agit positivement sur NGM^2 et PLL ; et une campagne sur trois, il semble affecter négativement la DPV et le NGE (Tableau 26).

Ainsi ces résultats suggèrent que la sélection du NE change RDT, PNE, BIO, RDT_{eco} ; elle induit souvent des changements positifs du NGM^2 et de la PLL et parfois, selon l'environnement, son augmentation est accompagnée par une réduction de NGE et de DPV. Le PMG est lié significativement et négativement, avec NGE lors des trois campagnes et au cours de deux campagnes sur trois, avec NGM^2 et DPV, et une campagne sur trois, il affecte négativement PNE et positivement TRE et MTS (Tableau 26).

Ces résultats suggèrent qu'une amélioration du PMG se fait, le plus souvent, au détriment du NGE. Elle induit une réduction du NGM^2 , probablement par compensation, et une réduction de la DPV. La nature de la liaison de ce caractère avec TRE et MTS, quoique moins fréquentes puisque dépendante de l'environnement, mérite d'être mieux étudiée comme moyen pour améliorer la présence des gènes qui contrôle la résistance au stress abiotique sous conditions semi-arides sud méditerranéennes. Ceci est d'autant plus intéressant que d'autres études Fellahi et al., (2017) et Hannachi, (2017) réalisées sous les mêmes conditions stressent plutôt l'absence de liaisons entre la productivité et la tolérance des stress abiotiques.

Le NGM^2 est positivement et significativement lié avec NGE et RDT_{eco} , au cours des trois campagnes. Il est aussi lié à PNE au cours des deux campagnes et au cours d'une seule campagne, il présente des liaisons positives et significatives avec BIO et HI (Tableau 26). En dehors de ses liaisons élevées avec PMG et NGM^2 , NGE est positivement et significativement lié à HI, au cours des deux campagnes, et au cours d'une seule campagne, il est lié positivement à PNE et à RDT_{eco} et négativement à PLL (Tableau 26). Au contraire du NGM^2 , NGE est un caractère facilement appréciable visuellement, il peut de ce fait servir comme indicateur de la capacité génotypique de répartition de la biomasse entre le grain et la paille.

Le poids des épis (PNE) est positivement et significativement corrélé avec BIO, PLL, RDT_{eco} , lors des trois campagnes, indiquant l'indépendance de cette relation de

l'effet environnement. La variabilité de PNE est dépendante du nombre des épis et de la masse de l'épi. La masse de l'épi est aussi dépendante du poids individuel du grain et de la fertilité de l'épi, mesurée par NGE. Ce caractère est, de ce fait, difficilement mesurable, au même titre que RDT, RDT_{eco}, BIO ou NGM².

Dans le cas où les fréquences des liaisons de PNE avec NE ($r_{NE/PNE}$ significatif deux campagnes sur trois) et avec NGE ($r_{NGE/PNE}$ significatif une campagne sur trois, Tableau 26), décrites plus haut, se répètent dans le temps, la sélection sur la base de NE identifient le plus souvent des génotypes qui se caractérisent par des valeurs moyennes élevées de RDT, BIO, RDT_{eco}, NGM² et PNE. Lors de la campagne 2016/17, PNE est positivement corrélé avec SFE et négativement avec PSFE (Tableau 26). Cette liaison suggère que la structure et les dimensions de la feuille étendard influent sur PNE, lors de certaines campagnes. Ainsi ces résultats indiquent qu'une feuille étendard aux larges dimensions, présente un faible PSFE, et favorise l'expression d'un PNE élevé.

Les résultats de la présente étude indiquent qu'une longue durée de la phase végétative (DPV) est, parfois (1 campagne sur 3), associée négativement à SFE, MTS, et au RDT, NE et NGM², comme cité plus haut (Tableau 26). La réduction de la durée de cette phase est désirable pour minimiser les effets des stress thermiques et hydriques de fin de cycle de la culture. En plus de ces liaisons, déjà précédemment citées avec NE, PNE, et à degré moindre avec RDT, BIO présente des liaisons positives et significatives, au cours des trois campagnes, avec PLL et RDT_{eco}, et négative avec HI. Elle montre une liaison positive avec PHT et avec TRE, lors d'une seule campagne ainsi qu'une liaison négative avec PSFE (Tableau 26). HI est négativement lié à PLL qui est positivement liée au RDT_{eco}.

En plus de la DPV, la PHT, la SFE, la TRE, la MTS, la CHL et la PSFE montrent peu de liaisons avec le rendement et les composantes des 25 variétés de blé dur évaluées dans la présente étude. Les causes probablement sont l'absence de variabilité pour la PHT, suite à la présence des gènes de nanisme dans le matériel génétique récent, qui accuse une réduction assez élevée de la durée de DPV. Le matériel végétal récent a été sélectionné surtout pour le RDT, le NGE, la BIO, le NGM² et HI, et de ce fait porte peu de variabilité pour les gènes contrôlant les caractères conditionnant la résistance aux stress abiotiques, comme la TRE, la CHL et la MTS.

Les résultats de l'analyse des corrélations indiquent qu'indépendamment de l'environnement test le RDT est lié positivement et significativement avec le NE, le NGM² et avec le RDT_{eco}. Les liaisons de ce caractère avec le NGE, la BIO, le PNE, le PMG, la DPV, HI, la SFE et le PSFE sont dépendantes de l'environnement. Ces résultats rejoignent partiellement ceux de Mansouri, et al., (2018) qui rapportent une corrélation positive et significative entre le rendement en grains et la biomasse aérienne, et entre le rendement en grains et le poids des épis, et suggèrent la possibilité d'utiliser la biomasse ou le poids des épis comme critère de sélection pour améliorer indirectement le rendement en grains. Graziani et al., (2014) mentionnent que parmi les composantes du rendement en grains, le nombre de grains/m² montre la corrélation la plus élevée en valeur avec le rendement en grains. Les résultats de Keyvan, (2010) s'oppose avec la présente étude qui a trouvé une corrélation hautement significative entre RDT et CHL et entre RDT et TRE. Dans les conditions sévères les variétés qui ont une teneur relative en eau et un contenu en chlorophylle élevées sont résistantes au stress hydrique et leur rendement est stable (Keyvan, 2010).

L'expression du RDT est indépendante de celle de la PLL, de la PHT, de la TRE, de la MTS et de la CHL. Ces résultats corroborent ceux de Mansouri et al., (2018) qui observent l'absence de corrélation significative entre la hauteur de la végétation et le rendement en grains, suggérant que la sélection de génotype de courte paille ne pénalise pas le rendement en grains.

Mohsin et al., (2009) notent que le rendement en grains est positivement corrélé avec la surface de la feuille étandard, la hauteur de la végétation, le nombre d'épis/m², le nombre de grains par épi et avec l'indice de récolte. Fellahi et al., (2018) rapportent une corrélation positive entre le rendement en grains d'une part, et la biomasse et le nombre d'épis d'autre part. Ces auteurs commentent qu'une amélioration de la biomasse, en particulier la fraction représentée par le nombre d'épis/m², contribuera significativement à l'amélioration indirecte du rendement en grains. Selon Oulmi et al., (2016) la biomasse aérienne apparaît comme un déterminant du rendement en grain. Royo et al., (2009) mentionnent que l'amélioration des performances de rendement en grains fait suite à l'amélioration de l'indice de récolte et du nombre de grains/m² via une augmentation du nombre d'épis/m² et du nombre de grains par épi.

Le NE est révélateur du PNE, de la BIO et du RDT_{eco} , quelque soit l'environnement test, par contre ses liaisons avec le NGM^2 et la PLL, la DPV et le NGE sont dépendantes de l'environnement test. Le PMG est négativement lié au NGE indépendamment de l'environnement, la signification statistique de ses liaisons avec le NGM^2 , la DPV, le PNE, la TRE et la MTS varie en fonction de l'environnement.

Fellahi et al., (2018) notent que le nombre d'épis/m² est positivement corrélé avec la paille, alors que le nombre de grains est négativement lié au poids de 1000 grains et à la hauteur de la végétation. Le NGM^2 est lié avec le NGE et le RDT_{eco} , dans les trois environnements d'étude. Ses liaisons avec le PNE, la BIO et HI dépendent de l'environnement. Les liaisons du NGE avec HI, la PNE, le RDT_{eco} et la PLL dépendent de l'environnement. Le PNE est corrélé avec la BIO, la PLL et le RDT_{eco} , dans les trois environnements. Les liaisons de la DPV avec SFE, la MTS, le RDT, le NE et le NGM^2 varient selon l'environnement.

2.3. ANALYSE EN CHEMIN (PATH ANALYSIS)

2.3.1. CAMPAGNE 2016/17

Suite à la présence de l'interaction GxE, l'analyse en chemin a été faite par campagne, selon deux modèles, l'un intégrant le RDT en fonction du NE, le NGE, le PMG, la BIO et HI, et le second cible la BIO en fonction de la PLL, la PHT, la TRE, la MTS, la CHL, le PNE et la DPV. Les paramètres du modèle intégrant le RDT en fonction du NE, du NGE, du PMG, de la BIO et HI sont indiqués au tableau 27 et ceux relatifs au modèle intégrant la BIO en fonction de la PLL, la PHT, la TRE, la MTS, la CHL, le PNE et la DPV sont donnés au tableau 28.

L'étude des données du tableau 27 indique que les 5 variables indépendantes (NE, NGE, PMG, BIO et HI) affectent significativement la variabilité du RDT, comme l'indique le F de table significatif au seuil de 1%. Les coefficients partiels de régression (β) de ces 5 variables varient de 0.058, effet direct du PMG, à 0.824, valeur de l'effet direct de HI. Ces valeurs indiquent que la variabilité du RDT est significativement plus influencée directement par la variabilité de la BIO et de HI, que par la variation des trois autres variables (NE, PMG et NGE), comme le suggèrent les valeurs observées du t calculé (Tableau 27).

Tableau 27. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $RDT = f(NE, NGE, PMG, BIO, HI)$, des données de la campagne 2017.

Coefficients de corrélations						
	<i>RDT</i>	<i>NE</i>	<i>PMG</i>	<i>NGE</i>	<i>BIO</i>	<i>HI</i>
RDT	1.000					
NE	0.447	1.000				
PMG	-0.099	0.071	1.000			
NGE	0.701	-0.169	-0.533	1.000		
BIO	0.409	0.665	0.236	-0.070	1.000	
HI	0.661	-0.084	-0.282	0.760	-0.397	1.000
Régression multiple $RDT = f(NE, PMG, NGE, BIO, HI)$						
<i>Source</i>	<i>Ddl</i>	<i>SCE</i>	<i>CME</i>	<i>F</i>	<i>Prob</i>	
Régression	5	23.36	4.67	138.57	0.00	
Résidus	19	0.64	0.03			
Total	24	24				
Coefficients de régression bêta, écart de bêta, t obs, prob t obs et r-β						
	<i>β</i>	<i>ET β</i>	<i>Tobs</i>	<i>Prob t</i>	<i>r-β</i>	
Constante	0.000	0.04	0.00	1.00		
NE	0.093	0.11	0.86	0.40	0.35	
PMG	0.058	0.08	0.71	0.48	-0.16	
NGE	0.168	0.17	1.01	0.33	0.53	
BIO	0.672	0.14	4.79	0.00	-0.26	
HI	0.824	0.16	5.29	0.00	-0.16	
Effets direct (diagonale) et indirects sur RDT via NE, PMG, NGE, BIO et HI						
	NE	PMG	NGE	BIO	HI	r (RDT)
NE	0.093	0.004	-0.027	0.447	-0.069	0.447
PMG	0.007	0.058	-0.084	0.159	-0.232	-0.099
NGE	-0.016	-0.031	0.168	-0.047	0.626	0.701
BIO	0.062	0.014	-0.011	0.672	-0.327	0.409
HI	-0.008	-0.016	0.120	-0.267	0.824	0.661

L'analyse de la somme des effets indirects déterminée par la différence entre ($r_{RDT/Y_i} - \beta_{Y_i}$) indique que le NE et le NGE présentent des effets indirects assez appréciables alors le PMG montre des effets direct et indirects faibles suggérant l'indépendance de caractère vis-à-vis de la variation du rendement en grains.

La subdivision de la somme des effets indirects selon les variables indépendantes, indique que le coefficient de corrélation liant le NE au RDT est constitué essentiellement de la contribution de ce caractère via BIO. Le coefficient de corrélation non significatif liant le

PMG au RDT est composé d'effets indirects faibles et contrastés, l'un positif via la BIO et l'autre négatif via HI.

Le coefficient de corrélation hautement significatif liant le NGE au RDT est composé d'un faible effet direct et d'un effet indirect positif très élevé via HI. La contribution de la BIO au RDT est faite d'un effet direct positif très élevé, associée à un effet indirect négatif, appréciable, via HI. Ce dernier caractère présente un effet direct positif, le plus élevé, associé à des effets indirects moyens, l'un négatif via la BIO et l'autre positif via le NGE (Tableau 27).

En résumé, lors de la campagne 2016/17, la variation du RDT est causée par des effets directs positifs et élevés de HI (0.824), la BIO (0.672) et faible du NGE (0.158) ; et des effets indirects positifs du NE via BIO (0.447), du PMG via BIO (0.159), du NGE via HI (0.626) et de HI via NGE (0.120). Les effets indirects négatifs sont causés par le PMG via HI (-0.232), la BIO via HI (-0.327) et HI via BIO (-0.26).

Ces résultats indiquent que le couple de caractères BIO et HI est déterminant dans la réalisation du potentiel de RDT. Ce couple de caractères peut être approché en sélection par l'amélioration concomitante du NE et du NGE sous forme d'un indice, vu que ces deux caractères (NE et NGE) sont parfois négativement corrélés ou sont sujets au phénomène de compensation.

L'analyse de la régression multiple du modèle intégrant BIO comme variable dépendante en fonction de PLL, PNE, PHT, TRE, MTS, CHL et DPV, introduit comme variables indépendantes, indique que les 7 variables indépendantes expliquent une grande part de la variabilité de la BIO, comme l'indique le F de table significatif au seuil de 1% (Tableau 28). Les coefficients partiels de régression (β) des variables indépendantes varient de -0.014, effet direct de CHL, à 0.754, valeur de l'effet direct de la PLL. Ces valeurs indiquent que la BIO est largement déterminée par la variabilité de la PLL et de PNE (Tableau 28).

L'analyse de la somme des effets indirects indique que la PHT, la TRE, la MTS, le PNE et la CHL contribuent aussi indirectement via d'autres caractères à la formation de la biomasse aérienne, par contre, la DPV reste indépendante de la BIO, suite aux faibles valeurs prises par l'effet direct et les effets indirects de ce caractère (Tableau 28). L'étude de l'effet

direct et des effets indirects de chaque variable indépendante montre que la PLL, dont le coefficient de corrélation avec la BIO est le plus élevé en valeur (0.904), présente un effet direct très élevé en valeur (0.754), associé à un faible effet indirect via le PNE (0.151).

La PHT contribue à la formation de la BIO indirectement via la PLL (0.377). La corrélation entre la BIO et la TRE (0.496) est faite d'une contribution de la TRE via la PLL (0.390) et de ce même caractère via le PNE (0.116). La MTS agit sur la formation de la BIO indirectement via la PLL (0.252) ; alors que la CHL reste indépendante comme la DPV de la biomasse produite.

Le PNE présente un effet direct appréciable (0.400) associé à un effet indirect via la PLL (0.285, Tableau 28). En résumé, les résultats de la campagne 2017 indiquent que la biomasse aérienne est largement déterminée par les contributions directes positives de la PLL et du PNE et des contributions indirectes, positives aussi, de la PHT, la TRE, la MTS et le PNE via la PLL.

Ces résultats suggèrent que la BIO est un caractère complexe dont la formation fait intervenir plusieurs caractéristiques aussi bien morphologiques que physiologiques, elles mêmes difficilement appréciables visuellement dans un programme de sélection où la loi des grands nombres joue un rôle important dans l'amélioration des caractères complexes, sous conditions semi- arides sud méditerranéennes.

Tableau 28. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $BIO = f(PLL, PHT, TRE, MTS, CHL, DPV, PNE)$ des données de la campagne 2017.

Coefficients de corrélations								
	BIO	PLL	PHT	TRE	MTS	CHL	PNE	DPV
BIO	1.000							
PLL	0.904	1.000						
PHT	0.470	0.500	1.000					
TRE	0.496	0.518	0.210	1.000				
MTS	0.257	0.335	0.358	0.450	1.000			
CHL	0.155	0.112	0.185	0.113	-0.155	1.000		
PNE	0.685	0.378	0.201	0.290	0.056	0.187	1.000	
DPV	-0.028	0.014	-0.310	-0.298	-0.283	-0.160	-0.084	1
Régression multiple $BIO = f(PLL, PHT, TRE, MTS, CHL, PNE, DPV)$								
Source	Ddl	SCE	CME	F	Prob F			
Régression	7	22.92	3.27	51.61	0.00			
Résidus	17	1.08	0.06					
Total	24	24						
Coefficients de régression béta, écart de béta, t obs, prob t obs et r-β								
	β	ET β	tobs	Prob t	r _{bio} -β			
Constante	0.000	0.050	0.000	0.000	0.000			
PLL	0.754	0.076	9.895	0.000	0.150			
PHT	0.024	0.068	0.357	0.134	0.446			
TRE	-0.003	0.070	-0.048	0.245	0.499			
MTS	-0.030	0.064	-0.460	0.451	0.287			
CHL	-0.014	0.056	-0.248	0.524	0.169			
PNE	0.400	0.057	7.017	0.000	0.285			
DPV	-0.009	0.062	-0.149	0.412	-0.019			
Effets directs (diagonale) et indirects sur BIO via PLL, PHT, MTS, CHL, PNE et DPV								
	PLL	PHT	TRE	MTS	CHL	PNE	DPV	r(BIO)
PLL	0.754	0.012	-0.002	-0.010	-0.002	0.151	0.000	0.904
PHT	0.377	0.024	-0.001	-0.011	-0.003	0.080	0.003	0.470
TRE	0.390	0.005	-0.003	-0.013	-0.002	0.116	0.003	0.496
MTS	0.252	0.009	-0.002	-0.030	0.002	0.022	0.003	0.257
CHL	0.084	0.005	0.000	0.005	-0.014	0.075	0.001	0.155
PNE	0.285	0.005	-0.001	-0.002	-0.003	0.400	0.001	0.685
DPV	0.011	-0.008	0.001	0.008	0.002	-0.034	-0.009	-0.028

2.3.2. CAMPAGNE 2017/18

L'analyse des résultats de la régression multiple des données de 2017/18 du RDT en fonction des composantes en plus de la biomasse aérienne et de l'indice de récolte indique qu'une grande part ($SCE_{Reg}/SCE_{Totale} = 23.62/24 = 0.9841$ ou 98.41%) de la

variation du rendement en grains est expliquée par la variation des variables indépendantes introduites dans le modèle (Tableau 29).

Les valeurs des coefficients partiels de régression ou Paths (β) varient de 0.204, effet direct du PMG à 0.865 effet direct de la BIO. La somme des effets indirects variant de -0.596, effets indirects du PMG, à 0.388, somme des effets indirects du NE (Tableau 29). Ces résultats indiquent, qu'au cours de la campagne 2017/18, le RDT est largement déterminé par des effets directs de la BIO et de HI. Ces deux caractères interviennent aussi par des effets indirects estimés à -0.172 pour la BIO et à -0.405 pour HI.

La somme des effets indirects du PMG via les autres variables est de -0.596, celle du NE est de 0.388, et celle du NGE est de 0.286 (Tableau 29). L'analyse, de l'effet direct et des effets indirects de chaque variable indépendante, indique que le coefficient de corrélation liant le RDT au NE est la somme d'un effet direct moyen d'une valeur de 0.253 associé à un effet indirect élevé d'une valeur de 0.441 via la BIO. La corrélation, de signe négative, entre le RDT et le PMG, est faite d'un faible effet direct positif d'une valeur de 0.204, associé à des effets indirects, faibles et négatifs, via le NGE (-0.174) et via la BIO (-0.282).

Le NGE agit sur le RDT par un faible effet direct positif (0.296) associé à des effets indirects faibles et négatif via le PMG (-0.120) et positif via HI (0.125) et moyen et positif via la BIO (0.301). La BIO présente un effet indirect négatif et élevée via HI (-0.338) et des effets indirects faibles et positifs via le NE (0.129) et via le NGE (0.103) (Tableau 29).

