

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار – UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR

عنابة ANNABA



FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE
LABORATOIRE D'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DES PLANTES

Thèse En vue de l'obtention d'un Diplôme de Doctorat

Domaine : SCIENCE DE LA NATURE ET DE LA VIE

Filière : BIOTECHNOLOGIES

Spécialité : BIOTECHNOLOGIE VÉGÉTALE

Intitulé

Evaluation des réponses adaptatives, physiologiques, biochimiques
et génotypiques d'un germoplasme de blé dur (*Triticum durum*
Desf) sous stress hydrique

Presentée par : **BENMOUNAH HOUDA**

Directeur de thèse :

Louhichi BRINIS

Professeur

Université Badji Mokhtar - Annaba

Devant un jury composé de :

Pr. TAHAR Ali

Président

Université Badji Mokhtar - Annaba

Pr. BEKHOUCHE Fatiha

Examinatrice

Université Badji Mokhtar - Annaba

Pr. BELKHODJA Moulay

Examineur

Université d'Oran 1 ABB

Dr. BENBELKACEM A.E.K

Examineur

INRA Constantine

Année universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

*Qu'il me soit permis au terme de cette modeste contribution, de remercier
madame et messieurs les membres de jury,*

*au premier rang duquel, mon directeur de thèse, professeur **BRINIS Louhichi** que
je tiens à remercier de manière très particulière. Je ne sais si les mots seront
suffisants pour lui témoigner ma gratitude, ma reconnaissance et ma fierté
d'avoir fait partie de son équipe ainsi que pour son soutien indéfectible, sa
disponibilité et sa patience durant toutes ces longues années.*

*Vous étiez le père, le guide, l'ange gardien, sans lequel je n'aurais jamais aspiré à
un si bel horizon.*

Vous étiez un disciple de Delouche ; puis-je en être une disciple à vous.

*Je remercie le professeur **TAHAR Ali**, pour avoir accepté de présider mon jury
de thèse. Je n'omettrai point le fait que le professeur **TAHAR Ali** a eu la
gentillesse et toute la disponibilité pour m'aider à exploiter mes résultats au plan
statistiques. Je n'aurai certes pas pu m'en sortir avec clairvoyance, n'eût été sa
patience qu'il a sans retenue décliné à mon égard.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à madame le professeur **BELKHOUCHE Fatima**,
chef d'équipe au sein de notre laboratoire Amélioration Génétique des Plantes et
enseignante en physiologie végétale. Je la remercie pour avoir accepté de juger
mon travail comme j'en profite aussi pour lui témoigner toute ma gratitude pour
son entière disponibilité, ses qualités humaines et ses insistants encouragements.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur le Professeur **BELKHODJA
Moulay** pour avoir daigné accepter d'expertiser mon travail. J'ai eu l'honneur de
lui avoir soumis mon travail il y a un peu plus d'un an ; il en était ravi et m'a
encouragé à conclure en mettant en relief l'aspect approche physiologique ; ce fût
fait et je lui témoigne toute ma gratitude. Le professeur **BELKHODJA** a fait
partie de notre famille scientifique depuis déjà fort longtemps et me réjouis à
l'idée de l'entendre porter un regard critique à mes résultats.*

*Je ne remercierai jamais assez Dr. **BENBELKACEM Abdelkader**, Directeur de
recherche et responsable des programmes nationaux d'amélioration génétique des
céréales, **INRA**, pour toute l'aide matérielle et immatérielle qu'il m'a prodiguée
tout au début de ma thèse. Comme il n'a pas cessé de m'orienter dans la partie
hybridations pour les caractères phénotypiques de tolérance au stress hydrique.
Je le remercie également pour nous avoir mis à notre disposition les variétés qui
m'ont servi de matériel génétique de base.*



DEDICACE

A vous mes très chers parents !

Vous qui m'avez tout donné, sans faille, sans retenue, avec abnégation et amour !

*Voilà le moment de vous le rendre, ce bonheur que vous attendiez avec
impatience..*

J'espère que vous en serez fiers de moi.

Je vous aime.

*A ma sœur **Lília**, mon mari **Ramzi** et à ma fille **Rania** qui, j'espère aura un
avenir radieux et prolifique, et suivra sa maman dans son parcours.*

*Un clin d'œil à mon cher frère et complice de toujours **Walid**.*

TABLE DES MATIÈRES

Résumés

| | |
|--|----------|
| Introduction générale..... | 01 |
| Partie I : Revue bibliographique..... | 5 |
| 1-Généralités sur le blé dur..... | 6 |
| 1-1-Originine du blé..... | 6 |
| 1-2-Classification du blé..... | 6 |
| 1-3-Morphologie de la plante..... | 8 |
| 1-3-1-Système racinaire..... | 9 |
| 1-3-2-Système aérien..... | 9 |
| 1-4-Cycle de développement..... | 11 |
| 1-4-1-Les Phases phénologiques de développement du blé..... | 11 |
| 1-5-Les exigences de la culture du blé..... | 13 |
| 1-5-1-La température..... | 13 |
| 1-5-2-La Lumière..... | 14 |
| 1-5-3-L'eau..... | 14 |
| 1-5-4-Le Sol..... | 14 |
| 1-5-5-La Fertilisation..... | 15 |
| 1-6-Importance de la culture du blé..... | 15 |
| 1-6-1-Dans le monde..... | 15 |
| 1-6-2-En Algérie..... | 15 |
| 2-Le Stress hydrique..... | 18 |
| 2-1-Définition du stress..... | 18 |
| 2-2-Stress abiotique..... | 19 |
| 2-2-1-Stress thermique..... | 20 |
| 2-2-2-Stress hydrique..... | 21 |
| 2-3-Effet du stress hydrique sur la plante..... | 23 |
| 2-3-1-Effets du stress hydrique sur le rendement et ses composantes..... | 24 |
| 2-3-1-1-Effet du stress hydrique sur le tallage épis..... | 25 |
| 2-3-1-2-Effet du stress hydrique sur le nombre de grains/épi..... | 25 |
| 2-3-1-3-Effet du stress hydrique sur le poids de mille grains (PMG)..... | 26 |
| 2-4-Effet du stress hydrique sur le phénotypage..... | 27 |
| 2-4-1- Effet du stress hydrique sur la hauteur de la plante..... | 27 |
| 2-4-2-Effet de stress hydrique sur la surface foliaire..... | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 2-4-3-Rôle de la pilosité et de la cire lors d'un stress hydrique | 27 |
| 3-Mécanismes d'adaptation de la plante vis-à-vis du stress hydrique..... | 29 |
| 3-1-Adaptation phénologique..... | 31 |
| 3-1-1-L'esquive..... | 31 |
| 3-1-2-L'évitement..... | 32 |
| 3-1-3-La tolérance..... | 32 |
| 3-2- Adaptation morphologique..... | 33 |
| 3-3-Adaptation physiologique au stress hydrique..... | 33 |
| 3-3-1-Teneur en pigments chlorophylliens..... | 34 |
| 3-3-2-Régulation stomatique..... | 34 |
| 3-3-3-Ajustement osmotique..... | 35 |
| 3-4-Adaptation biochimique en condition de stress hydrique..... | 36 |
| 3-4-1-Accumulation de la proline..... | 36 |
| 3-4-2-Accumulation des sucres solubles..... | 36 |
| 3-4-3-Synthèse des protéines liées à la tolérance au stress hydrique..... | 36 |
| Partie II : Matériel et méthodes..... | 37 |
| 4-Premier essai phénotypage des parents..... | 38 |
| 4-1-Matériel végétal..... | 38 |
| 4-2-Méthodes expérimentales..... | 39 |
| 4-3-Localisation du site expérimental..... | 39 |
| 4-4-Installation de l'essai..... | 39 |
| 4-5-Itinéraire technique..... | 40 |
| 5-Notations effectuées..... | 40 |
| 6-Hybridations..... | 43 |
| 7- Deuxième essai expérimental physiologie et biochimie des génotypes..... | 43 |
| 7-1-Physiologie des semences..... | 45 |
| 7-1-1-PMG..... | 45 |
| 7-1-2-Capacité de germination (taux de germination)..... | 45 |
| 7-1-3-Cinétique de croissance..... | 46 |
| 7-1-4-Test d'absorption..... | 46 |
| 7-1-5-Biomasse..... | 46 |
| 7-2-Physiologie de la plantule..... | 46 |
| 7-2-1-Teneur relative en eau (RWC)..... | 46 |
| 7-2-2-Taux de déperdition d'eau des feuilles excisées ou transpiration cuticulaire, non stomatale (RWL)..... | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 7-3-Biochimie de la plante..... | 47 |
| 7-3-1-Dosage de la proline..... | 47 |
| 7-3-2-Dosage des sucres solubles..... | 48 |
| 7-3-3-Dosage des protéines totales..... | 48 |
| 8-Troisième essai phénotypage parents/F1 respectives..... | 49 |
| 8-1- croisements effectués..... | 50 |
| 8-1-1-croisements simples..... | 50 |
| 8-1-2- Croisements back-cross..... | 50 |
| 8-1-3- Obtention de lignées F2..... | 51 |
| 8-2-Notations effectuées..... | 52 |
| 9- Quatrième essai phénotypage parents/F2 respectives..... | 53 |
| 10-Méthodes d'analyses statistiques..... | 53 |
| 10-1-Description des données..... | 53 |
| 10-2-Test de l'analyse de la variance à un critère de classification (AV1)..... | 53 |
| 10-3-Test d'analyse de la variance à deux critères de classification (AV2)..... | 54 |
| 10-4-Test de TUKEY recherche de groupe de moyennes homogènes..... | 54 |
| 10-5-Test de DUNNET recherche de traitements identiques au traitement témoin..... | 55 |
| Partie III : Résultats et discussion..... | 56 |
| 11-1-Résultats sur la physiologie des génotypes..... | 57 |
| 11-1-1-PMG..... | 57 |
| 11-1-2- Test de germination après 5 jours (test de vigueur)..... | 57 |
| 11-1-3-Test de germination après 10 jours (test de viabilité)..... | 58 |
| 11-1-4-Cinétique de croissance..... | 61 |
| 11-1-5-Test d'absorption..... | 65 |
| 11-1-6-Surface foliaire..... | 66 |
| 11-1-7-Biomasse..... | 67 |
| 11-1-8-Teneur relative en eau RWC..... | 73 |
| 11-1-9-Perte graduelle en eau RWL..... | 74 |
| 12- résultats sur la biochimie des génotypes..... | 75 |
| 12-1- Accumulation de proline..... | 75 |
| 12-2- Accumulation de sucres solubles..... | 76 |
| 12-3- Accumulation des protéines..... | 78 |
| 13-Résultat sur le phénotypage parental..... | 84 |
| 13-1-Caractéristiques de la feuille..... | 84 |
| 13-1-1-Type de feuille..... | 85 |

| | |
|--|-----|
| 13-1-2-Texture foliaire..... | 85 |
| 13-1-3-Surface foliaire..... | 85 |
| 13-2-Caractéristiques de la tige..... | 86 |
| 13-2-1-Hauteur de la plante..... | 86 |
| 13-2-2-Nature de tige..... | 86 |
| 13-2-3-Diamètre de la tige..... | 87 |
| 13-2-4-Epaisseur de la tige..... | 87 |
| 13-2-5- Pourcentage du cylindre central..... | 87 |
| 14-Quelques paramètres des composantes du rendement..... | 88 |
| 14-1-Tallage (nombre de talles/ m2)..... | 89 |
| 14-2- Nombre d'épis/m2..... | 89 |
| 14-3-Estimation du rendement théorique..... | 90 |
| 15-Paramètres phénologiques..... | 91 |
| 15-1-Phase semis- épiaison (jours)..... | 91 |
| 15-2-Phase semis –floraison (jours)..... | 91 |
| 16- Résultat du phénotypage en F1..... | 92 |
| 16-1-Tige..... | 93 |
| 16-2-Type de feuille..... | 93 |
| 16-3-Texture foliaire..... | 94 |
| 16-4-Surface foliaire..... | 94 |
| 16-5-Hauteur de la plante..... | 94 |
| 16-6-Nombre d'épillets/épi..... | 95 |
| 16-7-PMG..... | 95 |
| 17-Résultats du phénotypage en F2..... | 97 |
| 17-1-Type de tige..... | 98 |
| 17-2-Type de feuille..... | 99 |
| 17-3-Texture des feuilles..... | 100 |
| 17-4-Nombre d'épillets/ épi..... | 100 |
| Conclusion générale..... | 102 |
| Perspectives..... | 106 |
| Références bibliographiques..... | 107 |
| Publications | |

Résumé

Trois variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*), Ammar6, Vitron et Simeto ont servi de matériel génétique en vue d'une part de caractériser à la fois leur phénotypage et leurs potentiels physiologiques et biochimiques sous contrainte hydrique.

Des hybridations zygotiques furent effectuées en vue d'étudier l'héritabilité de certains traits de tolérance au stress hydrique en génération F1 puis en en génération F2. Les résultats obtenus révèlent que l'héritabilité des traits étudiés peut être à déterminisme génétique tantôt co-dominant (nombre d'épillets/épi), tantôt dominants (épillets/épis), tantôt à forte transgressivité (épillets/épi, absorption d'eau, vigueur des semences).

Cette étude nous aura permis d'entrevoir une nouvelle alternative dans la sélection de lignées sur la base de leurs potentiels à la fois phénotypique, physiologique et biochimique. Elle débouche sur la proposition d'idéotypes capables de tolérer des niveaux sévères de stress hydrique et ce, grâce à certains marqueurs ; le phénotypage, l'osmorégulation, la turgescence cellulaire en sont quelques exemples.

L'implication simultanée de marqueurs à des niveaux différents de la plante permettra au final de proposer de nouveaux modèles génotypiques qui peuvent à la fois tolérer un stress hydrique et donner des rendements satisfaisants tout autant.

Mots clés : blé dur- stress hydrique- hybridation- tolérance- phénotypage- osmorégulation- ideotype-

Abstract:

Three durum wheat varieties, namely Ammar6, Vitron and Simeto were used as initial genetic material in order to characterize phenotyping, physiological and biochemical potential as well when water deficit was imposed.

Zygotic crosses were made in order to study the heritability of some water deficit tolerance in F1 and F2 generation. The results that have been obtained revealed that heritability of traits under study can be obtained through a genetic determinism of co- dominance (number of spikelets/spike), or dominance (spikelets/spike) or with transgressivity (spikelets/spike, water absorption, seed vigour).

The present study would have allowed us to foresee a new alternative approach in selecting lines on the basis of their potential, phenotypic one, physiological and biochemical as well. The study ends on proposition of ideotype able to tolerate high levels of water stress by means of some markers; phenotyping, osmoregulation, relative water content being among those desirable traits.

The simultaneous implication of markers at different levels of plant will finally permit us to propose new genotypic models that may tolerate water deficit and give good yield too.

Key words: durum wheat- water stress- hybridization- tolerance- phenotyping- ideotype- osmoregulation

الملخص:

ثلاثة أصناف من القمح الصلب استعملوا من أجل تشخيص المظاهر الخارجية والطاقات الفسلجية والبيوكيميائية تحت الجفاف.

ولقد تمت تهجينات تهدف لدراسة قابلية التورث لبعض الصفات التي تتعلق بالتأقلم مع الجفاف وبالأخص في الجيل الأول F1 ثم في الجيل الثاني F2.

النتائج المتحصل عليها أكدت بأن وراثية الصفات المدروسة كانت أحيانا شبه سائدة، أحيانا سائدة وأحيانا ما فوق السيادة (نشاط البذور).

هذه الدراسة سمحت لنا باكتشاف بديل جديد في انتقاء أصناف على أساس طاقتها المظهرية، الفسلجية والبيوكيميائية.

ولقد أدت هذه الدراسة إلى اقتراح أنماط مثالية، ذو القدرة لتحمل مستويات مرتفعة من الجفاف وهذا بفضل بعض المؤشرات كالمظهر الخارجي، التحكم الأسموزي وتشبع الخلايا.

مساهمة وتأثير عديد من تلك المؤشرات في مختلف أعضاء النبات تسمح باقتراح أنماط فسلجية جديدة تتحمل الجفاف وتعطي مردود مرتفع.

الكلمات المفتاحية : القمح الصلب- جفاف - تهجين - تحمل - مظاهر خارجية - توازن أسموزي - النمط الأمثل.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nomenclature usuelle des blées selon Mackay (1966)

Tableau 2 : production céréalière en Algérie (2001-2019)

Tableau 3 : Caractéristiques des trois variétés de blé dur (CNCC ,2015)

Tableau 4 : PMG des trois géotypes (exprimé en gramme)

Tableau 5 : pourcentage de germination après 5 jours

Tableau 6 : Pourcentage de germination après 10 jours

Tableau 7 : regroupement des variétés en groupes homogènes selon test de Tukey

Tableau 8 : Résultats de la description : les paramètres de base

Tableau 9 : Résultats de l'AV1 pour chacune des deux périodes

Tableau 10 : Résultats du test de Tukey par période

Tableau 11 : cinétique de croissance racine/coléoptile en fonction du temps cv Ammar6

Tableau 12 : cinétique de croissance racine/ coléoptile en fonction du temps cv Vitron

Tableau 13 : cinétique de croissance racine/coléoptile en fonction du temps cv Simeto

Tableau 14 : test d'absorption d'eau pour les trois variétés (exprimé en gramme)

Tableau 15 : surface foliaire en fonction du stress hydrique

Tableau 16 : Biomasse (matière fraîche) c.v vitron exprimée en grammes

Tableau 17 : biomasse (matière sèche) c.v Vitron exprimée en grammes

Tableau 18 : biomasse (matière fraîche) c.v Simeto exprimée en grammes

Tableau 19 : biomasse (matière sèche) c.v Simeto exprimée en grammes

Tableau 20 : biomasse (matière fraîche) c.v Ammar 6 exprimée en grammes

Tableau 21 : biomasse (matière sèche) c.v Ammar6 exprimée en grammes

Tableau 22 : teneur relative en eau (RWC) de trois géotypes de blé dur en fonction d'un stress hydrique

Tableau 23 : perte graduelle en eau (RWL) de trois géotypes de blé dur en fonction du stress hydrique

Tableau 24 : Quantité de proline en fonction d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

Tableau 25 : quantités de sucres solubles en fonction d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

Tableau 26 : Quantité des protéines totales en fonction du stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

Tableau 27 : Résultats du test d'AV2

Tableau 28 : Résultats du test de TUKEY pour chaque variable mesurée

Tableau29 : Résultats du test de DUNNET appliqué sur plusieurs caractéristiques de la plante

Tableau 30 : Caractéristiques de la feuille de trois géotypes de blé dur

Tableau 31 : Caractéristiques de la tige de trois géotypes de blé dur

Tableau 32 : Quelques paramètres du composant du rendement de trois géotypes de blé dur.

Tableau 33 : Paramètres phénologiques de trois géotypes de blé dur

Tableau 34 : résultats sur l'effet de l'hétérosis en génération F1

Tableau 35 : résultats de l'AV1 pour les variétés Ammar6, F1 et Vitron

Tableau 36 : résultats de l'AV1 pour les variétés Simeto, F1 et Ammar6

Tableau 37 : résultats de l'AV1 pour les variétés Vitron, F1 et Ammar6

Tableau 38 : résultats du test de Tukey pour les variétés Ammar6, F1 et Vitron

Tableau 39 : résultats du test de Tukey pour les variétés Simeto, F1 et Ammar6

Tableau 40 : résultats du test de Tukey pour les variétés Vitron, F1 et Ammar6

Tableau 41 : résultats sur l'effet d'héritabilité en génération F2

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : la morphologie de blé dur (*Triticum durum*) (source : Soltner, 1998)

Fig. 2 : Structure d'un épi et épillet du blé. (Source : F.Flandrin, 1949)

Fig. 3 : Anatomie du grain de blé (Fredot, 2005)

Fig. 4 : Les différents stades de développement du blé (Jonard in Ait Kaki, 2008)

Fig. 5 : production comparative des grandes cultures en Algérie pendant les décades (2000-2009) et (2010-2017)

Fig. 6 : production céréalière dans les principales aires bioclimatiques en Algérie (2017)

Fig.7 : Les sources de stress environnemental chez les plantes (Schubert, 1985. Nilsen & Ocrutt, 1996)

Fig 8. poids de 1000 grains / variété

Fig 9. Pourcentage germination après 5 jours (test de vigueur)

Fig 10 .Pourcentage germination après 10 jours (test de viabilité)

Fig 11. cinétique de croissance racine,coleoptile cv Ammar 6

Fig 12. cinétique de croissance racine, coléoptile cv Vitron

Fig 13. cinétique de croissance racine, coléoptile cv Simeto

Fig 14. test d'absorption d'eau

Fig 15 : Représentation graphique de la surface foliaire en fonction du stress hydrique

Fig16 : Biomasse (matière fraîche) c.v Vitron exprimée en grammes

Fig 17 : Biomasse (matière sèche) c.v Vitron exprimée en grammes

Fig 13. cinétique de croissance racine, coléoptile cv Simeto

Fig 18 : Biomasse (matière fraîche) c.v Simeto exprimée en grammes

Fig 19 : Biomasse (matière sèche) c.v Simeto exprimée en grammes

Fig 20 : biomasse (matière fraîche) c.v Ammar 6 exprimée en grammes

Fig 21 : Biomasse (matière sèche) c.v Ammar6 exprimée en grammes

Fig 22 : RWC des trois génotypes en fonction du stress hydrique

Fig 23 : RWL des trois génotypes en fonction du stress hydrique

Fig 24 : Quantité de proline en fonction du niveau d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

Fig 25 : Accumulation de sucres solubles en fonction du niveau d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

Fig 26 : Accumulation de protéines en fonction d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

Fig 27 : Variations de la surface foliaire de trois génotypes de blé dur

Fig 28 : Variations de la hauteur de plante de trois géotypes de blé dur

Fig 29 : Variations du diamètre de la tige de trois géotypes de blé dur

Fig 30 : Variations de l'épaisseur de la tige de trois géotypes de blé dur

Fig 31 : Variations du pourcentage du cylindre central de trois géotypes de blé dur

Fig 32 : Schéma du cylindre central de trois géotypes de blé dur

Fig 33 : Variations du nombre de talles par plante de trois géotypes de blé dur

Fig 34 : Variations du nombre d'épis par m² de trois géotypes de blé dur

Fig 35 : Variations du rendement théorique de trois géotypes de blé dur

Fig 36 : Variations de la phase semis-épiaison de trois géotypes de blé dur

Fig 37 : Variations de la phase semis-floraison de trois géotypes de blé dur

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Vue aérienne du site expérimental (source : Google Earth, 2018)

Photo 2 : essai expérimental du phénotypage, ferme pilote Chaibi Larbi (Benmounah.H. 2018)

Photo 3 : phénotypage parents/ F1, ITGC Guelma. (Benmounah.H. 2019)

Photos 4 : Etapes de l'émasculature d'un épi de blé (Benmounah.H. 2020)

Photos 5 : étapes de la pollinisation (Benmounah.H. 2020)

Photo 6 : obtention de graines hybrides (Benmounah.H. 2020)

LISTE DES ABRÉVIATIONS

V1 : Vitron

V2: Ammar 6

V3 : Simeto

PMG : Poids de 1000 grains

RWC : Relative Water Content (teneur relative en eau)

RWL : Rate Water Loss (perte graduelle en eau)

T0 : Traitement en absence de stress hydrique

T1 : traitement en présence d'un stress modéré

T2 : traitement en présence d'un stress prononcé

T : total

C : coléoptile

R : racine

MF : matière fraîche

MS : matière sèche

SF : surface foliaire

Wax : waxiness (cire)

I.T.G.C : Institut Technique des Grandes Cultures

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction :

Depuis toujours, les céréales ont constitué une source importante alimentaire pour l'homme et l'animal. Les céréales occupent à l'échelle mondiale une place primordiale dans le système agricole (Slama et al, 2005). Parmi celles- ci, le blé occupe la deuxième place pour la production mondiale, après celle du riz, comme source de nourriture pour les populations humaines. Il assure 15% de ses besoins énergétiques (Badji, 1999).

Les céréales constituent la base de l'alimentation et occupent une place privilégiée dans les habitudes alimentaires des populations aussi bien urbaines que rurales (Yan et al., 2011). Thameur et al., 2012 ; Varshney et al., 2012 font ressortir de leurs travaux que la sécheresse constitue le principal facteur environnemental conditionnant les fortes variations des potentialités productives des espèces céréalières. Pour Ceccarelli (2010) et Yang et al (2011), le stress, qui correspond à toutes les conditions de l'environnement ou combinaison de conditions, empêche la plante de réaliser l'expression de son potentiel génétique pour la croissance, le développement et la reproduction.

Les céréales sont la principale culture occupant une superficie d'environ 3.6 millions d'ha. (MADR, 2002) dont une grande partie des terres est située dans les régions arides et semi- arides avec des rendements faibles et irréguliers. Cette culture est en outre, conduite sous conditions pluviales. Elle est soumise à une variabilité climatique qui se traduit par des contraintes hydriques et thermiques erratiques, notamment dans l'étage bioclimatique du semi aride qui se caractérise par de larges fluctuations spatio- temporelles des quantités de pluie (200 à 600 mm/an et des températures extrêmes (Benseddik et Kheloufa, 2000).

Parmi celle-ci, le blé occupe une place de choix dans l'alimentation de la population algérienne (Megherbi et al, 2012). L'Algérie figure parmi les premiers importateurs mondiaux de blé (C.I.C. 2007). Cette situation risque de se prolonger faute de rendements suffisants et au regard des besoins de consommation sans cesse croissants devant une forte évolution démographique (Chellali, 2007).

Cette faiblesse de la production de blé en Algérie est toujours liée aux effets du stress hydrique qui se fait ressentir de manière récurrente et ce depuis quelques décennies déjà. (Chaise et al, 2005) ; (Misra et al., 2010 ; Brinis et al., 2015).

L'augmentation de la production des cultures est largement dépendante du progrès génétique et de l'utilisation des variétés améliorées à haut potentiel de rendement (Morsli et al., 2010 ; Bhourri et al., 2015).

Il est important d'associer à la tolérance à la sécheresse un rendement à potentiel élevé. Cet objectif implique, selon Munns et al., 2010 ; Nio et al., 2011, une bonne connaissance des ressources génétiques disponibles au sein de l'espèce et leurs mécanismes d'adaptation à la contrainte hydrique.

En guise de réponse à une telle préoccupation, le présent travail va dans le sens où nous aspirons à identifier la diversité phénotypique et génotypique de trois variétés de blé dur. Tout comme il y a lieu de préciser que les actions à mener s'articuleront autour d'aspects émanant du terrain et faisant référence à la sélection directe, de traits de tolérance au stress hydrique, tout comme elles porteront sur des explorations à effectuer au laboratoire pour la sélection indirecte, prédictive, au stade juvénile.

Cette contribution servira à lier des caractères morphologiques à des potentiels de rendement, qui ne sont autres qu'une traduction des aptitudes génétiques de ces variétés. Ces expressions seront à valoriser dans des conditions environnementales sub-optimales. Ces formes de stratégies porteront sur autant de marqueurs pouvant contribuer et participer à l'élaboration et à la mise en place d'un programme génétique des céréales, sous des conditions stressantes du climat, le stress hydrique en particulier.

A une saison donnée et à une localisation donnée, les conditions climatiques, les facteurs édaphiques et les pratiques culturales interagissent pour déterminer jusqu'où le rendement potentiel d'un génotype donné sera exprimé (Hazel et al, 1987). L'identification des contraintes, tel le déficit hydrique, les températures extrêmes, la nutrition minérale, la date de semis, la maturité de la plante, reste intimement liée au génotype lui-même.

Malgré les nombreuses tentatives entreprises en vue d'augmenter la production céréalière, il n'en demeure pas moins vrai que les rendements demeurent en deçà du niveau escompté. Les raisons en sont multiples. Parmi elles, le mauvais zonage variétal, un pool génétique restreint, un itinéraire technique partiellement suivi, des stress abiotiques et biotiques qui sévissent avec des incidences particulières, aussi sévères qu'imprévisibles, agissent sur l'expression de la construction du rendement (Brinis, 1995).

Cette contribution se veut aussi une alternative en termes de choix pour la sélection de marqueurs de tolérance au stress hydrique. Une approche synthétique, multi caractères vise à tenir compte de plus d'un marqueur de tolérance sera privilégiée.

Les associations de traits à la fois morphologiques, physiologiques et biochimiques seront de nature à proposer des modèles biologiques que nous appellerons « idéotypes », soit le marquage d'un génotype grâce aux expressions ultimes fournies par les variétés.

Enfin parmi les marqueurs utilisés, certains seront à rechercher au niveau des hybrides F1, issus de croisements zygotiques. Une héritabilité transgressive pour quelques marqueurs concernant le phénotypage, la physiologie et la biochimie n'est pas à exclure et seront d'un apport utile dans le cadre de la mise en place d'un programme d'amélioration génétique de la culture du blé en Algérie.

PARTIE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1-Généralités sur le blé dur

1-1-Origine du blé

Le blé est l'une des premières espèces cultivées par l'homme, depuis plus de 7000 à 10000 ans avant Jésus-Christ dans la région du croissant fertile, vaste territoire comprenant, la vallée du Jourdain et les zones adjacentes de la Palestine, de la Jordanie, de l'Irak, et la bordure Ouest de l'Iran (Feldman 2001).

Selon *Vavilov in Erroux* (1961), le blé dur (*Triticum durum*) a deux origines : l'Abyssinie et l'Afrique du Nord, alors que pour Grignac, (1978), le Moyen Orient est le centre générateur du blé dur, où il s'est différencié dans trois régions : le bassin occidental de la méditerranée, le sud de la Russie et le Proche Orient (Syrie et nord de la Palestine). L'Afrique du Nord est considérée comme centre secondaire d'après la classification de l'espèce (Chikhi, 1992). Chaque centre a donné naissance à des groupes de variétés botaniques possédant des caractéristiques phénologiques, morphologiques et physiologiques spécifiques (Monneveux, 1991).

En Algérie, une grande diversité des blés cultivés était observée. En effet, au début du siècle une multitude de variétés et /ou populations de terroirs étaient cultivées, mais depuis la fin des années 1960, la gamme variétale locale a commencé à régresser sous les introductions massives des blés dits à haut potentiel génétique (Abdelguerfi et Laouar, 2000).

Le blé dur est appelé ainsi en raison de la dureté de son grain et il possède à l'inverse des espèces ancestrales originaires de Syrie et de Palestine, $2n=4x=28$ chromosomes.

1-2-Classification du blé

Le blé est un terme générique qui désigne plusieurs céréales appartenant au genre : *Triticum*, ce sont des plantes herbacées annuelles de la famille des Poaceae, monocotylédones qui comprennent à peu près 600 genres et plus de 5000 espèces cultivées dans de très nombreux pays.

Le terme blé désigne également le grain produit par ces plantes, les blés diffèrent également par leurs caractéristiques anatomiques, dont la position systématique selon Feuillet, (2000) est la suivante :

Embranchement : Spermaphytes

Sous Embranchement : Angiospermes

Classe : Monocotylédones

Ordre : Poales

Famille : Poaceae

Sous-famille : Festucoideae

Tribu : Triticeae

Sou-Tribu : Triticineae

Genre : *Triticum*

Espèce : *Triticum durum Desf*

La classification et la nomenclature des espèces du genre *Triticum*, proposées par Mackay(1966) est actuellement la plus utilisée, elle répartit les blés en quatre espèces qui sont : *Triticum monococcum* qui est diploïde ($2n=14$), *Triticum turgidum* et *Triticum timopheevi* qui sont tétraploïdes ($2n=28$) et *Triticum aestivum* qui est l'espèce hexaploïde et la plus importante économiquement avec la plupart de ses variétés botaniques de type blé tendre

Dans le tableau 1 sont indiqués les synonymes les plus courants des blés classés par Mackay (1966).

Tableau 1 : Nomenclature usuelle des blées selon Mackay (1966)

| Types | Nomenclature selon Mackay (1966) | Nomenclature usuelle | Génome |
|---------------------|--|---|--------------|
| Diploïdes | <i>T.monococcum</i> L, <i>Ssp. Boeoticum (bois)</i> MK | <i>T.boeoticum</i> Boiss <i>Ssp.aegilopides</i> | AA |
| | <i>Ssp.monococcum</i> | <i>Ssp.thaouidar</i> | AA |
| | | <i>T.monococcum</i> L. | AA |
| | | <i>T.sinskajae</i> A. Filat et Kurk | AA |
| | | | AA |
| Tétraploïdes | <i>T.turgdum (L.)Thell.</i> | <i>T.dicoccoides(Shrank)Schulb.</i> | |
| | <i>Ssp.dicoccum(Shrank)Thell.</i> | | AABB |
| | <i>Ssp.paleocolchicum(Men.)MK</i> | <i>T.paleocolchicum Men.</i> | |
| | <i>Ssp.turgidum</i> | | AABB |
| | <i>Conv.polonicum(L.)MK</i> | <i>T.polonicum L.</i> | |
| | <i>Conv .durum Desf. MK</i> | <i>T.durum Desf.</i> | AABB |
| | <i>Conv.turanicum(jukabz.)MK</i> | <i>T.turanicum Jakubz.</i> | AABB |
| | <i>T.timopheevi Zhuk.</i> | | AABB |
| | <i>Ssp araraticum (Jakubz.)MK .</i> | <i>T .araraticum Jakubz.</i> | |
| | <i>Ssp timopheevi</i> | <i>T .timopheevi Zhuk.</i> | AAGG AAGG |
| Hexaploïdes | <i>T.aestivum (L .) Thell.</i> | | |
| | <i>Ssp. Spelta (L.) Thell.</i> | <i>T.spelta L.</i> | AABBDD |
| | <i>Ssp. Macha(Dek. Et Men.)MK</i> | <i>T.macha Dek. etMen.</i> | AABBDD |
| | <i>Ssp.vavilovi (Vill.)MK</i> | <i>T.vavilovi (Tum) Jakubz.</i> | AABBDD |
| | <i>Ssp.compactum (Host.)MK</i> | <i>T.compactum Host.</i> | AABBDD |
| | <i>Ssp Sphearococcum(Perc.)Mk</i> | <i>T.sphearococcum Perc.</i> | AABBDD |
| | <i>Ssp.vulgare (Will.)MK</i> | <i>T.aestivum L.</i> | AAAAGG |
| | <i>T.zhukovskyi Men. Et Er.</i> | <i>T.zhukovskyi Men.et Er.</i> | |

1-3-Morphologie de la plante

C'est une espèce autogame de jours longs .C'est la première céréale cultivée et largement consommée en Algérie et dans le Monde.