Tableau 29. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $RDT = f(NE, NGE, PMG, BIO, HI)$, des données de la campagne 2018.

Coefficients de corrélations						
	<i>RDT</i>	<i>NE</i>	<i>PMG</i>	<i>NGE</i>	<i>BIO</i>	<i>HI</i>
RDT	1.000					
NE	0.641	1.000				
PMG	-0.392	-0.385	1.000			
NGE	0.583	-0.077	-0.587	1.000		
BIO	0.693	0.510	-0.326	0.348	1.000	
HI	0.211	0.079	-0.070	0.202	-0.546	1.000
Régression multiple RDT fonction (NE, NGE, PMG, BIO, HI)						
<i>Source</i>	<i>Ddl</i>	<i>SCE</i>	<i>CME</i>	<i>F</i>	<i>Prob F</i>	
Régression	5	23.62	4.72	238.08	0.00	
Résidus	19	0.38	0.02			
Total	24	24.00				
Coefficients de régression bêta, écart de bêta, t obs, prob t obs et r-β						
	β	<i>ET β</i>	<i>T obs</i>	<i>Prob t</i>	$r_{RDT/Yi} - \beta$	
Constante	0.000	0.028	0.000	1.000	0.000	
NE	0.253	0.100	2.528	0.021	0.388	
PMG	0.204	0.062	3.279	0.004	-0.596	
NGE	0.296	0.103	2.884	0.010	0.286	
BIO	0.865	0.122	7.092	0.000	-0.172	
HI	0.618	0.095	6.523	0.000	-0.407	
Effets direct (diagonale) et indirects sur RDT via NE, PMG,NGE, BIO et HI						
	NE	PMG	NGE	BIO	HI	$r_{RDT/Yi}$
NE	0.253	-0.079	-0.023	0.441	0.049	0.641
PMG	-0.098	0.204	-0.174	-0.282	-0.043	-0.392
NGE	-0.019	-0.120	0.296	0.301	0.125	0.583
BIO	0.129	-0.067	0.103	0.865	-0.338	0.693
HI	0.020	-0.014	0.060	-0.473	0.618	0.211

En résumé les résultats de la campagne 2018 indiquent que le rendement en grains, sous les conditions climatiques de la campagne ci-dessus citée, est influencé par d'importants effets directs de la biomasse aérienne et de l'indice de récolte, associés à des effets directs de valeurs moyennes du nombre d'épis/m², du poids de 1000 grains et du nombre de grains/épi.

Des effets indirects négatifs sont causés par la biomasse via l'indice de récolte et par l'indice de récolte via la biomasse aérienne. Des effets indirects appréciables sont induits par le nombre d'épis et par le nombre de grains par épi via la biomasse. Les effets directs comme les effets indirects mettent en relief l'importance de l'influence de la biomasse aérienne et l'indice de récolte comme déterminant du rendement en grains exprimé au cours de la campagne 2017/18 (Tableau 29).

L'analyse de la régression multiple du modèle intégrant BIO comme variable dépendante en fonction de la PLL, le PNE, la PHT, la TRE, la MTS, la CHL et la DPV, introduit comme variables indépendantes, présente le F calculé significatif au seuil de 1% (Tableau 30). Les coefficients partiels de régression (β) obtenus varient de -0.014, effet direct de la PHT à 0.761, valeur de l'effet direct de la PLL.

Ces valeurs indiquent que la BIO est largement déterminée par la variabilité de la PLL et à degrés moindre par celle du PNE (Tableau 30). La somme des effets indirects la plus élevée revient à l'effet du PNE avec une valeur de 0.448 suivie de la DPV avec une valeur de 0.241, les sommes des effets indirects de la PLL, de la PHT, de la MTS, de la CHL et de la TRE sont négligeables (Tableau 30).

L'analyse des effets directs et indirects de chaque variable indépendante indique que le coefficient de corrélation élevée liant le PNE à la biomasse aérienne est constituée surtout d'un effet direct du PNE (0.274), suivi d'un effet indirect élevée à élevé via la paille (0.477). Les effets indirects du PNE via les autres variables sont négligeables. La corrélation non significative entre la DPV et la BIO est constituée d'un faible effet direct négatif et d'un faible effet indirect positif via la paille. La paille agit par un effet direct très élevé associé à un faible effet indirect positif via le PNE.

La teneur relative en eau et la MTS agissent indirectement et négativement via la paille. La production de la biomasse reste indépendante du contenu en chlorophylle de la feuille étandard (Tableau 30). Les résultats de la 2017/18 indiquent que la biomasse aérienne est déterminée essentiellement par la variation de la paille et à degré moindre par celle poids des épis/m².

Tableau 30. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $BIO = f(PLL, PHT, TRE, MTS, CHL, DPV, PNE)$ des données de la campagne 2018.

Coefficients de corrélations								
	<i>BIO</i>	<i>PNE</i>	<i>DPV</i>	<i>PLL</i>	<i>PHT</i>	<i>TRE</i>	<i>MTS</i>	<i>CHLO</i>
BIO	1.000							
PNE	0.722	1.000						
DPV	0.085	0.356	1.000					
PLL	0.933	0.627	0.188	1.000				
PHT	-0.083	-0.142	-0.085	0.031	1.000			
TRE	-0.258	0.042	0.217	-0.241	-0.247	1.000		
MTS	-0.203	-0.345	-0.319	-0.188	-0.300	0.083	1.000	
CHL	-0.144	0.001	0.098	-0.130	-0.020	-0.132	0.064	1.000
Régression multiple BIO fonction (PLL, PHT, PNE, DPV, TRE, MTS, CHL)								
<i>Source</i>	<i>Ddl</i>	<i>SCE</i>	<i>Cme</i>	<i>F</i>	<i>Prob F.</i>			
Régression	7	22.54	3.22	37.49	0.00			
Résidus	17	1.46	0.09					
Total	24	24.00						
Coefficients de régression béta, écart de béta, t obs, prob t obs et r-β								
	β	<i>ET β</i>	<i>t obs</i>	<i>Prob t obs</i>	$r_{BIO/YI-\beta}$			
Constante	0.000	0.059	0.000	1.000	0.000			
PNE	0.274	0.089	3.072	0.007	0.448			
DPV	-0.156	0.069	-2.250	0.038	0.241			
PLL	0.761	0.085	8.899	0.000	0.172			
PHT	-0.114	0.068	-1.689	0.109	0.031			
TRE	-0.083	0.069	-1.198	0.247	-0.175			
MTS	-0.040	0.073	-0.549	0.590	-0.163			
CHL	-0.041	0.063	-0.647	0.526	-0.103			
Effets direct (diagonale) et indirects sur BIO via PNE, DPV, PLL, PHT, TRE, MTS et CHL.								
	PNE	DPV	PLL	PHT	TRE	MTS	CHL	$\Gamma_{BIO/YI}$
PNE	0.274	-0.056	0.477	0.016	-0.004	0.014	0.000	0.722
DPV	0.098	-0.156	0.143	0.010	-0.018	0.013	-0.004	0.085
PLL	0.172	-0.029	0.761	-0.004	0.020	0.008	0.005	0.933
PHT	-0.039	0.013	0.024	-0.114	0.021	0.012	0.001	-0.083
TRE	0.012	-0.034	-0.183	0.028	-0.083	-0.003	0.005	-0.258
MTS	-0.095	0.050	-0.143	0.034	-0.007	-0.040	-0.003	-0.203
CHL	0.000	-0.015	-0.099	0.002	0.011	-0.003	-0.041	-0.144

2.3.3. CAMPAGNE 2018/19

L'analyse de la régression multiple des données de la campagne 2018/19 indique qu'une grande proportion de la variation du rendement en grains est expliquée par la variation des variables indépendantes introduites dans le modèle (Tableau 31). Au vu des valeurs prises par le test t qui sont significatives, les variables indépendantes sont déterminantes dans la réalisation du rendement en grains.

Les valeurs des coefficients partiels de régression (β) sont dans l'ensemble élevées variant de 0.327, effet direct du PMG à 0.666, effet direct de la BIO. La somme des effets indirects variant de -0.330, effets indirects de la biomasse, à 0.196, somme des effets indirects du NE (Tableau 31). Ces résultats indiquent le rôle important joué par la BIO et HI dans la formation du rendement en grains.

L'analyse, de l'effet direct et des effets indirects de chaque variable indépendante, indique que le coefficient de corrélation liant le RDT au NE est la somme d'un effet direct élevé d'une valeur de 0.419 associé des effets indirects, l'un élevée et positif via la BIO (0.411) et l'autre moyen et négatif (-0.213) via le NGE. La corrélation, de signe positive, entre le RDT et le PMG, est faite d'un effet direct positif d'une valeur de 0.327, associé à un effet indirect, moyen et négatif, via le NGE (-0.208).

Le NGE intervient directement (effet direct de 0.454) et indirectement via HI (effet indirect de 0.311). La BIO, en plus de son effet direct élevé (0.622) intervient aussi indirectement via HI (-0.478) et via NE (0.277). HI présente un effet direct élevée associé à des effets indirects positif via NGE et négatif via BIO (Tableau 31).

Les résultats de l'analyse des données de la campagne 2018/19 montrent que les variables indépendantes introduites dans le modèle affectent directement et indirectement la variation du rendement en grains.

Tableau 31. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $RDT = f(NE, NGE, PMG, BIO, HI)$, des données de la campagne 2019.

Coefficients de corrélations						
	<i>RDT</i>	<i>NE</i>	<i>PMG</i>	<i>NGE</i>	<i>BIO</i>	<i>HI</i>
RDT	1.000					
NE	0.615	1.000				
PMG	0.421	0.326	1.000			
NGE	0.232	-0.469	-0.457	1.000		
BIO	0.292	0.661	0.026	-0.301	1.000	
HI	0.437	-0.163	0.223	0.468	-0.718	1.000
Régression multiple RDT fonction (NE, NGE, PMG, BIO, HI)						
	<i>DDI</i>	<i>SCE</i>	<i>CME</i>	<i>F</i>	<i>Prob. F</i>	
Régression	5	23.37	4.67	141.01	0.00	
Résidus	19	0.63	0.03			
Total	24	24.00				
Coefficients de régression bêta, écart de bêta, t obs, prob t obs et r-β						
	β	$Et\beta$	<i>t obs</i>	<i>Prob t</i>	$r_{RDT/Yi} - \beta$	
Constante	0.000	0.036	0.000	1.000		
NE	0.419	0.149	2.805	0.011	0.196	
PMG	0.327	0.078	4.205	0.000	0.094	
NGE	0.454	0.137	3.327	0.004	-0.222	
BIO	0.622	0.206	3.010	0.007	-0.330	
HI	0.666	0.202	3.294	0.004	-0.229	
Effets direct (diagonale) et indirects sur RDT via NE, PMG, NGE, BIO et HI						
	NE	PMG	NGE	BIO	HI	$r_{RDT/Yi}$
NE	0.419	0.106	-0.213	0.411	-0.109	0.615
PMG	0.136	0.327	-0.208	0.016	0.149	0.421
NGE	-0.197	-0.149	0.454	-0.187	0.311	0.232
BIO	0.277	0.009	-0.137	0.622	-0.478	0.292
HI	-0.068	0.073	0.212	-0.447	0.666	0.437

L'analyse de la régression multiple du modèle intégrant BIO comme variable dépendante en fonction de la PLL, le PNE, la PHT, la TRE, la MTS, la CHL et la DPV, introduit comme variables indépendantes, indique une valeur du F calculé significatif au seuil de 1% (Tableau 32). Ceci indique qu'une part importante de la variation de la biomasse aérienne est expliquée par la variation des variables indépendantes introduites dans le modèle.

Les coefficients partiels de régression (β) obtenus varient de -0.179, effet direct de la DPV à 0.915, valeur de l'effet direct de la PLL. Les effets directs appréciables sont uniquement ceux de la PLL et de la DPV (Tableau 32). L'étude de la somme des effets indirects indique que la PNE (0.407), la PHT (0.229), la MTS (0.287) et la CHL (-0.134) interviennent aussi indirectement dans la formation de la BIO (Tableau 32).

L'analyse des effets directs et indirects de chaque variable indépendante indique que la variation de la BIO est expliquée, en partie, par des effets directs, positif de la PLL, et négatif de la DPV (-0.179). Les effets indirects appréciables le sont via la PLL par le PNE (0.392), la PHT (0.1722), la TRE (-0.113) et la MTS (0.278) (Tableau 32). Ces résultats suggèrent l'importance de l'effet direct de la paille, et des effets indirects du PNE, de la PHT, de la TRE, et de la MTS dans la formation de la biomasse aérienne. La chlorophylle n'apparaît pas comme un caractère explicatif de la variation de la biomasse aérienne.

Les résultats de l'analyse en chemin des trois campagnes indique que quelque soit l'environnement la variation du RDT est largement déterminée par des effets directs positifs et élevés de la BIO et HI. Les effets directs et indirects des autres variables indépendantes (NE, NGE, PMG) varient en intensité selon l'environnement. La PLL et le PNE sont les principaux déterminants de la BIO, quelque soit l'environnement. La contribution des autres variables (DPV, TRE, PHT, MTS) est dépendante de l'environnement. La CHL reste indépendante de la BIO.

Tableau 32. Coefficients de corrélations, régression multiple, coefficients partiels de régression et effets directs et indirects des variables du modèle $BIO = f(PLL, PHT, TRE, MTS, CHL, DPV, PNE)$ des données de la campagne 2019.

Coefficients de corrélations								
	<i>BIO</i>	<i>PNE</i>	<i>DPV</i>	<i>PLL</i>	<i>PHT</i>	<i>TRE</i>	<i>MTS</i>	<i>CHL</i>
BIO	1.000							
PNE	0.464	1.000						
DPV	-0.092	0.017	1.000					
PLL	0.945	0.429	0.076	1.000				
PHT	0.276	0.106	-0.232	0.188	1.000			
TRE	-0.118	-0.132	-0.433	-0.123	0.050	1.000		
MTS	0.278	0.190	0.018	0.304	-0.106	-0.004	1.000	
CHL	-0.164	-0.122	0.316	-0.088	-0.403	-0.315	-0.181	1.000
Régression multiple BIO fonction (PLL, PHT, PNE, DPV, TRE, MTS, CHL)								
	<i>Ddl</i>	<i>SCE</i>	<i>CME</i>	<i>F</i>	<i>Prob.F</i>			
Régression	7	22.39	3.20	33.82	0.00			
Résidus	17	1.61	0.09					
Total	24	24						
Coefficients de régression bêta, écart de bêta, t obs, prob t obs et r-β								
	<i>β</i>	<i>ET β</i>	<i>t obs</i>	<i>Prob t obs</i>	<i>r_{BIO/Yi}-β</i>			
Constante	0.000	0.062	0.000	1.000				
PNE	0.057	0.070	0.803	0.433	0.407			
DPV	-0.179	0.073	-2.468	0.024	0.087			
PLL	0.915	0.074	12.350	0.000	0.030			
PHT	0.048	0.073	0.647	0.526	0.229			
TRE	-0.087	0.073	-1.187	0.252	-0.031			
MTS	-0.009	0.069	-0.123	0.904	0.287			
CHL	-0.030	0.076	-0.397	0.696	-0.134			
Effets directs (diagonale) et indirects sur BIO via PNE, DPV, PLL, PHT, TRE, MTS et CHL.								
	PNE	DPV	PLL	PHT	TRE	MTS	CHL	<i>r_{BIO/Yi}</i>
PNE	0.057	-0.003	0.392	0.005	0.011	-0.002	0.004	0.464
DPV	0.001	-0.179	0.069	-0.011	0.038	0.000	-0.009	-0.092
PLL	0.024	-0.014	0.915	0.009	0.011	-0.003	0.003	0.945
PHT	0.006	0.041	0.172	0.048	-0.004	0.001	0.012	0.276
TRE	-0.008	0.078	-0.113	0.002	-0.087	0.000	0.009	-0.118
MTS	0.011	-0.003	0.278	-0.005	0.000	-0.009	0.005	0.278
CHL	-0.007	-0.057	-0.080	-0.019	0.027	0.002	-0.030	-0.164

Dans ce contexte, Mansouri, et al., (2018) rapportent que la modèle complet de la régression multiple explique 94.58% de la variation du rendement en grains. La biomasse aérienne et l'indice de récolte apparaissent comme les déterminants du rendement grains et

sont les seules variables retenues par la régression progressive, expliquant 94.90% de la variation des données du rendement en grains. Les résultats de cette étude rejoignent aussi ceux de Fellahi et al., (2018) qui rapportent que la régression progressive retient uniquement la biomasse aérienne et l'indice de récolte qui expliquent 99.7% de la variation du rendement en grains.

Les résultats de la présente étude diffèrent de ceux Leilah et Al-Khateeb, (2005) qui mentionnent que la régression progressive retient comme variables explicatives de la variation du rendement en grains, l'indice de récolte, le nombre d'épis/m² et la biomasse aérienne. Les résultats de l'analyse en chemin de Mansouri et al., (2018) indiquent que la relation de la durée de la phase végétative avec le rendement en grains est surtout faite d'effets indirects dont la somme est de -0.325 et d'un effet direct négligeable de -0.014. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de la présente étude qui indique que les effets de la DPV sur le rendement en grains sont surtout des effets indirects que direct.

Mansouri et al., (2018) mentionnent que la biomasse aérienne présente un effet direct de valeur élevée, associé à des effets indirects négligeables ; par contre le nombre d'épis/m² présente un effet direct négligeable associé à des effets indirects de valeurs élevées. Ces résultats concordent partiellement ceux de la présente étude qui est le nombre d'épis, selon l'environnement, présente un effet direct de valeur moyenne à élevée et des effets indirects appréciables notamment via l'indice de récolte. L'analyse en chemin des résultats de Oulmi et al., (2016) montre que la biomasse aérienne a l'effet direct le plus important sur l'expression du poids des épis par plante.

Mansouri et al., (2018) rapportent que le contenu en chlorophylle de la feuille étandard présente des effets direct et indirects négligeables sur le rendement en grains ; ceci est conforme avec les résultats de la présente étude qui rejoignent aussi ceux de Khan et al., (2013) qui mentionnent que le nombre d'épis/m² et la biomasse aérienne sont les caractères qui affectent le plus le rendement en grains. Avec cette exception que les résultats de cette étude indiquent que l'effet de la biomasse est perceptible quelque soit l'environnement alors que celui des épis/m² est environnement dépendant. De ces résultats il ressort que le rendement en grains sous conditions semi- arides, sud méditerranéennes, peut être amélioré indirectement par la sélection du nombre d'épis/m², de la biomasse et de l'indice de récolte.

3. **TYPOLOGIE VARIETALE**

A mi-distance, les variétés évaluées se départagent de par leurs performances au cours des trois campagnes en trois clusters qui sont représentés en figure 19. Le cluster C I est constitué des variétés #4(Ajaia_4/canelo_3/4/arment//srn_3/nigris_4/3/ca), #5 (Canelo_9.1/snitani/10/plata_10/6/mque/4/usda573/), #6(Bellaroi/4/bicum//llaretainia/3/dukem_12/2*raiscon_21), #9 (Guemgoum rhem/4/Stj3//Bcr/Lks4/3/Ter-3), #10 (Brak^2/ajaia_2//solga_3/3/canelo_8//sora), #12(Silk_3/dipper_6/3/ac089/dukem_4//5*ac089/4/)#19(Ouasloukos/5/Aznl/4Bez aizshf/SD19539/Waha/3/Gdr2), #20 (Mohawk/9/usda595/3/d67.3/rabi/cra/4/al05/), #22 (Korifla/Aeg spelloides syr/Amedakul), #23 (Amedakull/triticum dico syr col/Lukos) et #25 (Ouasloukos/5/Aznl/4/BEZAIZSHF//SD19539/Waha/3/Gdr2).

Le cluster C II est formé par les variétés #13 (Sooty_9/rascon_37//storlom/5/toska_2), #14 (Terbol975/geruftel2), #21(Icasyrl3/Bcr/sb15/Turaru/4/13376/Bcrchl//Ossll/Stj5) et #24 (Terbol97-5/geruftel2). Le cluster C III comporte les variétés #1(Waha), #2 (Jupare c), #3 (9/rascon_37//storlom/5/toska_26/rasco), #7(Islom_1/dukem_2/tarro_3/5/crex// boy/yav_1/3), #8 (P91.272.3.1/3/*mex175//2*jupare c), #11 (Sooty^9/rascon_37//stormlom/8/rissa/gan//), #15 (Langdon/kucuk), #16 (20048 Traikia(mor)/mrb5//stj3), #17 (T.Polox ZB/lnrat69), et #18 (Icasyrl/3/Gen//Stj/M rb3) (Figure 19).

Les performances de rendement des trois clusters formés sont données en Figure 20. L'analyse de cette figure suggère des comportements très différents des trois clusters. On note, en effet, qu'au cours de la campagne 2017, les différences de rendement entre les moyennes des trois groupes de variétés sont faibles et peu perceptibles, suggérant que sous stress, les différences génotypiques sont masquées. Les moyennes de rendement sont de 301.2, 325.3 et 341.8 g/m², respectivement pour CI, CII et CIII avec une Ppds5% de 86.5 g/m².

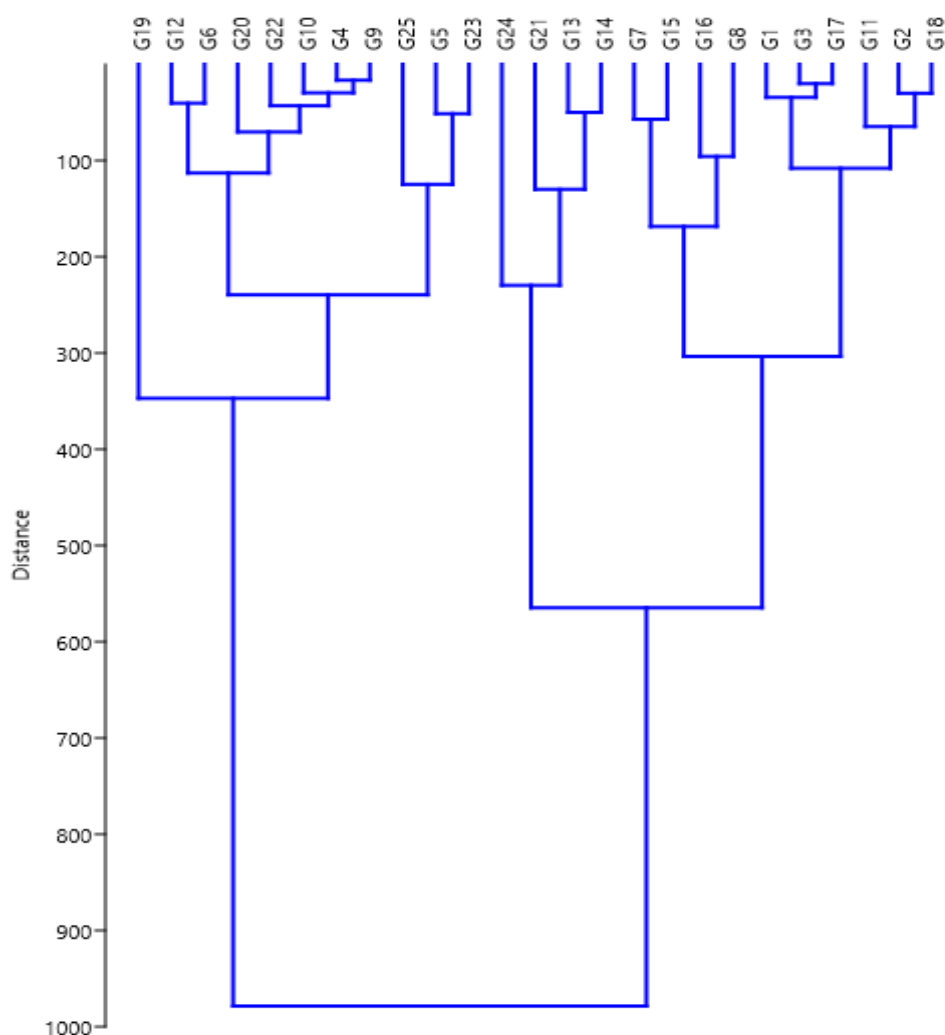


Figure 19. Classification des variétés évaluées sur la base des performances de rendement des trois campagnes.

Par contre au cours de la campagne 2018, les clusters CII et CIII se détachent nettement avec des moyennes respectives de 1134.7 et 1094.4 g/m², alors que le cluster CI ne réalise qu'une performance de 829.2 g/m². Au cours de la campagne 2019 le cluster CII maintient son classement en tête avec 863.9 g/m² de moyenne, suivi du cluster CI qui améliore sa performance avec une moyenne de 716.3 g/m² et en dernier lieu le cluster CIII qui fait une moyenne de 617.0 g/m² (Figure 20).

Les trois campagnes d'étude forment des environnements ou milieux très contrastés présentant un gradient de fertilité. En effet les moyennes de rendement par campagne sont

de 324.5, 1005.3 et 692.3 g/m², respectivement, pour 2017, 2018 et 2019. La réponse du rendement des trois clusters à ce gradient de fertilité est schématisée en Figure 20.

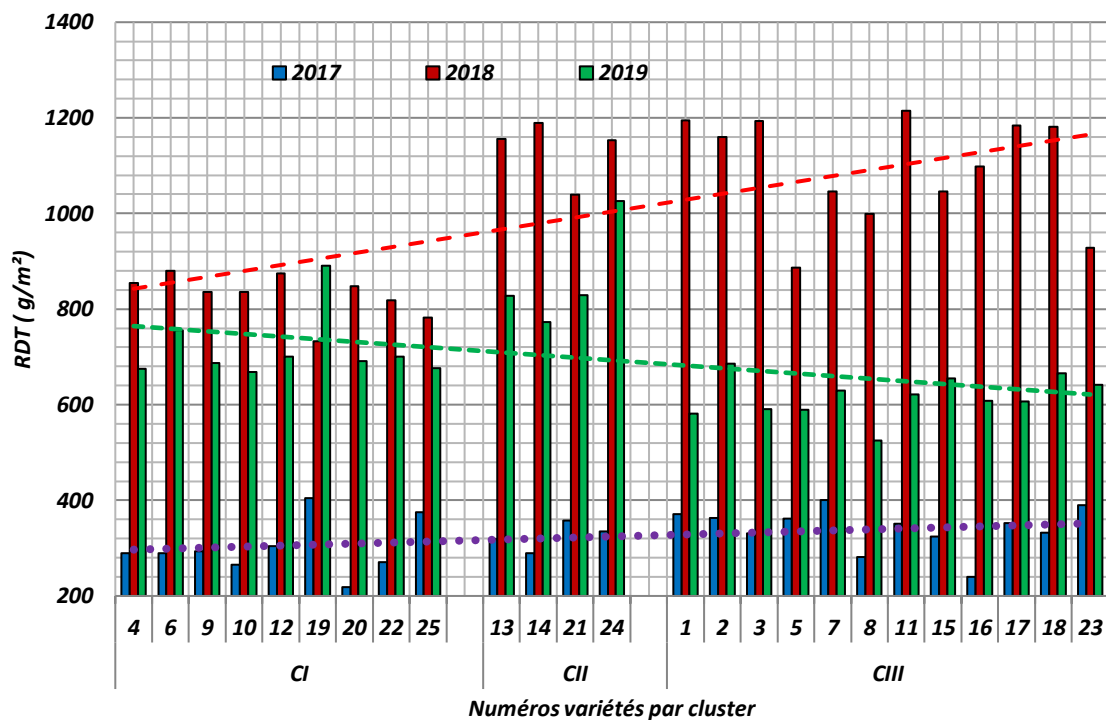


Figure 20. Performances de rendement en grains des différents clusters de variétés lors des trois campagnes d'études. .

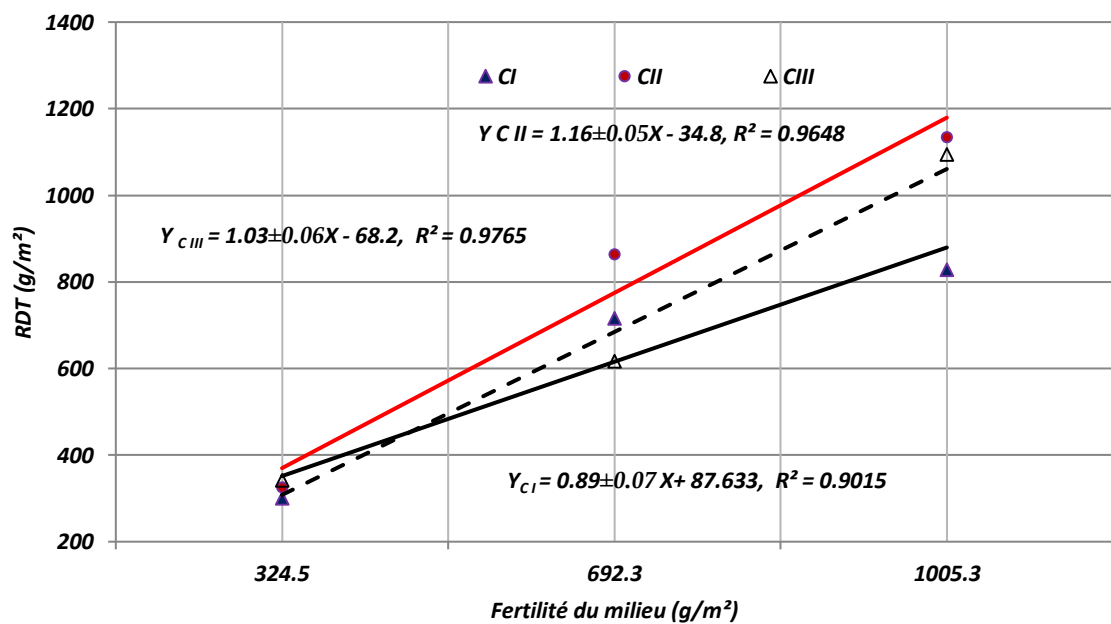


Figure 21. Réponses du rendement des trois clusters à la fertilité du milieu

La lecture de la figure 21 suggère que le cluster CI est moins sensible à la fertilité du milieu, à l'inverse du cluster CII qui réagit mieux. Le cluster CIII présente un comportement intermédiaire. En effet les valeurs prises par les coefficients de régression des trois clusters sont de 0.89, 1.16 et 1.03 g/m²d'amélioration du rendement par g/m² d'augmentation de la fertilité du milieu.

Les écarts types de ces coefficients de régression sont 0.07, 0.05 et 0.06 g/m², les valeurs du t observé correspondantes sont de 13.29, 24.22 et 16.25, et les valeurs de probabilité du t calculé sont de 0.01, 0.00 et 0.00, respectivement pour CI, CII et CIII. La caractérisation des trois clusters, identifiés sur la base des performances de rendement des trois campagnes, est donnée en Figure 22.

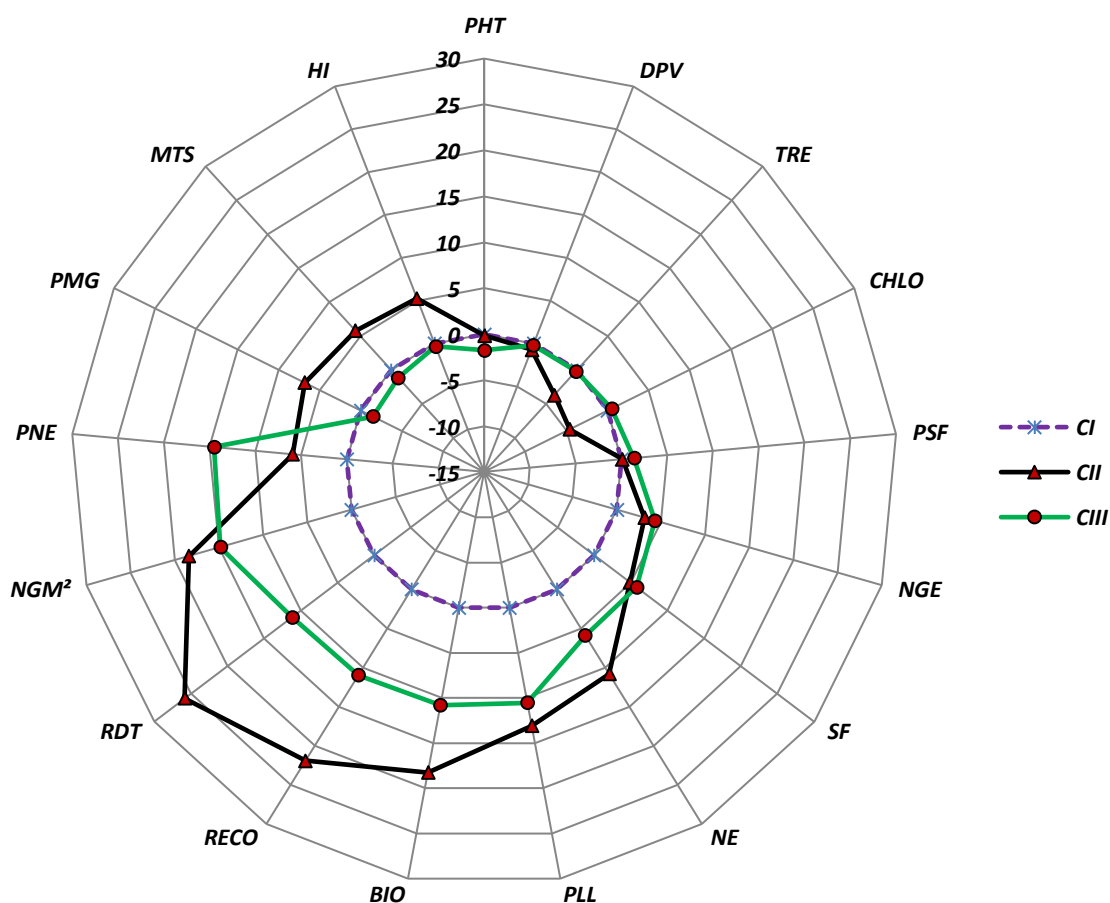


Figure 22. Caractérisation des différents clusters (en % des moyennes du CI), identifiés sur la base du rendement en grains des trois campagnes, pour les 17 variables mesurées.

Cette caractérisation est faite relativement aux valeurs moyennes des différents caractères du cluster CI $\{[(X_{\text{barCII}} - X_{\text{barCI}})/X_{\text{barCI}}] \times 100\}$. L'analyse de cette figure indique que les clusters formés diffèrent peu pour la PHT (68.9, 68.6 et 67.7 cm pour CI, CII et CIII), la DPV (115.3, 114.5 et 115.1 jours pour CI, CII et CIII), et le PSF (33.4, 33.5 et 33.6 mg/cm² pour CI, CII et CIII). Les différences entre clusters sont perceptibles (>5% d'écart jusqu'à 25%) pour les autres variables (Figure 22).

Comme le groupage est réalisé sur la base du rendement, ce sont surtout les caractères liés au rendement, tels que le PNE (551.4, 584.2 et 631.8 g/m² pour CI, CII et CIII), le NGM² (17.1, 20.2 et 19.6 mille grains/m² pour CI, CII et CIII), le RDT_{eco} (886.4, 1080.9 et 983.8 g/m² pour CI, CII et CIII), la BIO (1518.3, 1795.6 et 1682.4 g/m² pour CI, CII et CIII), la PLL (902.8, 1021.0 et 998.0 g/m² pour CI, CII et CIII) et le NE (485.6, 774.6 et 684.4 épis/m² pour CI, CII et CIII), qui font les différences entre clusters notamment entre les clusters CII et CIII comparativement au cluster CI (Figure 22).

Mansouri, et al., (2018) classent 56 génotypes de blé dur en utilisant la méthode Ward's sur la base des caractères morpho-physiologiques. Les variétés évaluées se classent en trois groupes ou clusters qui montrent une gradation pour la biomasse aérienne, le rendement économique, le rendement en paille, le nombre d'épis/m² et l'indice de récolte. Les différences entre cluster pour la durée de la phase végétative et la température de la canopée ne sont pas assez larges pour être d'utilité en sélection, comment c'est le cas des différences entre clusters trouvés dans la présente étude.

CONCLUSION

CONCLUSION

Les changements climatiques ont un effet contraignant sur les productions agricoles. La concentration du dioxyde de carbone (CO_2) est en augmentation avec le temps. Les conséquences sont l'augmentation de la demande climatique en eau et les excès de températures. Ces conditions affectent la production végétale, notamment dans les pays comme l'Algérie.

En Algérie, les superficies destinées à la céréaliculture en particulier le blé dur est en diminution avec l'augmentation de la demande de population qui est parmi les grands consommateurs de blé dans le monde. La culture du blé souffre avec les conditions climatiques instables, l'insuffisance d'eau et les températures élevées de fin de cycle sont des contraintes majeures de cette culture. Pour faire face à ces problèmes il faut sélectionner et créer des cultivars adapte mieux à ces conditions défavorables.

Les résultats de l'étude de la variabilité des variables mesurées indiquent que les conditions environnementales déterminent le niveau d'expression des variables mesurées. L'effet environnement est hautement significatif mais effet génotype n'est significatif que pour la DPV, le PMG et la SFE, la sélection ces caractères est possible pour l'adaptation générale. L'interaction GxE est significatif pour le reste des variables analysés, ce signifie que la sélection doit se faire pour l'adaptation spécifique. Comme l'environnement est représenté par l'effet campagne la sélection pour l'adaptation spécifique est onéreuse laissant la place à la recherche d'une meilleure stabilité des performances, associée à la minimisation des écarts entre le génotype sélectionné et le génotype le plus performant par environnement. Le ratio CVg/CVe est supérieur pour le PMG et la DPV suggérant pour ces deux variables une plus grande variabilité d'origine génétique qu'environnementale. L'expression de la plupart des variables analysées est sujette à l'interaction GxE. Ce qui explique les changements de classement des génotypes évalués. Cette interaction s'exprime sous forme de performances significativement différentes d'un environnement à l'autre. L'interaction GxE complique la sélection puisqu'elle ne permet pas d'identifier le génotype qui se classe le mieux quelque soit l'environnement.

Suite au peu de ressemblance entre environnement, la sélection basée sur la moyenne des trois campagnes est proche de la sélection basée sur l'indice Pi. Cet indice

associe le potentiel de rendement à la régularité de la production d'un environnement à l'autre. Les génotypes #2, #14 et #24 ont été sélectionnées pour plus de 5 caractères.

Les résultats de l'analyse des corrélations indiquent que le RDT est lié positivement et significativement avec le NE, le NGM² et avec le RDT_{eco}. Les liaisons de ce caractère avec le NGE, la BIO, le PNE, le PMG, la DPV, HI, la SF et le PSF sont dépendantes de l'environnement. L'expression du RDT est indépendante de celle de la PLL, de la PHT, de la TRE, de la MTS et de la CHL.

Les résultats de l'analyse en chemin des trois campagnes indique que quelque soit l'environnement la variation du RDT est largement déterminée par des effets directs positifs et élevés de la BIO et HI et effet indirecte de NE. De ces résultats il ressort que le rendement en grains sous conditions semi-arides, sud méditerranéennes, peut être amélioré indirectement par la sélection du nombre d'épis/m², de la biomasse et de l'indice de récolte. Une part importante de la variation de la biomasse aérienne est expliquée par la variation de la paille. L'effet direct de la PLL, et des effets indirects du PNE, de la PHT, de la TRE, et de la MTS contribuent dans la formation de la biomasse aérienne.

Les variétés évaluées se départagent de par leurs performances au cours des trois campagnes en trois clusters. Le cluster CI est moins sensible à la fertilité du milieu, à l'inverse du cluster CII qui réagit mieux. Le cluster CIII présente un comportement intermédiaire.

En générale et en ce qui concerne l'objectif de cette étude, les résultats on indiqué que les caractères physiologiques n'étaient pas liés les un aux autres et aux caractères morphologiques rendant difficile la sélection concomitante du rendement et de la tolérance au stress induit par ces caractères. Il est nécessaire de faires des croisements complexes entre les génotypes portent des caractéristiques de performance de rendement et ceux qui ont des traits de tolérance afin de créer de nouvelle génotypes avec une variabilité génétique élevé pour ces traits.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Acquaah, G., 2012. Principles of Plant Genetics and Breeding, 2ed Ed. ed. John Wiley & Sons, Ltd, USA.

Al-Khatib, K., Paulsen, G.M., 1990. Photosynthesis and Productivity during High Temperature Stress of Wheat Genotypes from Major World Regions. *Crop Sci* 30, 1127–1132. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000050034x>

Ammar, K., 2015. Enhancing the Sustainability of Global Durum Wheat Production. <http://www.openfields.it/category/docs/2015>.