Durant le cycle de développement de la plante, deux appareils se forment : un appareil racinaire (primaire et secondaire) et un appareil aérien (fig. 1)

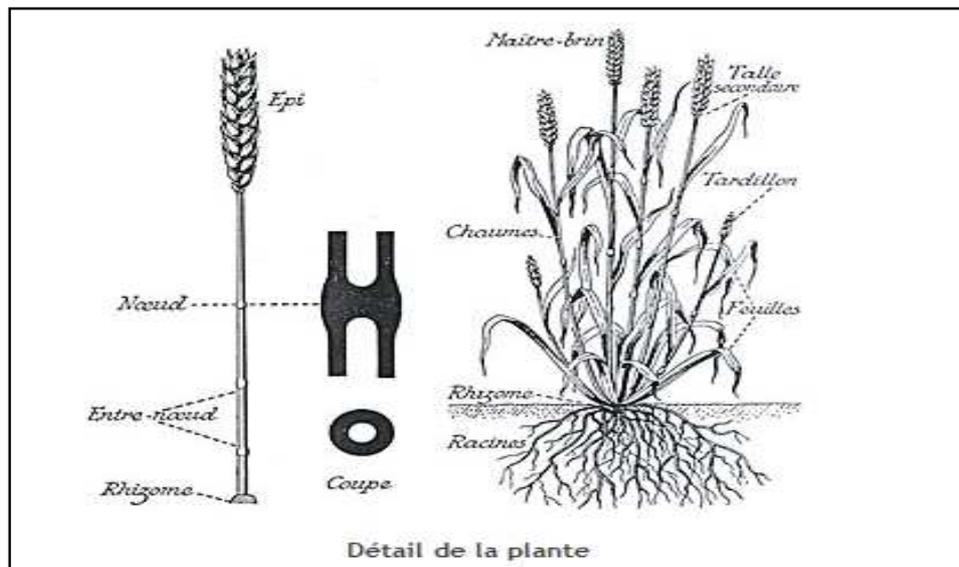


Fig. 1 : la morphologie de blé dur (*Triticum durum*) (source : Soltner, 1998).

1-3-1-Système racinaire

Il est de type fasciculé, puissant et profond, et peut atteindre jusqu'à 1,5m de profondeur qui varie selon l'espèce. Deux systèmes de racines se forment au cours du développement de la plante : un système primaire et un système secondaire.

Système primaire fonctionne de la germination à début du tallage, les racines de ce système ne restent pas fonctionnelles, elles sont remplacées par un système de racines adventives (système secondaire) qui assurent la nutrition et le développement de la plante (Belaid, 1986).

1-3-2-Système aérien

Il est formé de ramification appeler « talles » partant du plateau de tallage, chaque talle après développement forme une tige (chaume) cylindrique formée d'entre nœuds séparés par des nœuds plus au moins saillants, chaque nœud est le point d'attache d'une feuille alterne engainante, droite et large (Belaid, 1986).

L'inflorescence du blé est un épi (fig 2) composé d'un rachis sur le quelle sont insérés les épillets, chaque épillet porte 2 à 4 petites fleurs hermaphrodites.

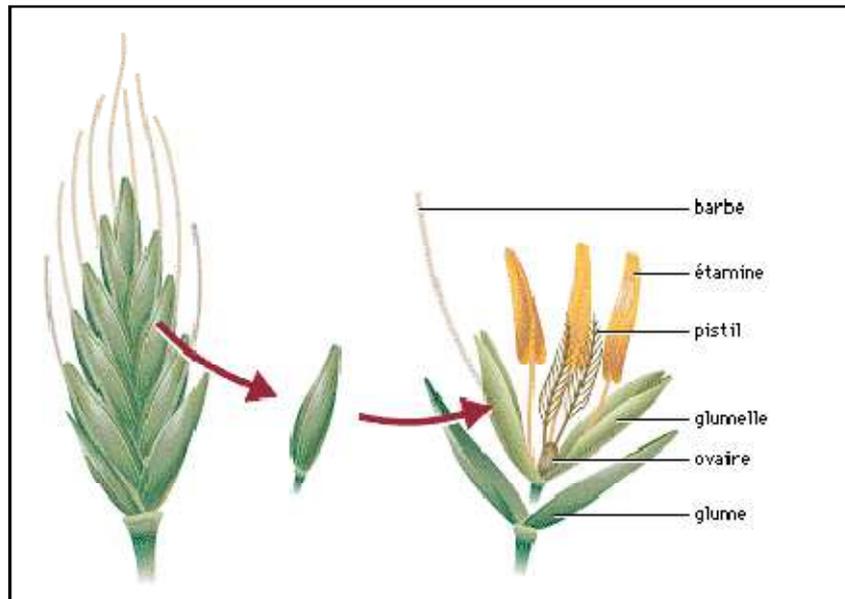


Fig. 2 : Structure d'un épi et épillet du blé. (Source: F.Flandrin, 1949)

Le grain de blé est un caryopse (fig 3). C'est un fruit sec et indéhiscents. Il est de couleur blanchâtre à brunâtre selon l'espèce, blé dur ou blé tendre, et selon les variétés. Le caryopse de blé se compose de deux parties : l'amande et le péricarpe.

L'amande est formée de l'embryon à la base du grain et d'albumen qui sert de réserves utilisées au moment de la germination. Les enveloppes sont riches en matière minérales et ont des teneurs assez élevées en protéines et en matières grasses.

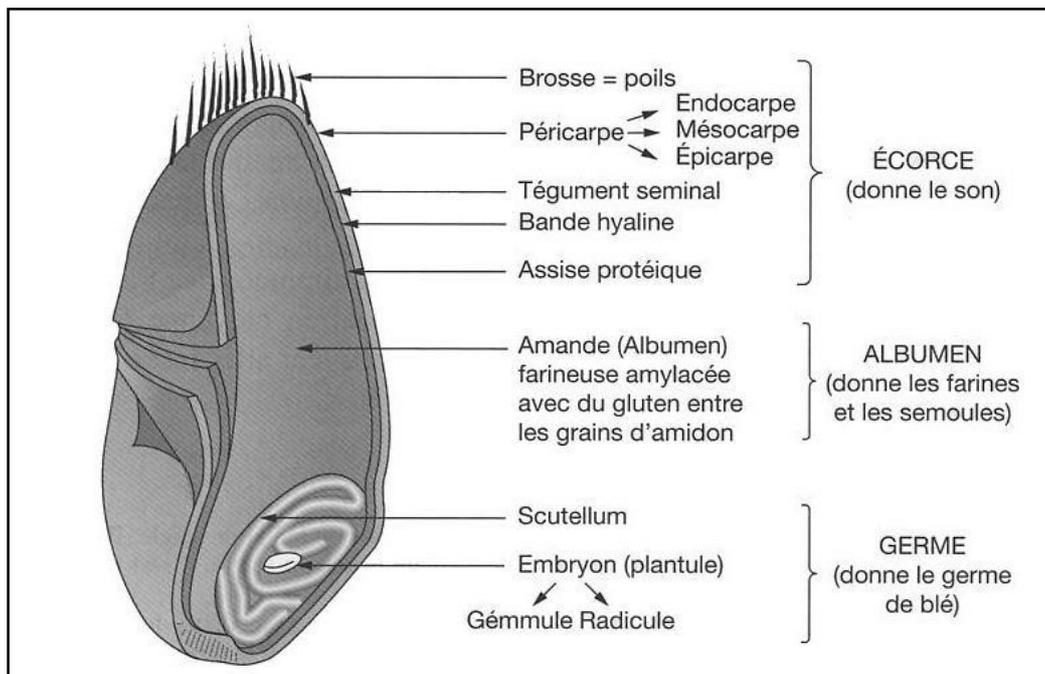


Fig. 3 : Anatomie du grain de blé (Fredot, 2005).

1-4-Cycle de développement

Plusieurs auteurs ont décrit le cycle de développement du blé en le décomposant en deux périodes : l'une végétative et l'autre reproductrice, d'autres considèrent que la maturation constitue une troisième période. Les modifications morphologiques résultant à la fois de processus de croissance et de développement.

Ces deux processus sont complémentaires et indissociables. Ils aboutissent à la production de matière sèche, résultant de la transformation des ressources du milieu par l'intermédiaire de capteurs aériens (feuilles : surfaces photo-synthétisantes) et capteurs souterrains (racines : capteurs d'eau et d'éléments minéraux).

La croissance consiste en une augmentation irréversible des dimensions et du poids des différents organes constitutifs de la plante. C'est une notion quantitative.

Le développement consiste en l'apparition d'organes nouveaux ou le franchissement par la plante d'une étape différente mais complémentaire à la précédente. C'est une notion qualitative (Papadakis, 1938). La Croissance et le développement sont mesurés selon plusieurs échelles dont celle de Feekes (Large et al, 1954). Une échelle qui permet la caractérisation des stades repères et elle repose sur la description de la morphologie du brin-maitre.

1-4-1-Les Phases phénologiques de développement du blé

Le cycle biologique du blé est une succession de périodes subdivisées en phases et en stades. (fig. 4)

A -Phase germination-levée

Cette phase correspond à la mise en place du nombre de pieds/m², le sol est percé par le coléoptile qui est un étui protecteur de la première feuille. La levée est notée quand 50% des plantes sont sorties de la terre, pendant cette phase les jeunes plantes sont sensibles au manque d'eau qui provoque une perte des plantes et au froid qui provoque de déchaussage (Karou et al, 1998).

B-Phase tallage

Cette phase s'amorce à partir de la quatrième feuille. Le début du tallage est marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle latérale primaire puis d'autres talles naissent successivement à l'aisselle des 2^{ème} et 3^{ème} feuille de la tige centrale, l'ensemble restant court noué, formant un plateau de tallage situé juste au niveau du sol.

Ces talles primaires peuvent ensuite émettre des talles secondaires, lesquelles à leur tour émettent des talles tertiaires (Belaid, 1986. Gate, 1995). Le fin tallage correspond la fin de la période végétative, elle marque le début de la phase reproductive, conditionné par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre-nœuds (Gate, 1995).

C -Phase montaison - gonflement

Elle se manifeste a partir du stade épi a 1cm, par l'élongation de premier entre-nœud.

Ce stade est repérable une fois que l'ébauche de l'épi du brin-maitre ait atteint 1cm de hauteur à partir de la couronne dite « plateau de tallage » (Gate, 1995).

Ce stade est sensible aux basses températures (variant entre -4° et 0° C).

Cette phase s'achève qu'une fois que l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étendard qui gonfle (stade gonflement).

D -Phase épiaison-floraison

L'épiaison se détermine par l'apparition de l'épi hors de la graine de la dernière feuille. Les épis dégainés fleurissent généralement entre 4 à 8 jours après l'épiaison (Bahlouli et *al*, 2005). Les basses températures au cours de ce stade réduisent fortement la fertilité des épis (Abassenne et *al*, 1998).

E -Phase remplissage du grain

Après la fécondation, l'évolution du poids du grain se fait en trois étapes. La première est une phase de multiplication des cellules du jeune grain encore vert, dont la teneur en eau est élevée .Suit la phase de remplissage actif du grain avec les produits provenant de la photosynthèse de la feuille étendard et du transfert des hydrates de carbones non structuraux stockés dans le col de l'épi. La quantité d'eau contenue dans le grain tends à se stabiliser : c'est le pallier hydrique.

Les fortes températures au cours de cette période provoquent l'arrêt de la migration des réserves de la feuille et de la tige vers le grain, qui perd de son humidité pour atteindre son poids sec final (Wardlaw, 2002).

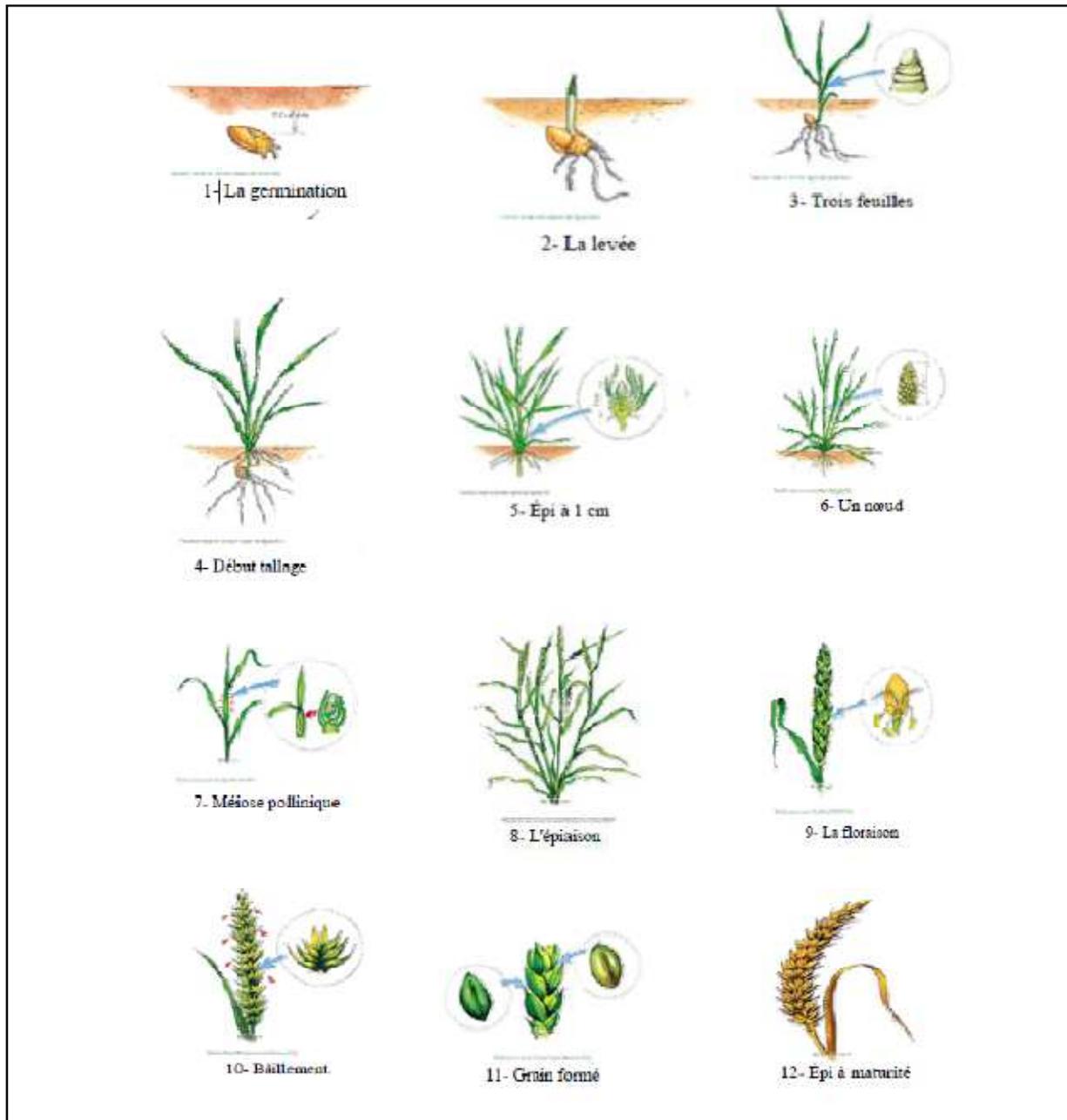


Fig. 4 : Les différents stades de développement du blé (Jonard in Ait Kaki, 2008)

1-5-Les exigences de la culture du blé

1-5-1-La température

La température à partir de laquelle un blé germe et pousse est de 0C°; cependant l'optimum se situe entre 20 et 22C°. Une température élevée est favorable au développement et à la croissance (Simon et al, 1989). Baldy (1992), ajout que les fortes températures provoquent une levée trop rapide et parfois un déséquilibre entre la partie aérienne et la partie souterraine.

Les températures entre 25 et 32C° défavorisent l'allongement racinaire et l'optimum se situe entre 5 et 12C°. Mekhlouf et al (2001), situent les exigences en température pour les différents stades de développement du blé de la manière suivante :

- Stade levée : la somme des températures = 120C°.
- Stade tallage : la somme des températures = 450C°.
- Stade plein tallage : la somme des températures = 500C°.
- Stade épi 1cm : la somme de températures = 600C°.

1-5-2-La Lumière

Les céréales nécessitent un apport en rayons solaires abondants durant la croissance végétative. La lumière affecte le système racinaire qui ne se développe pas normalement mais revêt d'une importance fondamentale pour les organes aériens. Elle agit beaucoup plus sur la photosynthèse et le rendement.

La diminution de la durée d'éclairement réduit la hauteur de la culture, La formation de l'épi nécessite 12 à 14 heures d'éclairement, une insuffisance d'éclairement retarde la floraison.

1-5-3-L'eau

L'eau constitue un facteur important du fait qu'elle participe au maintien de la structure cellulaire et qu'il est aussi le milieu nécessaire aux différentes réactions métaboliques.

L'eau est considérée également comme étant le composant principal des sèves qui véhiculent les substances nutritives et autres ions minéraux et molécules organiques (malate, citrate, sucre etc....), ainsi il joue un rôle important dans la régulation thermique dans les feuilles des plantes.

1-5-4-Le Sol

Les céréales s'accommodent à tous les sols, cependant chacune d'elles à des préférences (Moule, 1980) .Les terres convenables sont celles dont les caractéristiques physiques (structure et texture) sont capables de conserver assez longtemps l'humidité.

En effet les terres profondes sont préférables pour le blé dur et les terres peu profondes sont quant à-elles préférables pour le blé tendre.

1-5-5-La Fertilisation

La Production des céréales nécessite une fumure abondante et équilibrée, son épandage est fonction des conditions climatiques et de la culture précédente, elle doit également tenir compte du degré de fertilisation du sol, cette fumure doit être employée avec prudence.

L'apport d'engrais phospho-potassique a lieu avec le labour au plus tard avant le semis. La fumure azotée est d'une importance primordiale, elle présente le pivot de rendement, son apport peut être effectué soit en une seule fois ou bien fractionné en fonction des précipitations.

1-6-Importance de la culture du blé

1-6-1-Dans le monde

Les blés constituent la première ressource alimentaire pour l'homme, et la principale source en protéines. Ils fournissent également une ressource privilégiée pour l'alimentation animale et de multiples applications industrielles (Bonjean et Picard, 1990). La presque totalité de la nutrition mondiale est fournie par les aliments en grain dont 95% sont produits par les cultures céréalières.

Les blés et le riz sont les plus importantes en termes de superficie consacrées à leur production, avec 55% de la superficie annuelle allouées aux principales céréales (FAO, 2007)

Le blé dur représente environ 10% des surfaces cultivées en blés dans le monde dont 70% sont localisées en conditions méditerranéennes dont les principaux pays sont la Turquie, la Syrie, l'Italie, l'Espagne et les pays du Maghreb (Monneveux, 2002).

Cependant le principal producteur mondial de blé dur est l'union européenne avec 9 MT suivi par Canada avec 5.8 Millions de tonnes pour la période 2016 / 2017(CIC, 2017).

La production mondiale de blé dur en 2017 pourrait atteindre les 39 millions de tonnes, selon le rapport mensuel sur le blé dur publié par le Conseil Internationale des Céréales (CIC) en mars 2017, cette prévision présenterait un net recul par rapport aux 40 millions de tonnes de production en 2016.

1-6-2-En Algérie

Selon les statistiques du ministère de l'agriculture et du développement durable, la superficie emblavée au titre de la campagne labours-semis 2016 / 2017 à atteint les 1.17 millions d'ha pour le blé dur.

En 2016 la production céréalière en blé dur a atteint 2.2 MT. L'Algérie reste malgré tout un grand importateur de blé dur

Céréales :

Les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Durant les deux périodes 2000-2009 et 2010-2017, la superficie des céréales occupe en moyenne annuelle **40%** de la Superficie Agricole Utile (SAU). La superficie ensemencée en céréales durant la décennie 2000-2009 est évaluée à **3 200 930** ha, desquelles, le blé dur et l'orge occupent la majeure partie de cette superficie avec **74%** de la sole céréalière totale.

Durant la période 2010-2017, cette superficie a atteint en moyenne **3 385 560** ha, en évolution de **6%** par rapport à la période précédente (2000-2009).

La production réalisée des céréales au cours de la période 2010-2017 est estimée à **41.2** millions de quintaux en moyenne, soit un accroissement de **26%** par rapport à la décennie 2000-2009 où la production est estimée en moyenne à **32.6** millions de quintaux. La production est constituée essentiellement du blé dur et de l'orge, qui représentent respectivement **51%** et **29%** de l'ensemble des productions de céréales en moyenne 2010-2017.

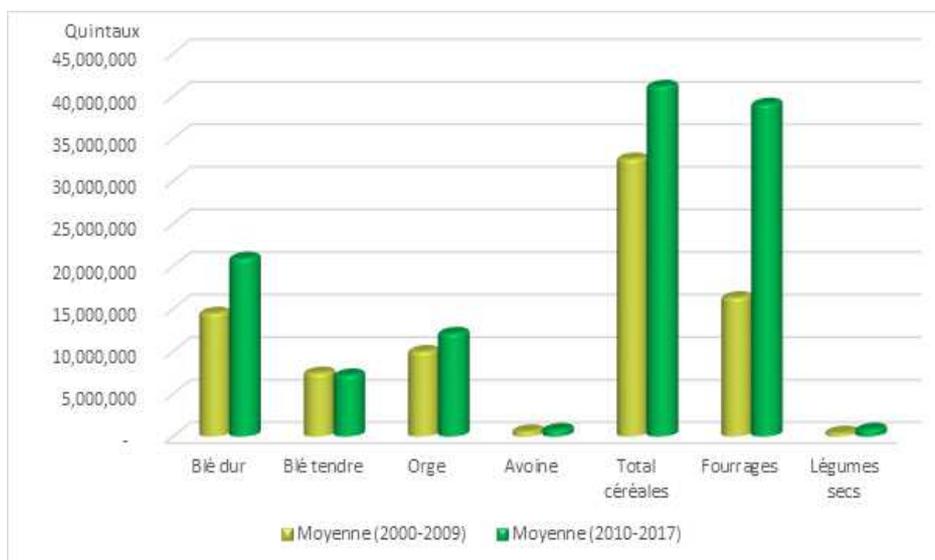


Fig. 5 : production comparative des grandes cultures en Algérie pendant les décades (2000-2009) et (2010-2017)

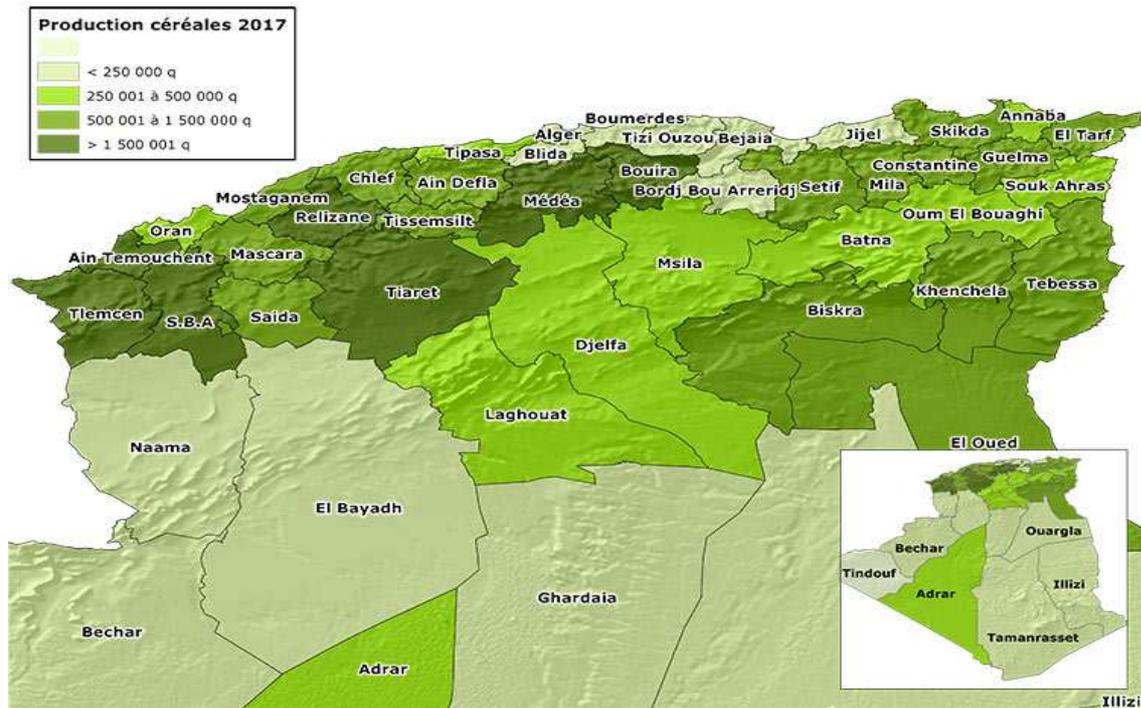


Fig. 6 : production céréalière dans les principales aires bioclimatiques en Algérie (2017)

Tableau 2 : production céréalière en Algérie (2001-2019)

| <i>Cereal production</i> | | | |
|--------------------------|------------------|-----------------------|----------------------|
| <i>Cropping season</i> | <i>Area (Ha)</i> | <i>Production (t)</i> | <i>Wheat rate(%)</i> |
| 2001/2002 | 3 195 000 | 1 951 410 | 77 |
| 2002/2003 | 3 230 000 | 4 264 374 | 70 |
| 2003/2004 | 3 365 000 | 4 031 300 | 68 |
| 2004/2005 | 3 279 230 | 3 525 046 | 69 |
| 2005/2006 | 3 129 000 | 4 012 810 | 67 |
| 2006/2007 | 3 421 000 | 3 597 858 | 65 |
| 2007/2008 | 3 090 600 | 1 533 614 | 75 |
| 2008/2009 | 3 251 750 | 6 120 000 | 56 |
| 2009/2010 | 3 324 560 | 4 807 200 | 65 |
| 2010/2011 | 3 189 700 | 4 245 700 | 69 |
| 2011/2012 | 3 250 000 | 5 134 006 | 74 |
| 2012/2013 | 3 187 900 | 4 935 501 | 63 |
| 2013/2014 | 3 235 600 | 4 275 350 | 69 |
| 2014/2015 | 3 278 600 | 5 245 210 | 71 |
| 2015/2016 | 3 197 540 | 3 430 000 | 60 |
| 2016/2017 | 3 312 000 | 3 480 000 | 62 |
| 2017/2018 | 3 354 650 | 4 254 100 | 72 |
| 2018/2019 | 3 215 300 | 61 269 000 | 68 |

Les superficies récoltées varient entre 75 à 91%. Les taux de collecte varient de 52 à 68%.

2-Le Stress hydrique

2-1-Définition du stress

Fondamentalement le stress est un concept de mécanique, défini par les ingénieurs et les physiciens comme étant une force exercée par unité de surface d'un objet. En réponse au stress, l'objet oppose une déformation, ou un changement de dimensions (Hopkins, 2003).

Il est difficile de définir aussi précisément le stress en biologie. J Levitt a considéré que la terminologie employée en physique devrait être appliquée aux organismes vivants (voir Levitt, 1982. Tuner et Kramer, 1980).

La définition la plus pertinente d'un stress biologique est à la fois l'action d'un agent agresseur et les réactions qu'il entraîne dans l'organisme agressé. C'est une force ou une influence hostile qui tend à empêcher un système de fonctionner (JONC, 1989).

Toute contrainte externe qui limite la productivité en dessous de potentialité génétique d'une plante, peut être considérée comme stress (Grime, 1979).

Les principaux stress environnementaux auxquels les plantes sont confrontées sont résumés dans la figure 7 :

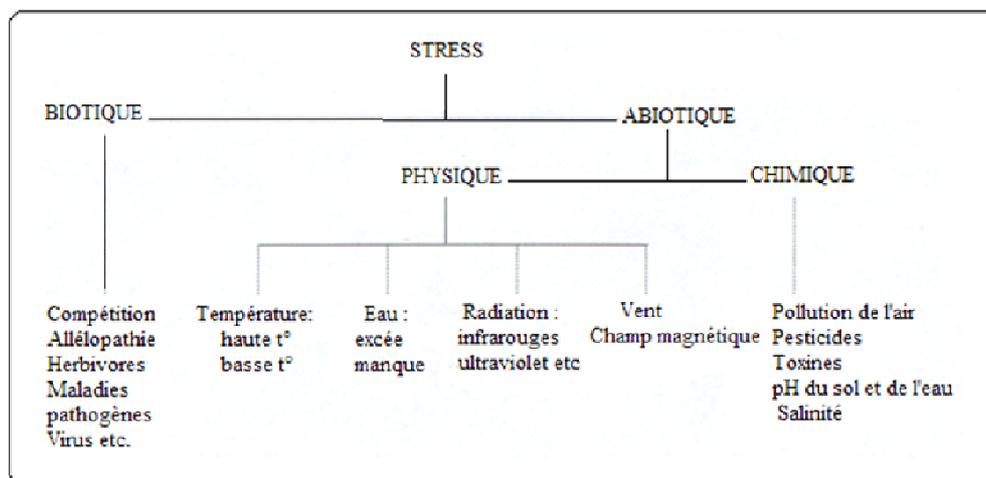


Fig.7 : Les sources de stress environnemental chez les plantes (Schubert, 1985. Nilsen & Ocrutt, 1996)

2-2-Stress abiotique

Les processus impliqués dans l'élaboration du rendement d'une culture

sont influencés par deux types de facteurs: les facteurs génétiques (intrinsèques à la plante) et les facteurs environnementaux (Chaves et al, 2009).

Les stress environnementaux abiotiques affectant une culture peuvent occasionner des pertes de rendements considérables. Il est donc essentiel de caractériser le type de la contrainte environnementale auquel la plante est confrontée (Shantha et al, 2000 ; Araus et al, 2014).

2-2-1-Stress thermique

La température est l'un des facteurs principaux qui conditionne la productivité des plantes. Il y a trois formes principales de stress de température extrême sur les cultures à savoir : le froid, le gel et la chaleur. Une augmentation des températures globales peut avoir l'un ou les deux de ces effets intenses: un stress plus fréquent de haute température et un stress moins fréquent de basse température (Cornic, 2007 ; Navarro, 2009 ; Wang et al, 2011).

A -Stress au froid

Les signes de lésion externe causés par le froid peuvent revêtir plusieurs formes qui dépendent de l'espèce et de son âge, ainsi que de la durée de l'exposition au froid (Wang et al, 2012 ; Burghardt et al, 2016). De jeunes plantules présentent typiquement des signes de réduction de la croissance des feuilles, de flétrissement et de chlorose. Dans les cas extrêmes, il apparaît un brunissement et des zones de tissus morts (nécroses), et/ou la mort de la plante peut s'ensuivre. Toutefois, l'action du froid et des faibles rayonnements induisent une stérilité des gamètes mâles (Navarro, 2009; Wang et al, 2011).

B - Le stress induit par les températures élevées

L'un des problèmes auxquels les plantes sont confrontées dans des conditions où les radiations solaires sont intenses et la température élevée, est l'absorption de l'énergie. De nombreuses plantes évitent la surchauffe en faisant adopter une position plus verticale, enroulement des feuilles, la production de poils foliaires et de surfaces cireuses qui réfléchissent la lumière (Navarro, 2009). La température la plus élevée et qui peut être supportée par la plupart des plantes est déterminée par la dénaturation irréversible des enzymes.

Tricker et al(2018) associent le stress hydrique au stress thermique, les hautes températures en particulier, et pensent qu'une combinaison de tolérance aux deux formes de stress diffère de manière appréciable. Dwivedi et al (2018), travaillant sur l'effet des régulateurs de croissance sur les traits physiologiques chez le blé sous conditions d'excès et de déficit hydrique, trouvent que la turgescence cellulaire (teneur relative en eau), l'indice de stabilité membranaire , la teneur en chlorophylle étaient améliorés grâce à l'application exogène de ces régulateurs. Cette amélioration a été obtenue dans les deux cas (irrigué et stressé).

C - Le gel

Les dégâts apparents du gel sont toujours la conséquence d'effets internes se manifestant au niveau cellulaire. L'abaissement brutal de la température en dessous de 0°C provoque de nombreuses perturbations au sein du végétal dues surtout à la formation de glace et non pas la basse température en soi qui endommage les cellules végétales (Burghardt et al, 2016).

2-2-2-Stress hydrique

L'une des premières étapes pour mieux comprendre la tolérance au déficit hydrique est de caractériser la contrainte environnementale (Petcu et al, 2009 ; Benblidia, 2011). L'eau est un élément vital pour le développement et la survie de la plante. Le courant d'eau ascendant fournit à la plante des éléments minéraux à l'état dissous, essentiels à sa croissance. Outre cette fonction dans l'alimentation, l'eau qui constitue le «milieu intérieur» des organes et de la plante en général (eau d'imbibition), a un rôle dans le maintien des fonctions principales des plantes; ceci implique que l'eau d'imbibition (qui s'évapore par transpiration) soit remplacée régulièrement par de l'eau provenant du sol par absorption racinaire (Merah, 2001 ; Levraut, 2010 ; Misra et al, 2010).

Plusieurs travaux démontrent que la sécheresse constitue le principal facteur environnemental conditionnant les fortes variantes des potentialité productives des espèces céréalières (Thameur et al., 2012 ; Varshney et al., 2012).

Environ 80% de la superficie de la céréaliculture est localisée en zones de plaines intérieures (Araus et al., 2008 ; Huseynova, 2012). Ces zones représentent en grande partie l'aire biogéographique du semi-aride, qui se caractérise par des contraintes abiotiques, d'ordre climatique en particulier.