Annicchiarico, P., Bellah, F., Chiari, T., 2005. Defining Subregions and Estimating Benefits for a Specific-Adaptation Strategy by Breeding Programs: A Case Study. *Crop Sci.* 45, 1741–1749. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0524>

Araus, J.L., Bort, J., Steduto, P., Villegas, D., Royo, C., 2003. Breeding cereals for Mediterranean conditions: ecophysiological clues for biotechnology application. *Annals of Applied Biology* 142, 129–141. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2003.tb00238.x>

Ashraf, M., Saeed, M.M., Qureshi, M.J., 1994. Tolerance to high temperature in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) at initial growth stages. *Environmental and Experimental Botany* 34, 275–283. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0098-8472(94)90048-5)

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

Bajji, M., Lutts S, Kinet J.M., 2000. La résistance au stress hydrique chez le blé dur: Comparaison des comportements au niveau cellulaire et au niveau de la plante entière, in: Royo C, Nachit M, Di Fonzo N, Araus J.L. (Eds.), : : Série A. Séminaires Méditerranéens. Presented at the Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges .Options Méditerranéennes, CIHEAM, Zaragoza, pp. 227–231.

Balota, M., Ittu, G., Saulescu, N., 1995. Excised-leaf water status in Romanian and foreign winter wheat cultivars. I. The physiological and environmental effects on excised-leaf water loss. *Romanian Agric. Res* 3, 69–76.

Barnabás, B., Jäger, K., Fehér, A., 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell & Environment* 31, 11–38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x>

Barrs, H.D., 1968. Determination of water deficits in plant tissues., in: *Water Deficits and Plant Growth*. Academy Press, New York, pp. 235–368.

Behl, R.K., Moawad, A.M., Achtmich, W., 1991. Amino acid and protein profile changes in spring wheat mutant under prolonged heat stress. *Annals of Biology* 7, 63–67.

Belkharchouche, H., Benbelkacem, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., 2015. Flag Leaf and Awns Ablation and Spike Shading Effects on Spike Yield and Kernel Weight of Durum Wheat (*Triticum Turgidum* L. Var. Durum) Under Rainfed Conditions. *Adv. Environ. Biol* 9, 184–191.

Benbelkacem, A., 2013. Rapport des résultats du projet "Enhancing Food Security in Arab Countries" Icarda-INRAA. 35 pages.

Benmahammed, A., Kribaa, M., Bouzerzour, H., Djekoun, A., 2010a. Assessment of stress tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) advanced breeding lines under semi arid conditions of the eastern high plateaus of Algeria. *Euphytica* 172, 383–394. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-0046-x>

Benmahammed, A., Nouar, H., Haddad, L., Laala, Z., Abdelmalek, O., Bouzerzour, H., 2010b. Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14, 177–186.

Bensemmane, L., 2015. Analyse de l'adaptation de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) sous conditions semi-arides. Université Ferhat Abbas Sétif-1 Faculté des sciences de la nature et de la vie, Sétif.

Blum, A., 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 1159–1168.

Blum, A., Klueva, N., Nguyen, H.T., 2001. Wheat cellular thermotolerance is related to yield under heat stress. *Euphytica* 117, 117–123. <https://doi.org/10.1023/A:1004083305905>

Blum, A., Sinmena, B., Mayer, J., Golan, G., Shpiler, L., 1994. Stem reserve mobilisation supports wheat-grain filling under heat stress. *Functional Plant Biology* 21, 771–781.

Burton, G.W., DeVane, E.H., 1953. Estimating Heritability in Tall Fescue (*Festuca Arundinacea*) from Replicated Clonal Material ¹. *Agron.j.* 45, 478–481. <https://doi.org/10.2134/agronj1953.00021962004500100005x>

Chalupska, D., Lee, H.Y., Faris, J.D., Evrard, A., Chalhoub, B., Haselkorn, R., Gornicki, P., 2008. Acc homoeoloci and the evolution of wheat genomes. *PNAS* 105, 9691–9696. <https://doi.org/10.1073/pnas.0803981105>

Charles, M., 2010. Évolution des génomes du blé (genres *Aegilops* et *Triticum*) au sein des Poaceae. Université d'Évry-Val d'Essonne, France.

Chaves, M.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S., 2003. Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. *Functional Plant Biol.* 30, 239–264. <https://doi.org/10.1071/fp02076>

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, 854–860. <https://doi.org/10.3923/ajps.2006.854.860>

Chipilski, R., Kocheva, K., Nenova, V., 2012. Physiological Responses of Two Wheat Cultivars to Soil Drought. *Zeitschrift für Naturforschung. C, Journal of biosciences* 67, 181–186. <https://doi.org/10.5560/ZNC.2012.67c0181>

Clarke, J.M., McCaig, T.N., 1982. Evaluation of Techniques for Screening for Drought Resistance in Wheat. *Crop Sci.* 22, 503–506. <https://doi.org/10.2135/cropsci1982.0011183X002200030015x>

Clarke, J.M., Romagosa, I., Jana, S., Srivastava, J.P., McCaig, T.N., 1989. Relationship of excised-leaf water loss rate and yield of durum wheat in diverse environments. *Canadian Journal of Plant Science* 69, 1075–1081.

Clarke, J.M., Townley-Smith, T.F., 1986. Heritability and Relationship to Yield of Excised-Leaf Water Retention in Durum Wheat1. *Crop Science* 26, 289–292. <https://doi.org/10.2135/cropsci1986.0011183X002600020016x>

Cosgrove, D.J., 2005. Growth of the plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 6, 850–861. <https://doi.org/10.1038/nrm1746>

Craufurd, P.Q., Prasad, P.V.V., Kakani, V.G., Wheeler, T.R., Nigam, S.N., 2003. Heat tolerance in groundnut. *Field Crops Research* 80, 63–77. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00155-7)

Cruz-Aguado, J.A., Rodés, R., Pérez, I.P., Dorado, M., 2000. Morphological characteristics and yield components associated with accumulation and loss of dry mass in the internodes of wheat. *Field Crops Research* 66, 129–139. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00070-8)

Daly, G.T., 1964. Leaf-surface Wax in *Poa colensoi*. *Journal of Experimental Botany* 15, 160–165. <https://doi.org/10.1093/jxb/15.1.160>

Datta, J.K., Mondal, T., Banerjee, A., Mondal, N.K., 2011. Assessment of drought tolerance of selected wheat cultivars under laboratory condition. *Journal of Agricultural Technology* 7, 383–393.

Dewey, D.R., Lu, K.H., 1959. A Correlation and Path-Coefficient Analysis of Components of Crested Wheatgrass Seed Production. *Agronomy Journal* 51, 515–518. <https://doi.org/10.2134/agronj1959.00021962005100090002x>

Dhanda, S.S., Sethi, G.S., 2004. Index of drought resistance in relation to water retention parameters in bread wheat. *Annals of Agricultural Research* 25, 211–214.

Dhanda, S.S., Sethi, G.S., Behl, R.K., 1998. Excised-leaf Water Loss as a Simple Selection Criterion for Drought Resistance in Wheat. *Der Tropenlandwirt - Journal of Agriculture in the Tropics and Subtropics* 99, 3–8.

Dubcovsky, J., Dvorak, J., 2007. Genome plasticity a key factor in the success of polyploid wheat under domestication. *Science* 316, 1862–1866. <https://doi.org/10.1126/science.1143986>

Ducellier, L.O., 1930. *Espèces et variétés de céréales cultivées en Algérie*. Ancienne impr. administrative V. Heintz.

Dvorak, J., Akhunov, E.D., Akhunov, A.R., Deal, K.R., Luo, M.-C., 2006. Molecular Characterization of a Diagnostic DNA Marker for Domesticated Tetraploid Wheat Provides Evidence for Gene Flow from Wild Tetraploid Wheat to Hexaploid Wheat. *Molecular Biology and Evolution* 23, 1386–1396. <https://doi.org/10.1093/molbev/msl004>

Ehdaie, B., Alloush, G., Madore, M., Waines, J., 2006. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat: I. Postanthesis changes in internode dry matter. *Crop Science* 46, 735–746. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.04-0033>

El Jaafari, S., Lepoivre, P., Semal, J., 1995. Implication de l'acide abscissique dans la résistance du blé à la sécheresse, in: *Quel avenir pour l'amélioration des plantes ?* John Libbey Eurotext., Paris, pp. 141–148.

Feldman, M., 2001. *The Origin of cultivated wheat*. Lavousier Tech & Doc, Paris, France.

Feldman, M., Lupton, F.G.H., Miller, T.E., 1995. Wheats, in: Smartt, J., Simmonds, N.W. (Eds.), *Evolution of Crop Plants*. Longman Group Ltd, London, pp. 184–192.

Fellahi, Z.E.A., Hannachi, A., Bouzerzour, H., 2018. Analysis of Direct and Indirect Selection and Indices in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Segregating Progeny. *International Journal of Agronomy* 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/8312857>

Fellahi, Z.E.A., Hannachi, A., Bouzerzour, H., Dreisigacker, S., Yahyaoui, A., Sehgal, D., Fellahi, Z.E.A., Hannachi, A., Bouzerzour, H., Dreisigacker, S., Yahyaoui, A., Sehgal, D., 2017. Genetic analysis of morpho-physiological traits and yield components in F₂

partial diallel crosses of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 70, 8237–8250. <https://doi.org/10.15446/rfna.v70n3.61927>

Fellahi, Z.E.A., Zaghdoudi, H., Bensaadi, H., Boutalbi, W., Hannachi, A., 2019. Assessment of Salt Stress Effect on Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars at Seedling Stage. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 84, 347–355.

Gavuzzi, P., Delogu, G., Boggini, G., Di Fonzo, N., Borghi, B., 1993. Identification of bread wheat, durum wheat and barley cultivars adapted to dry areas of Southern Italy. *Euphytica* 68, 131–145. <https://doi.org/10.1007/BF00024162>

Gilliham, M., Tester, M., 2005. The Regulation of Anion Loading to the Maize Root Xylem. *Plant Physiology* 137, 819–828. <https://doi.org/10.1104/pp.104.054056>

Grantz, D.A., 1990. Plant response to atmospheric humidity. *Plant, Cell & Environment* 13, 667–679.

Graziani, M., Maccaferri, M., Royo, C., Salvatorelli, F., Tuberosa, R., 2014. QTL dissection of yield components and morpho-physiological traits in a durum wheat elite population tested in contrasting thermo-pluviometric conditions. *Crop Pasture Sci.* 65, 80–95. <https://doi.org/10.1071/CP13349>

Haddad L, Bouzerzour H, Benmahammed A, Zerargui H, Hannachi A, Bachir A, Salmi M, Oulmi A, Nouar H, Laala Z, 2016. Analysis of The Phenotypic Variability of Some Varieties of durum Wheat (*Triticum durum* Desf) to Improve the Efficiency of Performance under the Constraining Conditions of semi arid environments. *J Fundam Appl S* 8, 1021–1036.

Hamli, S., 2015. Étude de la tolérance du blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) au choc thermique : criblage des plantules et déterminisme génétique de la tolérance (Thesis). Université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif.

Hamli, S., Bouzerzour Hamenna, Benmahammed Amar, Oulmi Abdelmalek, Kadi Kenza, Addad Dalila, 2015. Déterminisme génétique des caractères morpho-physiologiques liés au rendement chez le blé dur en zone semi-aride des hauts plateaux Sétifiens, Algérie. *European Scientific Journal*, ESJ 11, 146–160.

Hammer, O., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4, 4–9.

Hannachi, A., 2017. Aptitude à la combinaison, sélection mono et multi caractères et adaptabilité du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux conditions semiarides. Université Ferhat Abbas Sétif 1 Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sétif.

Hannachi, A., Fellahi, Z.E., Bouzerzour, H., Boutekrabt, A., 2013. Correlation, Path Analysis and Stepwise Regression in Durum Wheat (*Triticum Durum* Desf.) under Rainfed Conditions. *Journal of Agriculture and Sustainability* 3, 122–131.

Hannachi, A., Fellahi, Z.E.A., Rabti, A., Ali, G., Bouzerzour, H., 2017. Combining ability and gene action estimates for some yield attributes in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 9, 1519–1534. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i3.17>

Harlan, J.R., 1992. *Crops and Man*, 2nd edition. ed. American Society of Agronomy-Crop Science Society, Madison, Wis., USA.

Hervieu, B., Capone, R., Abis, S., 2006. The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean (No. 9).

<http://wheat.pw.usda.gov/ggpages/GrainTax/index.shtml> [WWW Document], 2016. URL <http://wheat.pw.usda.gov/ggpages/GrainTax/index.shtml>

Huang, S., Sirikhachornkit, A., Su, X., Faris, J., Gill, B., Haselkorn, R., Gornicki, P., 2002. Genes encoding plastid acetyl-CoA carboxylase and 3-phosphoglycerate kinase of the *Triticum/Aegilops* complex and the evolutionary history of polyploid wheat. *Proc Natl Acad Sci U S A* 99, 8133–8138. <https://doi.org/10.1073/pnas.072223799>

IGC, 2011. Grain market report [WWW Document]. URL www.igc.int

IPCC, 2007. *Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Geneva, Switzerland.

IRRI, I.R.R.I., 2007. *CropStat*. Dapo, Manila.

Kang, M.S., Aggarwal, V.D., Chirwa, R.M., 2006. Adaptability and Stability of Bean Cultivars as Determined via Yield-Stability Statistic and GGE Biplot Analysis. *Journal of Crop Improvement*. https://doi.org/10.1300/J411v15n01_08

Kebede, A., Getahun, A., 2017. Adaptability and stability analysis of groundnut genotypes using AMMI model and GGE-biplot. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 20, 343–349. <https://doi.org/10.1007/s12892-017-0061-0>

Kellogg, E., 2001. Evolutionary History of the Grasses. *Plant physiology* 125, 1198–205. <https://doi.org/10.1104/pp.125.3.1198>

Keyvan, S., 2010. The effects of drought stress on yield, relative water content, proline, soluble carbohydrates and chlorophyll of bread wheat cultivars. *Journal of Animal and Plant Sciences (JAPS)* 8, 1051–1060.

Khan, A.A., Alam, M.A., Alam, M.K., Alam, M.J., Sarker, Z.I., 2013. Correlation and path analysis of durum wheat (*Triticum turgidum* L. Var. Durum). *Bangladesh Journal of Agricultural Research* 38, 515–521. <https://doi.org/10.3329/bjar.v38i3.16978>

Kim, T.-H., Böhmer, M., Hu, H., Nishimura, N., Schroeder, J.I., 2010. Guard Cell Signal Transduction Network: Advances in Understanding Absciscic Acid, CO₂, and Ca²⁺ Signaling. *Annu Rev Plant Biol* 61, 561–591. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112226>

Kirouani, A., Kiar, R.O., Boukhalfoun, L., Fellahi, Z.E.A., 2019. Caractérisation de quelques variétés Algériennes de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) par le biais des marqueurs phénotypiques. *Journal of Applied Biosciences* 142, 14464–14477. <https://doi.org/10.4314/jab.v142i1.3>

Kocheva, K., Nenova, V., Karceva, T., Petrov, P., Georgiev, G.I., Börner, A., Landjeva, S., 2014. Changes in Water Status, Membrane Stability and Antioxidant Capacity of Wheat Seedlings Carrying Different Rht-B1 Dwarfing Alleles under Drought Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* 200, 83–91. <https://doi.org/10.1111/jac.12047>

Kumar, A., Sharma, S.C., 2007. Genetics of excised-leaf water loss and relative water content in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cereal Research Communications* 35, 43–52.

Kumar, B., SINGH, C.M., JAISWAL, K.K., 2013. Genetic variability, association and diversity studies in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *The Bioscan* 8, 143–147.

Laala, Z., Oulmi, A., Saraoui, T., Haddad, L., Nouar, H., Benmahammed, A., Bouzerzour, H., 2010. Effet de la sélection de la biomasse et des épis sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf) sous conditions Semi-arides. *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur (Univ Ouargla)* 4, 56–69.

Leilah, A.A., Al-Khateeb, S.A., 2005. Statistical analysis of wheat yield under drought conditions. *Journal of Arid Environments* 61, 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.011>

Levitt, J., 1980. Responses of Plants to Environmental Stress, 2nd Edition, Volume 1: Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses. Academic Press.

Lilley, J.M., Ludlow, M.M., 1996. Expression of osmotic adjustment and dehydration tolerance in diverse rice lines. *Field Crops Research* 48, 185–197.

Lin, C.S., Binns, M.R., 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar $\times$ location data. *Can. J. Plant Sci.* 68, 193–198. <https://doi.org/10.4141/cjps88-018>

Liu, H., Searle, I.R., Mather, D.E., Able, A.J., Able, J.A., 2015. Morphological, physiological and yield responses of durum wheat to pre-anthesis water-deficit stress are genotype-dependent. *Crop Pasture Sci* 66, 1024–1038.

Manivannan, N., 2014. TNAU-STAT-Statistical package. In: <https://sites.google.com/site/tnaustat>.

Mansouri, A., Oudjehih, B., Benbelkacem, A., Fellahi, Z., Bouzerzour, B., 2018. Variation and Relationships among Agronomic Traits in Durum Wheat [*Triticum turgidum* (L.) Thell. ssp. *turgidum* conv. *durum* (Desf.) MacKey] under South Mediterranean Growth Conditions: Stepwise and Path Analyses. *International Journal of Agronomy* 11.

Maurel, C., Verdoucq, L., Luu, D.-T., Santoni, V., 2008. Plant Aquaporins: Membrane Channels with Multiple Integrated Functions. *Annual review of plant biology* 59, 595–624. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092734>

McCaig, T.N., Romagosa, I., 1991. Water Status Measurements of Excised Wheat Leaves: Position and Age Effects. *Crop Science* 31, 1583–1588. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100060041x>

McIntosh, M.S., 1983. Analysis of Combined Experiments 1. *Agronomy Journal* 75, 153–155.

Mebarki, H., Ziane, O., Merbah, H., Bouzerzour, H., 2021. Assessment of flag leaf water status as drought tolerance discriminating trait in durum wheat (*Triticum turgidum* var durum L.). *Magna Sci. Adv. Res. Rev.* 2, 016–027. <https://doi.org/10.30574/msarr.2021.2.1.0026>

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, 507–513. <https://doi.org/10.1684/sec.2006.0054>

Mir, R.R., Zaman-Allah, M., Sreenivasulu, N., Trethowan, R., Varshney, R.K., 2012. Integrated genomics, physiology and breeding approaches for improving drought tolerance in crops. *Theor Appl Genet* 125, 625–645. <https://doi.org/10.1007/s00122-012-1904-9>

Mohsin, T., Khan, N., Naqvi, F., 2009. Heritability, phenotypic correlation and path coefficient studies for some agronomic characters in synthetic elite lines of wheat. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 7, 278–282.

Moore, G., Devos, K.M., Wang, Z., Gale, M.D., 1995. Cereal Genome Evolution: Grasses, line up and form a circle. *Current Biology* 5, 737–739. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(95\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(95)00148-5)

Morales, D., Rodríguez, P., Dell’Amico, J., Nicolás, E., Torrecillas, A., Sánchez-Blanco, M.J., 2003. High-Temperature Preconditioning and Thermal Shock Imposition Affects Water Relations, Gas Exchange and Root Hydraulic Conductivity in Tomato. *Biologia Plantarum* 47, 203–208. <https://doi.org/10.1023/B:BIOP.0000022252.70836.fc>

Murti, B., 2016. How to Conduct Path Analysis and Structural Equation Model for Health Research. Presented at the International Conference on Public Health, Indonesia, p. 84.

Nayyar, H., Walia, D.P., 2003. Water Stress Induced Proline Accumulation in Contrasting Wheat Genotypes as Affected by Calcium and Absciscic Acid. *Biologia Plantarum* 46, 275–279. <https://doi.org/10.1023/A:1022867030790>

Nouar, H., Bouzerzour, H., Haddad, L., Menad, A., Hazmoune, T., Zerargui, H., 2012. Genotype xEnvironment interaction assessment in Durum wheat (*Triticum durum* Desf) using AMMI and GGE models. *Advances in Environmental Biology* 6, 3007–3016.

Nouar, H., Haddad, L., Laala, Z., Oulmi, A., Zerargui, H., Benmahammed, A., Bouzerzour, H., 2010. Performances comparées des variétés de blé dur : Mohammed Ben Bachir, Waha et Boussalam dans la wilaya de Sétif. *Céréaliculture* 54, 23–28.

ONFAA, 2016. Bilan du commerce extérieur algérien des céréales 2016 [WWW Document]. URL <http://onfaa.inraa.dz/index.php/marches-et-filieres/commerce-international/item/147-bilan-du-commerce-exterieur-algerien-des-cereales-2015.html> (accessed 5.25.21).

Oulmi, A., Benmahammed, A., Laala, Z., Adjabi, A., Bouzerzour, H., 2014. Phenotypic variability and relations between the morpho-physiological traits of three F5 populations of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) evaluated under semi-arid conditions. *Advances in Environmental Biology* 8, 436–443.

Oulmi, A., Nadjim, S., Fellahi, Z.E.A., Salmi, M., Laala, Z., Rabti, A., Benmahammed, A., 2016. Variabilité génétique, héritabilité et corrélations entre les caractères phéno-morpho-physiologiques et agronomiques des populations F2 de blé dur (*Triticum durum* Desf.). *International Journal of Innovation and Applied Studies* 17, 1275–1285.

Prasad, V., Strömberg, C.A.E., Alimohammadian, H., Sahni, A., 2005. Dinosaur Coprolites and the Early Evolution of Grasses and Grazers. *Science* 310, 1177–1180. <https://doi.org/10.1126/science.1118806>

Rane, J., Chauhan, H, Shoran, J, 2003. Post-anthesis stem reserve mobilization in wheat genotypes tolerant and susceptible to high temperature. *Indian Journal of Plant Physiology* 383–385.

Reynolds, M.P., Singh, R.P., Ibrahim, A., Ageeb, O.A.A., Larqué-Saavedra, A., Quick, J.S., 1998. Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica* 100, 85–94. <https://doi.org/10.1023/A:1018355906553>

Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Condon, A.G., van Herwaarden, A.F., 2002. Breeding Opportunities for Increasing the Efficiency of Water Use and Crop Yield in Temperate Cereals. *Crop Sci* 42, 111–121. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1110>

Robinson, H.F., Comstock, R.E., Harvey, P.H., 1949. Estimates of Heritability and the Degree of Dominance in Corn. *Agronomy Journal* 41, 353–359. <https://doi.org/10.2134/agronj1949.00021962004100080005x>

Roosens, N.H., Bitar, F.A., Loenders, K., Angenon, G., 2002. Overexpression of ornithine-aminotransferase increases proline biosynthesis and confers osmotolerance in transgenic plants. *Molecular Breeding* 9, 73–80.

Roy, R., Agrawal, V., Gupta, S.C., 2009. Comparison of drought-induced polypeptides and ion leakage in three tomato cultivars. *Biol Plant* 53, 685–690. <https://doi.org/10.1007/s10535-009-0123-y>

Royo, C, Brugnoli, E., Manthey, F., 2009. *Handbook of Plant Breeding*.

Royo, Conxita, Elias, E.M., Manthey, F.A., 2009. Durum Wheat Breeding, in: Carena, M.J. (Ed.), *Cereals, Handbook of Plant Breeding*. Springer US, New York, NY, pp. 199–226. https://doi.org/10.1007/978-0-387-72297-9_6

Sabour, I., Merah, O., El Jaafari, S, Paul, R., Monneveux, P.H., 1997. Leaf osmotic potential, relative water content and leaf excised water loss variations in oasis wheat landraces in response to water deficit. *Arch. Inter. Physiol. Biochem. Biophys* 105, 14.

Salmi, M., Benmahammed, A., Benderradji, L., Fellahi, Z.E.A., Bouzerzour, H., Oulmi, A., Benbelkacem, A., 2019. Generation means analysis of physiological and agronomical targeted traits in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cross. *Revista Facultad*

Nacional de Agronomía Medellín 72, 8971–8981.
<https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.77410>

Shah, N.H., Paulsen, G.M., 2005. Injury to Photosynthesis and Productivity from Interaction Between High Temperature and Drought During Maturation of Wheat. *Asian Journal of Plant Sciences* 4. <https://doi.org/10.3923/ajps.2005.67.74>

Sharma, R.C., Morgounov, A.I., Braun, H.J., Akin, B., Keser, M., Kaya, Y., Khalikulov, Z., Ginkel, M.V., Yahyaoui, A., Rajaram, S., 2012. Yield stability analysis of winter wheat genotypes targeted to semi-arid environments in the international winter wheat improvement program. 1.

Sharp, R.E., Poroyko, V., Hejlek, L.G., Spollen, W.G., Springer, G.K., Bohnert, H.J., Nguyen, H.T., 2004. Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics*. *Journal of Experimental Botany* 55, 2343–2351. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh276>

Shukla, D., Gupta, N.K., KAPAS, S., Deshmukh, P.S., pe PANDEI, R.S., 1997. Relationship between stem reserves and grain development in terminal heat stress susceptible and tolerant wheat genotypes. *Indian J. Plant Physiol* 2, 36–40.

Simon-Sarkadi, L., Kocsy, G., Várhegyi, Á., Galiba, G., de Ronde, J.A., 2005. Genetic Manipulation of Proline Accumulation Influences the Concentrations of Other Amino Acids in Soybean Subjected to Simultaneous Drought and Heat Stress. *J. Agric. Food Chem.* 53, 7512–7517. <https://doi.org/10.1021/jf050540l>

Sinclair, T.R., 2011. Challenges in breeding for yield increase for drought. *Trends in Plant Science* 16, 289–293. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.02.008>

Singh, R.P., Prasad, P.V.V., Sunita, K., Giri, S.N., Reddy, K.R., 2007. Influence of High Temperature and Breeding for Heat Tolerance in Cotton: A Review, in: Sparks, D.L. (Ed.), . pp. 313–385. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)93006-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)93006-5)

Spagnoletti Zeuli, P.L., Qualset, C.O., 1990. Flag Leaf Variation and the Analysis of Diversity in DurumWheat. *Plant Breeding* 105, 189–202.

Steel, R.G.D., Torrie, J.H., 1982. Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill Book Company, New York, Toronto, London.

Talukder, S.K., Babar, M.A., Vijayalakshmi, K., Poland, J., Prasad, P.V.V., Bowden, R., Fritz, A., 2014. Mapping QTL for the traits associated with heat tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *BMC Genetics* 15, 97. <https://doi.org/10.1186/s12863-014-0097-4>

Todorov, D.T., Karanov, E.N., Smith, A.R., Hall, M.A., 2003. Chlorophyllase Activity and Chlorophyll Content in Wild Type and *eti 5* Mutant of *Arabidopsis thaliana* Subjected to Low and High Temperatures. *Biologia Plantarum* 46, 633–636. <https://doi.org/10.1023/A:1024896418839>

Valliyodan, B., Nguyen, H.T., 2006. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. *Current Opinion in Plant Biology* 9, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.01.019>

Wardlaw, I.F., Willenbrink, J., 1994. Carbohydrate Storage and Mobilisation by the Culm of Wheat Between Heading and Grain Maturity: the Relation to Sucrose Synthase and Sucrose-Phosphate Synthase. *Functional Plant Biol.* 21, 255–271. <https://doi.org/10.1071/pp9940255>

Wricke, G., 1962. On a method of understanding the biological diversity in field research. *Z. Pfl. Zucht* 47, 92–146.

Yan, W., Kang, M.S., Ma, B., Woods, S., Cornelius, P.L., 2007. GGE Biplot vs. AMMI Analysis of Genotype-by-Environment Data. *Crop Science* 47, 643–653. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>

Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., Zhu, Q., Liu, L., 2001. Water Deficit-Induced Senescence and Its Relationship to the Remobilization of Pre-Stored Carbon in Wheat during Grain Filling. *Agronomy Journal* 93, 196–206. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.931196x>

Zaman-Allah, M., Jenkinson, D.M., Vadez, V., 2011. A conservative pattern of water use, rather than deep or profuse rooting, is critical for the terminal drought tolerance of chickpea. *J Exp Bot* 62, 4239–4252. <https://doi.org/10.1093/jxb/err139>

Zhu, C., Schraut, D., Hartung, W., Schäffner, A.R., 2005. Differential responses of maize MIP genes to salt stress and ABA. *Journal of Experimental Botany* 56, 2971–2981.

ANNEXE

Assessment of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes based on their agro-physiological characteristics and stress tolerance indices

Radhia MEKAOUSSE¹, Abou-bakr RABTI², Zine El Abidine FELLAHI³, Abderrahmane HANNACHI⁴, Amar BENMAHAMMED⁵, Hamenna BOUZERZOUR⁵

Received January 03, 2020; accepted March 15, 2021.

Delo je prispelo 3. januarja 2020, sprejeto 15. marca 2021.

Assessment of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes based on their agro-physiological characteristics and stress tolerance indices

Abstract: The present study aimed to investigate the extent of variability and relationships between grain yield and morpho-physiological durum wheat traits. Sufficient variability was observed for most characters. Based on stress indices, either widely or specifically, adapted lines were identified. Path analysis pointed out to above ground biomass, harvest index, spike fertility and spike number as yield determinants, suggesting that these traits are of interest in the breeding program. The measured traits were classified within 6 principal components accounting for 79.45 % of the total variation. Breeding lines dispersed along first principal component exhibited substantial differences in performance and stress tolerance abilities. Cluster C3 lines were high yielding and stress tolerant. From this cluster, lines L24 and L14 were scored as the best for 7 and 5 traits out of 17 characters, respectively. Both lines are proposed for release and as parents in crosses to take advantage of their desirable characteristics. The results indicated that physiological traits were unrelated to each other and to morphological traits making difficult the concomitant selection for yield and stress tolerance driven by these traits. Complexes crosses, between parents carefully chosen for these specific characteristics, are necessary to enhance favorable genetic linkage and to generate new basic segregating populations with high genetic variability for these traits.

Key words: Durum wheat; grain yield; genotype x environment interaction; physiological traits; tolerance indices; path analysis; cluster

Ovrednotenje genotipov trde pšenice (*Triticum durum* Desf.) na osnovi agro-fizioloških lastnosti in indeksov tolerance na stres

Izvleček: Namen te raziskave je bil preučiti obseg spremljivosti in razmerja med pridelkom zrnja in morfološko-fiziološkimi lastnostmi trde pšenice. Za večino lastnosti je bila ugotovljena zadostna variabilnost. Na osnovi indeksov stresa so bile določene širše in ožje prilagojene linije. Analiza povezanih znakov je pokazala, da so nadzemna biomasa, žetveni indeks, fertilnost klasov in njihovo število najpomembnejše lastnosti, ki določajo pridelek, kar kaže, da so te lastnosti zanimive za žlahtniteljske programe. Merjene lastnosti so bile razvrščene znotraj 6 glavnih komponent, kar je prispevalo kar 79,45 % celokupne variabilnosti. Linije križancev razvrščene vzdolž prve glavne komponente so imele znatno raznolikost glede sposobnosti tolerance na stres. Linije v grozdu C3 so bile tolerantne na stres in imele velik pridelek. Iz te skupine sta bili liniji L24 in L14 prepoznani kot najboljši za 7 in 5 znakov izmed 17 lastnosti. Obe liniji sta predlagani prednostno za uporabo v križanjih kot starševski liniji zaradi njunih zaželenih lastnosti. Izsledki so pokazali, da fiziološke lastnosti niso bile povezane med sabo niti z morfološkimi znaki, kar povzroča težave pri hkratni selekciji za pridelek in toleranco na stres na osnovi teh lastnosti. Za povečanje genetske povezave med preučevanimi znaki in vzgojo novih osnovnih raznolikih populacij so potrebna kompleksna križanja med pazljivo izbranimi starši, glede na te specifične lastnosti.

Ključne besede: trda pšenica; pridelek zrnja; interakcije genotipa in okolja; fiziološke lastnosti; indeksi tolerance; analiza povezanih znakov; klasterška analiza

¹ Department of Agronomy, Valorization of Natural Biological Resources Laboratory, Faculty of Natural and Life Sciences, University of Ferhat Abbas Setif-1, 19000 Setif, Algeria

² Institute of Agriculture and Veterinary Sciences, University of Mohamed-Cherif Messaadia, 41000 Souk Ahras, Algeria

³ Department of Agronomy, Faculty of Natural, Life and Earth Sciences and the Universe, University of Mohamed El Bachir El Ibrahimi, 34034 Bordj Bou Arreridj, Algeria

⁴ National Agronomic Research Institute of Algeria (INRAA), Setif Research Unit, 19000 Setif, Algeria

⁵ Department of Ecology and Plant Biology, Valorization of Natural Biological Resources Laboratory, Faculty of Natural and Life Sciences, University of Ferhat Abbas Setif-1, 19000 Setif, Algeria

Corresponding author, e-mail: zinou.agro@gmail.com / zineelabidine.fellahi@univ-bba.dz

1 INTRODUCTION

Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) is a major cereal crop grown in Algeria. Its production is based on adoption of modern varieties derived from CIMMYT (International Maize and Wheat Improvement Center) plant material and traditional cultivars issued from heritage landraces. Actually 1.5 million hectares are sown annually with a production varying from 0.42 (1986/87) to 3.2 million tons (2016/17), during the 1975-2017 period (CEIC, 2021). Because of differential ability to withstand drought and heat stresses, traditional cultivars are generally grown in poor yielding environments while recently released varieties are cultivated under relatively more favorable conditions. Sown in autumn, as rainfed crop, the vegetative growth phase occurs during cold and wet winter-early spring months while reproductive growth phase endures drought and terminal heat stresses. To meet the needs of a fast-growing population and to reduce the sharp rise in grain imports, larger production increases are sought. Since increasing sown area is not possible, future improved durum wheat varieties must then be capable of higher yields under lower management and uncertain climate scenarios. Because of climate changes, declining rainfall and increased temperatures are predicted for the Mediterranean basin which is likely to be a vulnerable hotspot (Lobell et al., 2007; Fraser et al., 2013).

Beside high yield potential, new cultivars should express stable performance and broad adaptation. Grain yield is a result of the combined effects of genotype (G), environment (E), and their interaction (GEI). Differences among genotypes, in their response to environmental changes, are caused by GEI (Annicchiarico et al., 2005; Haddad et al., 2016). A crossover GEI type reduces heritability and selection efficiency (Ceccarelli et al., 1991). Substantial efforts are therefore dedicated to reduce yield instability through plant breeding and crop management (Chamekh et al., 2015). A number of traits and indices have been proposed to be used along with grain yield to select more efficiently desirable genotype characterized by high yield potential, stress tolerance and acceptable stability (Li et al., 2012; Dorostkar et al., 2015). In this context, an understanding of the physiological mechanisms underlying abiotic stress tolerance, the identification of the trait-markers of these mechanisms and the analysis of their relationships with grain yield and yield attributes could be helpful to efficiently select for high and stable grain yield under variable environments. Plants have developed several mechanisms, which alleviate the harmful effects of stress (Ashraf, 2010). Among various environmental stresses, heat and drought are the main grain yield limiting factors. Yield reduction mag-

nitude depends on plant growth stage subjected to stress and on stress severity (Nouri et al., 2011). Differences in stress tolerance among genotypes and species were reported in several studies (Marcinska et al., 2017; Grzesiak et al., 2012; 2017). Yield stability indices have been formulated and proposed among others by Di-Matteo et al. (2016) and Farshadfar et al. (2018).

The relation between grain yield obtained under stress and non stress conditions could be used as marker of stress tolerance. This relation is approached through stress tolerance indices, which identify genotypes with good performance under both non-stress and stress environments (Benmahammed et al., 2010; Grzesiak et al., 2012). Stress tolerance (STI), yield stability (YSI) and superiority genotypic (Pi) indices were, among several other indices, proposed as potential tools to identify high yielding, stable and/or stress tolerant genotypes (Lin and Binns, 1988, Farshadfar et al., 2018). Stress-induced cell membrane injury, relative water content, rate of excised flag leaf water loss, canopy temperature, and leaf chlorophyll content were rated as promising screening tools in the search of stress tolerance (Hura et al., 2007; Hasheminasab et al., 2014; Saed-Moucheshi et al., 2016). In this context, Awan et al. (2015) reported that grain yield was closely linked to relative water content, cell membrane stability and specific flag leaf area. The increased solute leakage, marker of decreased cell membrane thermostability, is used as a measure of heat-stress tolerance (Wahid et al., 2007; Khajuria et al., 2016). The present investigation aimed to assess the variability, stability and relationships of grain yield with physio-morphological traits in a set of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) advanced breeding lines grown under south Mediterranean conditions.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1. SITE, PLANT MATERIAL, AND EXPERIMENTAL DESIGN

Twenty four advanced durum wheat breeding lines and a check, cultivar Waha (Table 1), were evaluated in a field experiment during the 2016/17, 2017/18 and 2018/19 growing seasons at the Field Crop Institute, Agricultural Experimental Station of Setif (ITGC-AES, 36°12' N, 05°24'E, 1080 m above sea level, Setif, Algeria). The experiment was set-up in a randomized complete block design with four replications. Plot dimensions were 6 rows 5 m long with 0.20 m space between adjacent rows, and 0.30 m between adjacent plots. Recommended cultural practices for the area were followed to grow a good crop. Eighty kg ha⁻¹ of mono-ammonium phosphate (52

% P₂O₅ + 12 % N) were applied just before sowing, and 80 kg ha⁻¹ of urea (46 % N) 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⁻¹ of Pinoxaden, 22.5 g l⁻¹ of Clodinafopropargyl and 6.5 g l⁻¹ of Cloquintocet-mexyl) herbicides.

2.2. WEATHER CONDITIONS

Monthly rainfall and temperatures (maxi, mini, and average) recorded at the experimental site, during the three cropping seasons, are reported in Figure 1. Rainfall distribution, typical of Mediterranean climate, is quite variable within and between cropping seasons. The amount recorded, from September 1st to June 30th, reached 187.5, 442.1 and 346.6 mm, for 2016/17, 2017/18 and 2018/19 cropping seasons, respectively. Expressed relatively to the maximum value, these figures represent 42.4, 100.0 and 78.4 %, for the three cited cropping seasons, respectively. Rainfall amount available for the vegetative phase ranged from 73.2 % to 83.1 % of the cycle total, and from 16.9 to 26.8 % for the reproductive phase. Rainfall of the 2017/18 cropping season was evenly distributed along the crop cycle, while in 2016/17, a severe drought period occurred from the tillering stage onwards. June 2017 showers, coinciding with the grain filling period, avoided a complete crop failure. In fact, with less than 15 mm, during the March-April-May period, the 2016/17 cropping season was a stressful environment, while with 223.6 mm accumulated during the same period, the 2017/18 cropping season behaved as a favorable environment for wheat growth. Monthly mean maximum, mean minimum temperatures and their average exhibited, during the crop cycle, a bimodal evolution pattern, reaching their lowest values in January and February months and their highest values in June onwards (Figure 1). Under this climatic scenario, durum wheat growth is hampered by low temperature during the vegetative phase, when relatively appreciable soil water is available and by rising temperatures and water scarcity during the grain filling phase.

2.3. DATA COLLECTION

Relative water content (RWC) was determined as described in Pask et al. (2012). Fresh leaves were collected, at anthesis, weighted to record fresh mass (FM). The samples were placed in distilled water for 24 h and weighed to record turgid mass (TM). Samples were then subjected to oven drying at 72 °C for 24 h to record dry

mass (DM). Relative water content was calculated as follow: $RWC = [(FM - DM)/(TM - DM)] \times 100$. Flag leaf chlorophyll content (CHL, CCI) was determined with a CCM - 200 chlorophyll meter (Opti-Sciences, Tyngsboro, MA, USA) at the anthesis growth stage. Chlorophyll measurements were taken from the middle of the flag leaf. Canopy temperature (CT) was measured, at heading, using a hand-held infrared thermometer (Fluke Corporation, Everett, WA, USA). Four measurements were taken per plot at approximately 0.5 m distance from plot edge. Readings were done between 11:00 to 14:00 hours on sunny days.

Table 1: Name and pedigree of the advanced durum wheat breeding lines tested during three successive cropping seasons (2016/17, 2017/18, 2018/19) at the ITGC- AES experimental site (Setif, Algeria).