Selon Ceccarelli (2010) et Yang et al (2011), la contrainte abiotique est celle qui correspond à toutes les conditions de l'environnement ou combinaison de conditions qui empêchent la plante de s'exprimer par son potentiel génétique.

Cependant, le déficit hydrique demeure néanmoins le premier facteur, sinon l'unique, limitant la production agricole mondiale (Misra et al., 2010 ; Brinis et al, 2015).

Les changements climatiques intervenus au début des années soixante-dix deviennent de plus en plus contraignants pour la croissance et le développement des plantes (Hacini et al., 2014).

Cependant, malgré l'impact d'un environnement sévère et des conditions agro-climatiques suboptimales, Bhourri et al., (2015) pensent que l'augmentation de la production des cultures est dépendante du progrès génétique. Ainsi, l'utilisation de variétés améliorées à haut potentiel de rendement reste selon Morsli et al., (2010), une alternative privilégiée.

Munns et al (2010) et Nio et al (2011) quant à eux estiment, à la lumière de leur travaux, qu'il faut associer un rendement potentiel élevé à la sécheresse; ce qui implique une connaissance approfondie des ressources phytogéniques utilisées dans un programme d'amélioration génétique.

Sur un tout autre plan, la notion de potentiel de rendement reste sujette à la nature même de la sélection.

Certains auteurs pensent que le rendement ne constituerait pas un bon objectif de sélection, à cause de sa faible héritabilité. Plusieurs auteurs, néanmoins, proposent de substituer à cette sélection directe pour le rendement, une sélection indirecte basée sur des approches d'ordre morphologique, phénologique, physiologique, biochimique et anatomique (Youcfi 2013 ; Drake et al., 2013).

Les stress hydriques du sol doivent être décomposés en deux contraintes opposées :

Le stress hydrique de l'excès d'eau provoque une réduction de l'apport d'oxygène qui limite à son tour la respiration, l'absorption de nutriments et d'autres fonctions racinaires cruciales (Hopkins, 2003).

Le stress provoqué par un déficit hydrique est bien plus fréquent, de sorte que l'expression de stress de déficit hydrique est abrégée en stress hydrique. Le stress hydrique a été défini comme une baisse de la disponibilité de l'eau, se traduisant par une réduction de la croissance de la plante ou de sa reproduction par rapport au potentiel du génotype. D'autres auteurs limitent la définition du stress aux seules conditions correspondant à une hydratation suboptimale des tissus (Pugnaire et al, 1993).

Le stress hydrique se traduit par une série de modifications qui touche la croissance (Yousfi et al, 2012 ; Tauqeer et al, 2013), les caractères morphologiques, physiologiques et biochimiques à partir du moment où les besoins en eau de la plante sont supérieurs aux quantités disponibles (Mefti et al, 2002 ; Petcu et al, 2009).

Selon Tardieu (2005), le statut hydrique de la plante passe progressivement par trois principales phases, selon le développement du stress hydrique. Au cours de la phase initiale, la transpiration et l'assimilation se déroulent comme si la plante dispose de l'eau à volonté. Cette phase se poursuit jusqu'au moment où le niveau d'absorption racinaire ne peut plus satisfaire la demande climatique que subit le feuillage (Huseynova, 2012 ; Tian et al, 2013).

La réserve utile du sol est alors épuisée à 50 %. Après ce seuil, la plante entre dans la seconde phase, au cours de laquelle la transpiration et l'assimilation sont réduites relativement au potentiel. La plante réagit de façon dynamique au cours de cette phase, pour rétablir l'équilibre entre la demande climatique et l'offre du sol, faisant intervenir des mécanismes qui lui sont propres dont le développement du système racinaire, la régulation stomatique et/ou l'ajustement osmotique (Vysotskaya et al, 2008 ; Nio et al, 2011).

Quand le déficit hydrique devient plus intense, alors la plante entre dans la troisième et dernière phase au cours de laquelle les stomates se ferment complètement, annulant toutes activités photosynthétiques (Cernusak et al., 2011 ; Ceccarelli et al., 2012 ; Tian et al., 2013). Toutes les pertes hydriques de la plante se font alors à travers les voies non stomatiques (cuticule). Il n'y a plus de gain de matière sèche, la respiration consomme les hydrates de carbone stockés et la plante passe au stade de survie. La période de survie dépend du rythme de la transpiration résiduelle et de la tolérance à la dessiccation des tissus vivants restants (Jenks et al, 2010 ; Yang et al, 2011 ; Bennett et al, 2012 ; Wu et al, 2012).

Selon Kameli et Losel (1996), la croissance s'arrête avant qu'aucun abaissement notable ne soit perceptible dans le contenu relatif en eau. Les premiers effets du déficit hydrique est une réduction de la vitesse de croissance des cellules de la tige (Lebon et al, 2006), une diminution importante de la taille et de la surface foliaire (Domagalska et al, 2011). La réduction de la surface foliaire peut provenir d'une diminution de l'expansion foliaire et/ou d'une accélération de la feuille (Bouatrous et al, 2013).

Au niveau cellulaire, deux facteurs sont déterminants sur la croissance : l'extensibilité de la paroi et sa turgescence.

2-3-Effet du stress hydrique sur la plante :

Les effets du stress hydrique sur la physiologie de la plante se traduisent par un ralentissement de la dynamique cellulaire (division, allongement, translocation) (Leucci et al., 2008., Wand et al., 2013), une baisse de la photosynthèse, une modification de la respiration

(Cernusak et al., 2011., Tian et al., 2013) ; et un déséquilibre hormonal (Parent et al., 2009., Thameur et al., 2011). Pour Bonhomme et al., 2012 ; Wu et al., 2012, les effets du stress pendant la germination, la croissance et la production sont différents.

La réduction de la surface peut provenir d'une diminution de l'expansion foliaire (Buhtz et al., 2010 ; Mahdid et al., 2011 ; Bouatrous et al., 2013).

Le manque d'eau affecte la distribution de la biomasse chez les plantes stressées (Norman et al., 2011 ; Puiga et al., 2012). Benmahammed et al., 2008 ; Quanqui et al., 2010 ; Sieburth et al., 2010) renvoient la distribution de la biomasse sous stress hydrique, à la complémentarité des fonctions de croissance des parties racinaires et aérienne.

Lors d'un assèchement du sol, les réponses des plants vis-à-vis de cette contrainte peuvent se traduire en une augmentation du rapport en matière sèche entre la partie souterraine et la partie aérienne (Albouchi et al., 2003 ; Streda et al., 2012 ; Van Norman et al., 2011).

2-3-1-Effets du stress hydrique sur le rendement et ses composantes

Le rendement en grains est la résultante de diverses composantes qui sont déterminées à différentes périodes du cycle de la plante (Belaid et al, 2010). Chez les céréales, le rendement en grains dépend du génotype, de l'environnement et de la disponibilité en éléments minéraux du sol (Lobell et al, 2011).

Rajeev et al, attribuent le potentiel de rendement aux multiples facteurs qui contrôlent la culture du blé à travers les différents traits morpho physiologiques et génétiques. Les auteurs accordent beaucoup de crédit aux réponses à la déshydratation et à l'impact du déficit hydrique sur le développement de la plante. Ils suggèrent une interdisciplinarité en vue de renforcer les gains génétiques et d'atteindre une plus grande durabilité dans les aires de culture où le stress hydrique est selon ces auteurs, « un facteur dévastateur » pour la production agricole globale.

Le stress hydrique se traduit par une réduction de la croissance de la plante et de sa production par rapport au potentiel du génotype. Un stress hydrique précoce affecte en parallèle la croissance des racines et des parties aériennes, le développement des feuilles et des organes reproducteurs (Debaeke et al, 1996).

Le déficit hydrique, de nature intermittente, est une des principales causes des pertes de rendement du blé dur, pouvant aller jusqu'au sinistre total (Frija et al, 2013). Il affecte toutes les composantes du rendement et en particulier le nombre de grains par épi et le poids moyen du grain (Pedró et al, 2012).

L'effet du déficit hydrique sur ces composantes, et par conséquent sur le rendement dépend du stade au cours duquel ce déficit survient (tab 2).

2-3-1-1-Effet du stress hydrique sur le tallage épis

Le tallage épis est une composante essentielle du rendement en zones semi- arides et son rôle est particulièrement important en cas d'un déficit hydrique précoce très marqué (Chenu et al, 2011 ; Karrou et al, 2012).

Un déficit hydrique a un effet très variable selon la période d'apparition. Dans les zones arides toutes les talles produites sous l'effet de la compétition hydrique n'arrivent pas à former des épis (Acevedo et al, 1991 ; Kholová et al, 2010 a et b). Si le déficit hydrique apparaît pendant la période de tallage herbacé la vitesse d'émission des talles diminue et s'il s'accroît sévèrement il y a arrêt de tallage (Ma et al, 2010). Par ailleurs, une sécheresse au cours du mois précédant l'épiaison provoque une augmentation de la régression des talles.

Richards et al, 2011 ont montré que le nombre d'épis/m² n'est pas affecté par le déficit hydrique, pendant le stade 3 nœuds où cette composante est définitivement acquise.

2-3-1-2-Effet du stress hydrique sur le nombre de grains/épi

Le nombre de grains par épi est en fonction du nombre d'épillets par épi, tout les deux sont des composantes importantes dépendant étroitement de la disponibilité en eau (Botwright Acuna et al, 2012).

Foulkes et al, 2007 ont signalé un effet négatif de l'impact du manque d'eau sur les fleurs des épillets. D'après Grignac, 1987 et Rizza et al, 2012, un déficit hydrique, apparu plus tardivement au cours du stade montaison, augmente le taux d'avortement des fleurs qui peuvent entraîner la destruction de l'épillet d'où la baisse de la fertilité des épis (Passioura, 2012).

Botwright et al., (2012) ; Du et al., (2010) confirment, pour leur part, que le nombre de grains/épi est fonction du nombre d'épillets/épi ; toutes deux étant des composantes importantes dépendantes de la disponibilité en eau.

Lors d'un stress hydrique, l'épi assure par ailleurs une fonction photosynthétique importante (Stoddard et al, 2011) mais le remplissage des grains est pénalisé pendant la fin de montaison. La contribution de l'épi à la photosynthèse de la plante entière serait comprise entre 13 % (Frija et al, 2013) et 76% (Li et al, 2013). En cas de stress hydrique, les épis participeront même plus activement à la photosynthèse que la feuille étendard. Pedró et al, 2012 ont signalé que l'aptitude d'une céréale à maintenir le nombre de grains par épi et par unité de surface élevée serait associée, en cas de sécheresse à un caractère de tolérance à la contrainte hydrique.

2-3-1-3-Effet du stress hydrique sur le poids de mille grains (PMG)

Un rendement en grains du blé au cours d'une année de sécheresse sévère et prolongée est plus affecté surtout en période de remplissage du grain (Sommer et al, 2012).

Après la floraison, le grossissement du grain est assuré par la migration des matières synthétisées dans la partie encore verte mise en réserve dans la tige; pour que ce transfert se fasse bien, il faut que la circulation de la sève s'effectue sans entraves (Botwright Acuna et al, 2012). S'il y a un léger déficit hydrique, les grains restent petites (Fulvi et al, 2012). Cette diminution du calibre de grains se traduit pendant la montaison par une réduction de la taille de la surface et l'accélération à la sénescence de la feuille limitant ainsi la capacité de transfert des réserves dans les nervures où elles affectent la croissance des tiges pendant leurs élongations (Richards et al, 2011).

Du et al., (2010) ; Botwright et al., (2012) rapportent que le grossissement du grain est assuré après la floraison, par la migration des matières synthétisées dans la partie encore verte mise en réserve dans la tige. Si le stress hydrique est modéré, les graines restent petites (Gonzalez et al., 2010 ; Fulvi et al., 2012).

Richards et al., (2011) ; Chenu et al., (2011), attribuent le calibre des graines à la sévérité du déficit hydrique, notamment pendant la phase montaison. Un déficit hydrique, selon ces auteurs, ralentirait et limiterait la capacité de transfert des réserves dans les nervures où elles affectent la croissance des tiges pendant leurs élongations.

Darzi et al (2018) étudient la relation entre la taille de la semence chez quelques génotypes de blé, les caractéristiques phénologiques et le rendement en grains sous conditions de déficit hydrique. Leurs travaux montrent que le déficit hydrique cause une diminution du rendement ; du poids de mille grains, du poids de l'épi et du remplissage du grain.

Le PMG est affecté par le déficit hydrique pendant la phase floraison qui va accélérer la sénescence foliaire et réduire la durée du remplissage provoquant l'échaudage (Benbelkacem et Kellou, 2001 ; Quanqui et al, 2010 ; sommer et al 2012. La baisse de rendement est occasionnée par une durée des graines plus courte (Gonzalez et al, 2010 ; Comadran et al, 2011).

2-4-Effet du stress hydrique sur le phénotypage :

2-4-1- Effet du stress hydrique sur la hauteur de la plante

La hauteur de la plante apparaît comme un critère de sélection important particulièrement pour les zones arides. Meziani et al. (1992), considèrent que la recherche de la tolérance à la sécheresse passe par l'augmentation de la hauteur de la paille. Dakheel et al. (1993) notent que la hauteur du chaume présente une corrélation modérée avec le rendement en grain sous stress sévère. En condition de stress hydrique, une paille haute est plus apte à stocker plus de réserves glucidiques, qui sont susceptibles d'être transférées vers le grain, au cours de la phase de remplissage (Benabdellah et Bensalem, 1993).

2-4-2-Effet de stress hydrique sur la surface foliaire

En cas de déficit hydrique, la limitation de la perte d'eau peut également résulter de la réduction de la surface transpirante (Benhammouda et al, 2000 ; Turner 2000). Chez le sorgho, d'importantes variations génétiques ont été observées pour le maintien de la surface foliaire en conditions de déficit hydrique (Rosenow et al, 1983). La transpiration peut aussi être réduite par le phénomène d'enroulement foliaire, lui-même induit par la perte de la turgescence (Yang et al, 2011). O'Toole et al. (1980) ont montré que l'enroulement des feuilles peut entraîner, chez le riz, une diminution de 40 à 60% de la transpiration.

Le phénotypage variétal, selon Benmounah et Brinis (2020), peut être utilisé à bon escient dans le cadre d'une sélection indirecte de marqueurs de tolérance au stress hydrique. En effet, les auteurs montrent que le type de feuille érigée (erect leaf) , la texture foliaire cireuse (waxiness) et la surface foliaire (leaf area) constituent des traits déterminants et intéressants dans la sélection de variétés adaptées au stress hydrique.

2-4-3-Rôle de la pilosité et de la cire lors d'un stress hydrique

La cuticule des plantes supérieures est écologiquement très importante, elle constitue une interface entre la plante et son environnement. Son rôle est de prévenir la dessiccation des plantes dans les environnements à ressources en eau limitées (Feakins et Sessions 2010).

La cuticule joue un rôle essentiel dans le contrôle des échanges hydriques entre la plante et son milieu extérieur autre que celui régulé par l'intermédiaire des stomates (Schreiber et al, 1996). Elle agit comme une barrière contre les pertes d'eau à travers la plante (Kerstiens, 1996a). Elle peut aussi protéger les tissus des dommages mécaniques qui peuvent être causés par divers chocs, ou bien des insectes (Eigenbrode, 1996).

La cuticule peut aussi protéger les tissus photosynthétiques contre le trop de lumière. La fonction hydrophobe de la cuticule est essentiellement assurée par les cires qui rentrent dans la composition chimique de la cuticule. Les cires sont de longues chaînes aliphatiques qui jouent un grand rôle dans la préservation de l'eau de la plante. Elles sont impliquées dans plusieurs paramètres adaptatifs de la plante à son environnement et sont considérées par plusieurs auteurs dont (Bouzoubaâ et al, 2006) comme un critère de sélection des plantes tolérantes à la sécheresse. Leur quantité et leur composition sont très influencées par l'environnement.

La glaucescence des feuilles, liée à la présence d'une cuticule cireuse (Bennett et al, 2012), ainsi que la présence de trichomes, en augmentant la réflectance des radiations incidentes, limitent l'élévation de température des feuilles et contribuent ainsi à limiter les pertes d'eau par transpiration (Fakhri et al, 2008).

Les lignées glauques ont une transpiration nocturne réduite, une transpiration diurne plus faible, pour un taux de photosynthèse donné, et une température du feuillage plus réduite. Les feuilles glauques réfléchissent une grande partie de la lumière reçue et restent en activité plus longue (Schoppacha et al, 2012).

La glaucescence est un caractère qui influencerait fortement le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau des plantes en conditions sèches (Araus et al, 2010 ; Bennett et al, 2012). Des travaux réalisés sur des lignées isogéniques de blé dur montrent que les lignées glaucescentes ont, en conditions de déficit hydrique, une production de biomasse et un rendement en grains plus élevés que les lignées non glaucescentes (Kunst et al, 2009 ; Richards et al, 2010).

Le dépôt de la cire épicuticulaire diminue la perméabilité de la cuticule et augmente la résistance de la culture (Médina et al, 2006). La présence de cires sur les gaines et limbes foliaires, ainsi que sur les glumes, est soumise à d'importantes variations génétiques (Monneveux et al, 2004 ; Long et al, 2010).

La production de cires est également très liée à des facteurs environnementaux: une réduction de la disponibilité de l'eau du sol, une faible humidité de l'air et une forte radiation lumineuse augmentent la production de cires (Mamrutha et al, 2010 ; Yang et al, 2011). Néanmoins, les travaux de Kosma et al, 2010 ; Zhang et al., 2013 sur blé révèlent l'existence de génotypes qui, bien que présentant une forte augmentation de dépôt de cires sur la feuille étendard, montrent une faible rétention d'eau: en fait, la réduction de la transpiration dépend non seulement de la quantité totale de cires, mais également de la forme et la structure de ces cires, elle-même liée à leur composition chimique (Bouzoubaa et al, 2006 ; javelle et al, 2011).

Benmounah (2018), travaillant sur des génotypes de blé dur et sur leur phénotypage en particulier, trouve que la présence de cire était un caractère distinctif chez une variété, lui conférant ainsi des qualités adaptatives de tolérance au stress hydrique.

3-Mécanismes d'adaptation de la plante vis-à-vis du stress hydrique

Le déficit hydrique demeure l'un des principaux facteurs limitant sinon le plus important à travers les aires de culture des céréales. (Mekliche et al, 2003).

Le stress hydrique, selon Benlaribi (1990) et Baldy (1992), peut intervenir à n'importe quel stade phénologique de la culture.

La tolérance au stress hydrique est cependant un phénomène très complexe qui fait intervenir de nombreux mécanismes qui interagissent entre eux. La résultante des combinaisons respectives de ces mécanismes sera déterminante dans la définition des stratégies adaptatives du végétale face au stress imposé (Turner 1979, Nachit et Ketata, 1986).

Parmi les stratégies d'adaptation, celle qui apparaît être la plus abordable est celle qui passe par l'amélioration génétique variétale. Elle consiste à ajuster, modifier le cycle évènementiel de la plante, de manière à permettre à celle-ci de parvenir à sa maturité au champ, tout en escomptant un rendement en grain appréciable.

Raccourcir le cycle phénologique d'une variété de blé ou d'orge, revient à augmenter selon Fisher et Maurer (1978) de 30 à 80kg/ha par chaque jour de précocité.

Fisher (1979) note en outre que la précocité à la floraison s'accompagne d'une réduction du potentiel de production, par diminution du nombre de sites de remplissage. Gate ajoute (1995) que les variétés précoces ont de faibles potentiels en année favorable.

Une autre stratégie préconisée par d'autres chercheurs (Belhassen et al, 1995) est l'évitement qui permet le maintien d'un potentiel hydrique élevé dans la plante.

La glaucescence, la pilosité des feuilles ou des tiges, la couleur claire des feuilles et la présence de cires sont autant d'indicateurs de tolérance au stress hydrique (Gate 1995) et sont de nature génétique.

Al Hakimi (1992), invoque l'augmentation de la réflectance qui conduit à une réduction des pertes d'eau, et ce, en raison des hypothèses citées par Gate (1995).

La couleur des organes de transpiration liée au rapport chlorophylle a/ chlorophylle b et la présence de pigmentation (anthocyanes, caroténoïdes) ont un effet, selon Monneveux et Belhassen (1996), sur la proportion de la réflectance lumineuse de la feuille et par voie de conséquence sur la température foliaire.

Arrandeu (1989) quant à lui, soutient que la réduction de la surface foliaire tend à minimiser les pertes en eau en réduisant la transpiration.

Bidinger et Witcombe, (1989) ont rapporté dans leurs travaux que cette réduction de la transpiration n'est pas sans affecter négativement le rendement à cause de la réduction de la capacité photosynthétique.

La variation du milieu est une source de réponses génotypiques différentes qui se traduisent par un changement de classification de génotypes selon l'environnement.

De ce fait, chaque espèce végétale est représentée suivant les milieux par des écotypes différents, marquée par des caractères différents d'où la notion d'adaptation.

Levitt en 1972, définit l'adaptation comme la capacité de survivre durant des périodes de faible fourniture en eau.

Turner en 1979, définit l'adaptation comme la capacité de la plante de croître et donner des rendements dans des zones sujettes à des déficits hydriques périodiques.

Zahour en 1992, définit l'adaptation à la sécheresse comme un processus par lequel des individus, des populations ou des espèces subissent des changements de formes ou d'activités pour mieux fonctionner dans un environnement donné et augmenter leur chance de survie.

L'adaptation à la sécheresse des plantes peut être définie comme, la capacité de la plante à croître et donner des rendements satisfaisants dans des zones sujettes à des déficits hydriques périodiques (Mekhlouf et al, 2006 ; Lu et al, 2011). Il existe une large gamme de mécanismes qui n'est pas exclusive l'un de l'autre et qui peut même être complémentaire (Ceccarelli, 2010 ; Varshney et al, 2012). Les principaux caractères impliqués dans l'adaptation à la sécheresse, leurs efficacités pour améliorer le rendement et leurs facilités d'utilisation pour la sélection des cultures sont regroupés dans les trois grands mécanismes suivants:

3-1-Adaptation phénologique

3-1-1-L'esquive

L'esquive ou l'échappement consiste à réaliser le cycle végétatif pendant la période favorable. Il est l'un des moyens de la plante pour réduire ou annuler les effets du stress hydrique (Monneveux et This ,1997), permettant ainsi à la plante de ne pas subir directement les effets de contrainte hydrique (De Raissac, 1992). Il consiste à placer le cycle cultural pendant des périodes où la demande climatique est faible et/ou pluvieuse.

Une autre stratégie efficace consiste à planter des espèces ou génotypes à cycle cultural court, qui peuvent se développer avant les périodes les plus stressantes. Ce raccourcissement du cycle se traduit aussi par une réduction de la photosynthèse cumulée et un rendement potentiel.

La précocité chez les céréales à paille cultivées en zone méditerranéenne (blé, orge, avoine..), la brièveté du cycle des cultures pluviales des zones tropicales sèches (mil, sorgho, arachide, niébé) sont des mécanismes d'évitement qui ont d'ailleurs été largement exploités par les agriculteurs et les sélectionneurs. Ce mécanisme est efficace dans les environnements avec déficit hydrique fréquent en fin de cycle.

Cependant, les sélections de variétés à cycle court ne permettent pas toujours d'améliorer les rendements dans le cas où le déficit hydrique a lieu aussi au cours de cycle (Frija et al, 2013). Par ailleurs, la réduction de la variabilité entraînant une réduction de la plasticité phénologique, est considérée comme une stratégie risquée dans le cas des légumineuses à floraison et à croissance déterminée (Clavel et al, 2005 ; Son et al, 2011).

3-1-2-L'évitement

Les mécanismes d'évitement permettent à la plante de maintenir un potentiel hydrique élevé en conditions de déficit hydrique, évitant ainsi la déshydratation des tissus (Bonhomme et al, 2012 ; Motzo et al, 2013). Ceci peut être réalisé :

- Par une absorption efficace de l'eau du sol et ce, grâce à un système racinaire très développé (Vincent et al, 2013) ou à une conductivité hydraulique élevée des tissus (Nio et al, 2011).
- Par une limitation des pertes d'eau qui est liée principalement à la réduction de la surface transpirante (Mahdid et al, 2011 ; Yang et al, 2011), à la fermeture stomatique (Araus et al, 2010), à la synthèse des cires cuticulaires, à l'augmentation de réflectance foliaire (Bennett et al, 2012), et à l'enroulement foliaire (Hacini et al, 2012).

3-1-3-La tolérance

Les mécanismes de résistance permettent à la plante d'assurer normalement ces fonctions physiologiques malgré une dégradation de son état hydrique interne suite à la sécheresse (De Raissac, 1992).

La tolérance à la sécheresse est un mécanisme par lequel les plantes maintiennent un métabolisme régulier malgré la réduction du potentiel hydrique foliaire (Boutraa et al, 2010). Le maintien de nombreuses fonctions vitales de la plante est assuré grâce au maintien de la turgescence cellulaire consécutive à une diminution du potentiel hydrique liée à la baisse du potentiel osmotique (Soualem et al, 2014). L'ajustement osmotique constitue le processus majeur permettant à la cellule de maintenir sa turgescence sous contrainte hydrique grâce à l'accumulation de certains solutés (Turner, 2000; Morsli et al, 2010).

Zhang et Bartels (2018) font quant à eux, la distinction entre la tolérance à la déshydratation et la tolérance à la dissécatation. Cette distinction est essentielle pour le phénotypage et l'interprétation de la notion de survie et de « convalescence (recovery), une forme de reprise végétale. Blum et Tuberosa, 2018). Turner (2018) privilégie le rôle bénéfique de l'ajustement osmotique sur le maintien de la turgescence en conditions de stress hydrique. Selon Borrás et Vivantonio (2018), la biomasse de la culture a une importance déterminante dans le rendement. Les auteurs analysent dans leurs travaux le rôle de la variabilité « plante- plante » dans le développement de la plante et de l'épi et attribuent cette variabilité à l'aptitude des plantes à produire un rendement individuel élevé à forte densité tout en maintenant une uniformité suffisante entre plantes.

3-2- Adaptation morphologique :

L'effet du stress hydrique peut se traduire selon la stratégie adaptative de chaque espèce ; par des modifications morphologiques pour augmenter l'absorption d'eau et pour diminuer la transpiration et la compétition entre les organes pour les assimilats. Ces modifications affectent selon Badjii (1999) la partie aérienne ou souterraine.

L'enroulement des feuilles chez certaines variétés, de blé notamment, peut être considéré comme un indicateur de perte de turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation. Il entraîne (Amokrane et al, 2002), une diminution de 40 à 60% de la transpiration. Autre caractère rapporté par Hadji christodoulou (1985) est celui de la longueur des barbes, semble être lié à la tolérance au stress hydrique.

Blum (1996) privilégie la diminution de la surface foliaire et du nombre de talles, considérée comme une réponse adaptative au déficit hydrique.

El Hassani et Persoons (1994) attribuent la faible adaptation au stress hydrique, à un enracinement superficiel. Bagga et al (1970) font le lien entre une variété à paille haute et un système racinaire profond.

Si l'intensité d'un stress est trop faible pour provoquer des dommages irréversibles à court terme, à long terme par contre, ce stress peut provoquer des changements plastiques, voire la mort de l'organisme (Levitt., 1980). L'adaptation se traduit, selon Demarly. (1984) par une série de modifications au niveau cellulaire et moléculaire qui sont liées aux potentialités génétiques des espèces. Il en résulte des modifications physiologiques et morphologiques qui confèrent à la plante une résistance plus ou moins grande à la contrainte (Jean et al., 2003).

La tolérance quant à elle, correspond aux mécanismes grâce aux quels la plante peut préserver l'intégrité structurale et fonctionnelle des tissus. Il s'agit en l'occurrence, d'une propriété intrinsèque du protoplasme et des organites cellulaires à supporter sans dommage une dessiccation plus ou moins forte.

3-3-Adaptation physiologique au stress hydrique :

Jean (2003), explique que dans un sol dont le potentiel hydrique baisse et devient proche de celui qui provoque la plasmolyse au niveau racinaire, c'est alors que l'eau sortira de la racine au lieu d'être absorbée. C'est une situation de stress qui s'annonce et la plante va devoir réagir.

Ceci, toujours selon le même auteur (Jean, 2003), va se faire en deux phases. D'abord, au niveau membranaire des poils absorbants, il va y avoir un signal qui va être émis aux cellules de la racine que le potentiel hydrique du sol devient insuffisant.

La racine réagit, émettant un signal secondaire (qui n'est autre qu'un messenger interne) sous forme de libération d'acide abscissique. Ce messenger va être véhiculé par le xylème qui induit une autre réaction au niveau des feuilles. Ces dernières ont encore une grande réserve d'eau mais vont être menacées par le fait que la transpiration ne sera plus compensée par l'absorption d'eau racinaire.

La réaction va consister en la fermeture des stomates sous l'influence de l'acide abscissique. La plante va pour ainsi dire, maintenir plus ou moins bien son état hydrique. Brinis.L. 1995.

3-3-1-Teneur en pigments chlorophylliens :

Selon Bousba et al (2009) les teneurs en chlorophylle diminuent chez le blé en présence d'un stress hydrique.

Les travaux de Slayter (1974) font référence à une économie d'eau qui se traduit par une turgescence cellulaire moins affectée par le stress, conduisant à une dilution de la chlorophylle. Tahri et al (1997) montrent qu'il y a une corrélation inverse entre les pigments chlorophylliens accumulés et les teneurs en proline. Selon le même auteur, la variété qui accumule plus de proline est aussi celle qui connaît la plus forte diminution de ses teneurs en pigments chlorophylliens.

3-3-2-Régulation stomatique :

En présence d'un stress hydrique, la réduction de la perte en eau par la fermeture des stomates constitue un moyen d'adaptation des plantes. (Djekoun et Planchon, 1992). Cette diminution de la transpiration peut aussi engendrer une réduction de la photosynthèse. Yekhlef (2001) travaillant sur des génotypes de blé, rapporte que les variétés qui sont les moins affectées par le stress hydrique grâce à leur capacité photosynthétique stable, présentent une plus grande efficacité de l'utilisation de l'eau. Elles ont par conséquent une plus grande capacité de survie.

Selon Slama (2002), une bonne activité physiologique serait liée à l'augmentation du nombre de stomates par unité de surface, chez les céréales.

L'accroissement de la densité stomatique peut augmenter l'assimilation nette du CO_2 et diminuer la perte en eau.

Djekoun et Yekhlef, 1996). Erchidi et al (2000) constatent que les variétés de blé ayant une conductance et une densité élevées, sont plus résistantes au stress hydrique en donnant un rendement en grain plus élevé. Selon Teare et Kanemasu (1972), l'ouverture et la fermeture des stomates demeure un mécanisme contrôlé par la turgescence de leurs cellules de garde. La fermeture des stomates permet, selon les mêmes auteurs, d'ajuster le débit transpiratoire qui à son tour, freine la déshydratation. Robelin (1984), citant Turner (1986), attribue à ce dernier la mise en évidence de la résistance stomatique (ou à l'inverse, la conductance) qui est reliée au potentiel hydrique total de la feuille et variable selon l'espèce.

3-3-3-Ajustement osmotique :

Le stress hydrique conditionne la mise en place d'un état de régulation hydrique de la plante qui se manifeste par la fermeture stomatique et par une régulation du potentiel osmotique (Brisson et Delecolle 1992).

L'ajustement osmotique, selon Badjii et al, (2001), est généralement considéré comme un trait important dans l'adaptation des plantes vis-à-vis du déficit hydrique. Nouri et al (2002) précisent que cet ajustement implique l'accumulation au niveau cellulaire, des sucres, d'acides aminés, d'ions ou d'autres solutés compatibles, c'est-à-dire non toxiques. Pour Kumar et Dubey (1999), lors d'un stress hydrique, l'accumulation d'osmolytes semblerait liée à la protection des cellules. D'autres auteurs (Maggio et al, 1997), ne partagent cependant pas ce concept et pensent, selon leurs résultats, qu'une augmentation d'osmolytes n'est toujours forcément liée à une augmentation de la tolérance.

Chez la plupart des végétaux, les métabolites impliqués dans cet ajustement sont variés. Tahri et al (1997) menant des travaux sur l'osmorégulation, indiquent que les acides aminés libres peuvent jouer un rôle significatif dans ce processus. Parmi les acides aminés, la proline représente l'une des manifestations les plus remarquables des stress. Les sucres sont aussi considérés par plusieurs auteurs comme de bons osmorégulateurs qui peuvent jouer un rôle important dans l'ajustement osmotique et l'adaptation des plantes au stress hydrique (Cai et al, 2007).

Hare et Cress (1997) pensent que ce type de molécules sont plus efficaces que les composés organiques.

3-4-Adaptation biochimique en condition de stress hydrique :

3-4-1-Accumulation de la proline :

L'accumulation de la proline constitue un véritable mécanisme de tolérance au stress hydrique (Slama et al, 2004).

Bergareche et al, (1993), travaillant sur les céréales, suggère que cet acide aminé peut être considéré comme un marqueur fiable de tolérance, et ce, compte tenu de la variabilité intraspécifique. Il serait possible, voire souhaitable, de procéder à une sélection selon ce paramètre. D'autres chercheurs (Bellinger et al, 1991 ; Benlaribi et Monneveux, 1988, sur blé dur, Dorfling et Askman 1989 sur le blé tendre), s'accordent à dire qu'il est possible de procéder à un criblage variétal sur la base de ce marqueur biochimique qu'est la proline.

3-4-2-Accumulation des sucres solubles :

Le potentiel osmotique peut être, selon Bensari et al (1990), maintenu pour un stress hydrique de faible ou moyenne intensité, par ajustement osmotique.

Toujours selon les travaux de Bensari (1990), lorsqu'une contrainte hydrique cesse, la feuille reconstitue les réserves d'amidon et si une nouvelle contrainte hydrique intervient, le temps d'adaptation est plus court. En effet, Hare et Cress (1997) remarquent que les sucres glucose, fructose et la saccharose représentent des osmotocums beaucoup moins puissants que la proline.

L'implication des sucres dans la tolérance au stress hydrique a été mise en évidence par des corrélations observées entre le contenu en certains sucres et l'acquisition de la tolérance (Dejardin et al, 1999).

3-4-3-Synthèse des protéines liées à la tolérance au stress hydrique :

Les protéines de stress jouent un rôle dans l'adaptation de la plante et de ce fait, nombreux sont les chercheurs qui abordent la résistance au stress par l'isolement et l'étude de ces molécules. (Campalans et al, 1999). Schulze et al (2005), rapportent qu'une partie des protéines induites ont une fonction directe dans la chaîne de translocation (protéines régulatrices) qui aboutissent à la production de protéines fonctionnelles.

PARTIE II

MATÉRIEL ET MÉTHODES

4-Premier essai : phénotypage des parents

4-1-Matériel végétal :

Trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) ont servi de matériel biologique. Elles nous été fournies par l'INRA de Constantine.

Caractéristiques des trois variétés de blé dur utilisées :

Tableau 3 : Caractéristiques des trois variétés de blé dur (CNCC ,2015).

| Caractéristiques \ Variétés | Simeto | Vitron | Ammar6 |
|--|---|---|--|
| Origine Année d'inscription | Italie / | Espagne 1986 | Syrie 2011 |
| Caractères morphologiques | | | |
| Compacité de l'épi Couleur de l'épi | Demi-lâche Blanc | Compact Blanc avec Barbes noires | Moyenne Blanchâtre |
| caractères culturaux | | | |
| Cycle végétatif Tallage | Semi-Précoce Fort | Semi-précoce moyen | Semi-précoce moyen |
| Résistance | résistante au froid, tolérante à la verse et tolérante à la sécheresse | Sensible aux gelées printanières et à la sécheresse et résistante au froid et tolérante à la verse | Résistante à l'oïdium, rouille brune, charbon, fusariose et septoriose |
| Caractéristiques qualitatives | | | |
| P M G Qualité semoulière | Moyen Très bonne | Moyen Assez bonne | Elevé Bonne |
| Zones d'adaptation | Littoral, sublittoral et plaines intérieures | Milieu Aride et semi-aride | Littoral et plaines intérieure |

4-2-Méthodes expérimentales :

L'étude a porté sur trois types d'expérimentation :

- La première a concerné le phénotypage des parents ; essai qui a été réalisé en plein champ. - Une deuxième expérimentation a été réalisée au niveau du laboratoire Amélioration Génétique Des Plantes, UBMA, sur la physiologie et la biochimie des génotypes.- Un troisième essai a été mené sur le phénotypage parental versus les populations ségrégantes hybrides (F1.Simplecroisement ;F1 backcross et F2). - Analyses statistiques.

4-3-Localisation du site expérimental

L'expérimentation a été réalisée dans la ferme pilote « Chaïbi Larbi », Elkarma, située dans la commune d'El Hadjar à 25 km sud du chef lieu de la wilaya d'Annaba. La ferme pilote a une SAU (surface agricole utile) de 288 ha, localisée à une latitude 36°45 19.80 N. et une longitude de 7° 40 46.53 E., avec une altitude de 15m. La région d'El Karma est caractérisée par un climat tempéré chaud. En hiver, les pluies sont bien plus importantes qu'elles ne le sont en été. La moyenne pluviométrique annuelle est de 712 mm. (DSA. Annaba.2011).



Photo 1 : Vue aérienne du site expérimental (source : Google Earth, 2018)

4-4-Installation de l'essai :

L'essai a été installé selon un dispositif expérimental en Blocs Complètement Randomisés (RCB) ; en trois blocs avec trois répétitions.

Chaque parcelle élémentaire comprend six rangs de 2.5m de long, espacés de 0.2m. L'espace entre variétés est de 0.50m.

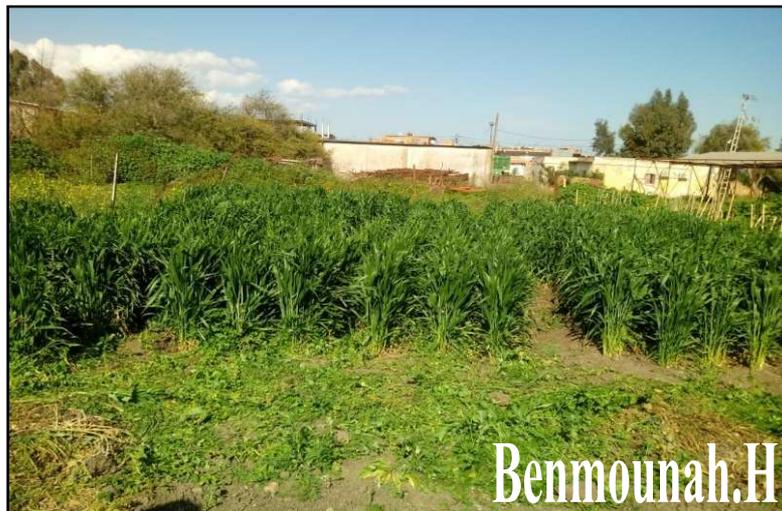


Photo 2 : essai expérimental du phénotypage, ferme pilote Chaibi Larbi (Benmounah.H. 2018)

4-5-Itinéraire technique :

Dose de semis : la dose utilisée a été calculée sur la base d'un semis à raison de 150 kg/ha.

Profondeur de semis : les semences ont été mises à terre à une profondeur de 8cm.

Préparation du lit de semences : la parcelle où était implantée notre expérimentation a été labourée en même temps que le reste des terres restées en jachère. Avant le semis un recroisement a été effectué en vue d'ameublir davantage le sol et d'obtenir des particules plus fines de sol.

Fertilisation : un apport d'azote sous forme d'ammonitrite 33% a été apporté après la levée à raison de 2quintaux/ha. Les engrais de fonds ont été quant à eux, apportés au printemps précédant le semis.

Désherbage : les parcelles étant de dimensions petites, il n'était pas nécessaire d'intervenir chimiquement. L'opération s'est effectuée à la main.

5-Notations effectuées :

Les notations effectuées portent sur un certain nombre de paramètres parmi lesquels :

- Des paramètres morphologiques (tiges, feuilles)
- Des paramètres phénologiques (événements séquentiels phase de semis- épiaison et semis- floraison)
- Estimation des composantes de rendement. Cette caractérisation au champ traduit le phénotypage variétal.

Morphologie de la feuille :

Surface foliaire : est exprimée en cm² et a concerné la feuille étandard. Elle est déterminée par la méthode de Paul et al, (1979) et qui consiste à :

- Prendre la feuille de blé dur sur papier calque et découper les contours ; ensuite peser (Pf).
- Couper un carré de 1cm (1cm² de surface) de ce même papier qui est également pesé (P de cm²).
- Déduire la surface foliaire SF par la formule : $SF (cm^2) = Pf (cm^2) / P (1cm^2)$.

Type de feuille : a été établi à l'œil nu. Il s'agit de feuille de type :

- Erigé (erect leaf)
- Semi érigé (semi erect leaf)
- Feuille pendante (flag leaf)

Texture foliaire : l'évaluation est faite au toucher. Il en existe :

- Texture cireuse (waxiness)
- Texture glauscescente (glauescence)

La texture foliaire permet d'identifier certains traits relevés au champ ayant un rapport avec des niveaux de tolérance ou d'adaptation au stress hydrique.

Caractéristiques de la tige : cette caractérisation a concerné la hauteur de la plante, la nature de la tige, le diamètre de la tige, l'épaisseur de la tige et le pourcentage de surface du cylindre central.

Hauteur de la plante : est exprimée en cm et est mesurée à maturité, du bas du chaume (à ras du sol) jusqu'au sommet de l'épi et ce à raison de deux répétitions par variété.

Nature de la tige : une coupe transversale a été effectuée entre les 4^{ième} et 5^{ième} entre nœud. L'observation à l'issue de la coupe permet de juger à l'œil nu de la nature de la tige (pleine- creuse ou semi creuse).

Cette caractéristique morphologique est intéressante et utile à la fois au plan pratique. Elle permet de prédire une certaine robustesse de la tige qui à son tour, facilitera le support d'un poids plus élevé en grains, produits par les épis.

Diamètre de la tige : est exprimé en mm. Il est mesuré après le stade floraison, entre le 4^{ième} et 5^{ième} entre nœud à l'aide d'un pied à coulisse.

Épaisseur de la tige : elle est mesurée après floraison, entre le 4^{ième} et le 5^{ième} entre nœud. Une coupe transversale est effectuée au terme de laquelle la mesure de l'épaisseur de la tige en utilisant un pied à coulisse.

Pourcentage de la surface du cylindre central :

Le pourcentage de la surface du cylindre central est calculé par rapport à la surface de la coupe transversale selon la formule :

$$\% \text{ CC} = S' / S * 100 \text{ où}$$

$$S = \pi r^2$$

$$S' = \pi r'^2$$

S = surface totale de la tige (mm²)

S' = surface du cylindre central (mm²)

r = rayon de tige, égale au diamètre/2 (mm)

r' = rayon du cylindre central (mm) avec r' = r - e

e = épaisseur de la tige (mm)

Paramètres phénologiques :

Dans cet essai, il était question de ne repérer que les stades phénologiques épiaison et floraison. Ces événements séquentiels qui déterminent les principales phases de croissance et de développement, sont importants compte tenu du fait que celles-ci sont souvent liées aux conditions environnementales prévalentes. Les génotypes, du moins certains, peuvent être dotés, selon Levitt (1982) d'un mécanisme phénologique d'adaptation. Il s'agit toujours selon cet auteur, de la thèse de l'esquive, phénomène grâce auquel des génotypes peuvent échapper ou esquiver au stress imposé, le stress hydrique en particulier.

Phase semis- épiaison : est comptabilisée en jours. Elle correspond à la durée entre le stade de semis et le stade d'épiaison. Le stade d'épiaison est noté lorsque 50% des épis sortent de leur gaine.

Phase semis- floraison : est exprimée en jours. Elle concerne la durée entre le stade de semis et le stade de floraison. Le stade floraison correspond à l'apparition des étamines de 50% des plantes.

Composantes du rendement :

- **Le nombre de talles/ plante** : il est déterminé par comptage direct du nombre de talles de deux plantes/ génotypes/ répétition, au stade fin tallage.
- **Nombre d'épis/m²** : il est déterminé par comptage direct du nombre d'épis présents dans 1m²/génotype.
- **Estimation du rendement théorique** : le rendement théorique est le produit de trois paramètres :
 - Nombre d'épis/m²
 - Nombre de grains/m²
 - Poids de 1000 grains

6-Hybridations :

Des hybridations zygotiques, monofactorielles eurent lieu entre les trois variétés. Des croisements simples et quelques fois réciproques (cas de Vitron X Simeto) ont terminé cette première phase expérimentale, menée sur terrain. L'objectif en est de créer une variabilité génétique dans les populations ségrégantes en disjonction, dans les futures générations F2.

Pour l'heure, il s'agit surtout à travers ces croisements de caractériser les F1. Entre autres objectifs, nous nous intéressons à une certaine forme d'héritabilité transgressive, soit au plan phénotypique, soit au plan physiologique et biochimique. Certains traits peuvent être d'une certaine utilité et peuvent faire l'objet de sélection. Ils feront plus tard l'objet d'étude d'introgession génétique, par la voie moléculaire ou tout simplement être incorporés comme traits à introduire pour enrichir et améliorer d'autres génotypes.

7- Deuxième essai expérimental : physiologie et biochimie des génotypes

Il a été réalisé au laboratoire d'Amélioration génétique des plantes, UBMA. Cette expérimentation pourrait être traduite sous l'appellation « analyse prédictive et sélection de traits physiologiques et biochimiques de tolérance au stress hydrique ».

En fait, toute une série d'analyses a été effectuée en vue de quantifier les réponses adaptatives vis-à-vis d'un stress hydrique imposé à des seuils différents. Ce sont des essais qui ont été menés en conditions semi- contrôlées, dans des pots. Les analyses ont été effectuées à un stade juvénile des plantes (stade 5- 6 feuilles). Ce stade repère a été choisi au regard d'une bibliographie abondante qui approuve et crédibilise ce stade phénologique (Brinis et al, 1995 ; Monneveux (1989) ; Clarke (1982) ; Ashraf (2004).

La relation à faire entre les deux protocoles expérimentaux réside dans le fait qu'il s'agit d'une forme de sélection directe pour le travail au champ et le second privilégie une forme de sélection indirecte, prédictive, basée sur des bio marqueurs physiologiques et biochimiques.

Cette voie explore les réponses du végétal à un stade jeune, lorsqu'il est soumis à un stress hydrique. Un certain nombre de reflexes de la plante vont pour ainsi dire constituer les mécanismes réactionnels en guise d'accommodation transitoire sous l'effet du stress. Cette accommodation se traduit par une série de « reconfiguration » métabolique qui favorisera des catabolismes glucidiques, lipidiques ou protéiques. Pour le métabolisme protéique par exemple, il sera question d'une protéolyse qui sera responsable de la libération d'acides aminés libres, devant aider la plante à mieux supporter le stress à laquelle elle fait face. Il s'agit de mécanismes osmorégulateurs à même « d'accompagner » la plante dans la poursuite de sa croissance et de son développement sous la contrainte hydrique.

Ainsi, au laboratoire, un certain nombre de tests ont été réalisés en vue de connaître :

- Le statut hydrique, énergétique, physiologique et biochimique de trois génotypes de blé dur.
- Les tests ont été exécutés en présence d'un stress hydrique.

Protocole expérimental : l'essai a été réalisé en pots de 20 cm de profondeur sur 15 cm de diamètre.

Un mélange sable-terreau a été obtenu avec les proportions 1/3 sable ; 2/3 terreau

Une mince couche de gravier fin a été mise au fond des pots pour permettre une meilleure percolation de l'eau excédentaire.

Rythme d'irrigation : l'irrigation s'effectue deux fois/ semaine.

Dose d'irrigation : 500ml (T0) ; 400ml (T1) et 100ml (T2)

L'apport d'eau se fait équitablement pour tous les pots jusqu'au stade 5-6 feuilles, stade à partir duquel, les traitements seront appliqués pendant 10 jours et au terme desquels les analyses ou tests peuvent être exécutés.

Au préalable, les semences auront subi une désinfection à l'hypochlorite de HCl dilué. Elles subiront une imbibition dans des boîtes de pétri pendant 24 heures avant d'être ensemencées.

7-1-Physiologie des semences :

Matériel végétal :

Trois variétés de blé dur ont servi de matériel génétique de base à savoir cv Vitron, cv Ammar6 et cv Simeto dont les origines respectives sont l'Espagne, le CIMMYT, et l'Italie. L'essai a été réalisé au laboratoire à des fins d'analyses physiologiques, de semences en particulier et au champ pour des notations de traits d'adaptation.

Dispositif expérimental :

Chaque variété comprend trois traitements avec trois répétitions.

10 graines / pot ont été semées à une profondeur de 6 cm.

Les traitements :

- T0 : absence de stress à la capacité au champ. Celle-ci a été évaluée à 250 ml par pot.
- T1 : stress de sévérité de 60% de la capacité au champ
- T2 : stress de sévérité de 30% de la capacité au champ.

Le stade de prélèvement des échantillons pour analyse c'est effectué au stade phénologique de 5 feuilles (plantule de 5 feuilles).

Analyses effectuées au laboratoire :

7-1-1-PMG :

Les analyses effectuées ont concerné dans un premier temps le PMG. Ce trait morphologique est considéré comme déterminant de la qualité technologique de semences. Trois répétitions de 100 graines ont été pesées pour chaque génotype.

Ensuite le % de germination a été évalué pour quantifier l'aptitude physiologique des trois variétés utilisées. Le test de vigueur et de viabilité a été réalisé respectivement à 5 jours et 10 jours dans les conditions optimales du laboratoire. (Température à 20°C et 60% d'humidité relative). Ces conditions sont celles préconisées par l'I.S.T.A (International Seed Testing Association).

7-1-2-Capacité de germination (taux de germination) :

Il s'agit de dénombrer le pourcentage de semences capables de germer après 5 jours et 10 jours. L'équation utilisée sera celle de Côme (1970) et qui est :

$$\% \text{ germination} = \frac{N_i}{N_t} \cdot 100$$

N_i = nombre de graines germées

N_t = nombre total de graines mises à germer

7-1-3-Cinétique de croissance :

La cinétique de croissance a été exécutée sur papier buvard (15 graines/ répétition). Les longueurs des racines et coléoptiles ont été évaluées journallement jusqu'à 12 jours ; au terme desquels l'essai pris fin.

7-1-4-Test d'absorption :

Un test d'absorption d'eau a été effectué sur un lot de semences de 10 gr, trempé dans de l'eau et pesé toutes les 3 heures. La dernière pesée s'effectue après 48heures car au-delà, la germination physiologique s'opère (percée du coléoptile) et s'ensuit une perte d'eau.

7-1-5-Biomasse :

Au stade 4-5 feuilles, deux échantillons ont été choisis pour chaque variété et pour chaque échantillon utilisé (témoin et stressé).

Les plantes sont retirées avec précaution totalement, bien rincées de tous déchets et essuyées en utilisant du papier buvard, ensuite ces plantes procèdent à leur pesée (poids frais).

Les échantillons sont ensuite mis à sécher dans l'étuve à 80°C pendant 24 heures puis ils sont pesés (poids sec).

7-2-Physiologie de la plantule :

7-2-1-Teneur relative en eau (RWC)

La teneur relative en eau a été mesurée sur une feuille bien développée, le limbe foliaire excisé à la base et pesée juste après équilibre isothermique et ce, en vue de déterminer le poids frais (Pf). L'extrémité coupée est ensuite placée dans un tube à essai contenant de l'eau distillée. L'ensemble est mis à 4°C à l'obscurité pendant 24 heures (conditions d'un réfrigérateur). Après avoir légèrement égoutté l'échantillon entre deux feuilles de papier absorbant, celui-ci est pesé. La pesée de la feuille après réhydratation donne un poids à saturation ou poids à la turgescence (Pr). L'échantillon est ensuite placé dans une étuve à 85°C pendant 48 heures, au terme desquelles il est de nouveau pesé pour obtenir le poids sec (Ps).

Le RWC est calculé selon la formule de Clarke et Mc Caig (1982) :

$$\text{RWC (\%)} = \frac{(\text{Pf} - \text{Ps})100}{(\text{Pr} - \text{Ps})}$$

Où : Pf= poids frais ; Ps= poids sec ; Pr= poids à saturation (Réhydratation).

Cette méthode a été aussi utilisée par Ladigues (1975), Rascio (1988), Ritchie et al, (1990).

7-2-2-Taux de déperdition d'eau des feuilles excisées ou transpiration cuticulaire, non stomatale (RWL)

Cette méthode permet d'identifier des génotypes de blé adaptés à des conditions défavorables pendant les phases phénologiques de développement et croissance. Plusieurs chercheurs ont eu recours à cette méthode. Nous citerons Clarke et Mc Caig (1982), Clarke et al (1989) et Monneveux (1991) :

$$RWL = (g10-3/cm^2/mn) = (P_i - P_{2h}) / P_s / 1 / SF \cdot 120mn$$

Où: P_i = poids initial de la feuille

P_{2h} = poids de la feuille après 2h

P_s = poids sec de la feuille après 24 h à l'étuve à 80°C

SF = surface foliaire

7-3-Biochimie de la plante :

7-3-1-Dosage de la proline

La technique utilisée pour le dosage de la proline est celle de Monneveux et Nemmar (1986).

- On pèse 100mg du végétal, coupé en petits morceaux et introduit dans un tube à essai, auquel on ajoute 2ml de méthanol à 40%. L'ensemble est ensuite chauffé au bain marie à 80°C pendant 60mn ; les tubes sont recouverts de papier aluminium pour éviter la volatilisation de l'alcool.
- Après refroidissement on prélève 1ml de la solution à laquelle on ajoute 1ml d'acide acétique et 1ml de mélange modifié contenant 120 ml d'eau distillée + 300ml d'acide acétique + 80ml d'acide orthophosphorique et 25 mg de ninhydrine.
- Les solutions sont portées à ébullition pendant 30mn. Elles virent au rouge. Après refroidissement, on ajoute 5ml de toluène. Après agitation deux phases se séparent :
 - 1- La phase inférieure sans proline
 - 2- La phase supérieure contient la proline.

Cette phase est ensuite récupérée et déshydratée par l'adjonction de Na_2SO_4 . Enfin on procède à la détermination des densités optiques des échantillons à la longueur d'onde 528 nm ; après étalonnage au spectrophotomètre par le mélange (acide acétique+ eau distillée+acide ortho phosphorique+ ninhydrine). Les valeurs obtenues sont reportées sur la courbe d'étalonnage.

$$Y = 0.032x + 0.059$$

Y= densité optique

X= concentration en proline

7-3-2-Dosage des sucres solubles :

Les sucres solubles totaux sont dosés par la méthode de Schields et Burnett (1960). Le principe repose sur la condensation des produits de dégradation des sucres neutres. L'acide sulfurique concentré transforme à chaud les glucides en dérivés sulfuriques qui donnent avec l'antrone une coloration verte présentant un maximum d'absorption à 585nm. Elle consiste à mettre 100mg de matière fraîche coupée au tiers médian de la feuille, dans un tube à essai auquel on ajoute 3ml d'éthanol à 80% pendant 48h à l'obscurité.

La solution à l'antrone est préparée 4heures avant les dosages avec les proportions suivantes : 0.2 mg d'antrone pure dans 100ml d'acide sulfurique concentré. Au moment du dosage, les tubes sont placés dans l'étuve à 80°C pour faire évaporer l'alcool. Dans chaque tube on ajoute à l'extrait 20ml d'eau distillée, ce qui constitue en fait la solution à analyser.

Dans des tubes propres, on met 2ml de solution à analyser puis on ajoute 4ml du réactif ; le tout maintenu à 0°C dans de la glace pendant l'opération. Après agitation, les tubes sont mis au bain marie à 90°C pendant 8mn, puis refroidis pendant 30mn dans de la glace et à l'obscurité pour éviter l'oxydation des sucres. L'absorbance est lue au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 585 nm. La lecture finale se fait d'après la courbe détalonnage qui est établie avant le dosage.

7-3-3-Dosage des protéines totales :

La technique utilisée pour le dosage des protéines totales est basée sur la modification de la longueur d'onde maximale d'absorption du bleu de coumassie, une fois fixé sur les protéines, de 460 à 595 nm.(Bradfort, 1976). On prend 100 mg d'échantillon végétal, on ajoute 5ml d'eau distillée dans un mortier et on procède à leur broyage jusqu'à obtention d'une solution verte. La solution est filtrée sur papier Wattman, ensuite le filtrat est récupéré dans des tubes à essai. C'est la solution à analyser.

Dans des tubes à essai propres, on prélève 0.2 ml de la solution précédente et 1.6 ml d'eau distillée (à l'aide d'une micropipette). 5mn avant la lecture, on ajoute 0.2 ml du réactif de Bardfort (100mg de BBC, bleu de Coumassie (G250) ; 50ml d'éthanol à 95%. Agiter et rajouter 100ml d'acide ortho phosphorique à 85% et compléter à l'eau distillée jusqu'à 1litre.

La lecture se fait au spectrophotomètre à la longueur d'onde 595nm, après l'étalonnage de l'appareil par une solution témoin contenant 0.2ml d'eau distillée, 2 ml du réactif de Bradford.

Cet aspect biochimique vient en effet renforcer l'idée de la sélection indirecte grâce à laquelle des mécanismes qui apparaissent tôt chez la plante qui subit un stress, peuvent être de nature explicative d'adaptation.

Ces tests ont pour vocation d'identifier chez trois génotypes, des marqueurs biochimiques qui s'expriment le mieux, en termes d'Osmoprotection de la plante par des métabolites secondaires.

8-Troisième essai : phénotypage parents/F1 respectives

Cet essai avait pour objectif de mettre ensemble dans une même expérimentation, les trois variétés de blé dur avec leurs F1 respectives. Il s'agissait de procéder à une étude comparative entre parents et descendants, sur des aspects morphologiques. En somme, le phénotypage des F1 hybrides versus leurs parents respectifs devait nous indiquer les modes de transmission de caractères recherchés, notamment ceux en rapport avec la tolérance au stress hydrique.

Parmi ces traits, sont visés la texture des feuilles, des tiges et de l'épi.

Cet essai vient à point nommé pour porter une appréciation conjointe entre des aspects notés au champ et d'autres obtenus lors d'une évaluation physiologique antérieure sur les génotypes étudiés.

Ainsi, nous aurions fait en somme, un parallèle entre une forme de sélection directe au champ et une forme indirecte, exécutée au laboratoire et relative à une exploration plus fine pour les réponses physiologiques biochimiques, adaptatives au stress hydrique.

Dispositif expérimental :

Le semis a été effectué à la station expérimentale de l'I.T.G.C Guelma selon le dispositif suivant :

3 rangées de 2m de longueur, espacées de 20 cm pour les parents avec au milieu des deux parents 1rangée de 2m pour la F1 hybride issue du croisement simple entre parents.



Photo 3 : phénotypage parents/ F1, ITGC Guelma. (Benmounah.H. 2019)

8-1- croisements effectués

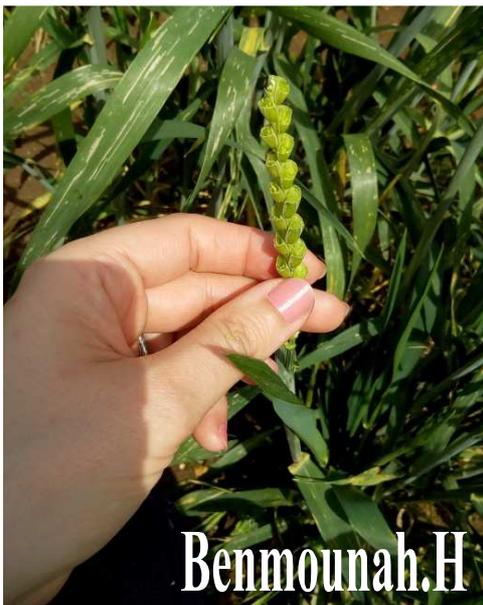
8-1-1-croisements simples

- Ammar6X Vitron
- Vitron X ammar 6 (croisement réciproque)
- Simeto X Ammar

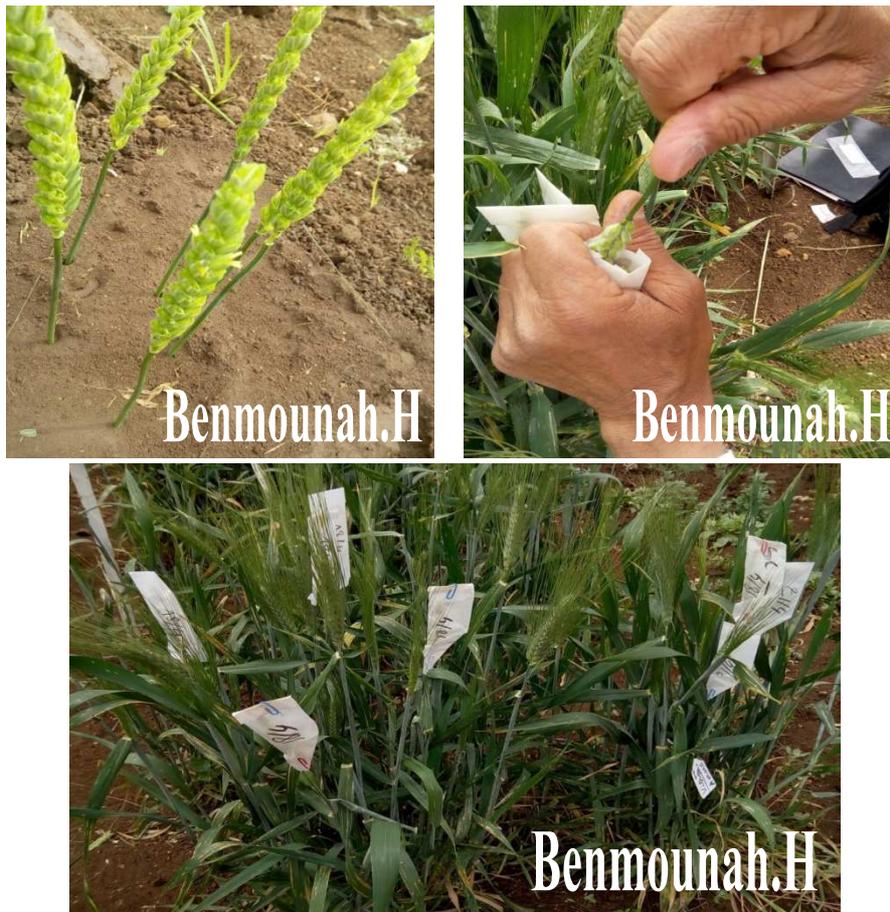
8-1-2- Croisements back-cross

C'est un rétrocroisement entre une F1 simple croisement et l'un des deux parents susceptible d'avoir des caractères intéressants vis-à-vis de la tolérance au stress hydrique. Le but en est de les introduire par additivité génétique.

8-1-3- Obtention de lignées F2 : issues par selfing (autofécondation) à partir des lignées F1.



Photos 4 : Etapes de l'émasculatation d'un épi de blé (Benmounah.H. 2020)



Photos 5 : étapes de la pollinisation (Benmounah.H. 2020)



Photo 6 : obtention de graines hybrides (Benmounah.H. 2020)

8-2-Notations effectuées :

Elles ont concerné principalement le phénotypage de la tige, de la feuille et de l'épi à savoir :

- Type de feuille
- Texture foliaire
- Tige creuse, semi creuse
- Nombre d'épillets/ épi

9- Quatrième essai : phénotypage parents/F2 respectives

Cet essai avait pour but d'évaluer les caractères phénotypiques intéressants et répondant au critère d'adaptation au stress hydrique à savoir la texture foliaire, le type de feuilles et bien d'autres traits de rendement.

La sélection dans les populations F2 dites ségrégantes, est la plus judicieuse parce que grâce à la disjonction des caractères, l'apparition dans les populations de ceux-ci traduirait leur héritabilité.

Un semis de deux rangs par variété et par population F2 a été réalisé, d'une longueur de 2m espacés de 20cm, au niveau de la ferme pilote Chaibi Larbi El Karma.

Les notations ont concerné le type de feuilles, la texture foliaire, la tige et une composante de rendement, à savoir le nombre d'épillets par épi.

10-Méthodes d'analyses statistiques

10-1-Description des données :

Pour mieux décrire la germination des variétés Vitron, Ammar 6 et Simeto, pendant 5 jours et 10 jours, nous avons calculé certains paramètres statistiques de base tels que la moyenne arithmétique (\bar{X}), qui est un paramètre de position et de tendance centrale, l'écart-type (s) qui mesure la dispersion des données autour de la moyenne, les valeurs minimales (x_{min}) et maximales (x_{max}) qui donnent une idée sur l'amplitude des données et l'effectif (n) qui montre l'importance des échantillons traités.

10-2-Test de l'analyse de la variance à un critère de classification (AV1)

Le test d'analyse de la variance à un critère ou à un facteur de classification consiste à comparer plus de deux moyennes de plusieurs populations à partir des données d'échantillons aléatoires simples et indépendants (Dagnelie, 2006).

La réalisation du test se fait soit en comparant la valeur du F_{obs} avec une valeur théorique $F_{1-\alpha}$ extraite à partir de la table F de Fisher pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$, 0.01 ou 0.001 et pour k_1 et k_2 degrés de liberté, soit en comparant la valeur de la probabilité p , de mettre en évidence une différence significative entre les différentes moyennes, avec toujours les valeurs de $\alpha = 5\%$, 1% ou 0.1%. Selon que cette hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée au niveau $\alpha = 0.05$; 0.01 ou 0.001, on dit conventionnellement que l'écart observé est significatif, hautement significatif ou très hautement significatif. On marque généralement ces écarts d'un, deux ou trois astérisques (étoiles) (Dagnelie, 2006).

Ce test a été utilisé :

- Pour comparer, entre les trois variétés Vitron, Ammar 6 et Simeto, les moyennes de la germination, pour 5 jours et pour 10 jours.
- Pour comparer, entre les variétés Ammar 6, F1 et Vitron puis entre les variétés Simeto, F1 et Ammar 6, les moyennes de chacune des trois caractéristiques : hauteur, nombre d'épillets et surface foliaire. Tous les calculs ont été réalisés avec le logiciel MINITAB 16- 0

10-3-Test d'analyse de la variance à deux critères de classification (AV2)

Ce test a été utilisé pour comparer les moyennes de deux facteurs considérés simultanément. L'acceptation ou le rejet de l'hypothèse d'égalité des moyennes se fait selon le même principe que pour l'AV1 et ceci pour chacun des deux critères étudiés.

Ce test a été utilisé :

- Pour comparer entre les trois variétés Vitron, Ammar 6 et Simeto, les moyennes de chacune des 12 caractéristiques : surface foliaire, matière fraîche totale, MF col, MFR, MST, MScol, MSR, RWC, RWL, Proline, Sucres, Prot. T.
- Pour comparer entre les trois traitements : traitement sans stress (T0), traitement avec stress modéré à 30% (T30) et traitement avec stress sévère à 60% (T60) ; les moyennes de chacune des 12 caractéristiques précitées:

Tous les résultats sont obtenus avec le logiciel MINITAB 16.0

10-4-Test de TUKEY : recherche de groupe de moyennes homogènes

Lorsqu'à l'issue d'un test d'analyse de la variance et pour un facteur fixe, on est amené à rejeter l'hypothèse d'égalité de plusieurs moyennes alors la question se pose de rechercher et de localiser les inégalités ou en d'autres termes de rechercher quels sont les groupes de moyennes homogènes, pour telle ou telle caractéristique mesurée.

De nombreuses solutions ont été proposées pour répondre ou tenter de répondre à cette question (Dagnelie, 2003 et 2006). Ces solutions sont groupées sous l'appellation générale de méthodes de comparaisons particulières et multiples de moyennes.

Parmi ces méthodes, figure celle de TUKEY (Dagnelie, 2006).

Les résultats obtenus par cette méthode sont généralement présentés sous forme de tableau où les groupe de moyennes homogènes sont soulignés d'un seul trait.