N°	Name /Pedigree
1	Waha (check)
2	Jupare C
3	Sooty_9/Rascon_37//Storlom/5/Toska_26/Rasco
4	Ajaia_4/Canelo_3/4/Arment//Srnl_3/Nigris_4/3/Ca
5	Canelo_9.1/Snitan//Plata_10/6/Mque/4/Usda573/
6	Bellaroi/4/Bicum//Lauretinia/3/Dukem_12/2*Raiscon_21
7	Islom_1/Dukem_2/Tarro_3/5/Crex//Boy/Yav_1/3
8	P _{91.272.3.1} /3*Mex ₁₇₅ //2*Jupare c
9	Guemgoum Rhem/4/Stj3//Bcr/Lks4/3/Ter ₃
10	Brak^2/Ajaia_2//Solga_3/3/Canelo_8//Sora
11	Sooty^9/Rascon_37//Stormlom/8/Rissa/Gan.
12	Silk_3/Dipper_6/3/ac089/Dukem_4/5*Ac ₀₈₉
13	Sooty_9/Rascon_37//Storlom/5/Toska_2
14	Terbol ₉₇₅ /Geruftel ₂
15	Langdon/Kucuk
16	20048 Traikia/Mrb5//Stj ₃
17	T.Polo/ZB//Inrat ₆₉
18	Lcasyrl/3/Gen//Stj/Mrb ₃
19	Ouasloukosl/5/Aznl/4/Bezaizshf//SD19539/Waha/3/Gdr ₂
20	Mohawk/9/Usda ₉₉₅ /3/D67.3/Rabi/Cra/4/Al05
21	Icasyrl/3/Bcr/sb1/5/Turaru/4/13376/Bcrchl//Ossll/Stj ₅
22	Korifla/Aeg speltoïdes Syr/Amedakul
23	Amedakull/Triticum Dico Syr Col/Lukos
24	Terbol97-5/Geruftel ₂
25	Ouasloukosl/5/Aznl/4/Bezaifshf//SD ₁₉₅₃₉ /Waha/3/Gdr ₂

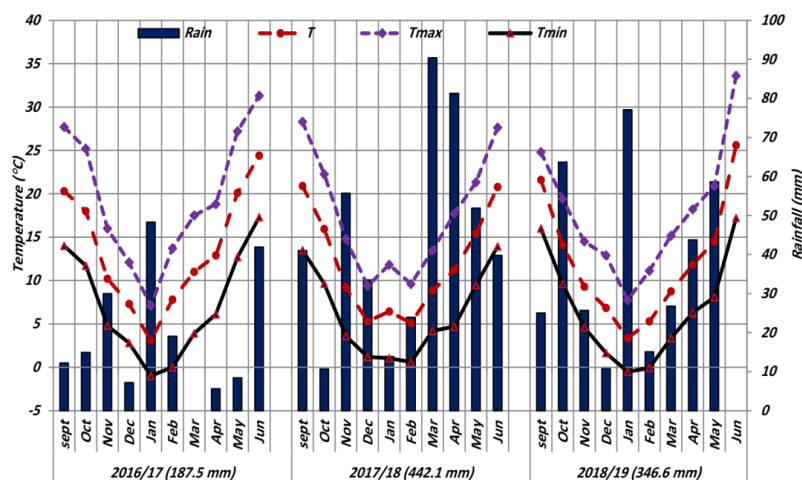


Figure 1: Monthly rainfall and mean temperatures recorded during the three cropping seasons test at the ITGC-AES, Setif, Algeria.

Membrane stability index (MSI) was estimated according to Ibrahim and Quick (2001). Two sets of leaf tissues, 10 leaf segments, 1 cm length each, were placed in test tubes containing 10 ml of double-distilled water. One set was kept at 40 °C for 30 min and its electrical conductivity recorded (C1) using a conductivity meter, type Eutech Instruments, Singapore, while the second set was kept in a boiling water bath (100 °C) for 30 min and its conductivity recorded (C2). MSI was calculated as follows: $MSI = 100 * [1 - (C1/C2)]$. To determine the rate of excised leaf water loss (ELWL), 10 flag leaves were randomly clipped per plot, and were immediately weighted to record the fresh mass (FM). The samples were wilted at 30 °C in an electrical oven for 4 hours, and weighted to obtain the wilted mass (WM). The samples were oven-dried at 70 °C for 72 h and weighed to record dry mass (DM). ELWL was worked out using the following formulae: $ELWL (\%) = 100 * (FM - WM) / DM$ (Dhanda and Sethi, 1998). Plants were scored for plant height (PHT, cm), measured just before harvest. Days to heading (DHE) were counted from January 1st to the date when 50 % of the spikes were half-way out of the flag leaf sheath. At maturity, a row segment, 1 m long, was harvested and used to determine above ground biomass (BIO, g m⁻²), number of spikes m⁻² (SN), and harvest index (HI, %). Grain yield (GY, g m⁻²) and thousand-kernel mass (TKM, g) were determined from the combine harvested trial. The number of kernels per spike (NKS) was derived as the ratio of the number kernels m⁻² divided by the number of spikes m⁻².

2.3. DATA ANALYSIS

Environment (E), genotype (G) and their interac-

tion (GEI) effects of physiological, yield and yield-related traits were determined through a combined analysis of variance using balanced analysis of variance subroutine implemented in Cropstat software (Cropstat, 2007). Genotypic (σ^2_g) and error (σ^2_e) components of variance were calculated to estimate the coefficient of experimental (CVe), and of genotypic variation (CV_G) and their ratio CV_G/CVe. This ratio is used to appreciate the magnitude of genotypic relatively to experimental variation as suggested by Cruz et al. (2012). A ratio value, greater than unity, suggests the presence of appreciable genotypic variability exploitable in selection. Pearson's correlation coefficients between grain yield and the measured traits were calculated per cropping season using Past software (Hammer et al., 2001). Path coefficients analysis was carried out on the across cropping seasons averaged values. For this purpose, mean values of the traits loaded in the full model were standardized, and subjected to a multiple regression analysis to determine standardized partial regression coefficients (Beta) or paths. The indirect effect of trait X_i via trait X_p was obtained as the product of the path coefficient of the trait X_i and the correlation coefficient relating traits X_i and X_p following the procedure described in Akintunde (2012). Genotypic superiority index (Pi) was derived according to Lin and Binns (1988) as: $P = \sum (X_{ij} - M_j)^2 / 2n$, where X_{ij} is the grain yield of the i^{th} breeding line in the j^{th} testing environment (cropping season), M_j is the grain yield of the best performing breeding line in the j^{th} environment, and n is the number of environments test. Grain yield stability index (YSI) was calculated using the following formulae: $YSI = Y_s / Y_p$; and stress tolerance index (STI) was determined as follow: $STI = (Y_p \times Y_s) / \bar{Y}_p^2$, where Y_s , Y_p and $\bar{Y}_p$ are grain yield means observed under stress, non stress and average of all assessed breeding lines under non stress envi-

ronments, respectively (Benmahammed et al., 2010). The ecovalence (W^2i) was calculated as described in Weedon and Finckh (2019) as follow: $W^2_i = \sum (X_{ij} - X_i - X_j + X_{..})^2$, where X_{ij} represents grain yield of the i^{th} genotype in the j^{th} environment, X_i is the genotype main effect, X_j is the environment main effect and $X_{..}$ is the grand mean. Principal components and cluster analyses, subroutine implemented in Past statistical software (Hammer et al., 2001), were carried out using standardized mean values of the measured traits averaged of across environments and the stress index values. Dendrogram, showing breeding lines classification, was generated adopting Ward's method based on squared Euclidean distance.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1. MEAN PERFORMANCE AND VARIABILITY

The results of the combined analysis of variance for the measured traits are reported in Table 2. Season and genotype main effects as well as their interaction (GEI) were highly significant for all traits, except CHL season main effect and GEI which were not. Season main effect of GY, NKS, DHE, BIO, and PHT accounted for more than 70.0 % of the variation observed in the analyzed data. Season main effect of HI, SN and MTS explained between 30.0 to 60.0 % of the total variation expressed in these traits, while TKM, RWC and CHL season main effects accounted for less than 30 % of the total variation. Genotype main effect accounted for 15.0 % for GY, SN, NKS, DHE, BIO, HI and RWC. TKM and CHL genotype main effect accounted for 52.2 %, and 23.1 %, to the total variation, respectively. Contribution of GEI to the total variation was as low as 1.2 % and 2.7 % for PHT and DHE and increased to 38.5 % for HI (Table 2). These results suggested that the expression of the measured traits is affected essentially by changes in environment, while variation originated from differences between genotypes (G) and GEI effects is comparatively less marked. The large season main effect is attributed to differences in the amount and distribution of annual rainfall (Figure 1). The fact that GEI contributed more to the explanation of the variation observed than the contribution due to genotype main effect suggested that genotypes responded and ranked differently across the seasons test, as this is shown in Figure 2, which indicated the G + GEI contribution to the grain yield variation.

Breeding line L19 was the most reacting, exhibiting positive contribution during two seasons and a strong negative contribution during the third season. L9 appeared as a desirable entry as it exhibited positive contributions during the three cropping seasons. L6, L3 and

to a lesser extent L4 were less yielding but have positive interactions during the three cropping seasons (Figure 2). The results of the present study show that selection and recommendation, based on grain yield of superior genotypes among those tested, is difficult because of the masking effect of the GEI.

The mean, maximum and minimum values, averaged over seasons, and the best scoring lines for the measured traits are reported in Table 2. GY ranged from 585.93 to 838.11 g m⁻², SN from 435.42 to 590.42, TKM from 33.08 to 41.17 g, NKS from 29.23 to 41.32 kernels per spike, DHE from 113.33 to 117.33 days, BIO from 1334.98 to 1976.38 g m⁻², HI from 34.45 to 47.53 %, PHT from 65.23 to 71.18 cm, RWC, from 66.90 to 83.01 %, MTS from 49.44 to 71.43 %, CHL from 33.78 to 46.36 cci, CT from 20.15 to 24.90 °C and ELWL from 23.58 to 55.32 %. The recorded values for the coefficient of experimental variation (CVe) were below 10 % for most of the measured traits, suggesting that an appreciable precision was achieved in the measurement of these traits. Cve values for HI, RWC, MTS, CHL and ELWL were higher than 10 % suggesting a lack of precision and an environment effect on the expression of these traits. Increasing replications for the measurement of these traits is justified to be able to detect significant genotypic differences, if any. The ratio CV_G/CVe is almost equal to 1 for CT and higher than unity for TKM and DHE, indicating sizeable genotypic variability. Values of this ratio were lower than unity for the remaining measured traits, suggesting relatively low genotypic variability.

3.2. GRAIN YIELD STABILITY AND STRESS TOLERANCE

Genotypic superiority index values ranged from 1.46 to 52.12 with an average of 33.41. The best breeding lines (≈ 10 % selection intensity) were L24 and L13 which exhibited the lowest Pi values of 1.5 and 8.4, respectively. YSI values ranged from 0.219 to 0.553 and an overall mean of 0.330. Since high YSI values are desirable, the best breeding lines for this trait were L25 (YSI = 0.180) and L19 (YSI = 0.553). STI values ranged from 0.184 to 0.439 and an overall mean of 0.324. High STI values are desirable in selection for drought tolerance. The best breeding lines for this trait were L1 (STI = 0.439) and L11 (STI = 0.423). The ecovalence values (W^2i) ranged from 3.03 to 120.0 with an average value of 25.34. Genotypes exhibiting low W^2i are desirable in selection. The best breeding lines for this characteristic were L15 (W^2i = 3.00) and L21 (W^2i = 7.1). Correlation coefficients analysis indicated that no significant relationship ($r = 0.164$, $p > 0.05$) existed between Y_p (GY of 2017/18 season) and

Table 2: Combined analysis of variance mean squares, contribution to the total variation (%), mean values, best scoring lines, coefficient of experimental variation, ratio of genetic to experimental coefficients of variation and least significant difference at 5% probability level, for the measured traits.

Source	Season (E)	Blocks/E	Gen (G)	G x E	Pooled residual	Mean	Maxi	Min	CVe %	CV _c /CVe	Lsd5%
DF	2	9	24	48	216						
GY	11611800** 82.9%	14138.3	54003** 4.6%	52800** 9.0%	3853.6	674.04	838.11 L24, L14	585.93	9.21	0.16	50.7
SN	1069850** 56.7%	2920.9	19158** 12.2%	18253** 23.0%	1263.6	507.79	590.42 L24, L12	435.42	7.00	0.24	29.0
TKM	239.3** 13.1%	1.2	79.3** 52.1%	21.2** 27.9%	1.1	36.10	41.17 L23, L21	33.08	2.94	2.08	0.9
NKS	12985.3** 71.4%	4.4	155.2** 10.2%	119.1** 15.7%	4.2	35.50	41.32 L3, L15	29.23	5.78	0.84	1.7
DHE	5049.1** 93.6%	0.5	13.8** 3.1%	6.0** 2.7%	0.3	115.08	113.33 L24, L14	117.33	0.47	1.48	0.4
BIO	38690800** 72.3%	12655.7	406210** 9.1%	380943** 17.1%	7247.7	1641.45	1976.38 L14, L2	1334.98	5.19	0.54	69.5
HI	4053.4** 34.1%	37.7	111.1** 11.2%	189.6** 38.3%	16.3	40.15	47.53 L24, L17	34.45	10.06	0.00	3.3
PHT	38623.4** 91.9%	415.3	32.8** 0.9%	21.5** 1.2%	5.6	68.28	71.18 L24, L14	65.23	3.48	0.41	1.9
RWC	2146.2** 11.6%	188.5	229.9** 14.9%	138.6** 18.0%	87.5	77.86	83.01 L18, L2	66.90	12.01	0.29	7.6
MTS	29247.6** 49.5%	1568.7	301.3** 6.1%	221.7** 9.0%	128.7	62.29	71.43 L14, L21	49.44	18.21	0.23	9.3
CHL	506.5 ^{ns} 9.4%	183.5	103.3** 23.1%	22.8 ^{ns} 10.2%	20.9	39.44	46.36 L24, L12	33.78	11.58	0.57	3.7
CT ^a		11.63	4.80**		1.04	22.75	24.90	20.15 L1, L9	4.48	0.95	0.8
ELWL ^a		211.6	315.6**		116.1	37.13	55.32 L3, L6	23.58	29.05	0.66	8.8

GY = Grain yield (g m⁻²), SN = Number of spikes m⁻², TKM = 1000-kernel mass (g), NKS = Number of kernels per spike, SM = Spikes mass (g m⁻²), DHE = Number of days to heading, BIO = Above ground biomass (g m⁻²), HI = Harvest index (%), STW = Straw yield (g m⁻²), Yeco = economical yield (g m⁻²), PHT = Plant height (cm), RWC = Flag leaf relative water content, MTS = Membrane thermo stability (%), CHL = Chlorophyll content(cci), CT = Canopy temperature (°C), ELWL = Excised leaf water loss (%). ns, * and ** = non significant and significant effects at 5 % and 1 % probability level, respectively. ^a = Data from one season only.

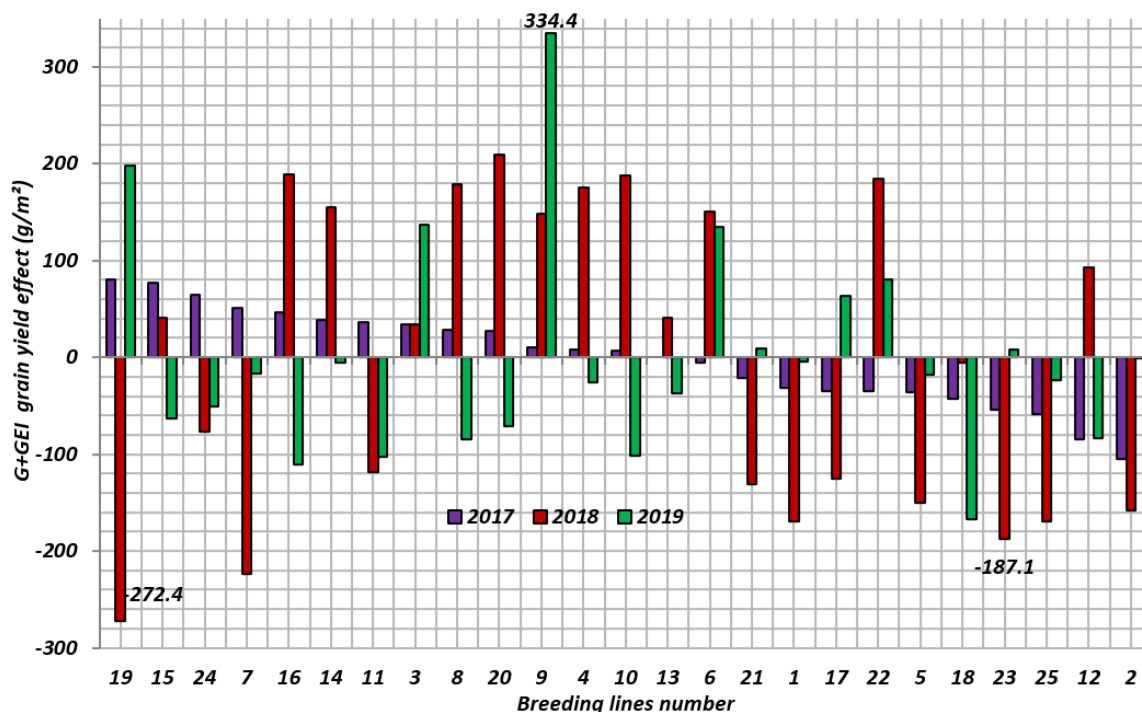


Figure 2: Genotype + Genotype x Environment interaction (G + GEI) contributions to grain yield variation of the advanced breeding lines assessed during three cropping seasons at the ITGC-AES of Setif (Algeria).

Ys (GY of 2016/17 season), suggesting that both environments ranked differently the assessed breeding lines. These results support findings reported by Nouri et al. (2011). In contrast, a positive and significant correlation, between Ys and Yp, was reported by Golabadi et al. (2006) and a negative one by Sio-Se-Mardeha et al. (2006). Different results may come out due to the nature of the GEI present (presence of crossover or not), stress intensity and to the degree of sensitivity of the plant materials tested. Pi index correlated negatively and significant with Yp ($r = -0.725, p < 0.01$) and with STI ($r = -0.629, p < 0.01$), but not with YSI ($r = 0.384, p > 0.05$), nor with W²i ($r = -0.027, p > 0.05$). YSI index correlated negatively and significant with Yp ($r = -0.641, p < 0.01$) and positively and significantly with Ys ($r = 0.637, p < 0.01$) and with W²i ($r = 0.470, p < 0.05$). Besides its negative and significant correlation with Pi, STI index correlated positively and significant with Ys ($r = 0.717, p < 0.01$) and Yp ($r = 0.800, p < 0.01$). Pi index measures the deviation of the performance of a given genotype from that of the best performing genotype in a given environment, and lower Pi values are desirable, because they identify high yielding and stable genotypes (Lin et Binns (1988).

The results of the present study corroborate those of Clarke et al. (1992) and Benmahammed et al. (2010) who reported significant and negative correlation between

Pi and Yp. This correlation suggested that low Pi genotypes responded to improved growth conditions (fertility) more than they do under stress conditions which are less discriminating. Yield stability index (YSI) measures Ys as a fraction of Yp. Genotypes, with high YSI index, minimize yield decline under stressed conditions. The results of the present study corroborate those of Nouri et al. (2011) who reported a negative and significant correlation between YSI and Yp and a strong positive and significant correlation with Ys. Similar results were obtained by Sio Se-Mardeh et al. (2006). The positive and significant correlation between YSI and Wi, found in the present study, suggests that YSI identify stable genotypes too. Nouri et al. (2011) and Mohammadi et al. (2011) mentioned that STI was suitable for sorting out the best yielding and stable genotypes under Ys and Yp growth conditions. According to Lin et al. (1986), W²i represents the genotypic contribution to the GEI, as such a W²i value near or equal to zero is suggestive of dynamic stability. No significant correlations were found, in the present study, between W²i and Ys, nor between W²i and Yp. In this context Benmahammed et al. (2010) report a positive and significant correlation between W²i and Yp, suggesting that best performing genotypes under favorable environment are generally instable. Non significant correlation between Yp and W²i indicates the independ-

ence of this stability parameter from grain yield under non stress conditions and the potential trade-off between grain yield potential and stability as mentioned by Lopes et al. (2012). Comparison of Y_s and Y_p of the advanced breeding lines selected on the basis of the studied indices indicated that STI and Pi identify high yielding and stable genotypes which take advantage of the growth conditions available in the favorable environment (Figure 3).