Cette méthode a été utilisée :

- Pour rechercher les groupes de variétés homogènes dans le cas de la germination pour les périodes de 5 jours et de 10 jours.
- Pour rechercher les groupes de variétés homogènes pour
- la caractéristique hauteur, nombre d'épillets et surface foliaire dans le cas des 3 variétés Simeto, Ammar 6, Vitron et leurs descendances F1.
- Pour rechercher les groupes de variétés homogènes et les groupes de traitements homogènes pour les 12 caractéristiques mesurées sur les 3 variétés : Vitron, Ammar 6 et Simeto.

Il y a lieu de signaler que tous les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel d'analyse et de traitement statistique des données, le MINITAB.

10-5-Test de DUNNET : recherche de traitements identiques au traitement témoin.

Après rejet de l'hypothèse d'égalité des moyennes des différentes caractéristiques mesurées pour chacun des trois traitements utilisés, la question se pose alors de rechercher quels sont les traitements qui donnent des résultats identiques à ceux du traitement témoin. Pour répondre à cette question nous avons utilisé le test de DUNNET (Dagnelie, 2006).

Le principe est de comparer chacune des moyennes des traitements à la moyenne du traitement témoin et de souligner d'un seul trait les résultats identiques à ceux du témoin.

Ce test a été utilisé pour rechercher les traitements identiques au traitement témoin sans stress comme traitement témoin et les autres traitements avec stress modéré et avec stress sévère.

PARTIE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

11-Résultats et discussion :

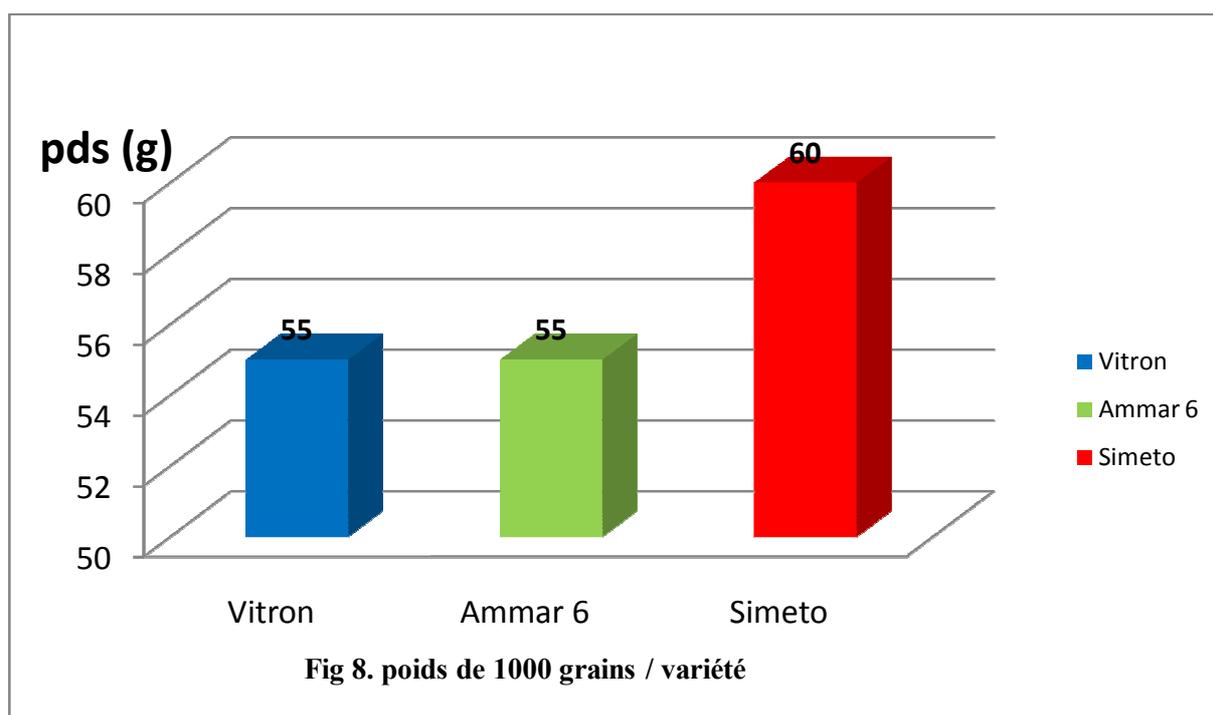
11-1-Résultats sur la physiologie des génotypes :

11-1-1-PMG :

- Le PMG (poids de 1000 grains), souvent utilisé comme un déterminant ou attribut important de qualité chez les semences, s'avère être le plus élevé chez la variété Simeto (60 grammes). Ceci étant, les PMG des deux autres variétés (Vitron et Ammar 6) ne sont pas négligeables non plus. Un PMG élevé va nécessairement impliquer un poids spécifique élevé des variétés, ce qui favorisera un rendement élevé lorsque les conditions sont optimales, en absence de stress.

Tableau 4 : PMG des trois génotypes (exprimé en gramme)

| Variété | Vitron | Ammar6 | Simeto |
|-----------|--------|--------|--------|
| poids (g) | 55 | 55 | 60 |



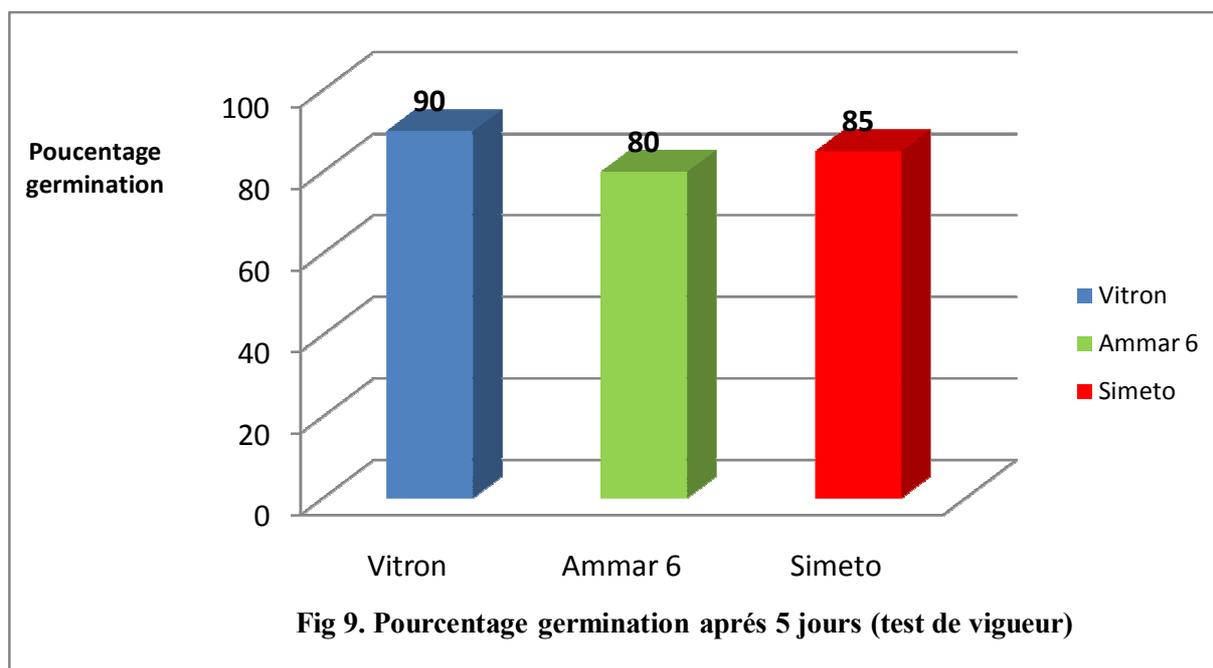
11-1-2- Test de germination après 5 jours (test de vigueur) :

Le test de germination devait constituer un préalable avant de poursuivre d'autres tests et analyses. Il s'agissait d'abord de connaître l'aptitude physiologique des semences des trois variétés mises sous étude. Cette aptitude traduit l'expression endogène des mécanismes réactionnels devant servir à initier les ébauches végétatives.

Cette expression de la germination traduit également l'état de vigueur et de viabilité, en termes de santé de la graine. Le test de germination après cinq jours s'est fait conformément aux normes prescrites par l'I.S.T.A et l'A.O.S.A (1978) ; deux organismes qui ont les compétences pour statuer sur les lois de technologie des semences.

Tableau 5: pourcentage de germination après 5 jours :

| Variété | Vitron | Ammar6 | Simeto |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| Pourcentage germination | 90 | 80 | 85 |



Ainsi, à la lumière des résultats obtenus (tableau 5), les trois variétés Vitron, Ammar6 et Simeto, affichent respectivement un pourcentage de germination de 90%, 80% et 85%. Malgré une légère différence numérique entre les trois variétés, l'analyse statistique, en utilisant la comparaison des moyennes, montre qu'il n'y a pas de différence significative. Ceci se traduit sur un plan technologique que la vigueur des semences des trois génotypes est statistiquement la même. Ceci conforte quelque part notre position puisque nous démarrons notre expérimentation avec des semences de vigueur similaire.

11-1-3-Test de germination après 10 jours (test de viabilité) :

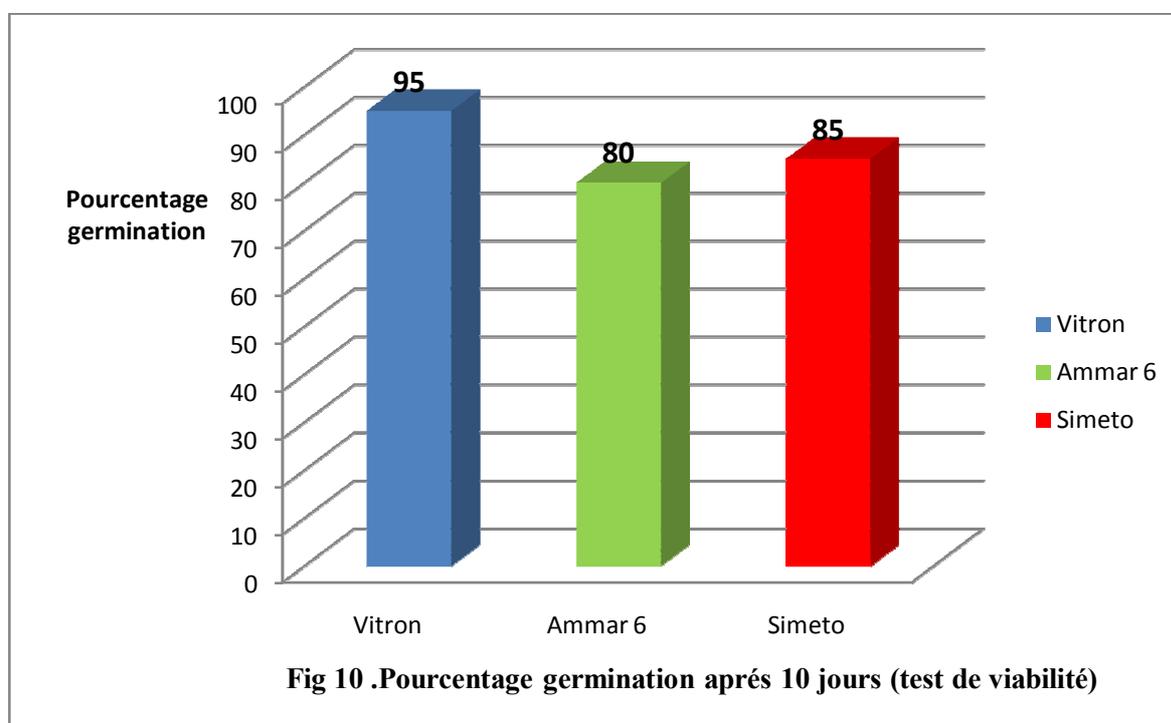
Le tableau 6 affiche un pourcentage de germination de 95%, 80% et 85% pour respectivement les variétés Vitron, Ammar 6 et Simeto. Ces pourcentages élevés sont tout de même statistiquement différents et les résultats sont significatifs, l'utilisation de la

comparaison des moyennes de la germination le confirme ; les variétés ayant ainsi des viabilités différentes.

Le regroupement des variétés en utilisant la méthode du test de Tukey et à un niveau de confiance de 95% pour cinq jours montre que les trois variétés appartiennent au même groupe. (tableau 6).

Tableau 6 : Pourcentage de germination après 10 jours :

| Variété | Vitron | Ammar6 | Simeto |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| Pourcentage germination | 95 | 80 | 85 |



Toujours selon la méthode de Tukey et à un niveau de confiance de 95% pour 10 jours, les moyennes sont sensiblement différentes. Le groupement des variétés en groupes homogènes après une germination de 10 jours, peut s’illustrer ainsi :

Tableau 7 : regroupement des variétés en groupes homogènes selon test de Tukey

| Variété | N | Moyenne | Groupement |
|---------|---|---------|------------|
| 1 | 3 | 19.0 | A |
| 2 | 3 | 17.0 | A B |
| 3 | 3 | 15.3 | B |

Partie III: Résultats et discussion

La description des données de la germination pour les variétés : Vitron, Ammar6 et Simeto, pendant 5 jours et 10 jours a révélé les résultats suivants et ce, en fonction des principaux paramètres de base :

Tableau 8 : Résultats de la description : les paramètres de base.

| Périodes | variétés | paramètres statistiques | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|------|--------------|
| | | N | x | s | Xmin-Xmax |
| 5jours | Vitron | 3 | 18.00 | 1.76 | 17.00-20.00 |
| | Ammar 6 | 3 | 16.33 | 1.53 | 15.00- 18.00 |
| | Simeto | 3 | 17.00 | 1.73 | 16.00- 19.00 |
| 10jours | Vitron | 3 | 19.00 | 1.00 | 18.00- 20.00 |
| | Ammar6 | 3 | 15.33 | 0.58 | 15.00-16.00 |
| | Simeto | 3 | 17.00 | 1.73 | 16.00-19.00 |

La comparaison des moyennes de la germination entre les 3 variétés pour les périodes de 5 jours et de 10 jours effectuée selon l'analyse de variance à un critère a donné les résultats suivants :

Tableau 9 : Résultats de l'AV1 pour chacune des deux périodes.

| Période | source de variation | ddl | SCE | CM | Fobs | P |
|---------|---------------------|-----|-------|-------|------|------|
| 5jours | variétés | 2 | 4.22 | 2.11 | 0.76 | 0.51 |
| 10jours | variétés | 2 | 20.22 | 10.11 | 7.00 | 0.03 |

Après comparaison des moyennes de germination des trois variétés pour chaque période, on recherche alors les groupes de variétés homogènes par le test de TUKEY et ce par période au terme duquel nous obtenons les résultats suivants :

Tableau 10 : Résultats du test de Tukey par période

| Période | Moyennes et groupes de Variétés homogènes | | | Nombre de groupes |
|---------|---|--------|--------|-------------------|
| 5 jours | Ammar6 | Simeto | Vitron | 01 |
| | 16.30 | 17.00 | 18.00 | |
| <hr/> | | | | |
| 10jours | Ammar 6 | Simeto | Vitron | 02 |
| | 15.30 | 17.00 | 19.00 | |

11-1-4-Cinétique de croissance :

- variété Ammar 6

La vitesse de germination évalue l'élongation du coléoptile et des racines principales. Les résultats obtenus par génotype montrent que la cinétique de croissance suit une courbe ascendante et ce, pendant 15 jours (période pendant laquelle l'essai a été suivi). Pendant la première mesure, les racines et les coléoptiles ont une longueur moyenne à peu près égale (6.60cm contre 6.77cm respectivement). Pendant la seconde phase de mensuration, les coléoptiles prennent légèrement le dessus sur les racines (9.08 cm contre 8.03), alors qu'à l'issue de la troisième et dernière mensuration, l'écart est plus élevé entre les racines et les coléoptiles (8.72 cm contre 11.08 cm).

Tableau 11 : cinétique de croissance racine/coléoptile en fonction du temps cv Ammar6

| variété \ Longueur (cm) | 1 ^{ère} mesure | | 2 ^{ème} mesure | | 3 ^{ème} mesure | |
|-------------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|-------|
| | R | C | R | C | R | C |
| Ammar 6 | 6.60 | 6.77 | 8.03 | 9.08 | 8.72 | 11.08 |

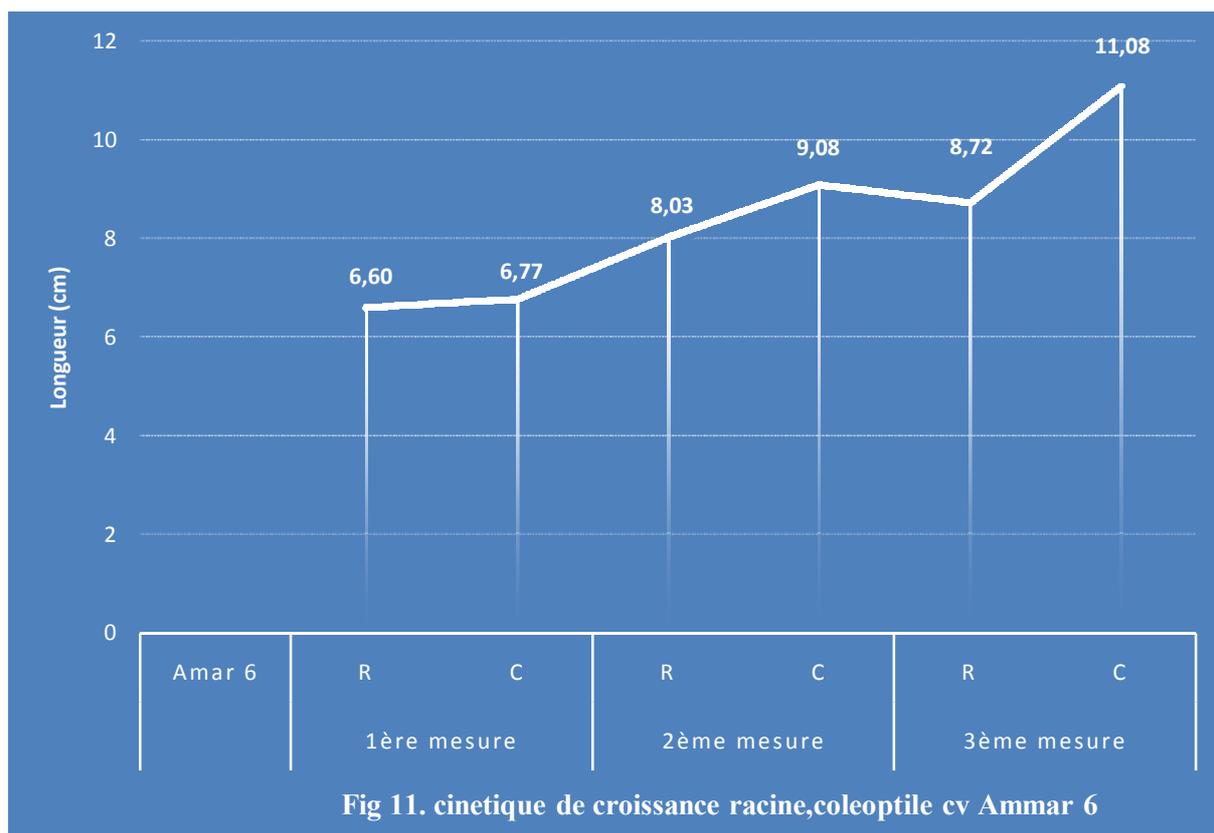


Fig 11. cinétique de croissance racine,coleoptile cv Ammar 6

- **Variété Vitron** : Contrairement à la variété Amar6, les racines ont une longueur plus élevée lors de la première mesure (3.74 cm contre 1.43 cm respectivement). Pendant la seconde phase de croissance, les racines demeurent encore supérieures en longueur par rapport aux coléoptiles (5.57 cm contre 4.36 cm). A l'issue du test, les coléoptiles ont surpassé en longueur les racines légèrement (6.32 cm contre 5.80 cm respectivement).

Tableau 12 : cinétique de croissance racine/ coléoptile en fonction du temps cv Vitron

| variété \ Longueur(cm) | 1 ^{ère} mesure | | 2 ^{ème} mesure | | 3 ^{ème} mesure | |
|------------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| | R | C | R | C | R | C |
| Vitron | 3.74 | 1.43 | 5.57 | 4.36 | 5.80 | 6.32 |

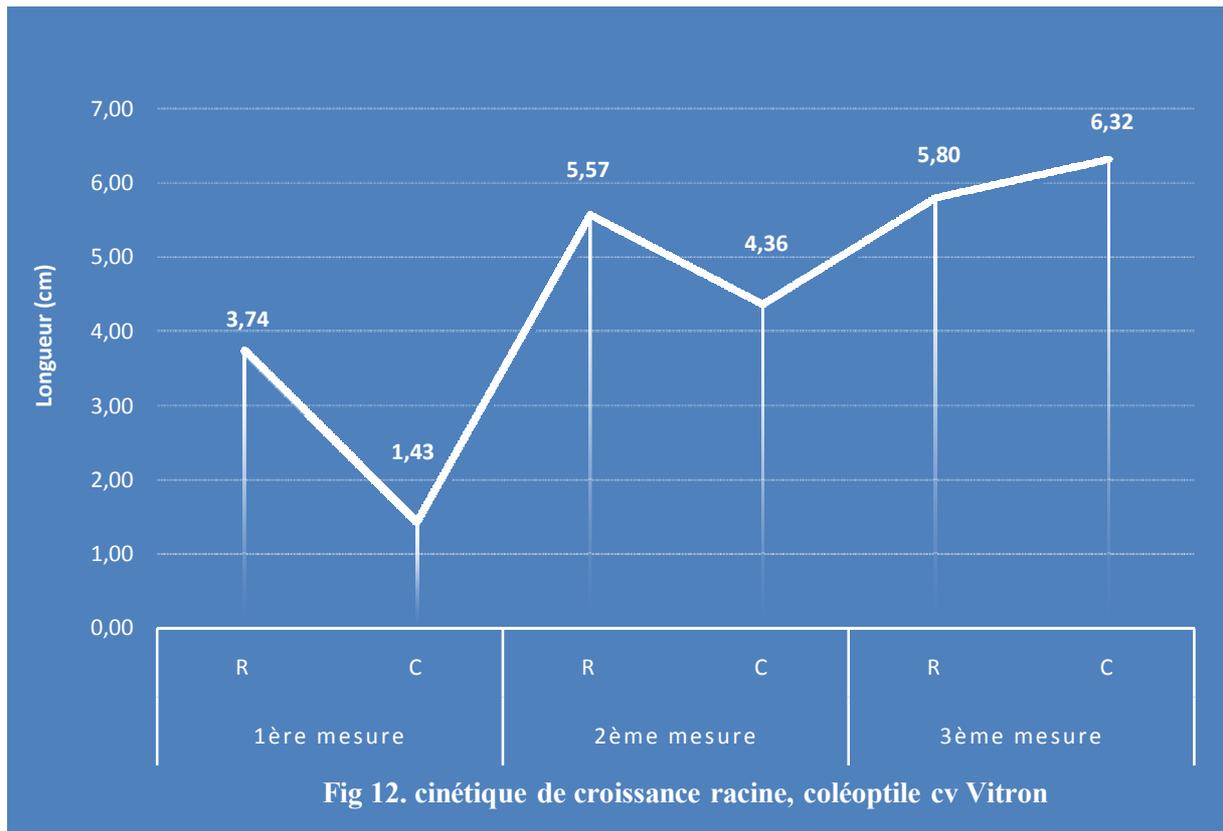


Fig 12. cinétique de croissance racine, coléoptile cv Vitron

- **Variété Simeto** : si pendant la première mesure les longueurs moyennes des racines et des coléoptiles semblent être relativement rapprochées (6.95cm pour les racines et 7.85cm pour les coléoptiles), la seconde phase est plus discriminante (8.17cm contre 10.57 cm, alors que les dernières mesures vont en faveur des coléoptiles (11.85cm) contre 8.63cm pour les racines

Tableau 13 : cinétique de croissance racine/coléoptile en fonction du temps cv Simeto

| variété \ Longueur(cm) | 1 ^{ère} mesure | | 2 ^{ème} mesure | | 3 ^{ème} mesure | |
|------------------------|-------------------------|------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | R | C | R | C | R | C |
| Simeto | 6.95 | 7.85 | 8.17 | 10.57 | 8.63 | 11.85 |

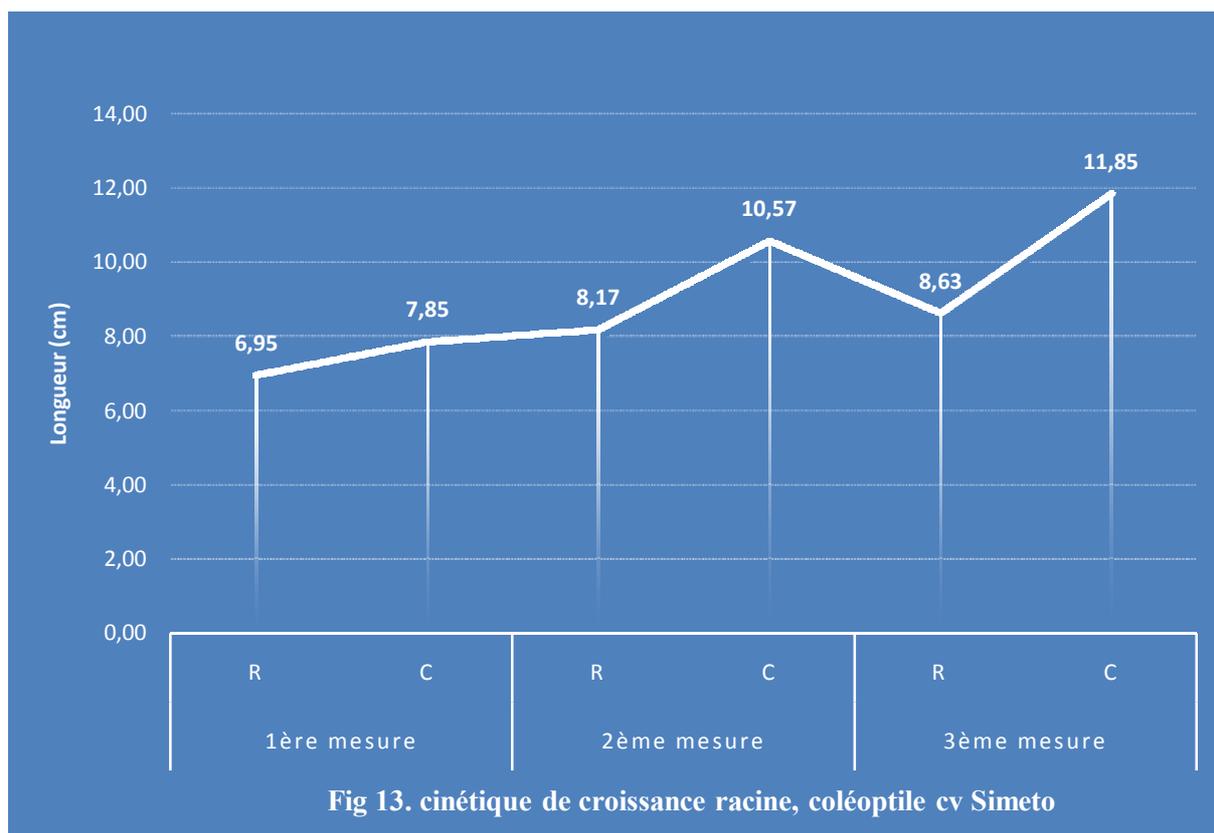


Fig 13. cinétique de croissance racine, coléoptile cv Simeto

Ces résultats montrent la spécificité génotypique qui se traduit par des manifestations physiologiques particulières et qui sont pour un bon nombre d'entre elles, liées au corpus génétique de l'espèce, voire de la variété.

Ces résultats seront encore davantage révélateurs lorsqu'un stress abiotique, le stress hydrique en l'occurrence est imposé à ces variétés. Cela permettrait d'élucider les mécanismes adaptatifs et de pouvoir associer ces traits d'accommodation à d'autres traits phéno-morphologiques. Ainsi, il en ressort que des modèles physiologiques peuvent être déduits grâce à cette démarche de sélection trait par trait, appelée aussi approche analytique.

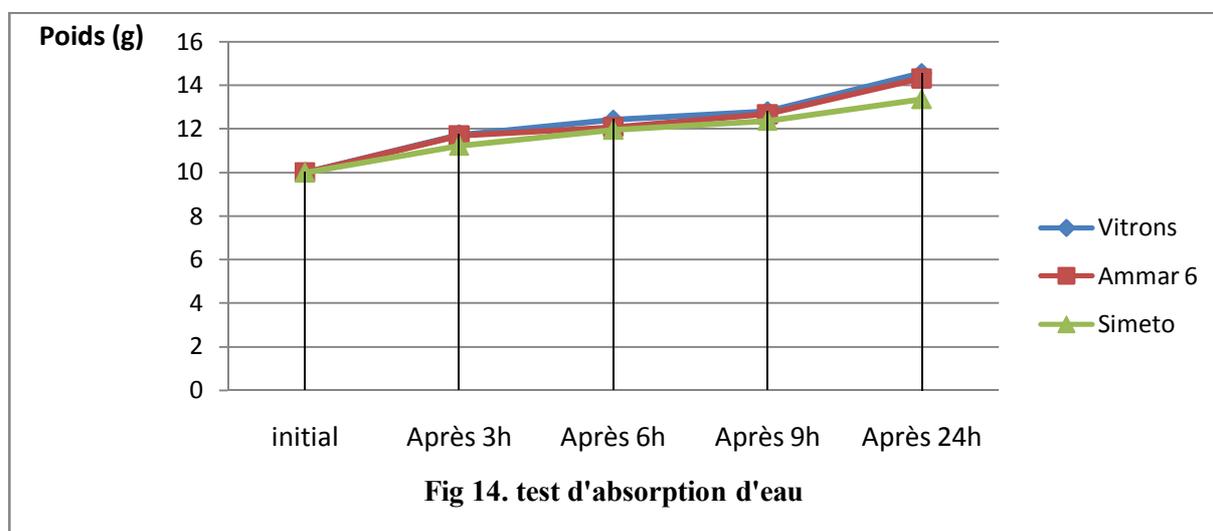
11-1-5-Test d'absorption :

Le test d'absorption d'eau, qui selon certains auteurs (Harrington 1959), doit discriminer entre les variétés selon la régulation du flux d'eau pendant une certaine durée (48h), a montré que la variété Simeto était celle qui absorbait le moins d'eau ; d'où l'hypothèse d'une meilleure intégrité membranaire de ses semences. Au-delà de 48 heures, les graines vont être à saturation, le péricarpe éclate et le point de rupture au niveau de l'embryon entraînera une perte d'eau et d'exsudats (leachates).

Le fait aussi que le PMG de cette variété soit le plus élevé (60g), il est possible de faire un lien de corrélation négative. Plus le PMG est élevé, moins le génotype absorbera d'eau, même s'il reste encore à affiner et confirmer cette approche déductive. La composition nutritionnelle, telle la masse molaire protéique avec une densité de 1.2 par rapport à l'amidon, de densité 0.8, selon Abdul Baki (1969), peut en effet expliquer d'abord pourquoi un PMG peut-il être élevé, ensuite déduire que s'il est élevé, c'est en partie grâce à une nutrition azotée adéquate qui lui confèrera un bon PMG grâce à la translocation des photo-assimilats vers la graine.

Tableau 14 : test d'absorption d'eau pour les trois variétés (exprimé en gramme)

| Poids (gr) / variété | initial | Après 3 h | Après 6 h | Après 9 h | Après 24 h |
|----------------------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Vitron | 10 | 11.73 | 12.41 | 12.80 | 14.55 |
| Ammar 6 | 10 | 11.69 | 12.08 | 12.68 | 14.32 |
| Simeto | 10 | 11.22 | 11.97 | 12.38 | 13.37 |



11-1-6-Surface foliaire :

Ce critère trouve son importance de par le rôle d'adaptation qu'il confère à la plante, compte tenu du fait que la transpiration cuticulaire est intimement liée à la surface foliaire.

Tableau 15: surface foliaire en fonction du stress hydrique

| Traitements Variétés | T0 | T1 | T2 |
|-------------------------|-------|------|------|
| V1 | 10,44 | 8,49 | 8,29 |
| V2 | 9,96 | 8,81 | 9,06 |
| V3 | 14,39 | 7,49 | 5,63 |

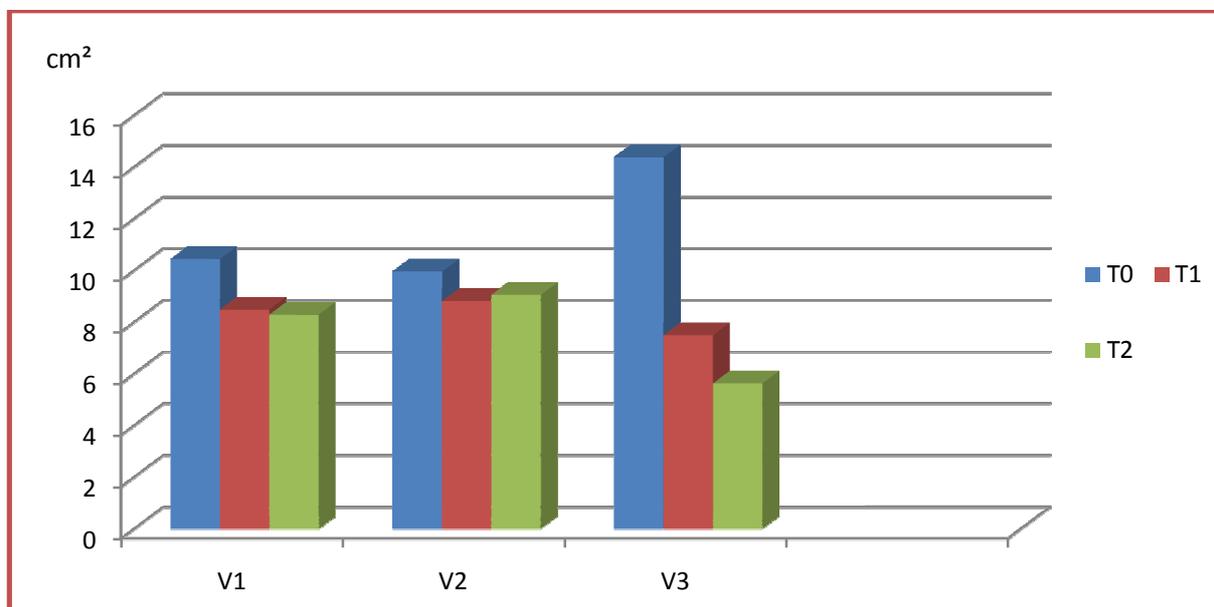


Fig 15 : Représentation graphique de la surface foliaire en fonction du stress hydrique

La représentation graphique montre que les niveaux du stress hydrique ont un impact sur la surface foliaire. En effet, pour les trois variétés, il y a une diminution de la surface foliaire. Le traitement prononcé T2 est celui qui affecte le plus la surface foliaire. La variété V3 est quant à elle, celle qui a subi en proportion, la plus forte diminution comparativement au témoin T0. Les variétés V1 et V2 diminuent en surface foliaire ; mais cette diminution reste malgré tout faible. La surface foliaire fait partie des attributs de la plantule et de la plante, qui indiquent le seuil de tolérance au stress hydrique. La variation morphologique de la surface foliaire s'accommode au seuil de sévérité du stress abiotique imposé. La bibliographie rapporte qu'un changement dans la surface foliaire indiquerait une accommodation transitoire au stress hydrique.