Selection based on YSI identifies genotypes which minimize Y_s decline at the expense of Y_p which is drastically reduced. Selection, based on W^2i identifies stable genotypes which deviate little from the grand mean (Figure 3). These results corroborated those of Weedon and Finckh (2019) who reported that W^2i identifies stable genotypes which exhibit low GEI, achieving a yield response parallel to the mean yield response of all genotypes. These results suggest that selection based on W^2i and YSI parameters favors stable but below average yielding genotypes. In contrast, selection based on Pi and STI favors high-yield genotypes adapted to a wide range of conditions. Yield stability is either static or dynamic. Genotypes showing static stability tend to yield similarly across all environments, showing specific adaptation to stress environments. Genotypes showing dynamic stability exhibit a mean response parallel to the mean response of all genotypes in the test environments. They are adapted to a broader range of environments.

3.3. GRAIN YIELD AND MORPHO-PHYSIOLOGICAL TRAITS RELATIONSHIPS

Correlation coefficients analysis per environment indicated consistent positive and significant correlations across seasons ($r = 0.446, p < 0.05$; $r = 0.641, p < 0.01$ and $r = 0.615, p < 0.01$) between GY and SN, suggesting that SN exerted a strong influence on grain yield. The relationships between GY, on one hand, and NKS, BIO and HI, on the other hand, were inconsistent showing significance in two out of three cropping seasons. Relationships between GY and TKM, DHE and CT were inconsistent reaching significance in one out of three cropping seasons. These results suggested the dependence of these relationships on the environment for their expression. The correlation between GY and CT indicated that this relationship is likely expected under stress rather than under non stress environment. So, to be efficient, selection based on CT should be done under stress conditions which allow expression of CT controlling genes. No significant correlations were observed between GY and RWC, PHT, MTS, CHL and ELWL (Table 3). The results of the correlation coefficients analysis indicated that GY is influenced consistently by SN, while the effects of BIO, NKS, TKM, DHE, HI, CT on GY were environment-driven. GY was insensitive to the expressed variation of the physiological traits (RWC, PHT, MTS, CHL and ELWL). This contrasts with what has been reported by Awan et al. (2015) who observed that GY was closely linked to RWC and MTS. Lopes et al., (2012) noted that RWC failed to correlate to GY, while Nouri et al. (2011) concluded that RWC is a valuable analytical selection tool to improve wheat GY under drought stress.

Phenotypic correlations depend on genetic and en-

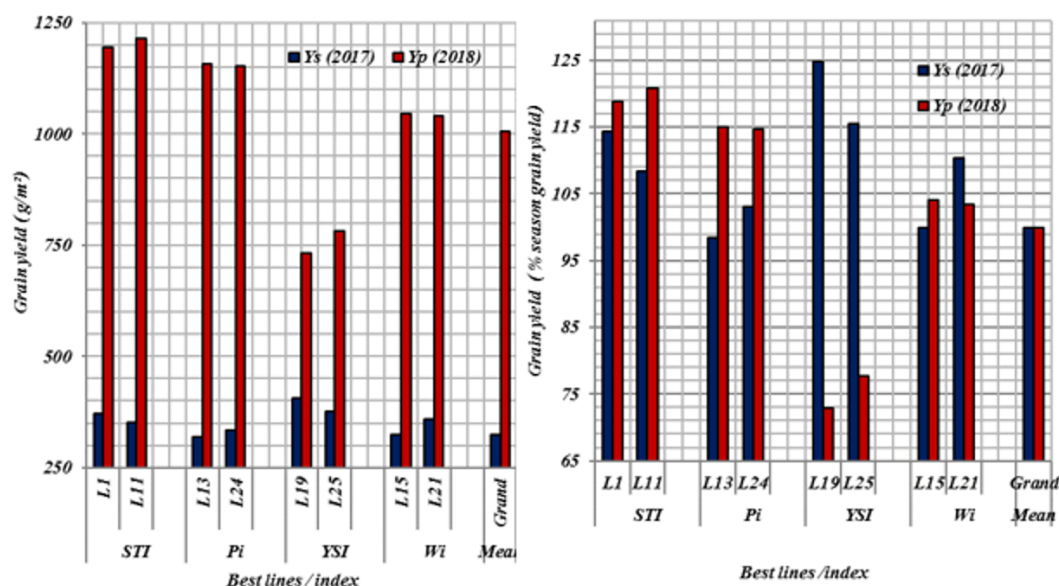


Figure 3: Grain yield performances ($g\ m^{-2}$, left figure and % of season grain yield, right figure) under stress (Y_s) and non stress (Y_p) growth conditions of the best breeding lines selected based on stress indices.

Table 3: Person's correlation coefficients between grain yield and morpho-physiological traits of the advanced durum wheat breeding lines tested during three successive cropping seasons (2016/17, 2017/18, 2018/19) at the ITGC- AES experimental site (Setif, Algeria).

	GY 2016/17	GY 2017/18	GY 2018/19
SN	0.446*	0.641**	0.615**
TKM	-0.099 ^{ns}	-0.392 ^{ns}	0.421*
NKS	0.700**	0.583**	0.232 ^{ns}
DHE	-0.096 ^{ns}	-0.158 ^{ns}	-0.503*
BIO	0.408*	0.693**	0.292 ^{ns}
HI	0.661**	0.211 ^{ns}	0.437*
PHT	0.032 ^{ns}	-0.274 ^{ns}	0.293 ^{ns}
RWC	0.054 ^{ns}	-0.178 ^{ns}	0.002 ^{ns}
MTS	-0.114 ^{ns}	-0.143 ^{ns}	-0.040 ^{ns}
CHL	0.124 ^{ns}	-0.109 ^{ns}	-0.246 ^{ns}
CT	-0.410*	-0.153 ^{ns}	-0.220 ^{ns}
ELWL	-0.163 ^{ns}	-0.069 ^{ns}	-0.103 ^{ns}
r 5%, 23 DF =		0.396	
r 1%, 23 DF =		0.505	

GY = Grain yield (g m^{-2}), SN = Number of spikes m^{-2} , TKM = 1000-kernel mass (g), NKS = Number of kernels per spike, DHE = Number of days to heading, BIO = Above ground biomass (g m^{-2}), HI = Harvest index (%), PHT = Plant height (cm), RWC = Flag leaf relative water content, MTS = Membrane thermo stability (%), CHL = Chlorophyll content(cci), CT = Canopy temperature ($^{\circ}\text{C}$), ELWL = Excised leaf water loss (%). ns, * and ** = non-significant and significant effects at 5 % and 1 % probability level, respectively, r 5% and r 1 %, = r table values at 5 and 1 % probability levels, respectively.

environmental factors. Environmental factors may either enhance traits relationship or inhibit it, lessening the usefulness of such environment-driven traits in selection. The dependence of the relationship between traits on the environment was mentioned by Lopes et al., (2012) who found that TKM was positively associated with GY in some environments and negatively related in others environment, while CT was consistently associated with GY in all environments test. Furthermore, the absence of correlation between the independent and dependent variable could be due to the fact that the independent variable influences the dependent variable indirectly via other variables, rather than directly. These effects are not shown by the correlation coefficient. This inconvenient is avoided by using path analysis instead of the correlation coefficient analysis. In fact, path coefficient analysis subdivides the correlation coefficient into direct and indirect components, which allows determining which component influences substantially the dependent variable. Direct and indirect effects of the measured traits on grain yield are reported in table 4. Based on the categorization of the path coefficients suggested by Bhisma (2016) (absolute value < 0.100 is a negligible effect; < 0.300 > 0.100, small effect; > 0.300 < 0.500, medium effects, and > 0.500 is a large effect), the results of the present study indicated that NKS (0.738), SN (0.614), TKM (0.434), BIO (0.349) and HI (0.290), beside their

appreciable direct effects, are a consistent route via which most of the measured traits influenced indirectly grain yield. This highlights their role as GY determinants. In fact, SN exhibited a large positive direct effect (0.614) on GY, and acted indirectly, on this trait, via NKS (-0.263) and BIO (0.218). The negative indirect effect via NKS comes out because of compensation effect between SN and NKS. This suggests that increased GY is amenable through selection for high SN. This trait, easily estimated visual, could be used to discriminate between assessed lines in the field. Khan et al. (2010) reported positive direct and indirect effects through PHT, NKS and TKM of SN on GY. TKM expressed moderate direct effect (0.434) on GY, associated with sizeable indirect and negative effects via NKS (-0.440). The indirect effects of this trait via the remaining measured traits were negligible. In contrast Khan et al. (2010) found a negative direct effect for TKM, associated to negative indirect effects via PHT and NKS. NKS influenced positively GY directly (0.738) and indirectly and negatively via SN (-0.219) and TKM (-0.259). No substantial indirect effects of NKS via the remaining measured traits were observed (Table 4). DHE showed negligible direct influence on GY (-0.095), since lateness affected negatively GY through SN (-0.229) and TKM (-0.295) decline, and through increase of spike fertility (indirect effect for NKS = 0.390). BIO acted directly (0.349) and indirectly via HI (-0.151) and via SN (0.383).

Table 4: Direct (diagonal) and indirect effects of the morpho-physiological traits on grain yield of the advanced durum wheat breeding lines tested during three successive cropping seasons (2016/17, 2017/18, 2018/19) at the ITGC-AES experimental site (Setif, Algeria): Data averaged across the three cropping seasons.

	SN	TKM	NKS	DHE	BIO	HI	PHT	RWC	MTS	CHL	CT	ELWL	rGY/yi	rGy/Yi -β
SN	0.614	0.036	-0.263	0.035	0.218	-0.057	-0.024	0.002	0.001	0.004	0.007	0.001	0.574	-0.040
TKM	0.051	0.434	-0.440	0.065	-0.025	0.052	-0.008	-0.006	0.002	0.003	0.008	0.007	0.141	-0.293
NKS	-0.219	-0.259	0.738	-0.050	0.027	0.095	0.026	0.000	-0.002	-0.001	-0.025	-0.014	0.318	-0.420
DHE	-0.229	-0.295	0.390	-0.095	-0.028	-0.003	0.028	0.003	-0.002	-0.001	-0.004	-0.008	-0.242	-0.147
BIO	0.383	-0.032	0.057	0.008	0.349	-0.151	0.001	0.004	0.002	0.006	-0.006	-0.008	0.613	0.264
HI	-0.120	0.078	0.243	0.001	-0.182	0.290	0.006	-0.001	-0.001	-0.005	0.000	0.001	0.309	0.019
PHT	0.201	0.048	-0.264	0.036	-0.005	-0.024	-0.074	0.005	0.000	0.004	-0.003	0.000	-0.076	-0.002
RWC	-0.036	0.092	-0.010	0.009	-0.043	0.009	0.011	-0.030	0.001	0.003	-0.020	-0.003	-0.016	0.014
MTS	0.147	0.166	-0.240	0.029	0.101	-0.072	0.002	-0.007	0.006	0.002	-0.017	0.000	0.120	0.114
CHL	-0.089	-0.040	0.021	-0.002	-0.078	0.045	0.011	0.003	0.000	-0.029	0.018	0.002	-0.137	-0.108
CT	0.068	0.053	-0.282	0.006	-0.032	-0.001	0.003	0.009	-0.002	-0.008	0.066	0.008	-0.111	-0.177
ELWL	0.017	0.083	-0.294	0.021	-0.081	0.006	0.002	0.002	0.000	-0.002	0.015	0.036	-0.193	-0.229

GY = Grain yield (g m⁻²), SN = Number of spikes m⁻², TKM = 1000-kernel mass (g), NKS = Number of kernels per spike, DHE = Number of days to heading, BIO = Above ground biomass (g m⁻²), HI = Harvest index (%), PHT = Plant height (cm), RWC = Flag leaf relative water content, MTS = Membrane thermo stability (%), CHL = Chlorophyll content(cci), CT = Canopy temperature (°C), ELWL = Excised leaf water loss (%). Residual factor = 0.0264.

This trait showed negligible indirect effects via the other measured traits. Similarly, HI acted directly (0.290) and indirectly and negatively via BIO (-0.182), and via SN (-0.120) and positively via NKS (0.243). PHT showed sizeable indirect effects, positive via SN (0.201) and negative via NKS (-0.234). Khan et al. (2010) found positive direct effect of NKS on GY and positive indirect effects through PHT and TKM. The morphological traits measured (SN, TKM, NKS, DHE, BIO, HI and PHT) didn't express any sizeable indirect effect on GY via physiological traits. Similarly, physiological traits (RWC and CHL) didn't show any sizeable direct or indirect effects on GY, while MTS and CT and ELWL expressed moderate indirect effects. MTS affected indirectly and positively GY via SN (0.147) and via TKM (0.166) and negatively via NKS (-0.240). Similarly, CT (-0.282) and ELWL (-0.294) affected indirectly and negatively GY via NKS (Table 4). Globally these results suggested SN, NKS and BIO and HI should of interest to the breeding because of their role as GY determinants. These results corroborated those of Wolde et al. (2016) who found that HI and BIO impacted directly and indirectly GY, suggesting that these characters should be considered for selection either individually or combined under the form of an index.

3.4 TRAITS AND BREEDING LINES STRUCTURATION

Principal components analysis (PCA) grouped the recorded traits into 10 components, from which six exhibited an eigenvalue greater than unity, ranging from 4.03 for the first component to 1.30 for the sixth one. The retained principal components (PC) explained 23.7, 18.3, 10.9, 10.4, 8.5 and 7.6 %, respectively, with a cumulated variance reaching 79.45 %. The variability of the assessed breeding lines was interpreted based on the retained PC which indicated which of the measured traits were decisive in genotype differentiation. Based on their loading values, GY (0.474), STI (0.408), SN (0.345) and Pi (-0.438) were structured within the first component (PC1), while TKM (0.394), NKS (-0.516) and DHE (-0.418) determined the second component (PC2, Figure 4). BIO (0.418) and HI (-0.601) were well correlated with PC3. The physiological trait MTS (-0.423), and the stress indices YSI (0.416) and W²i (0.522) were well represented on PC4. RWC (-0.417), CT (0.498) and ELWL (0.460) were more related to PC5, and PHT (-0.535) and CHL (0.420) were related to PC6. Based on traits assignation, PC1 could be used to target breeding lines with high GY, dynamic stability (high STI and low Pi indices value) and high SN. PC2 informs about breeding lines having high TKM, early to head but showing low NKS or lines having low TKM, late to head with high NKS (Figure 4). PC3 is a linear function of BIO production ability and partitioning (HI).

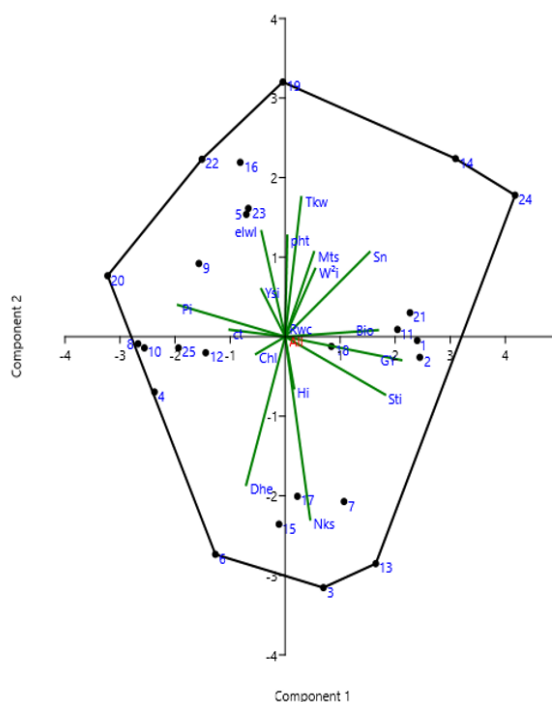


Figure 4: First two principal components (PC1, 23.7 % and PC2 = 18.3 %) biplot of the 25 durum wheat breeding lines based on standardized mean values of the morpho-physiological traits and stress indices.

Breeding lines expressing high heat tolerance (MTS) and yield stability could be found along PC4, lines characterized by high water status, low canopy temperature and low excised leaf water loss are present along PC5. Short stem breeding lines with high stay green ability could be looked for along PC6. Analysis of the relationships between the loaded variables and the differentiation of the breeding lines trait indicated that lines L1 (2.400), L2 (2.447), L11 (2.042), L14 (3.096), L21 (2.269) and L24 (4.178) with high positive scores on PC1 grouped separately from lines L4 (-2.375), L8 (-2.674), L10 (-2.558), L12 (-1.444) and L20 (-3.226) with negative scores along PC1 (Figure 4). Group of lines with positive scores gained, relatively to the mean value of the group of lines with negative scores, 21.40 % GY, 11.43 % SN, 27.98 % BIO, 73.07 % STI, -6.47 % CT, -17.93 % ELWL and -49.56 % Pi. Compared to the check cultivar Waha (L1), only L24 showed sizeable GY advantage (17.09 %), concomitant to a series of increases in TKM (19.94 %), HI (31.05 %), superiority genotypic (-95.61 %), stress sensitivity (-12.99 % reduction in STI), contribution to GEI (17.97 % increase in W²i) and a slight reduction in BIO (-5.48 %). Based on its high GY ability L24 appears as a potential candidate for future release. From the group of lines well represented on PC2, L22 (2.231) had positive score and grouped separately from L3 (-3.155), L6 (-2.736), L7 (-7.072), L13 (-2.853), L15 (2.357) and L17 (-2.007) which had negative scores. These groups of lines diverge mainly for TKM and NKS. L22 appeared as potential genetic source to improve TKM (12.15 % increase over the check TKM mean), while L3, L6, L7, L13, L15 and L17 are good genetic sources of genes controlling spike fertility (12.78 to 17.77 % increase over check NKS mean), without any penalty on TKM (variation in TKM relative to check mean ranged from -1.41 to 4.94 %). Along PC3 were opposed line L5 (2.317) to line L18 (-2.198) which diverged essentially for BIO (15.10 % higher in L5 compared to L18) and HI (-21.80 % low in L5 compared to L18). Compared to the check cultivar, line L5 brought no sizeable change in BIO, nor in HI, but -14.40 % GY decline, while L18 exhibited no significant change in GY compared to the check but a decline in BIO (-16.20 %) and an increase in HI (+20.00 %). L18 appears as a good genetic source for future uses aiming to improve HI. Lines L16, L19 and L25 which were more related to PC4, as well as those related to PC5 (L9) and PC6 (L23) are less desirable as far as GY is concerned, in fact they yielded 6.54 to 14.66 % less than Waha, but L16 exhibited 10.02 % increase in MTS over Waha, associated with a decrease in YSI (-29.52 %), while L19 and L25 showed improvement in YSI over the check without sizeable change in MTS. L9 exhibited a decrease in CHL and L9 a reduction in ELWL. Based on these results, the

assessed breeding lines were classified, at half way the maximum distance, into 5 clusters (Figure 5). The line L19 stemmed alone in a separate cluster, this line is a sister line to L25, whose cross pedigree is Oualoukosl/5/Aznl/4Bezaizshf//SD19539/Waha/3/Gdr₂.

Cluster 2 included 9 lines (L25, L5, L22, L16, L20, L4, L8, L10 and L12). The cluster 3 contains 5 lines (L1, L2, L11, L14, and L24). L14 and L24 are sister lines with a cross pedigree Terbol₉₇₅/Geruftel₂. Cluster 4 included 3 lines (L21, L9 and L23), while cluster 5 included 7 lines (L17, L18, L7, L15, L6, L3 and L13). L3 and L23 are sister lines with a cross pedigree Sooty9/Rascon37//Storlom/5/Toska26/Rasco. The check cultivar Waha was included in cluster 3 (Figure 5). Deviation of the mean values of clusters C1, C2, C3, and C5, in %, from the mean values of the lowest grain yield cluster C4 are reported in Table 5. Compared to C4, breeding lines grouped in C3 showed appreciable increases in GY (13.06 %), BIO (17.72 %) and SN (20.15 %), associated with 10.76 % TKM decrease. They are stress tolerant and stable in the dynamic sense (23.94 % increase in STI, 39.6 % decrease in Pi), reacting to environment changes (210.72 % increase in W²i). Among the lines included in this cluster the sister lines L24 and L14 were scored as the best lines for 7 (GY, SN, DHE, HI, PHT, CHL and Pi) and 5 traits (GY, BIO, DHE, PHT, and MTS) out 17 measured characters, respectively. Both lines are considered for released as cultivars, and may be used as parents in crosses to take advantage of the desirable characteristics they brought. L2 was scored as the best for its high RWC, and as such could be used as a genetic source for improving this characteristic in elite material. Similarly, L11, scored best for STI, could be crossed to transfer its stress tolerance and good yielding ability under stress and non stress conditions to advanced breeding plant material. L19 which stemmed alone as a cluster is sensitive to environmental changes (high W²i) but was scored among the best for its ability to minimize GY reduction under stress conditions (high YSI value), and thus could be used in crosses as a source of germplasm to increase genetic variability of this characteristic in the segregating populations. Breeding lines included in cluster C4 are globally low grain yielding, but L9 from this cluster was scored as having the lowest CT, so it could be useful as a source for this desirable trait. Similarly, lines included in C5, are lower grain yield in general but some lines contain genes controlling desirable characteristics such as high RWC in L18 and low ELWL in lines L3 and L6.