D'une manière générale, ce caractère n'est pas significatif pour les variétés dans les résultats obtenus du moins. Par contre l'analyse de variance fait ressortir un effet très hautement significatif pour les traitements (seuils de sévérité du stress hydrique). (Tab ANOVA).

Les résultats du test de Tukey pour l'analyse de variance montrent qu'étant donné qu'il n'y a pas eu d'effet variétal, les trois géotypes peuvent ainsi, selon le test de Tukey, être dans un même groupe homogène (avec des moyennes de 9.10cm², 9.20cm² et 9.30 cm² pour respectivement Vitron, Ammar 6 et Simeto.). (tab Tukey).

11-1-7-Biomasse :

La production de biomasse végétale demeure selon de nombreux auteurs (Nachit, Acevedo, Ceccarelli 1987), un trait déterminant sous les conditions de stress hydrique.

Tableau 16 :Biomasse (matière fraîche) c.v vitron exprimée en grammes

| Traitements \ Organes | T0 | T1 | T2 |
|-----------------------|------|------|------|
| T | 0,47 | 0,63 | 0,73 |
| C | 0,45 | 0,57 | 0,64 |
| R | 0,13 | 0,06 | 0,08 |

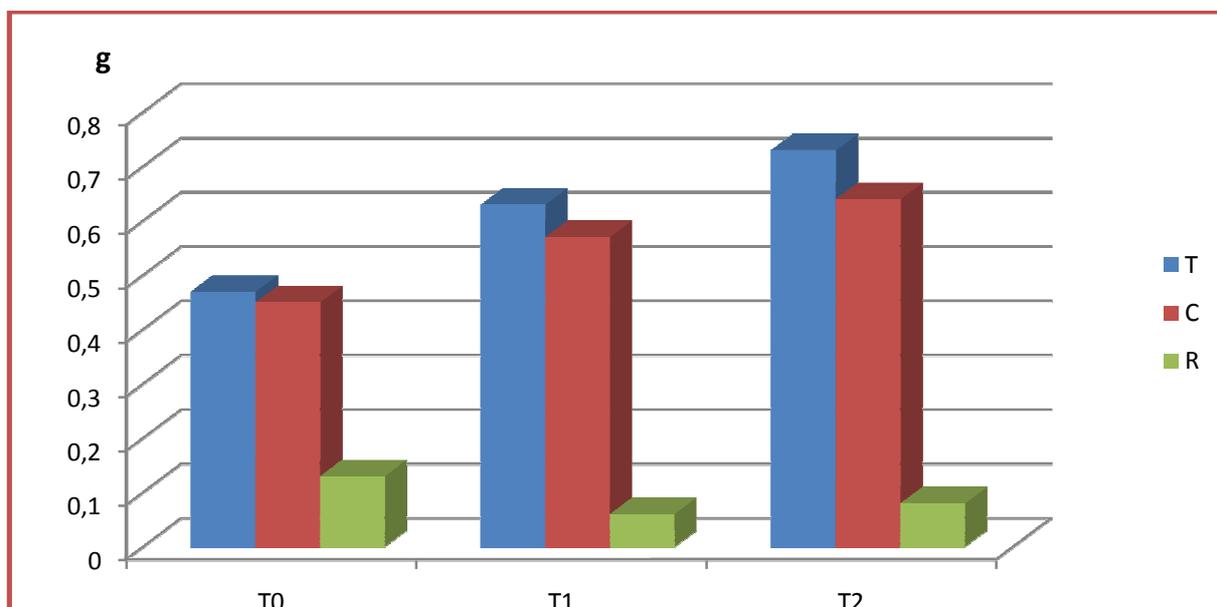


Fig16 : Biomasse (matière fraîche) c.v Vitron exprimée en grammes

La biomasse, qui est un paramètre important en tant que résultant de l'activité biologique du génotype, diminue pour les racines lorsque le stress est présent, qu'il soit modéré ou sévère (T1 et T2).

La biomasse des coléoptiles ne semble pas être affectée par l'imposition du stress hydrique. Il y a même eu de légères augmentations pour les biomasses des coléoptiles. peut-être est-ce là un signe précurseur de survie, déclenché par une plus rapide croissance, du moins transitoire.

Tableau 17 : biomasse (matière sèche) c.v Vitron exprimée en grammes

| Traitements \ Organes | T0 | T1 | T2 |
|-----------------------|------|------|------|
| T | 0,11 | 0,16 | 0,17 |
| C | 0,1 | 0,15 | 0,15 |
| R | 0,01 | 0,02 | 0,02 |

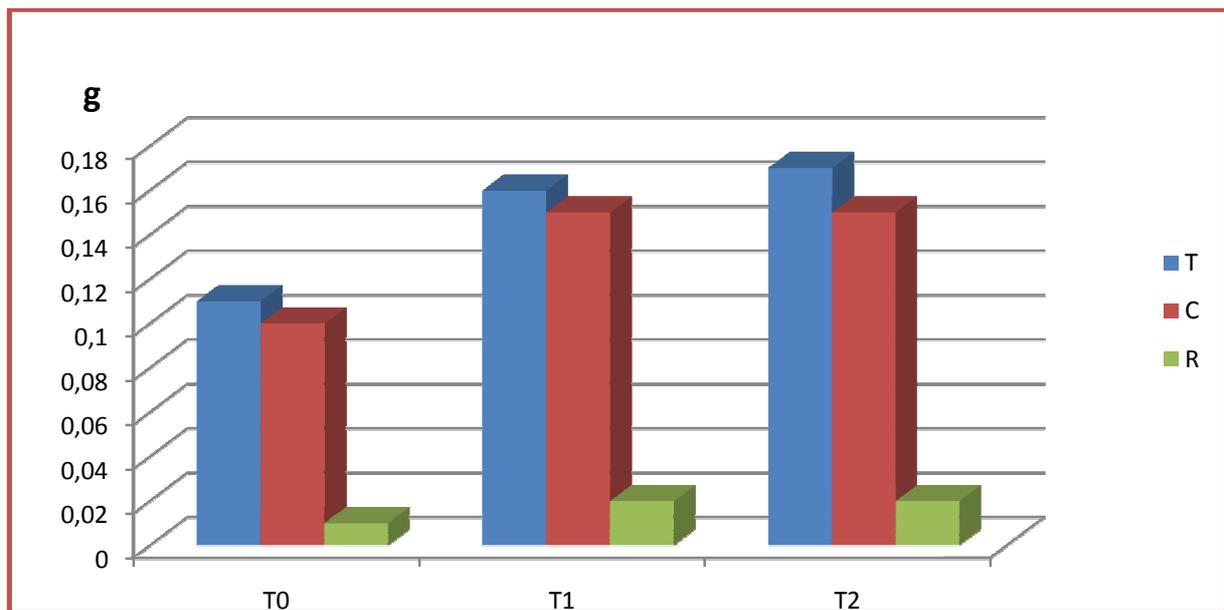


Fig 17 : Biomasse (matière sèche) c.v Vitron exprimée en grammes

Les résultats pour la matière sèche suivent la même tendance que celle de la matière fraîche. Pour ce résultat précis, du moins, contentons-nous d'avancer l'hypothèse de la survie du génotype vitron qui s'accommode au stress hydrique par une accélération de sa croissance.

Tableau 18 : biomasse (matière fraîche) c.v Simeto exprimée en grammes

| Traitements \ Organes | T0 | T1 | T2 |
|-----------------------|------|------|------|
| T | 0,62 | 0,74 | 0,5 |
| C | 0,5 | 0,66 | 0,44 |
| R | 0,1 | 0,07 | 0,10 |

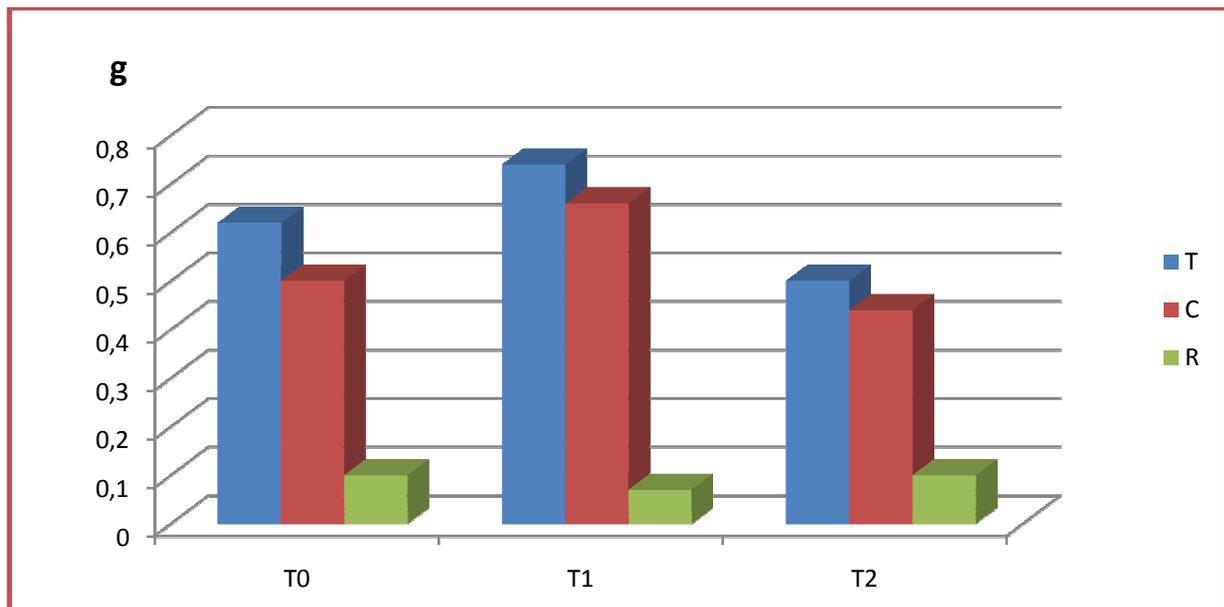


Fig 18 : Biomasse (matière fraîche) c.v Simeto exprimée en grammes

Le résultat consigné dans le tableau 18, montre qu'il y a une diminution de la matière fraîche en conditions de stress prononcé. En conditions de stress modéré (T1), les coléoptiles accusent une légère augmentation. C'est comme si le stress hydrique stimulait un peu la production de biomasse.

En effet, souvent en cas d'un début de stress ou d'un stress modéré, la variété accélère son rythme de croissance pour produire rapidement une biomasse suffisante pour lui permettre de monter à des phases phénologiques avancées.

Tableau 19 : biomasse (matière sèche) c.v Simeto exprimée en grammes

| Traitement Organe | T0 | T1 | T2 |
|----------------------|------|------|------|
| T | 0,13 | 0,19 | 0,12 |
| C | 0,12 | 0,17 | 0,12 |
| R | 0,01 | 0,02 | 0,01 |

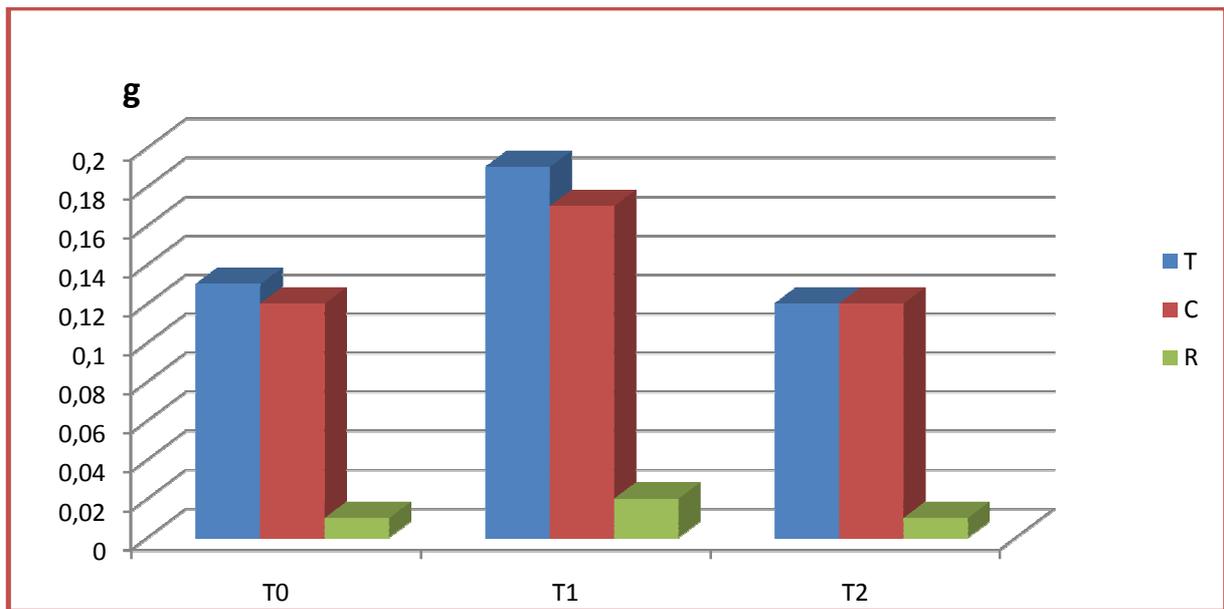


Fig 19 : Biomasse (matière sèche) c.v Simeto exprimée en grammes

La production de biomasse (matière sèche) diminue en cas de stress prononcé, notamment pour les racines. Dans cet essai, il est donc prouvé qu'il y a malgré tout un effet stress hydrique sur le génotype.

Tableau 20 : biomasse (matière fraîche) c.v Ammar 6 exprimée en grammes

| Organes \ Traitements | T0 | T1 | T2 |
|-----------------------|------|------|------|
| T | 1,70 | 0,8 | 0,66 |
| C | 1,44 | 0,74 | 0,59 |
| R | 0,23 | 0,05 | 0,06 |

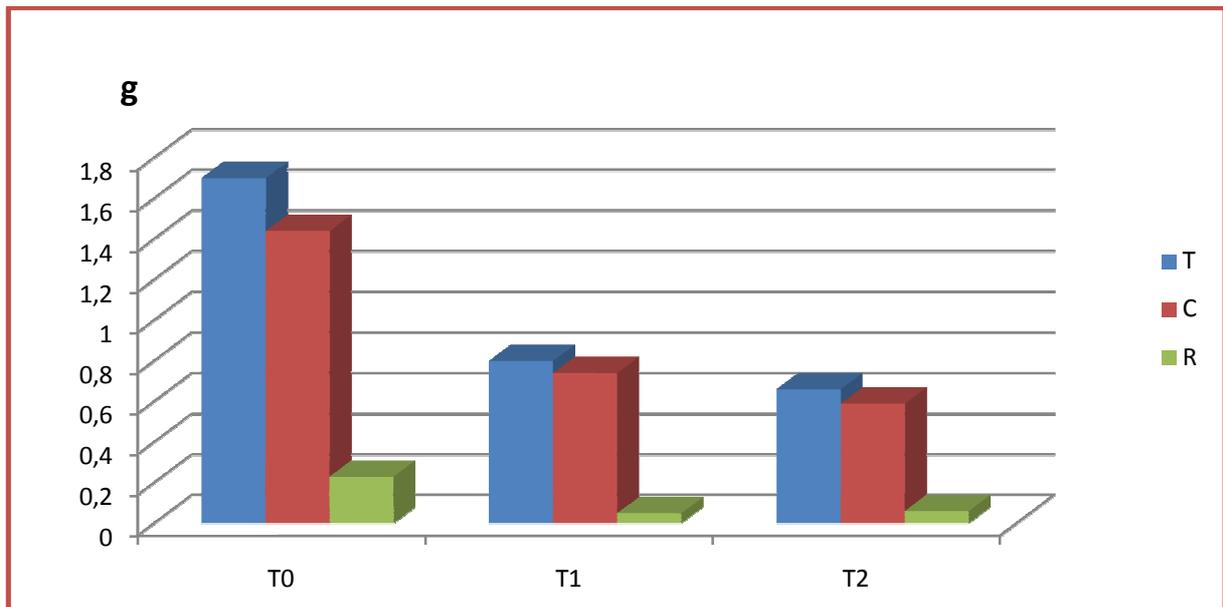


Fig 20 : biomasse (matière fraîche) c.v Ammar 6 exprimée en grammes

La biomasse, exprimée par la matière fraîche, diminue chez la variété Ammar6, au fur et à mesure que le traitement est prononcé, le seuil de sévérité T2 semble avoir beaucoup affecté les coléoptiles et les racines. Là encore, l'effet stress hydrique est évident, surtout en T2 pour la biomasse racinaire (matière fraîche).

Tableau 21 : biomasse (matière sèche) c.v Ammar6 exprimée en grammes

| Traitements \ Organes | T0 | T1 | T2 |
|-----------------------|------|------|------|
| T | 0,38 | 0,23 | 0,17 |
| C | 0,31 | 0,21 | 0,15 |
| R | 0,07 | 0,02 | 0,01 |

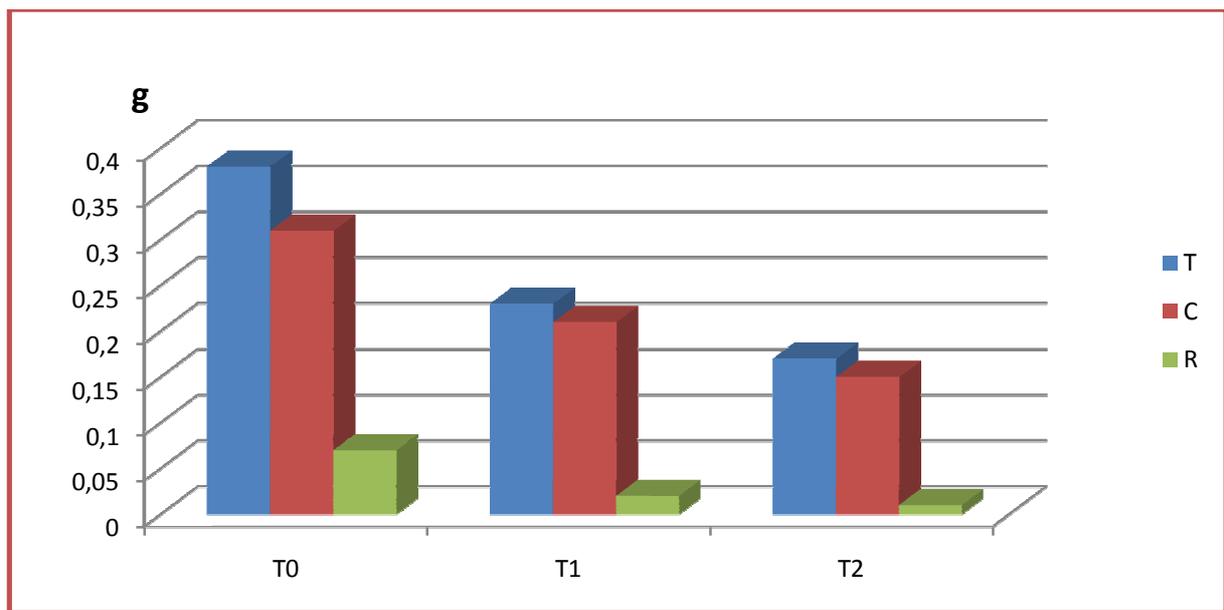


Fig 21 : Biomasse (matière sèche) c.v Ammar6 exprimée en grammes

La matière sèche, déduite à partir de la matière fraîche, a diminué en fonction de la variété du stress hydrique. Les racines ont particulièrement souffert sous le stress imposé.

Les résultats obtenus dans la présente étude et à la lumière de l'analyse de variance, nous rapportons les déductions suivantes :

En termes de matière fraîche et ce aussi bien pour la matière fraîche totale, la matière fraîche de la partie caulinaire (coléoptile) que la matière fraîche racinaire, il y a un effet variétés et un effet traitement, c'est à adire un effet du stress hydrique sur la production de biomasse. Tous les deux effets sont très hautement significatifs.

Ces résultats montrent qu'il y a des réponses spécifiques à chacun des génotypes étudiés et à chaque traitement. Il n'y a en tous cas pas de linéarité entre le niveau de stress hydrique et la réponse corrélative vis-à-vis du paramètre en question.

Concernant la production de biomasse sèche (matière sèche totale, matière sèche caulinaire, matière sèche racinaire), les réponses variétales sont similaires à celles obtenues pour la production de matière fraîche. Ceci est quelque peu attendu puisque ces dernières dérivent d'un dessèchement de la matière fraîche. (cf. tableau analyses statistiques).

11-1-8-Teneur relative en eau RWC :

Le RWC est un paramètre grâce auquel nous évaluons la quantité d'eau retenue au niveau tissulaire, après qu'un stress hydrique ait été exercé sur la plantule. Ce test traduit en somme la rétention d'eau au niveau foliaire, suite à une exposition à un déficit hydrique.

Tableau 22 : teneur relative en eau (RWC) de trois génotypes de blé dur en fonction d'un stress hydrique.

| Traitements \ Variétés | V1 | V2 | V3 |
|------------------------|----|----|----|
| T0 | 92 | 90 | 89 |
| T1 | 91 | 91 | 88 |
| T2 | 88 | 90 | 81 |

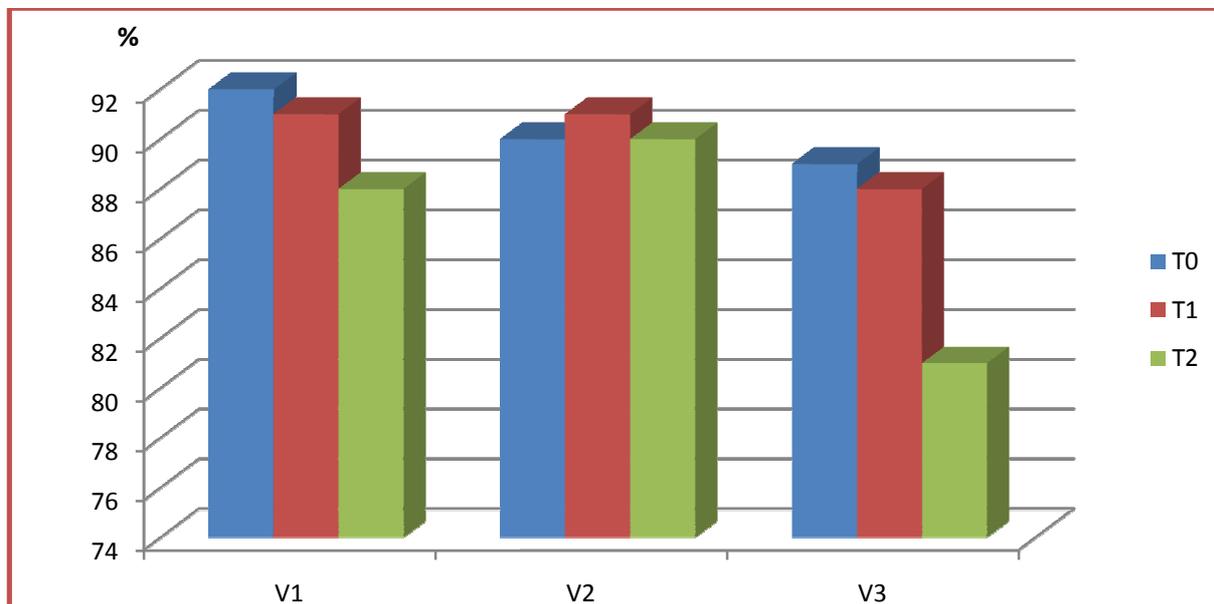


Fig 22: RWC des trois génotypes en fonction du stress hydrique

Les résultats montrent, après analyse de variance, qu'il n'y a pas de différence significative entre variétés mais par contre il y a une différence hautement significative entre les traitements. Nous pouvons traduire ceci en termes de réponses adaptatives des génotypes par rapport à l'application du stress hydrique.

Chaque traitement conduit à un comportement différent de la part des génotypes, en termes d'ajustement ; le cas échéant le pouvoir de rétention d'eau de la plante lorsque nous appliquons un stress hydrique à des sévérités différentes.

Ce caractère est souvent utilisé pour discriminer entre les génotypes tolérants (Brisin 1995, Clarke 1982). Il constitue de fait un critère de sélection surtout lorsque nous utilisons la sélection indirecte, prédictive. Ce trait est d'ailleurs à mettre en corrélation avec un autre trait, le RWL (perte graduelle en eau).

11-1-9-Perte graduelle en eau RWL :

Ce paramètre traduit la capacité d'un génotype à perdre le moins possible d'eau et ce, par unité de temps et par unité de surface. Moins une variété libère d'eau, plus elle est supposée s'accommoder aux conditions stressantes de déficit hydrique. Ce trait constitue également un indice de sélection sous des conditions suboptimales, souvent drastiques de l'environnement. L'interaction Génotype- Milieu viendrait ainsi mettre en valeur et en exergue l'importance du potentiel génétique d'un cultivar à pouvoir négocier un stress hydrique.

Tableau 23 : perte graduelle en eau (RWL) de trois génotypes de blé dur en fonction du stress hydrique.

| Traitements \ Variétés | V1 | V2 | V3 |
|------------------------|-------|-------|-------|
| T0 | 0,003 | 0,002 | 0,004 |
| T1 | 0,004 | 0,003 | 0,003 |
| T2 | 0,004 | 0,005 | 0,002 |

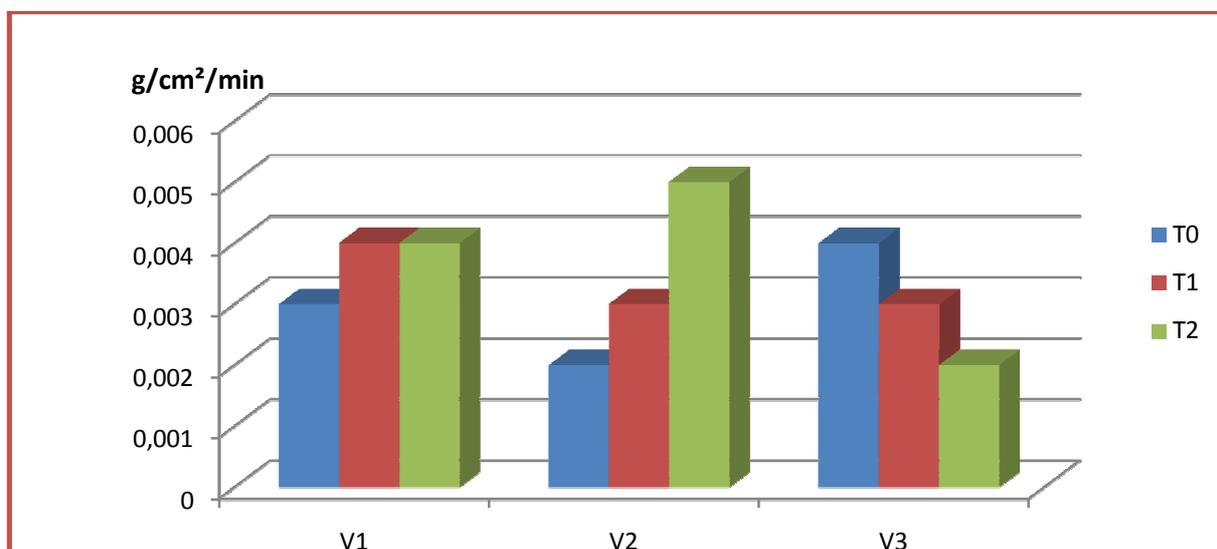


Fig 23 : RWL des trois génotypes en fonction du stress hydrique

La transpiration cuticulaire (RWL) ou perte graduelle en eau, diffère d'un génotype à l'autre. Ce qui est intéressant à retenir, c'est le comportement de la variété V2. Plus le stress est prononcé, moins la variété transpire ; elle retient au maximum l'eau contenu dans les feuilles et la perte graduelle s'effectue lentement.

Cette forme d'accommodation est très révélatrice en tant qu'expression de tolérance au stress hydrique et ce malgré une non signification statistique.

Cette même variété a été celle dont le RWC ne constitue pas un bon marqueur de tolérance. Ceci nous amène à conclure qu'en fait, les variétés répondent différemment et manifestent des régulations physiologiques spécifiques et différentes tout autant.

12- résultats sur la biochimie des génotypes :

12-1- Accumulation de proline :

L'osmorégulation demeure une stratégie privilégiée utilisée par la plante en vue d'une plus grande tolérance aux stress environnementaux en général ; le stress hydrique en particulier. Il s'agit pour la plante, en cas de stress, de déclencher des processus biochimiques, de catabolisme, de protéolyse pour libérer des molécules plus simples, tel la proline, les sucres solubles.

Le rôle de ces molécules est un rôle d'osmoprotecteur, d'osmorégulateur. En amélioration génétique des plantes, ces stratégies trouvent leur intérêt en tant que marqueurs biochimiques de sélection indirecte pour une meilleure tolérance vis-à-vis du stress hydrique, entre autres stress abiotiques et biotiques.

Tableau 24 : Quantité de proline en fonction d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

| Traitements Variétés | T0 | T1 | T2 |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| V1 | 0,1658 | 0,1685 | 0,1863 |
| V2 | 0,1656 | 0,1673 | 0,1686 |
| V3 | 0,1673 | 0,1706 | 0,1729 |

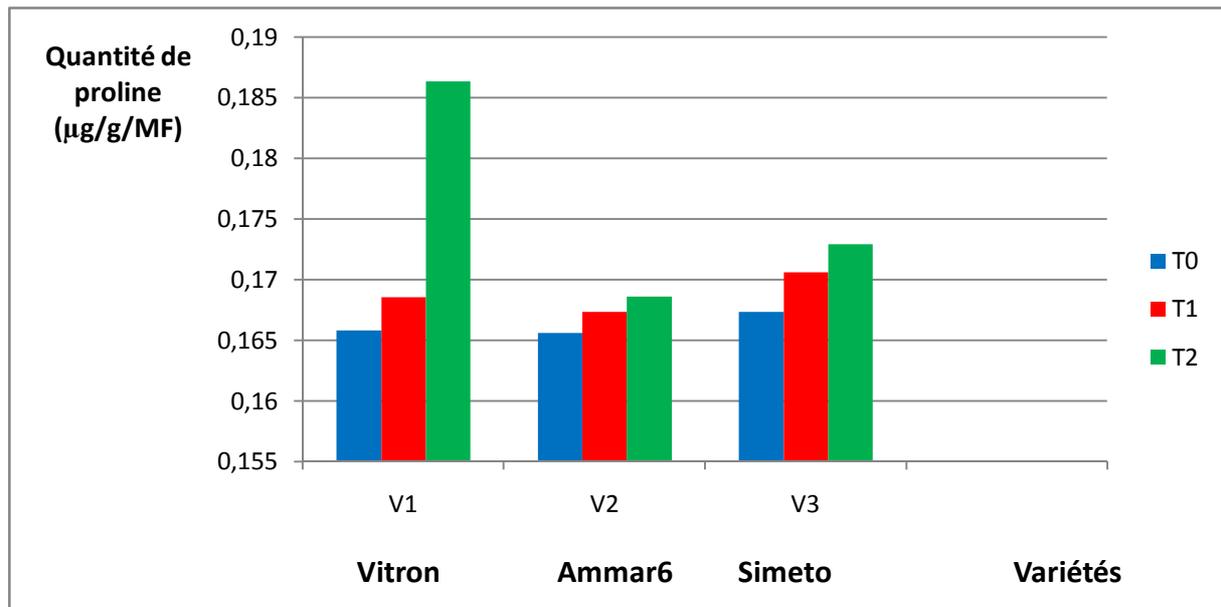


Fig 24: Quantité de proline en fonction du niveau d'un stress hydrique (µg/g/Mf)

En effet, pour les trois variétés, il y a une augmentation de l'accumulation de ce soluté osmotique, la proline est ce, au fur et à mesure que le stress hydrique augmente.

L'analyse de variance montre qu'il n'y a pas d'effet variété ; par contre il y a effet traitement (seuil de sévérité du stress hydrique) significatif. Le test de Tukey pour les groupes homogènes montre un groupe formé par les variétés Vitron et Simeto ; Ammar 6 se détachant toute seule en un groupe à part

Le fait que les taux de protéines aient baissé dans ce travail, trouverait son explication dans les conversions partielles de protéines en acides aminés libres, la proline en l'occurrence. Il y a une protéolyse qui s'opère pour permettre la libération de proline en vue d'une accommodation transitoire, un ajustement osmotique, qui assurerait la turgescence cellulaire même en période d'un déficit hydrique.

La variété V1 est par contre, celle qui accumule le plus de proline, comparativement aux deux autres variétés.

D'une manière générale, souvent des corrélations inverses entre l'accumulation de protéines et l'accumulation de proline, sont citées en référence.

12-2- Accumulation de sucres solubles

D'une manière générale, les trois variétés ont affiché des augmentations de taux de sucres solubles en fonction du stress hydrique.

Les trois géotypes montrent ainsi, leurs capacités respectives à tolérer des niveaux élevés de stress hydriques grâce à ce mécanisme biochimique.

Tableau 25 : quantités de sucres solubles en fonction d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

| Traitements Variétés | T0 | T1 | T2 |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| V1 | 0,1583 | 0,1606 | 0,1598 |
| V2 | 0,1586 | 0,1592 | 0,1586 |
| V3 | 0,1579 | 0,1594 | 0,1594 |

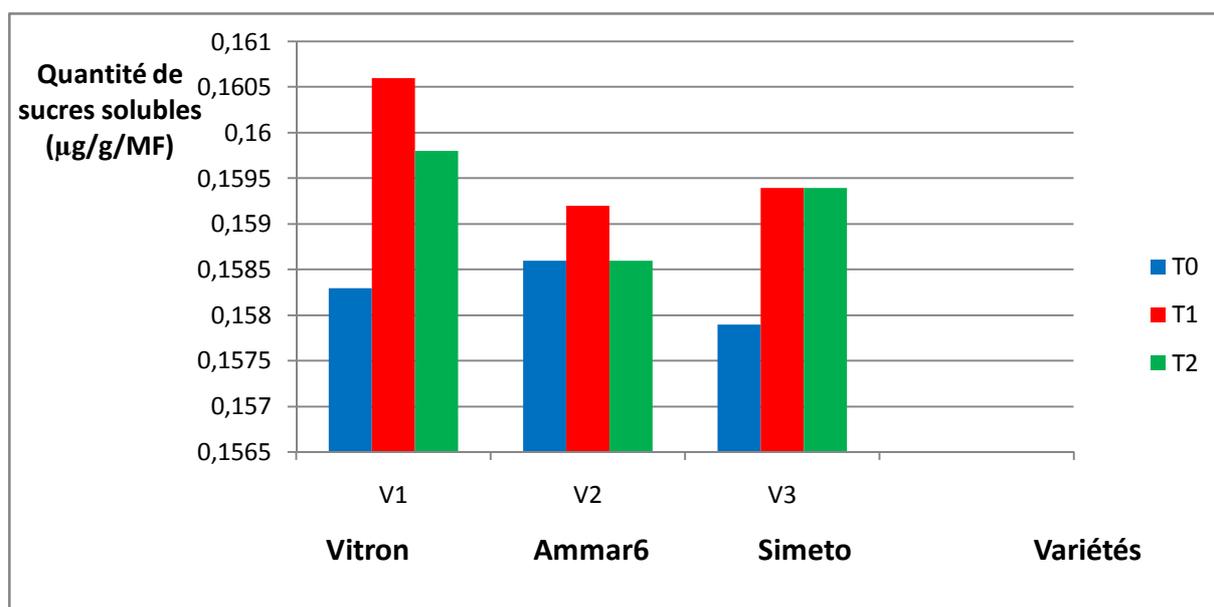


Fig 25 : Accumulation de sucres solubles en fonction du niveau d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

L'analyse de variance pour cet osmorégulateur montre qu'il y a une différence significative entre variétés (*) et des différences très hautement significatives entre traitements (***). Ce qu'il y aurait à déduire d'un tel résultat est que les génotypes sont différents statistiquement et ont donc à ce titre, un corpus génétique distinct. Les trois variétés ont répondu différemment, est-ce à dire que leurs aptitudes et potentiels génétiques respectifs laissent à présumer qu'ils seraient différents structurellement. L'origine variétale a en effet un rôle primordial à jouer quant à certaines réponses au plan physiologique, biochimique ou autre.

Le test de Tukey affiche un groupe homogène pour Simeto et Ammar 6 et un groupe constituant Vitron seul et ce, pour l'effet variété.

Pour l'effet traitement, un groupe homogène (Vitron et Ammar 6) et un groupe à part (Simeto) sont affichés.

L'interprétation que nous pouvons émettre serait que les variétés Vitron et Ammar6 se comporteraient de manière similaire sous l'effet de traitement de sévérité du stress hydrique.

Pour ce qui est de l'utilité de ces résultats, leur insertion dans un programme d'amélioration génétique du blé dur est vivement souhaitée.

Ces résultats, de part le fait qu'ils traduisent des réponses des génotypes à un stade jeune, plantule, constitueraient un plus dans la prédiction de la tolérance aux stress abiotiques, en général, et au stress hydrique en particulier.

Cette forme d'exploration prédictive, fait partie de ce qui est désormais appelé "la sélection indirecte".

Elle permet de capitaliser des informations sur le comportement des variétés face à un stress hydrique.

Nous pourrions ainsi, grâce à cette voie, connaître d'autres paramètres physiologiques ou biochimiques à même de concourir à une plus ample caractérisation des variétés.

12-3- Accumulation des protéines :

A la lumière des résultats obtenus, nous pouvons déduire les conclusions suivantes :

Tableau 26 : Quantité des protéines totales en fonction du stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

| Traitements Variétés | T0 | T1 | T2 |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| V1 | 0,0453 | 0,0443 | 0,0452 |
| V2 | 0,0449 | 0,0455 | 0,0445 |
| V3 | 0,0449 | 0,0454 | 0,0449 |

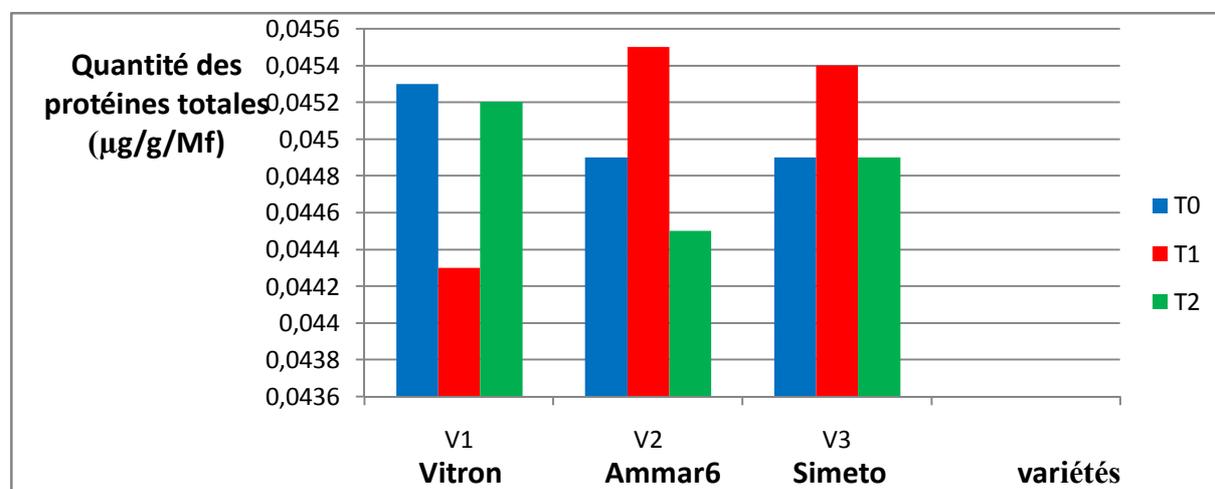


Fig 26 : Accumulation de protéines en fonction d'un stress hydrique ($\mu\text{g/g/Mf}$)

- Les 3 variétés répondent différemment au stress imposé.

La variété V1, malgré un taux de protéine élevé en T2, accumule un peu moins que le témoin. Au niveau du traitement T1, le taux de protéine a même baissé.

Pour la variété V2 le traitement T1 est celui où l'accumulation de protéines est élevée. Au même moment, le traitement T2 (stress sévère) a vu se taux baisser sensiblement.

Pour la variété V3, c'est toujours lorsqu'il y a un stress modéré (T1) qui est appliqué que le taux de protéines est élevé. En T2 (stress sévère), le taux de protéines est moindre, il égale à peine le traitement T0, c'est-à-dire, en absence de stress hydrique.

Concernant cet osmorégulateur, l'ANOVA (analyse de variance) qu'il n'y a aucune différence significative, ni entre variétés, ni entre traitements. Le test de Tukey donne un même groupe homogène pour les variétés et pour les traitements.

Cette non signification pourrait être perçue et interprétée comme étant le résultat obtenu par un marqueur biochimique qui serait de moindre importance. Les génotypes n'ont pas eu recours à cet osmorégulateur pour s'accommoder au stress hydrique. Il est toutefois opportun de rappeler que l'approche analytique et synthétique qui traduit la sélection indirecte est à mettre à l'ordre du jour.

Tous les traits morphologiques, physiologiques, biochimiques fussent-ils, n'ont pas forcément la même importance et le même impact dans l'explication de la tolérance aux stress. Certains génotypes se distinguent par le recours à certains osmolytes plutôt qu'à d'autres.

Ainsi, un programme d'amélioration génétique pour la tolérance au stress hydrique, se baserait sur les traits les plus saillants et qui du reste, sont susceptibles d'être corrélés à d'autres traits phénotypiques au champ. Concilier la sélection prédictive indirecte et la sélection directe au champ reste une des préoccupations de l'heure.

Comparaison entre variétés et entre traitements des valeurs moyennes des variables mesurées sur les 3 variétés, à l'aide du test l'AV2 modèle croisé mixte (facteur variétés et facteur traitements) :

Tableau 27 : Résultats du test d'AV2

| Variable | source de variation | ddl | SCE | CM | Fobs | P |
|-----------|---------------------|-----|----------|----------|--------|-----------|
| Surface | variétés | 2 | 0.18 | 0.09 | 0.65 | 0.54NS |
| Foliaire | traitements | 2 | 80.92 | 40.46 | 283.92 | 0.000 *** |
| MF totale | variétés | 2 | 1.15 | 0.58 | 88.11 | 0.000*** |
| | Traitements | 2 | 0.43 | 0.21 | 32.64 | 0.000*** |
| MF col. | Variétés | 2 | 0.88 | 0.44 | 86.56 | 0.000*** |
| | Traitements | 2 | 0.27 | 0.13 | 26.39 | 0.000*** |
| MF Rac. | Variétés | 2 | 0.11 | 0.01 | 19.35 | 0.000*** |
| | traitements | 2 | 0.03 | 0.01 | 49.15 | 0.000*** |
| MS Tot | variétés | 2 | 0.73 | 0.36 | 93.69 | 0.000*** |
| | traitements | 2 | 0.13 | 0.06 | 16.77 | 0.000*** |
| MS Col | variétés | 2 | 0.05 | 0.02 | 135.30 | 0.000*** |
| | Traitements | 2 | 0.01 | 0.005 | 18.62 | 0.000*** |
| MS Rac. | Variétés | 2 | 0.002 | 0.001 | 14.04 | 0.000*** |
| | traitements | 2 | 0.001 | 0.005 | 9.68 | 0.001*** |
| RWC | variétés | 2 | 40.67 | 20.33 | 2.50 | 0.111NS |
| | traitements | 2 | 134.89 | 67.44 | 8.28 | 0.003** |
| RWL | variétés | 2 | 0.000017 | 0.00009 | 0.46 | 0.641NS |
| | traitements | 2 | 0.000017 | 0.000003 | 0.15 | 0.858NS |
| Proline | variétés | 2 | 0.41 | 0.21 | 2.67 | 0.096NS |
| | traitements | 2 | 1.03 | 0.52 | 6.69 | 0.007** |
| Sucres | variétés | 2 | 0.20 | 0.10 | 4.17 | 0.033* |
| | Traitements | 2 | 0.52 | 0.26 | 10.97 | 0.001*** |
| Protéines | variétés | 2 | 0.00023 | 0.00012 | 0.07 | 0.933NS |
| Totales | traitements | 2 | 0.0007 | 0.00033 | 0.20 | 0.820NS |

Recherche de groupes de variétés homogènes et de groupes de traitements homogènes avec le test de TUKEY :

Tableau 28 : Résultats du test de TUKEY pour chaque variable mesurée.

| Variable | facteur | moyennes et groupes de Moyennes homogènes pour les var. et les traits | | | nombre de groupes |
|------------------|-------------|---|----------------|----------------|-------------------|
| Surface Foliaire | variétés | Vitron 9.10 | Ammar6 9.20 | Simeto 9.30 | 01 |
| | Traitements | T60 7.70 | T30 8.30 | T0 11.60 | 03 |
| MF | variétés | T60 0.60 | T30 0.60 | T0 1.10 | 02 |
| | Tot. | T60 0.60 | T30 0.70 | T0 0.90 | 02 |
| MF Col. | variétés | T30 0.50 | T0 0.60 | T60 0.90 | 02 |
| | Trait. | T60 0.60 | T30 0.70 | T0 0.80 | 03 |
| MF Rac. | variétés | T0 0.10 | T30 0.10 | T60 0.20 | 02 |
| | trait. | T30 0.10 | T60 0.11 | T0 0.20 | 02 |
| MS.Tot. | variétés | T30 0.10 | T0 0.11 | T60 0.30 | 02 |
| | Trait. | T60 0.20 | T30 0.28 | T0 0.30 | 02 |
| MS col. | Variétés | T30 0.10 | T0 0.10 | T60 0.20 | 02 |
| | Trait. | T60 0.1 | T30 0.20 | T0 0.20 | 02 |

Partie III: Résultats et discussion

| | | | | | |
|-----------------|----------|-------------|-------------|-------------|----|
| MS Rac. | Variétés | T30 0.1 | T0 0.11 | T60 0.20 | 02 |
| | Trait. | T60 0.01 | T30 0.01 | T0 0.12 | 02 |
| RWC | variétés | T60 87.6 | T0 89.2 | T30 90.6 | 01 |
| | Trait. | T60 86.2 | T0 89.4 | T30 91.7 | 02 |
| RWL | variétés | T60 0.10 | T30 0.10 | T0 0.10 | 01 |
| | Trait. | T0 0.10 | T30 0.10 | T60 0.11 | 01 |
| Prolinevariétés | | T60 0.20 | T30 0.40 | T0 0.50 | 01 |
| | Trait. | T0 0.20 | T30 0.30 | T60 0.60 | 02 |
| Sucres variétés | | T30 0.30 | T60 0.31 | T0 0.50 | 02 |
| | Trait. | T0 0.20 | T60 0.30 | T30 0.50 | 02 |
| Protéines | variétés | T0 0.20 | T60 0.20 | T30 0.21 | 01 |
| | Trait. | T60 0.20 | T0 0.21 | T30 0.22 | 01 |

Après le test d'analyse de la variance à 2 critères de classification, on recherche à l'aide du test de DUNNET les traitements qui sont identiques au traitement témoin.

On note T0= le traitement sans stress

Partie III: Résultats et discussion

T30 : le traitement avec stress modéré (30%)

T60 : le traitement avec stress sévère (60%)

Tableau29 : Résultats du test de DUNNET appliqué sur plusieurs caractéristiques de la plante

| Variable | Moyennes et groupes de moyennes Identiques à la moyenne du témoin | | | nombre de traitements identiques au témoin |
|------------|--|-------------|-------------|---|
| S.Fol | T60 7.70 | T30 8.30 | T0 11.60 | 00 |
| MF Tot | T60 0.60 | T30 0.70 | T0 0.90 | 00 |
| MFcol. | T60 0.60 | T30 0.70 | T0 0.80 | 00 |
| MF rac. | T30 0.10 | T60 0.12 | T0 0.17 | 00 |
| MS Tot. | T60 0.20 | T30 0.24 | T0 0.26 | 01 |
| MS Col. | T60 0.10 | T30 0.20 | T0 0.22 | 01 |
| MS Rac. | T60 0.02 | T30 0.04 | T0 0.08 | 00 |
| RWC | T60 86.20 | T0 89.4 | T30 91.7 | 03 |
| RWL | T30 0.02 | T60 0.04 | T0 0.05 | 03 |
| Prol. | T0 0.20 | T30 0.30 | T60 0.60 | 02 |
| Sucres | T0 0.20 | T60 0.30 | T30 0.50 | 02 |
| Prot. Tot. | T60 0.20 | T30 0.21 | T0 0.23 | 03 |

Le test a été appliqué à plusieurs paramètres morphologiques (surface foliaire, matière fraîche, matière sèche), physiologiques (RWC, RWL) et biochimiques (proline, sucres solubles et protéines totales).

Ce test permet de connaître le nombre de traitements identiques au témoin.

A l'issue de cette analyse, il en ressort que :

Aucun traitement n'est identique au témoin pour la surface foliaire, la matière fraîche totale, matière fraîche caulinaire, matière fraîche racinaire. Pour les matières sèches par contre, il y a des traitements qui sont identiques au témoin. Cela concerne la matière sèche totale, la matière sèche caulinaire et la matière sèche racinaire.

Pour les paramètres de la régulation hydrique, exprimée par la turgescence cellulaire et la perte graduelle en eau (RWC et RWL), les trois traitements sont identiques. Ces résultats démontrent l'impact du stress hydrique sur ces traits.

Concernant les marqueurs d'osmorégulation, tel la proline, les sucres solubles, il y a eu au moins deux traitements identiques (T0, T60) alors que pour les protéines totales, il y a eu trois traitements identiques.

Ce test met en valeur les réponses adaptatives des génotypes face à des seuils de sévérité différents de stress hydrique.

13-Résultat sur le phénotypage parental :

Les résultats que nous présentons concernent exclusivement des points relevés sur terrain. Initialement, nous nous sommes fixés comme objectif principal de « schématiser » trois variétés de blé dur au plan morphologique. Souvent les chercheurs vont dans le détail sur un certain nombre d'aspects de physiologie d'étude structurale ou ultra-structurale sans pour autant daigner connaître la variété sur terrain. C'est ainsi qu'est née cette idée d'aller au champ et se familiariser avec les variétés tout au long du cycle végétatif.

13-1-Caractéristiques de la feuille

Tableau 30 : Caractéristiques de la feuille de trois génotypes de blé dur

| variétés \ traits | Type de feuille Erigée-pendante- semi érigée | Texture foliaire cireuse - glaucescence | Surface foliaire (cm ²) |
|-------------------|---|--|--|
| Vitron | pendante | Cireuse (+) | 54,17 |
| Ammar 6 | Erigée | Cireuse (++) | 53,55 |
| Simeto | Semi-érigée | Glaucescence (-) cireuse (-) | 54,67 |

13-1-1-Type de feuille

Vitron a des feuilles pendantes (flag leaf) ; Ammar 6 a des feuilles érigées (erect leaf) et Simeto a des feuilles semi érigées (semi erect leaf). Ce caractère est considéré comme important parce qu'il participe aux stratégies adaptatives des variétés sous stress hydrique. Les variétés qui ont des feuilles érigées sont celles qui éviteront au maximum de transpirer ; le soleil est réfléchi en grande partie, alors que dans les feuilles pendantes, la lumière et la chaleur sont conservées et la plante transpire plus.

13-1-2-Texture foliaire

Peut être cireuse ou glaucescente. Les résultats obtenus montrent qu'il ya une diversité phénotypique, d'où l'intérêt du phénotypage.

Vitron : cireuse (cire moyenne)

Ammar 6 : cireuse (cire excessive- prononcée)

Simeto : absence de cire et de glaucescence

13-1-3-Surface foliaire

La surface foliaire est plus importante chez Simeto (54.67cm²). Suivent ensuite respectivement Vitron et Ammar 6 (54.17 cm² et 53.55 cm²) (Fig27).

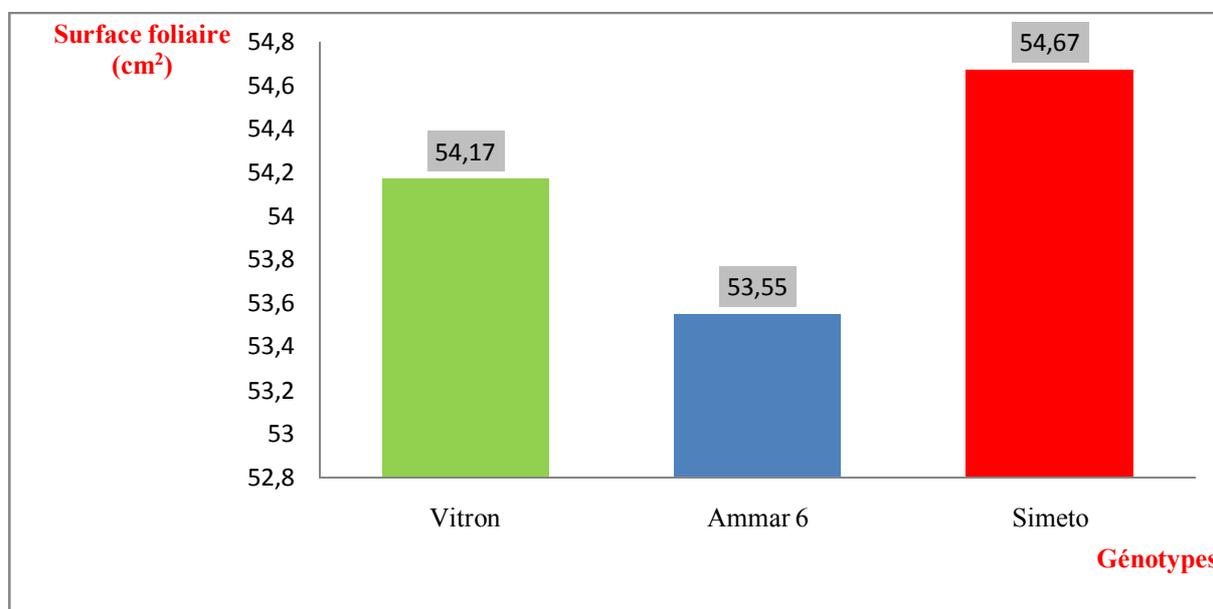


Fig 27 : Variations de la surface foliaire de trois génotypes de blé dur.

13-2-Caractéristiques de la tige

Tableau 31 : Caractéristiques de la tige de trois géotypes de blé dur

| variétés \ traits | <i>Hauteur de la plante</i> (cm) | <i>Nature de tige</i> pleine - creuse- semi pleine | <i>Diamètre de la tige</i> (mm) |
|-------------------|-------------------------------------|---|------------------------------------|
| Vitron | 107,8 | Semi -pleine | 4,25 |
| Ammar 6 | 111 | Semi -pleine (+) | 3,62 |
| Simeto | 108,6 | Semi-pleine (+) | 4,33 |

13-2-1-Hauteur de la plante

D'une manière générale, les trois géotypes ont répondu d'une façon similaire (Fig28). Les hauteurs traduisent un modèle biologique semi- nain, en comparaison aux variétés traditionnelles locales comme Bidi 17, Hedba 3 ou encore Mohamed Ben Bachir toutes considérées comme des variétés à paille haute.

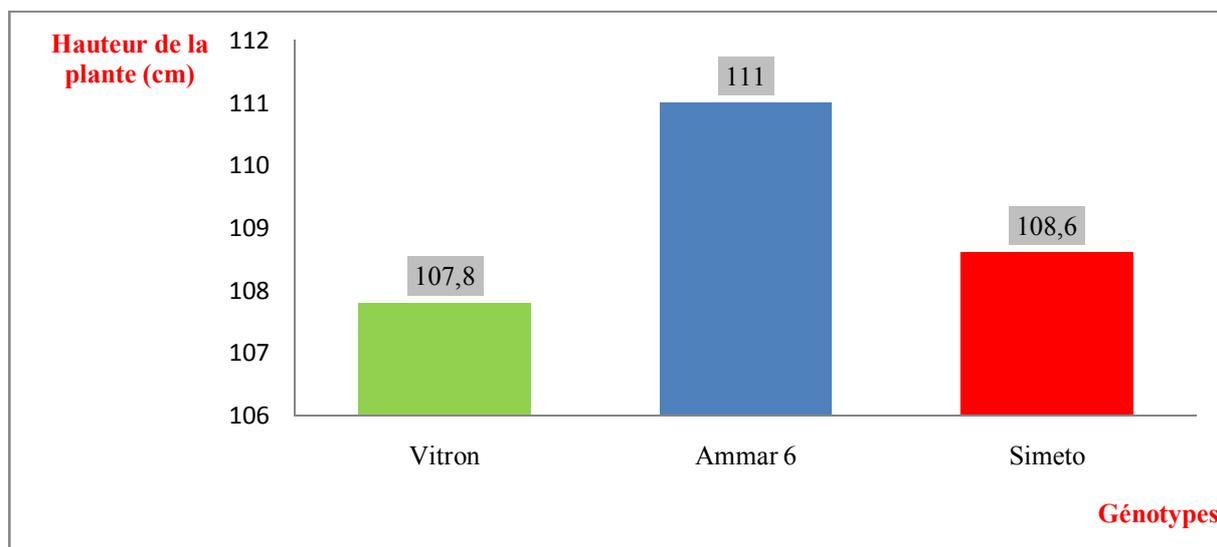


Fig 28 : Variations de la hauteur de plante de trois géotypes de blé dur.

La hauteur est intéressante à connaître dans le cadre d'un phénotypage parce qu'elle permet de prédire des rendements à travers des niveaux de fertilisation, azotés notamment. Les variétés à haute paille courent le risque de verse physiologique ou même de verse mécanique en cas de vents forts et persistants. Les plantes tombent et risquent d'avoir des grains altérés lors de la récolte.

13-2-2-Nature de tige

Les trois variétés ont des tiges semi- pleines avec un peu plus de nuances pour Ammar6 et Simeto dont les tiges sont un peu plus pleines que Vitron.

13-2-3-Diamètre de la tige

Les trois variétés affichent des diamètres de tige différents (Fig29). Simeto est celle qui a un plus grand diamètre (4.33mm), suivie de Vitron (4.25mm) et enfin Ammar 6 (3.62 mm).

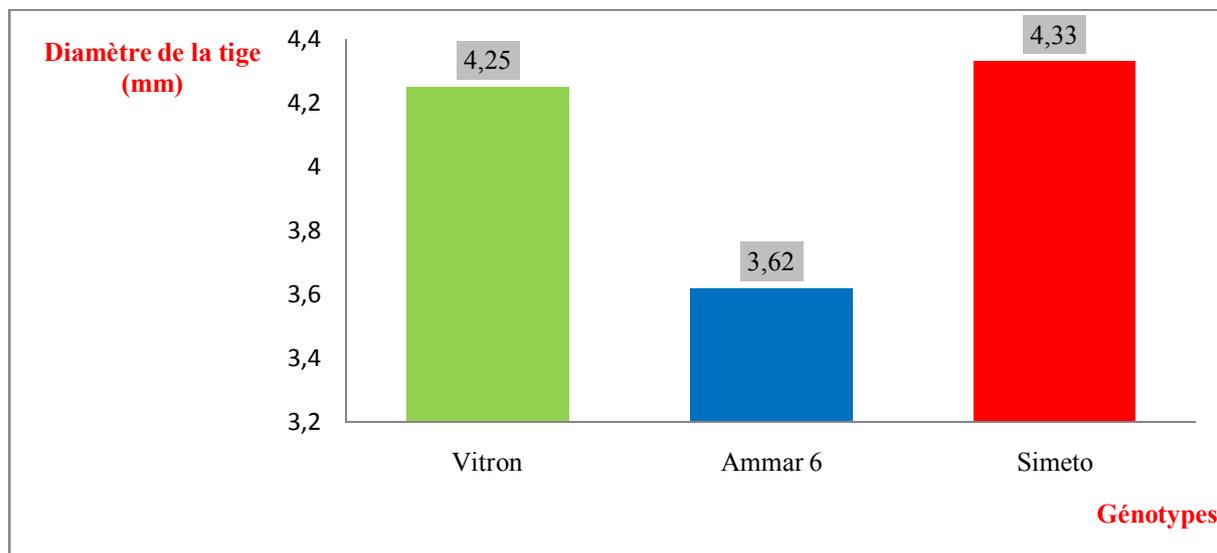


Fig 29 : Variations du diamètre de la tige de trois génotypes de blé dur.

13-2-4-Epaisseur de la tige

Les tiges ont une épaisseur avoisinant 1mm (Fig30); la différence entre les génotypes est quasi nulle.

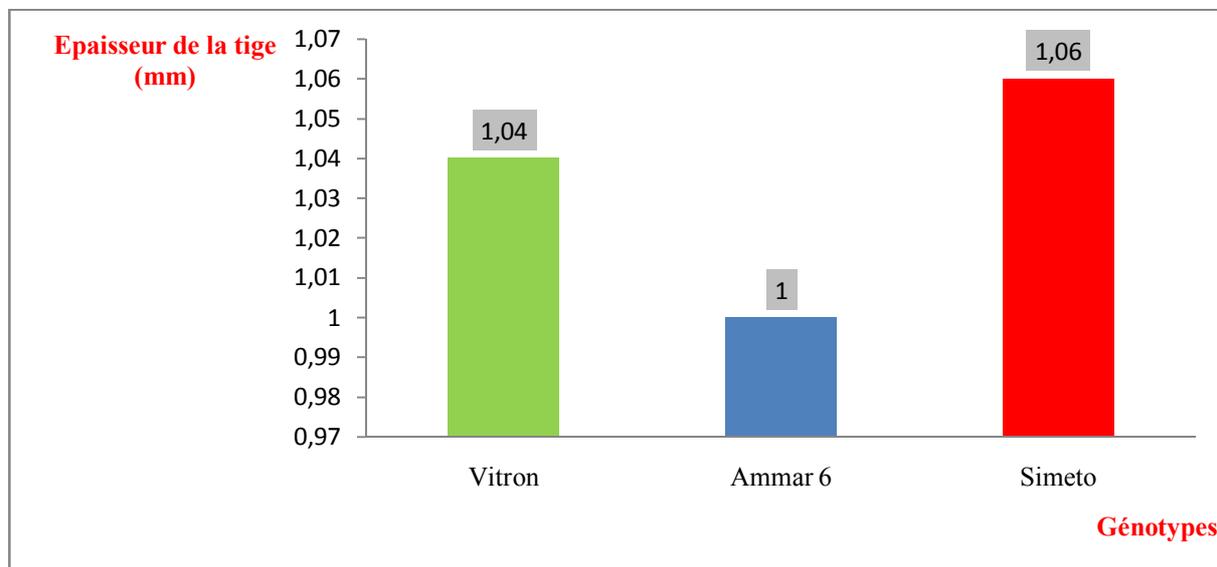


Fig 30 : Variations de l'épaisseur de la tige de trois génotypes de blé dur.

13-2-5- Pourcentage du cylindre central

Le cylindre central (moelle) est plus important chez Simeto et Vitron. Ammar 6 a une moelle proportionnellement plus faible comparativement aux deux autres génotypes (Fig31).

Ce résultat dénote de l'importance du caractère, car si le pourcentage de la moelle est faible, cela voudrait dire qu'en contre partie, la tige est robuste (Fig30), le cylindre n'étant pas complètement vide.

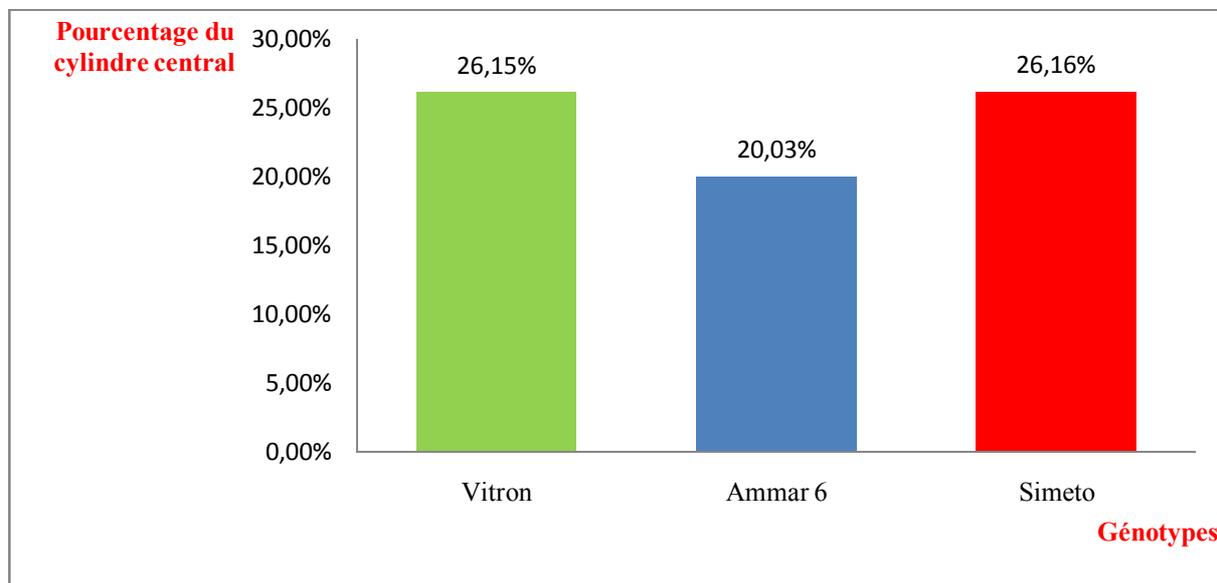


Fig 31 : Variations du pourcentage du cylindre central de trois génotypes de blé dur.

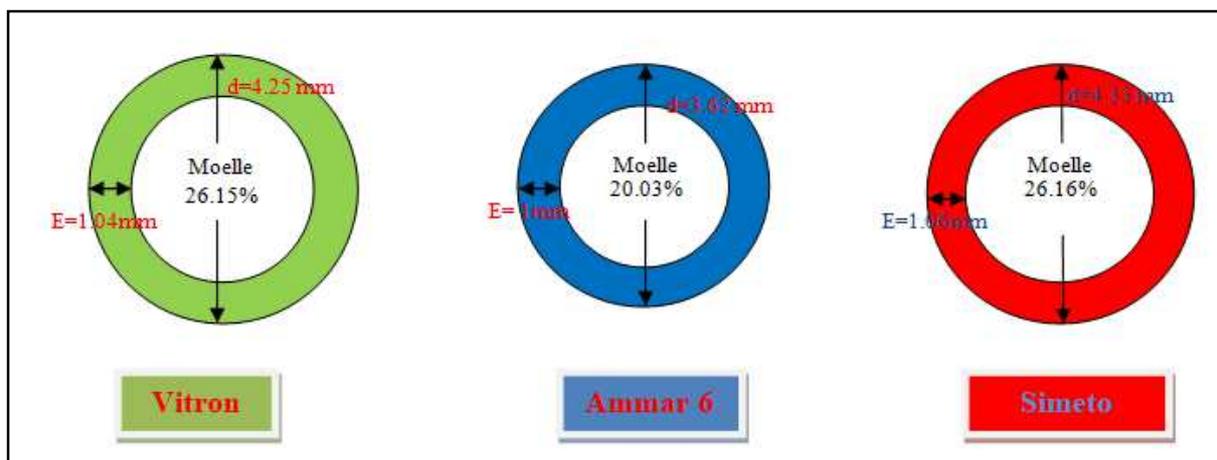


Fig 32: Schéma du cylindre central de trois génotypes de blé dur.