Globally and as far as the objective of this study is concerned, the results indicated that if GY, BIO, SN, TKM, NKS and indices based on GY are more or less

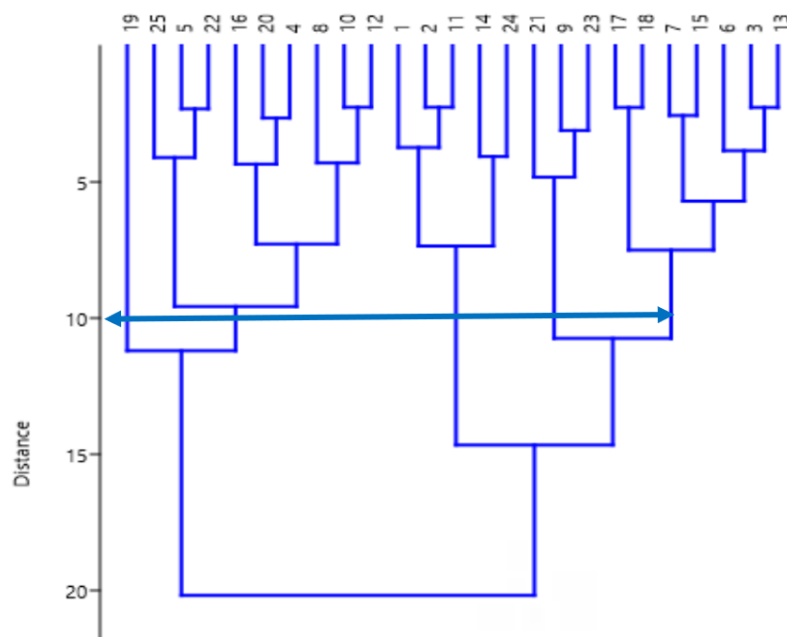


Figure 5: Clustering of the 25 durum wheat breeding lines based on standardized mean values of the morpho-physiological traits and stress indices.

Table 5: Deviation $[(100 * (X_{Ci} - X_{C4}) / X_{C4})]$ of the mean values of clusters C1 (= L19), C2, C3 and C5 as % of the mean values of the lowest yielding cluster C4 for the measured traits and stress indices.

	C3	C5	L19	C2	Mean C4	Mean check (L1)
GY	13.05	5.44	1.4	-8.7	667.1	715.8
BIO	17.73	3.57	6.5	-3.5	469.2	568.3
SN	20.15	4.17	14.6	6.8	40.2	33.6
NKS	1.73	15.39	-9.4	-4.5	34.6	35.1
TKM	-10.76	-14.14	-4.3	-10.9	114.3	115.1
DHE	-0.07	1.32	0.2	0.9	1585.4	1883.1
HI	-4.62	2.09	-3.5	-4.1	41.0	36.3
PHT	2.22	-0.83	2.6	1.6	67.7	68.4
RWC	-5.97	-4.70	-6.1	-5.3	81.7	78.2
MTS	-2.86	-12.81	-13.7	-7.1	67.2	62.0
CHL	2.71	7.31	1.8	7.4	37.4	41.6
TCV	0.75	4.08	4.0	7.9	21.8	20.2
ELWL	1.95	-18.00	39.9	6.1	37.5	35.9
STI	23.94	13.34	-9.0	-21.7	31.8	33.2
Pi	-39.86	-16.25	31.3	45.1	0.4	0.3
YSI	-22.15	-17.11	48.7	-10.9	0.3	0.4
Wi	210.72	85.16	957.2	52.8	11.4	45.0

GY = Grain yield (g m^{-2}), BIO = Above ground biomass (g m^{-2}), SN = Number of spikes m^{-2} , NKS = Number of kernels per spike, TKM = 1000 - kernel mass (g), DHE = Number of days to heading, HI = Harvest index (%), PHT = Plant height (cm), RWC = Flag leaf relative water content, MTS = Membrane thermo stability (%), CHL = Chlorophyll content(cci), CT = Canopy temperature ($^{\circ}\text{C}$), ELWL = Excised leaf water loss (%), STI = Stress tolerance index, Pi = genotypic superiority index, YSI = Grain yield stability index, W^2i = ecovalence.

correlated and easily accumulated in the plant materials, physiological traits on the contrary were unrelated to each other and to the first cited traits making difficult the concomitant selection for yield and stress tolerance driven by these traits. This is because selection is done under favorable conditions based mainly on GY. Under these conditions, physiological traits, markers of stress tolerance, are less expressed and not selected for. To bring altogether these traits and agronomic ones in the same genetic background, it is necessary to make complexes crosses between parents carefully chosen for these specific characteristics to enhance favorable genetic linkage and to generate new basic segregating populations with high genetic variability for these traits.

4 CONCLUSIONS

Even though the season main effect was the most preeminent source of variation, the results of the combined analysis of variance showed sufficient variability for most of the measured traits, justifying deeper analyses of the data. STI and Pi identify stress tolerant and high performing lines under Ys and Yp environments, showing wider adaptability. YSI is best suited to select drought tolerant lines which minimize grain yield reduction under stress but which are not responsive to fertility, showing biological stability. Wi² is best suited to select lines with reduced contribution to GEI. Both YSI and W²i identify lines with specific adaptation. Based on correlation coefficients analysis GY showed a consistent correlation with SN, while its relationships with the remaining agro-morphological traits were inconsistent and environmentally-driven. The relationships with physiological traits were in most cases non significant. Path analysis results showed that BIO and HI, SN and to lesser extent NKS influenced directly GY, besides being a consistent route via which most of the measured traits influenced indirectly grain yield, suggesting that these traits should of interest to the breeding because. Physiological traits didn't show any sizeable direct effect on GY, their indirect effects were of varying sign and magnitude, via BIO and HI. Six PC explained altogether nearly 80.00 % of the total variation available in the data. PC1 was a function of GY, STI, SN and Pi. TKM, NKS and DHE were grouped within PC2. BIO and HI were well correlated with PC3. MTS, YSI and W²i were represented on PC4 RWC, CT and ELWL were related to PC5, and PHT and CHL to PC6. Breeding lines dispersed along PC1 exhibited substantial differences in performances and stress tolerance abilities, among those lines L24 showed sizeable GY advantage which suggests it a potential candidate for future release. Potential genetic sources to improve morpho-physiological traits

were identified on the retained PC's. The various breeding lines were grouped into 5 clusters. Breeding lines grouped in C3 were, in general, high yielding and stress tolerant, within this cluster L24 and L14 were scored as the best lines for 7 and 5 traits out of 17 measured characters, respectively. Both lines may be used as parents in crosses to take advantage of the desirable characteristics they brought. Globally and as far as the objective of this study is concerned, the results indicated that physiological traits were unrelated to each other and to morphological traits making difficult the concomitant selection for yield and stress tolerance driven by these traits. To bring altogether these traits and agronomic ones in the same genetic background, it is necessary to make complexes crosses between parents carefully chosen for these specific characteristics to enhance favorable genetic linkage and to generate new basic segregating populations with high genetic variability for these traits.

5 REFERENCES

- Akintunde, A. N. (2012). Path analysis step by step using excel. *Journal of Technical Science and Technologies*, 1, 9–15.
- Annicchiarico, P., Abdellaoui, Z., Kelkoui, M., & Zerargui, H. (2005). Grain yield, straw yield and economic value of tall and semi-dwarf durum wheat cultivars in Algeria. *Journal of Agricultural Science*, 143(1), 57–64. <https://doi.org/10.1017/s0021859605004855>
- Asharaf, M. (2010). Inducing drought tolerance in plants: recent advances. *Biotechnology Advances* 28(1), 199–238. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.11.005>
- Awan, K.A., Ali, J., & Akmal, M. (2017). Yield comparison of potential wheat varieties by delay sowing as rainfed crop for Peshawar climate *Sarhad Journal of Agriculture*, 33(3), 480–488. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2017/33.3.480.488>
- Benmahammed, A., Nouar, H., Haddad, L., Laala, Z., & Bouzerzour, H. (2010). Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 14, 177–186.
- Bhisma, M. (2016). How to conduct path analysis and structural equation model for health research. *International Conference on Public Health Best Western Premier Hotel, Solo, Indonesia*, September 14–15, Masters Program in Public Health, Graduate Program. Sebelas Maret University, Indonesia.
- Ceccarelli, S., Acevedo, E., & Grando, S. (1991). Breeding for yield stability in unpredictable environments: single traits, interaction between traits, and architecture of genotypes. *Euphytica*, 56(2), 169–185. <https://doi.org/10.1007/bf00042061>
- CEIC. 2021. *Algeria's Durum Wheat production from 1975 to 2017*. Retrieved from <https://www.ceicdata.com/en/algeria/agricultural-production/agriculture-production-vegetable-cereals-durum-wheat>

- Chamekh, Z., Karmous, C., Ayadi, S., Sahli, A., Hammami, Z., Belhaj Fraj, M., & Slim-Amara, H. (2015). Stability analysis of yield component traits in 25 durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under contrasting irrigation water salinity. *Agricultural Water Management*, 152, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.12.009>
- Clarke, J. M., Richards, R. A., & Condon, A. G. (1992). Effect of drought stress on residual transpiration and its relationship with water use of wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 71(3), 695–702. <https://doi.org/10.4141/cjps91-102>
- CropStat 7.2. (2008). *Software package for windows*. Manila, International Rice Research Institute (IRRI).
- Cruz, C. D., Regazzi, A. I., & Carneiro, P. C. S. (2012). *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. 4th Ed. UFV, Viçosa.
- Dhanda, S. S., & Sethi, G. S. (1998). Inheritance of excised-leaf water loss and relative water content in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 104(1), 39–47. <https://doi.org/10.1023/a:1018644113378>
- Di Matteo, J. A., Ferreyra, J. M., Cerrudo, C., Alejandro, A., Echarte, L., & Fernando, H. (2016). Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding. *Field Crops Research*, 197, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.023>
- Dorostkar, S., Dadkhodaie, A., & Heidari, B. (2015). Evaluation of grain yield indices in hexaploid wheat genotypes in response to drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(3), 397–413. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.936855>
- Farshadfar, E., Poursiahbidi, M. M., & Safavi S. M. (2018). Assessment of drought tolerance in land races of bread wheat based on resistance/ tolerance indices. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 6, 233–245.
- Fraser, E.A.B., Simelton, E., Tjernansen, M.S., Gosling, N., & South, A. (2013). Vulnerability hotspots: Integrating socioeconomic and hydrological models to identify where cereal production may decline in the future due to climate change induced drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.008>
- Golabadi, M., Arzani, A. S., & Maibody, A. M. (2006). Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. *African Journal of Agricultural Research*, 5, 162–171.
- Grzesiak M.T., Marcińska, I., Janowiak, F., Rzepka, A., & Hura, T. (2012). The relationship between seedling growth and grain yield under drought conditions in maize and triticale genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(5), 1757–1764. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-0973-3>
- Grzesiak, M.T., Hura, K., Jurczyk, B., Hura, T., Rut, G., Szczyrek, P., & Grzesiak, S. (2017). Physiological markers of stress susceptibility in maize and triticale under different soil compaction and/or soil water contents. *Journal Plant Interaction*, 12(1), 355–372. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1370143>
- Haddad, L., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Zerargui, H., Hannachi, A., Bachir, A., & Laala, Z. (2016). Analysis of genotype × environment interaction for grain yield in early and late sowing date of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 8(3), 139–146. <https://doi.org/10.4314/jfas.v8i3.19>
- Hammer, O., Harper, D.A.T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1–9.
- Hasheminasab, H., Farshadfar, E., & Varvani, H. (2014). Application of physiological traits related to plant water status for predicting yield stability in wheat under drought stress conditions. *Annual Review & Research in Biology*, 4(5), 778–789. <https://doi.org/10.9734/arrb/2014/6689>
- Hura, T., Hura, K., Grzesiak, M. T., & Rzepka, A. (2007). Effect of long-term drought stress on leaf gas exchange and fluorescence parameters in C3 and C4 plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29(2), 103–113. <https://doi.org/10.1007/s11738-006-0013-2>
- Ibrahim, A., & Quick, J. S. (2001). Genetic control of high temperature tolerance in wheat as measured by membrane stability. *Crop Science*, 41(5), 1405–1407. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.4151405x>
- Khajuria, P., Singh, A. K., & Singh, R. (2016). Identification of heat stress tolerant genotypes in bread wheat. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 7(1), 124–131. <https://doi.org/10.5958/0975-928x.2016.00016.8>
- Khan, F., Azam, A., & Ali, A. (2010). Relationship of morphological traits and grain yield in recombinant inbred lines grown under drought conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 42(1), 259–267.
- Li, P., Chen, J., & Wu, P. (2011). Agronomic characteristics and grain yield of 30 spring wheat genotypes under drought stress and non-stress conditions. *Agronomy Journal*, 103(6), 1619–1628. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0013>
- Lin, C. S., Binns, M. R., & Lefkovitch, L. P. (1986). Stability analysis: where do we stand? *Crop Science*, 26(5), 894–900. <https://doi.org/10.2135/cropsci1986.0011183x002600050012x>
- Lin, C.S., & Binns, M.R. (1988). A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68(1), 193–198. <https://doi.org/10.4141/cjps88-018>
- Lobell, D. B., & Field, C. B. (2007). Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002>
- Lopes, M.P., Reynolds, M.P., Jalal-Kamali, M.R., Moussa, M., Feltaous, Y., Tahir, I.S.A., & Baum, M. (2012). The yield correlations of selectable physiological traits in a population of advanced spring wheat lines grown in warm and drought environments. *Field Crops Research*, 128, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.017>
- Marcinska I, Czyczyło-Mysza, I., Skrzypek, E., Grzesiak, M., Popielarska Konieczna, M., Warchol, M., & Grzesiak, S. (2017). Application of photochemical parameters and several indices based on phenol-typical traits to assess intra-specific variation of oat (*Avena sativa* L.) tolerance to drought. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(7), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2453-2>
- Mohammadi, R., Sadeghzadeh, D., Armon, M., & Amri, A. (2011). Evaluation of durum wheat experimental lines under different climate and water regime conditions of

- Iran. *Crop and Pasture Science*, 62(2), 137–151. <https://doi.org/10.1071/cp10284>
- Nouri, A., Etmnan, A., Teixeira da Silva, J. A., & Mohammadi, R. (2011). Assessment of yield, yield related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turgidum* var. *durum* Desf.). *Australian Journal of Crop Science*, 5(1), 8–16.
- Pask A.J.D., Pietragala, J., Mullan, F.M., & Reynolds, M.P. (2012). *Physiological Breeding II: A field guide to wheat phenotyping*. Mexico, DF, CIMMYT.
- Saed-Moucheshi, A., Hasheminasab, H., & Assad, M. T. (2016). Modeling the relationships between yield stability and its related physio-biochemical traits under water deficit conditions in wheat. *Biharean Biologist*, 10, 123–130.
- Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K., & Mohammadi, V. (2006). Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crop Research*, 9, 222–229.
- Wahid, A., Gelani, S., Asharf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199–223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Weedon, O. D., & Finckh, M. R. (2019). Heterogeneous winter wheat populations differ in yield stability depending on their genetic background and management system. *Sustainability*, 11(21), 6172. <https://doi.org/10.3390/su11216172>
- Wolde, T., Eticha, F., Alamerew, S., Assefa, E., & Dutamo, D. (2016). Trait associations in some durum wheat (*Triticum durum* Desf.) accessions among yield and yield related traits at Kulumsa, South Eastern Ethiopia. *Advances in Crop Science and Technology*, 4(4), 234–237. <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000234>

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة التباين والتحكم الوراثي في الاستجابة للإجهاد المائي والحراري للقمح الصلب (*Triticum durum* Desf). أجريت التجربة في محطة المعهد التقني للمحاصيل الحقلية بسطيف. خلال ثلاث مواسم زراعية 2016/2017، 2017/2018 و 2018/2019. لوحظ تباين معقول لمعظم الصفات. تشير النتائج إلى أن معظم التباين الملاحظ هو أساساً من أصل بيئي أكثر منه وراثياً. يشير تحليل التفاعل النمط الوراثي x البيئي (GxE) إلى أن هذا التفاعل يؤثر على تعبير معظم المتغيرات. بناءً على مؤشرات الإجهاد، سواء على نطاق واسع أو نوعي، تم تحديد السلالات المتأقلمة. أشار تحليل المسار إلى الكتلة الهوائية، ومؤشر الحصاد، وخصوبة السنابل، وعدد السنابل كمحددات للمحصول، مما يوحي أن هذه الصفات ذات أهمية في برنامج الانتخاب. أظهرت نتائج الارتباط صعوبة الانتخاب على أساس المردود وتحمل الإجهاد من خلال الصفات الفسيولوجية والمورفولوجية نظراً لعدم وجود ارتباط بين هذه الصفات. تعتبر التهجينات المتقاطعة، بين الآباء المختار بعناية لهذه الخصائص النوعية، ضرورية لتحسين الرابط الوراثي وتوليد عشائر إنعزالية جديدة ذات تباين وراثي مرتفع لهذه الصفات.

كلمات مفتاحية : القمح الصلب، مردود حب، تفاعل النمط الوراثي x بيئة، الربح الوراثي، الصفات الفسيولوجية، مؤشر التأقلم.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier la variabilité et le contrôle génétique de la réponse au stress hydrique et thermique de blé dur (*Triticum durum* Desf.). L'expérimentation a été conduite au niveau de la Station de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Sétif durant trois campagnes 2016/2017, 2017/2018 et 2018/2019. Une variabilité acceptable a été observée pour la plupart des caractères. Les résultats indiquent que l'essentiel de la variation observée est surtout d'origine environnementale plus que génotypique. L'analyse de l'interaction GxE indique que cette interaction influe sur l'expression de la plupart des variables. Sur la base des indices de stress, soit largement ou spécifiquement, des lignées adaptées ont été identifiées. L'analyse en chemin indique que la biomasse aérienne, l'indice de récolte, la fertilité des épis et le nombre des épis sont déterminants du rendement, ce qui suggère que ces caractères sont d'intérêt pour le programme de sélection. Les résultats de la corrélation montrent que la sélection pour le rendement et pour la tolérance au stress est difficile via les traits physiologiques et morphologiques vu que à l'absence de liaison entre ces caractères. Les croisements complexes, entre parents soigneusement choisis pour ces caractéristiques spécifiques, sont nécessaires pour améliorer le lien génétique favorable et pour générer de nouvelles populations de ségrégation de base avec une variabilité génétique élevée pour ces traits.

Mots clés : blé dur, Rendement en grain, interaction génotype x environnement, gain génétique, traits physiologiques, indice de tolérance.

Abstract

The aim of this work is to study the variability and genetic control of the drought and thermal stress response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). The experiment was conducted at Technical Institute of Field Crops (ITGC) Station of Setif during three campaigns 2016/2017, 2017/2018 and 2018/2019. Sufficient variability was observed for most characters. The result indicates that the majority of the variation observed is mainly environmental rather than genotypic. Analysis of GxE interaction indicates that this interaction influences the expression of most variables. Based on stress indices, either widely or specifically, adapted lines were identified. Path analysis pointed out to above ground biomass, harvest index, spike fertility and spike number as yield determinants, suggesting that these traits are of interest in the breeding program. The results of the correlation show that the selection of yield and stress tolerance is difficult via physiological and morphological traits as to the absence of correlation between these characters. Complexes crosses, between parents carefully chosen for these specific characteristics, are necessary to enhance favorable genetic linkage and to generate new basic segregating populations with high genetic variability for these traits.

Keywords: Durum wheat; grain yield; genotype x environment interaction, genetic gains, physiological traits; tolerance indices.