14-Quelques paramètres des composantes du rendement

Tableau 32 : Quelques paramètres du composant du rendement de trois génotypes de blé dur.

| traits variétés | Tallage | Nombre d'épis / m ² | Nombre de grains /épi | PMG (g) | Rendement théorique (Qx /ha) |
|-----------------|---------|--------------------------------|-----------------------|---------|------------------------------|
| Vitron | 9 | 390 | 21 | 55 | 45,04 |
| Ammar 6 | 10 | 437 | 23 | 55 | 55,28 |
| Simeto | 12 | 421 | 19 | 60 | 48 |

14-1-Tallage (nombre de talles/ m2)

La variété Simeto semble avoir un avantage en ayant un plus grand nombre de talles par plante (12 talles), en comparaison à la variété Ammar 6 avec 10 talles et Vitron avec 9 talles (Fig33).

Le tallage est en effet une composante agronomique qui a sa part dans la détermination du rendement. Toutefois, certaines variétés peuvent être performantes, avec un fort potentiel de rendement tout en ayant un nombre de talles pas très élevé (Benbelkacem et Rasmusson 1982), Borojevitch. Lorsque les conditions environnementales, la pluviométrie en particulier n'est pas un facteur limitant, alors le rendement peut s'exprimer à travers d'autres paramètres, comme le poids de mille grains ou le nombre de grains par épis.

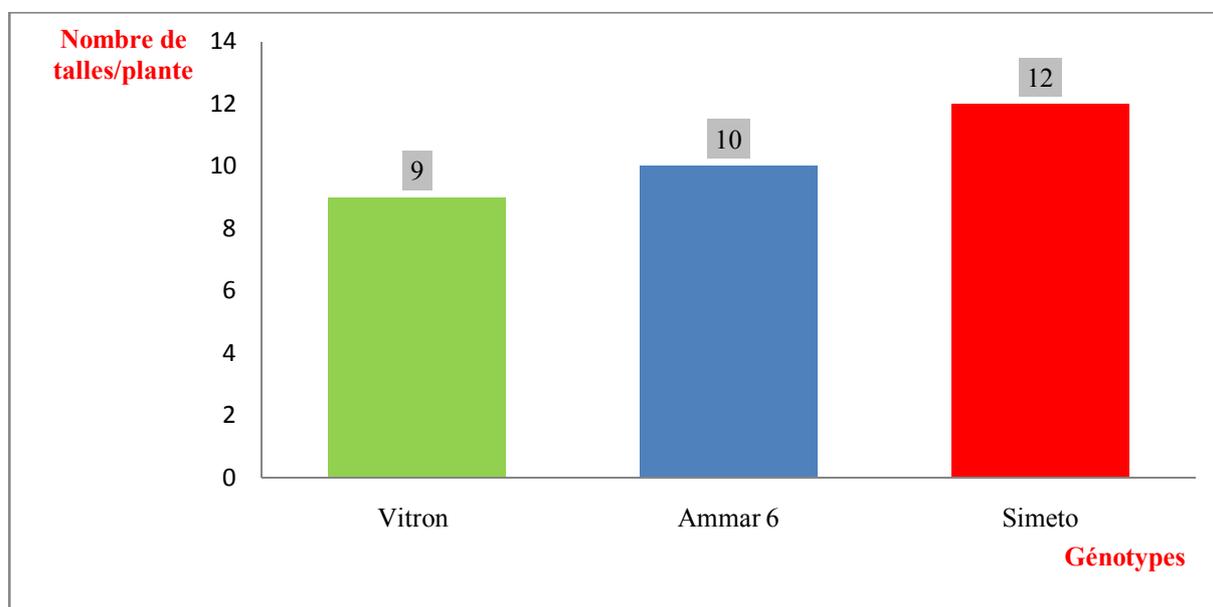


Fig 33: Variations du nombre de talles par plante de trois génotypes de blé dur.

Dans les conditions de réalisation de notre essai expérimental, le nombre de talles se justifie pour déterminer un rendement élevé, parce que les conditions pluviales sont souvent irrégulières et avoir ainsi beaucoup de talles permet à la variété d'assurer une bonne productivité.

14-2- Nombre d'épis/m2

Le nombre d'épis semble être en bonne corrélation avec le tallage. En effet, Simeto qui avait un plus fort tallage, affiche un nombre d'épis par m2 élevé (421 épis), surclassé toutefois par la variété Ammar 6 (437 épis) alors qu'au même moment la variété Vitron affiche 390 épis par m2 seulement (Fig34).

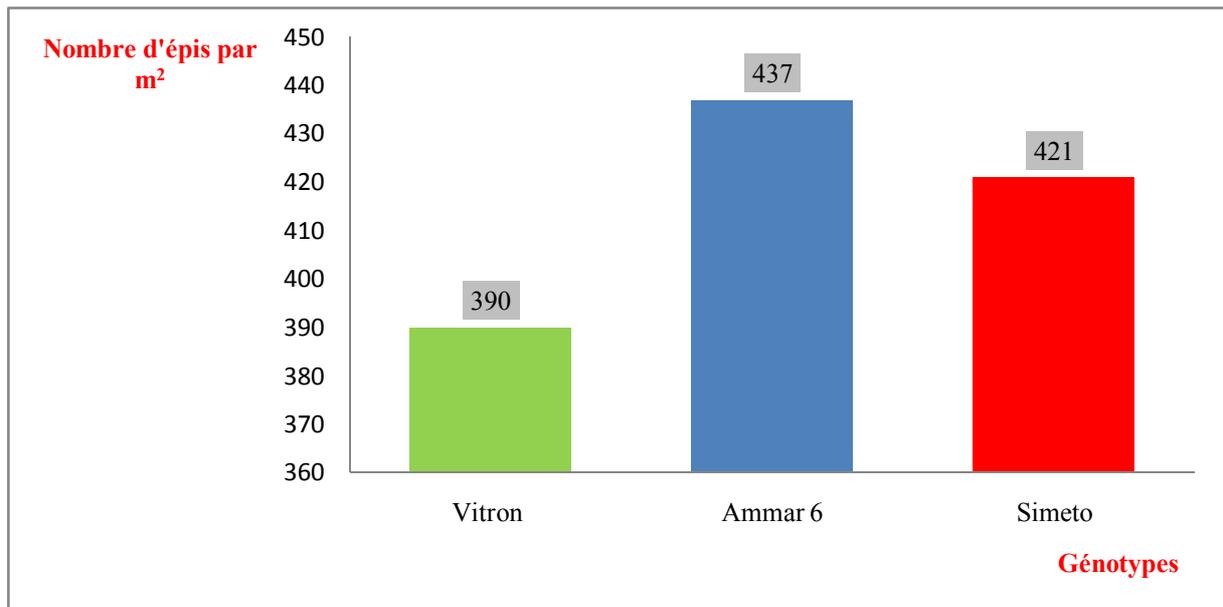


Fig 34 : Variations du nombre d'épis par m2 de trois géotypes de blé dur.

14-3-Estimation du rendement théorique

Le rendement théorique est plus important chez Ammar 6 (55.28Qx/ha). Suivent ensuite respectivement Simeto et Vitron (48 Qx/ha et 45.04Qx/ha) (Fig35).

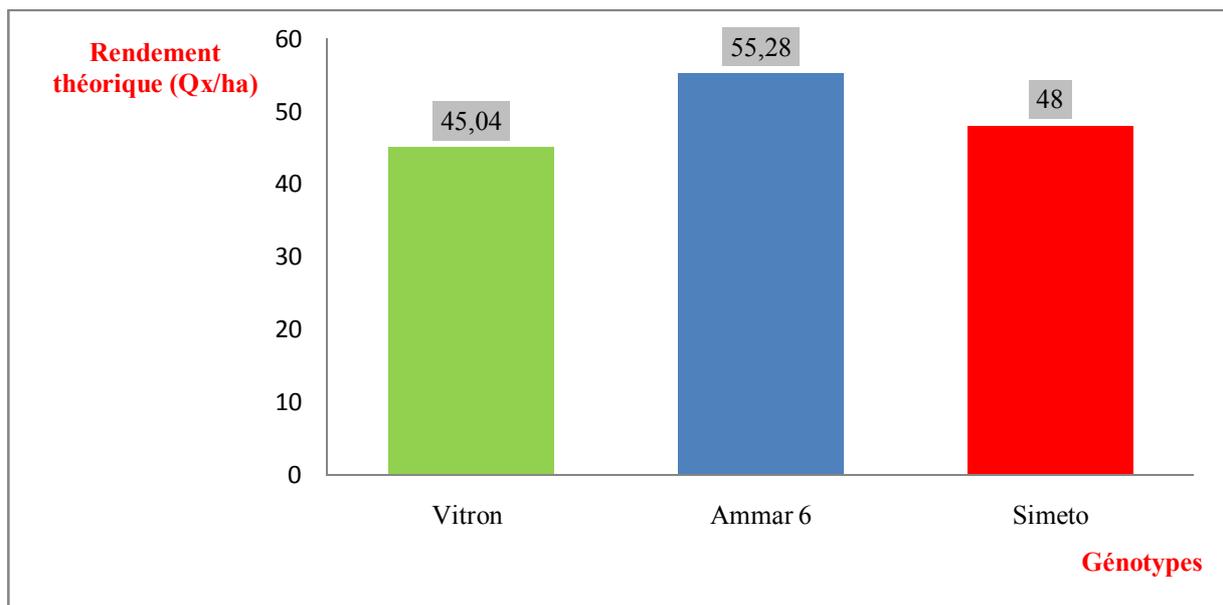


Fig 35: Variations du rendement théorique de trois géotypes de blé dur.

15-Paramètres phénologiques

Tableau 33: Paramètres phénologiques de trois géotypes de blé dur.

| traits variétés | <i>Phase semis-épiaison</i> (nombre de jours) | <i>Phase semis-floraison</i> (nombre de jours) |
|--------------------|--|---|
| Vitron | 137 | 153 |
| Ammar 6 | 139 | 151 |
| Simeto | 141 | 152 |

15-1-Phase semis-épiaison (jours)

Les trois variétés ont épié à la même date et ce compte tenu du fait que ce sont des variétés intensives améliorées, elles s'apparentent dans leur phénologie.

137j, 139j et 141j ont marqué respectivement la phase semis-épiaison pour respectivement Vitron, Ammar6 et Simeto (Fig36).

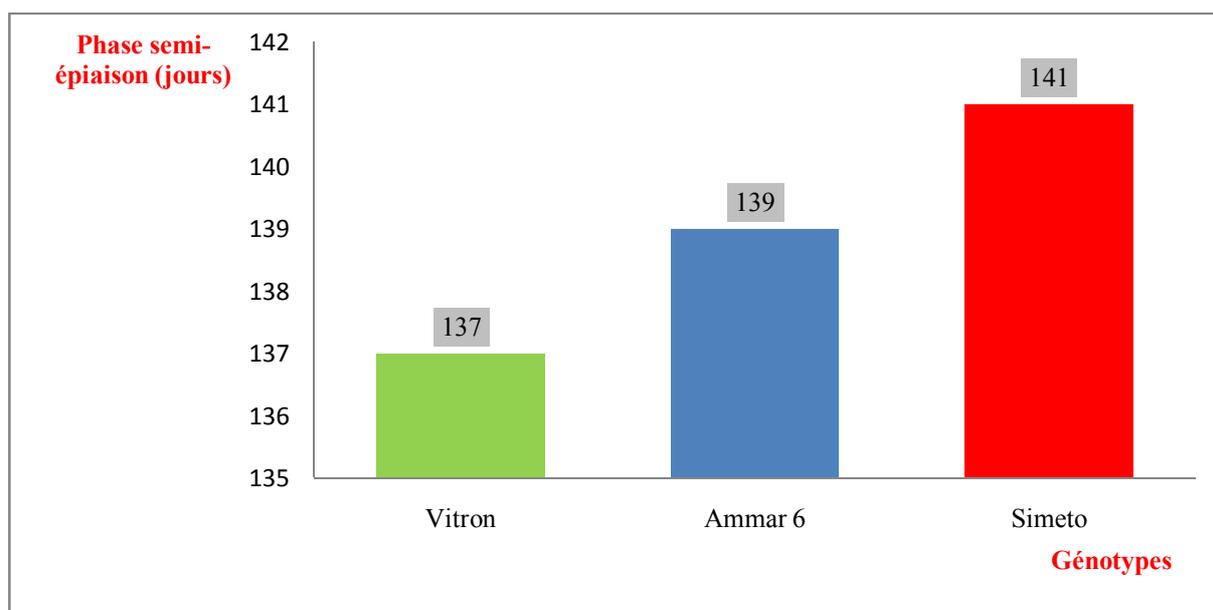


Fig 36 : Variations de la phase semis-épiaison de trois géotypes de blé dur.

15-2-Phase semis-floraison (jours)

Elles ont été comme suit : 150 jours en moyenne pour les trois variétés 153 j, 151 j et 152 j respectivement pour Vitron, Ammar 6 et Simeto (Fig37).

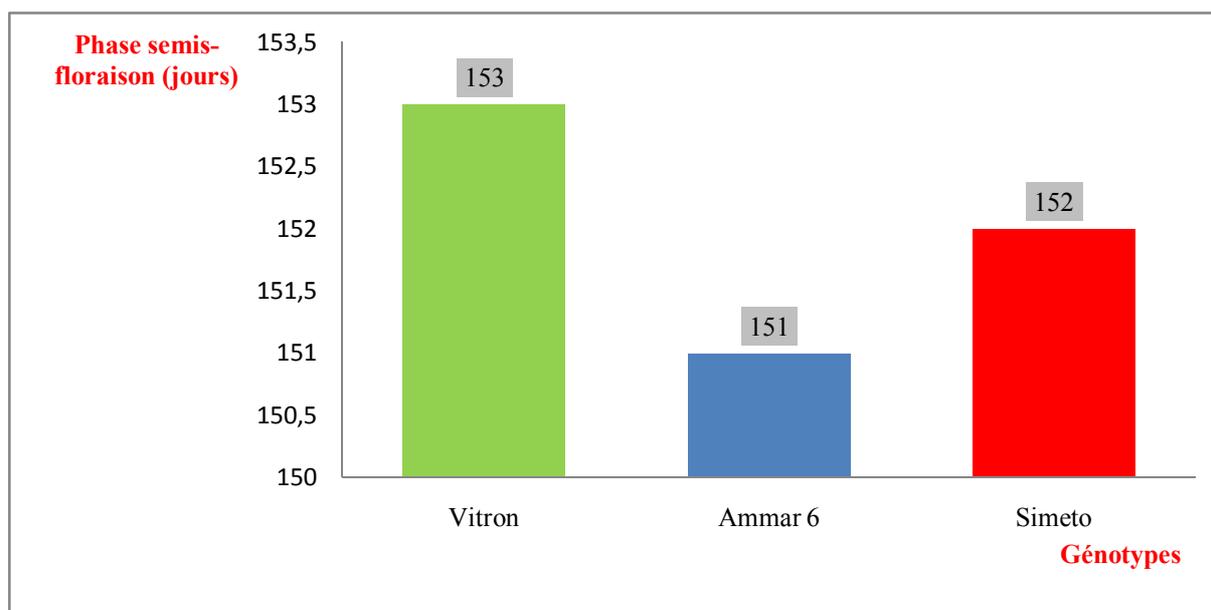


Fig 37 : Variations de la phase semis-floraison de trois géotypes de blé dur.

Il en ressort que la phénologie, au regard des résultats obtenus, du moins pour cette année, n'est pas ou peu discriminante entre les variétés et ne peut être prise comme trait déterminant entrant dans le cadre de sélection.

16- Résultat du phénotypage en F1

Après avoir exploré et quantifié les réponses physiologiques et biochimiques des trois variétés de blé dur, vis-à-vis d'un stress hydrique, imposé à deux niveaux de sévérité, une lecture complémentaire a été faite et a concerné des populations F1, issus d'hybridations (croisements simples entre deux lignées pures).

Cet aspect morphométrique a été exclusivement réalisé au champ. Cette approche devait, dans une suite logique, comparer des parents avec leur F1 respectives.

L'objet était de voir si parmi les traits étudiés, il y en avait qui étaient susceptibles de retenir notre attention par leur mode de transmission, sachant que le point de vue de l'améliorateur est basé beaucoup plus sur le transfert de gènes désirables dans les géotypes.

Ce volet porte sur des traits qui sont directement liés à la tolérance au stress hydrique chez le blé dur. Parmi ces traits, la tige, la morphologie foliaire furent sélectionnées. Les principaux résultats auxquels nous avons abouti au terme de cette recherche, peuvent être ainsi synthétisés :

Tableau 34 : résultats sur l'effet de l'hétérosis en génération F1 :

| croisements | | traits | tige | Type de feuille | Texture feuille | Hauteur (cm) | Nbre d'épillets/épi | PMG | Surface foliaire |
|---------------|--------|-------------|---------------|-----------------|-----------------------|--------------|---------------------|-----|------------------|
| Ammar6xVitron | Ammar6 | Semi pleine | érigée | | Cireuse ++ | 102 | 22 | 57 | 11.68 |
| | F1 | creuse | érigée | | Cireuse ++ | 113 | 24 | 30 | 13.28 |
| | Vitron | Semi pleine | pendante | | Cireuse + | 94 | 24 | 58 | 12.56 |
| SimetoxAmmar6 | Siemto | Semi pleine | Semi pendante | | Cireuse - Glausc - | 105 | 26 | 64 | 14.5 |
| | F1 | creuse | érigée | | Cireuse ++ | 115 | 24 | 32 | 12.63 |
| | Ammar6 | Semi pleine | érigée | | Cireuse ++ | 109 | 24 | 57 | 11.68 |
| VitronxAmmar6 | Vitron | Semi pleine | pendante | | Cireuse + | 99 | 24 | 58 | 12.56 |
| | F1 | Semi pleine | érigée | | Cireuse ++ | 108 | 26 | 31 | 15.56 |
| | Ammar6 | Semi pleine | érigée | | Cireuse ++ | 98 | 26 | 57 | 11.68 |

16-1-Tige :

Qu'elle fût pleine, semi- pleine ou creuse, le type de tige a un rôle à jouer dans la robustesse des plantes. Si nous regardons avec acuité les résultats, nous pouvons conclure qu'il n'y a pas aucune corrélation évidente quant à son mode d'héritabilité et encore moins une linéarité affichée dans les générations F1. Ceci signifie que l'épaisseur de la tige est de moindre importance dans le cas précis de cette étude.

La variété Ammar 6 a une tige semi- pleine ; la variété Vitron a une tige semi- pleine ; la F1 issue de leur croisement donne une tige creuse.

Le même résultat est obtenu avec le croisement Ammar 6 X Simeto, où les deux variétés ont des tiges semi- pleines et dont la F1 a une tige creuse. Par contre le croisement réciproque Vitron X Ammar 6 donne une F1 semi- pleine semblable aux deux parents. Il y aurait probablement un effet cytoplasmique maternel qui a favorisé une telle héritabilité.

16-2-Type de feuille :

Il est suffisamment connu dans la bibliographie que la feuille érigée est un caractère désirable, recherché dans les conditions de déficit hydrique. Les résultats obtenus semblent être d'un intérêt certain.

En croisant le génotype Ammar 6 qui a des feuilles érigées, avec Vitron qui a des feuilles tombantes, nous obtenons une F1 avec des feuilles érigées. Ainsi, ce caractère peut être aisément transmis et transféré chez les descendants. En procédant de la sorte, il est alors possible d'améliorer des génotypes en ajoutant ce trait.

Ceci est encore vrai en croisant Ammar6 X Simeto. Nous obtenons toujours des feuilles érigées en F1 ; l'héritabilité de ce trait venant certainement du génotype Ammar6. Ce caractère semble de toute évidence être dominant et transmissible aisément aux F. Nous pouvons émettre l'hypothèse que ce caractère serait vraisemblablement monogénique.

16-3-Texture foliaire :

Clarke (1987) rapporte que les dépositions de cires épicuticulaires, produisent de la glaucescence sur la surface des feuilles et apparaissent comme étant une caractéristique chez plusieurs espèces, pour la résistance à la sécheresse ; le blé en faisant partie.

Waxiness (cire), qui est une caractéristique spécifique chez Ammar6, est aussi présente en F1. Ce trait est tellement si important et utile dans la mesure où il renforce la tolérance au déficit hydrique en protégeant les tissus superficiels des feuilles. Pour ce trait, Ammar6 semble être un bon donneur.

16-4-Surface foliaire :

Les résultats consignés dans cette étude indiquent que l'hybride F1, se comporte positivement. Dans les trois croisements effectués, la F1 a eu des feuilles plus larges, avec une plus grande surface foliaire. Cette héritabilité transgressive contribuera certainement à une élaboration de pigments énergétiques en photosynthétats, qui en retour, impactera positivement le rendement en grains.

16-5-Hauteur de la plante :

Dans les trois croisements qui ont été réalisés (Ammar6 X Vitron, Simeto X Ammar6, Vitron X Ammar6, croisements réciproque), la hauteur des plantes est apparue comme étant un attribut de transgressivité positive, en ce sens, que les descendants F1 ont tous une hauteur de tige supérieure aux parents respectifs. Cette transgressivité peut traduire que les F1 se comportent comme ayant une meilleure vigueur, celle de la vigueur hybride, due notamment à son état entièrement hétérozygote pour ce caractère.

Souvent, cette transgressivité est perdue dans les prochaines générations à cause même de la nature de l'espèce ; le blé n'étant pas une allogame. Toutefois, cela permet de nous donner

une idée sur la manière dont cette transgressivité pouvait être maintenue par voie biotechnologique.

16-6-Nombre d'épillets/épi :

A la lumière des résultats obtenus, le nombre d'épillets/épi ne semble pas être une valeur discriminante entre les parents et leurs F1 respectives.

En effet l'analyse de variance (AV1) et l'analyse de Tukey ont montré que ces résultats étaient non significatifs.

16-7-PMG :

Concernant ce paramètre, la F1 a eu un poids inférieur aux parents respectifs. Ceci est quelque peu attendu dès lors que la graine F1 est le résultat d'une fertilisation d'un organe haploïde femelle (l'ovule) avec un organe haploïde male (grain de pollen). Celle-ci ne se fait qu'à la phase phénologique floraison. Les graines ont eu à ce titre un cycle biologique de vie relativement court pour accumuler des réserves nutritives conséquentes (réserves amylacées et protéiques) pour pouvoir concurrencer les graines mères issues des parents.

Comparaison des valeurs moyennes de la hauteur, du nombre d'épillets entre les différentes variétés, à l'aide de l'analyse de la variance à 1 critère de classification.

Tableau 35 : résultats de l'AV1 pour les variétés Ammar6, F1 et Vitron.

| Variables | source de Variation | ddl | SCE | CM | Fobs | P |
|-------------------|---------------------|-----|--------|--------|-------|----------|
| Hauteur | variétés | 2 | 548.22 | 214.11 | 13.63 | 0.006** |
| Nombre D'épillets | variétés | 2 | 12.7 | 6.33 | 5.18 | 0.059 NS |

N.B : ** : existe des différences hautement significatives entre les 3 variétés

N.S : n'existe pas de différences significatives entre les 3 variétés

Tableau 36 : résultats de l'AV1 pour les variétés Simeto, F1 et Ammar6

| variables | source de Variation | ddl | SCE | CM | Fobs | P |
|-------------------|---------------------|-----|--------|-------|-------|----------|
| Hauteur | variétés | 2 | 176.89 | 88.44 | 11.21 | 0.009** |
| Nombre D'épillets | variétés | 2 | 3.50 | 1.78 | 0.67 | 0.548 NS |

Tableau 37 : résultats de l'AV1 pour les variétés Vitron, F1 et Ammar6

| Variables | source de variation | ddl | SCE | CM | Fobs | P |
|-------------------|---------------------|-----|--------|-------|-------|----------|
| Hauteur | variétés | 2 | 176.89 | 88.44 | 11.21 | 0.009** |
| Nombre d'épillets | variétés | 2 | 3.50 | 1.78 | 0.67 | 0.548 NS |

Après la comparaison des moyennes par l'AV1, nous avons essayé de rechercher les groupes de variétés homogènes pour chaque variable à l'aide du test de Tukey.

Tableau 38 : résultats du test de Tukey pour les variétés Ammar6, F1 et Vitron.

| Variables | moyennes et groupes de variétés homogènes | | | nombre de groupes |
|-------------------|---|--------|-------|-------------------|
| Hauteur | Vitron | Ammar6 | F1 | 02 |
| | 94.0 | 101.7 | 113.0 | |
| Nombre D'épillets | Vitron | Ammar6 | F1 | 01 |

Tableau 39 : résultats du test de Tukey pour les variétés Simeto, F1 et Ammar6

| Variables | moyennes et groupes de variétés homogènes | | | nombre de groupes |
|-------------------|--|--------|--------|-------------------|
| | | | | |
| Hauteur | Simeto | Ammar6 | F1 | 01 |
| | 105.0 | 109.3 | 115.3 | |
| <hr/> | | | | |
| Hauteur | F1 | Ammar6 | Simeto | 01 |
| Nombre d'épillets | 23.7 | 23.7 | 26.3 | |
| <hr/> | | | | |

Tableau 40 : résultats du test de Tukey pour les variétés Vitron, F1 et Ammar6

| Variables | moyennes et groupes de variétés homogènes | | | nombre de groupes |
|------------|--|--------|--------|-------------------|
| | | | | |
| Hauteur | Ammar6 | Vitron | F1 | 02 |
| | 97.7 | 99.0 | 107.0 | |
| <hr/> | | | | |
| Nombre | Vitron | F1 | Ammar6 | 01 |
| D'épillets | 24.3 | 25.7 | 25.7 | |
| <hr/> | | | | |

17-Résultats du phénotypage en F2 :

Dans le présent travail, il s'agissait en fait de vérifier si, pour les quelques traits étudiés, il y a eu une transmission de ces caractères des parents vers la descendance F2. Les principaux caractères ou marqueurs de tolérance au stress hydrique qui ont été sélectionnés furent ceux ayant trait exclusivement au type de feuille, la texture foliaire, le type de tige et le nombre d'épillets/ épi.

Des croisements simples furent effectués pour obtenir des générations F1. A partir de ces F1, des F2 furent obtenus par autofécondation et constituèrent l'objet de notre recherche.

Tableau 41 : résultats sur l'effet d'héritabilité en génération F2 :

| Variétés | | traits | Type de feuille (Erigée-pendante- semi érigée) | Texture foliaire (Cireuse – glaucescence) | Tige (creuse – semi-creuse) | Nombre d'épillets/épi |
|-----------------------|--------|--------|--|---|--------------------------------|--------------------------|
| Ammar6 X Vitron | Ammar6 | | Erigée | Cireuse ++ | Semi-creuse | 20 |
| | F2 | | Erigée | Cireuse | Semi-creuse | 18 |
| | Vitron | | pendante | Cireuse + | Semi-creuse | 21 |
| Vitronx Ammar6 | Vitron | | pendante | Cireuse+ | Semi-creuse | 21 |
| | F2 | | Erigée | Cireuse | Semi-creuse | 21 |
| | Ammar6 | | Erigée | Cireuse++ | Semi-creuse | 20 |
| Simetox Ammar6 | Simeto | | Semi-Erigée | Glaucescence - Cireuse- | Semi-creuse | 20 |
| | F2 | | Erigée | cireuse | Semi-creuse | 24 |
| | Ammar6 | | Erigée | Cireuse++ | Semi-creuse | 20 |

17-1-Type de tige:

Ce paramètre est considéré comme un indicateur de la robustesse de la plante. Des tiges peuvent être tantôt creuses tantôt pleines, tantôt semi- pleines. Dans notre étude, les F2 ont suivi les parents, qu'il s'agisse du croisement Ammar 6X Vitron, Vitron X Ammar 6 (croisement réciproque) ou SimetoX Ammar 6. Le type de tige semi- pleine est ressorti dans la population ségrégant F2. Il semblerait qu'il y ait une dominance de ce caractère puisque la F2 a des tiges phénotypiquement identiques à celles des parents dont est issu le croisement.

Ce paramètre peut être un indicateur phénotypique utile en sélection selon les cas de figure. La robustesse de la tige peut contribuer, aider la plante à mieux supporter le poids des tiges, surtout lorsque celles-ci sont porteuses d'épis fertiles, donc naturellement plus lourds.

Un autre aspect ne figure pas dans la présente étude est la hauteur de la tige. Nombreux sont les améliorateurs qui sélectionnent des génotypes sur la base de la hauteur de la tige. Ce critère donne une idée de la résistance de la plante, surtout lorsqu'elle est corrélée au critère type de tige (creuse- pleine, semi pleine).

Une plante haute mais dont la tige est pleine ou semi-pleine, peut mieux supporter le poids des épis mais pas que. Dans certaines régions, les vents dominants peuvent constituer un problème pour la plante en ce sens qu'il y a un phénomène appelé « verse mécanique » où les vents persistants font tomber les plantes entières. Ceci a pour conséquence une difficulté à récolter comme il y a aussi cette possibilité quasi- certaine que des maladies, cryptogamiques notamment, se déclarent et affectent les tiges, les épis, les feuilles et les graines avant récolte.

17-2-Type de feuille :

Le caractère type de feuille a souvent été considéré comme un marqueur phénotypique fiable dans l'expression de tolérance au stress hydrique chez le blé dur. En effet, plus la feuille est érigée, c'est-à-dire non pendante, plus elle permet la réflexion de la lumière et de la chaleur ; de même, une bonne partie de la surface n'est pas exposée à ces deux facteurs. De ce fait, un génotype qui est doté de feuilles érigées (erect leaf) serait en mesure de mieux gérer son évapotranspiration cuticulaire.

Ainsi pour le croisement Ammar6 X Vitron :

La F2 semble avoir hérité le caractère « erect leaf » de la variété Ammar 6. Vitron étant une variété à feuilles pendantes (flag leaf) l'obtention de la population ségrégant F2 avec des feuilles érigées ne peut être qu'une transmission du trait à partir de Ammar 6.

Cette héritabilité a été déjà observée en F1 et c'est à partir de celles-ci que les F2 ont manifesté cette caractéristique « erect leaf ».

Pour le croisement Vitron X Ammar 6 (croisement réciproque), il a été réalisé en changeant les parents respectifs de statut de mâle à femelle et vice versa. L'utilité d'un tel croisement réside dans le fait d'évaluer l'effet cytoplasmique, appelé aussi effet maternel. Un génotype utilisé comme femelle au lieu de mâle peut donner lieu à des variations génotypiques différentes dans les populations ségrégantes F1 et F2. Dans ce croisement, le caractère « erect leaf » est encore transmis et, à l'évidence, son héritabilité n'a pu se faire que grâce au génotype Ammar 6. Cette apparition en F2 du caractère « erect leaf » dénote d'une bonne transmission du caractère. Le fait que nous l'ayons observé en F2 et dans un travail antérieur en F1, signifie que Ammar 6 est un génotype doté d'une aptitude à transmettre ce caractère spécifique. On dit souvent qu'un caractère qui s'observe rapidement dans les toutes premières générations F1 et F2, pourrait suggérer que le trait est facilement héritable et par conséquent à déterminisme monogénique. Cela n'est qu'une hypothèse dont nous ne nous prévalons pas d'en faire un acquis.

Concernant le croisement Simeto X Ammar 6, la variété Simeto a un type de feuilles « semi- pendantes » ; la variété Ammar 6 des feuilles érigées. La F2 a eu des feuilles érigées. Encore une fois, ce caractère « erect leaf » provient bien de la variété Ammar 6 qui en détient le type « erect leaf ».

Ainsi, au terme de ce travail et à la lumière de ces résultats, la variété Ammar 6 semble être un bon donneur pour ce trait qui est à la fois utile et déterminant tout autant pour la tolérance au stress hydrique.

17-3-Texture des feuilles :

Le dépôt de cire sur les feuilles (waxiness) est un trait important dans la tolérance au stress hydrique. En effet, cette particularité phénotypique va permettre une meilleure gestion de l'eau de la plante. Le dépôt de cire va minimiser les pertes d'eau qui seraient causées par l'évapotranspiration.

Les résultats obtenus montrent que les trois génotypes utilisés avaient quelques nuances quant au dépôt de cire, avec une préférence pour Ammar 6 qui a un « waxiness » prononcé.

Dans les trois cas (les trois croisements), les plantes F2 ont affiché le caractère « waxy ». C'est probablement au terme d'une action cumulative de Ammar 6 (waxy ++), de Vitron (waxy +) et de Simeto (waxy -) que la génération F2 s'est trouvée un peu dans une moyenne des trois variétés. La F2 fut dans les trois cas « cireuse ».

Pour le sélectionneur, il lui suffit juste que le caractère apparaisse pour l'intégrer dans son programme d'amélioration génétique, comme un trait phénotypique « améliorant ».

17-4-Nombre d'épillets/ épi :

Le nombre d'épillets/ épi traduit la fertilité de l'épi ; donc du rendement en grains. Même si souvent, il y a eu selon de nombreux chercheurs, des corrélations inverses ou négatives entre le nombre de grains et le poids des grains (en termes de densité). Ce mécanisme est purement physiologique car il dépend de la nutrition azotée ajoutée à la quantité d'apport d'eau (pluie dans le cas d'une conduite de blé sous un régime pluvial).

Toujours est-il que le nombre d'épillets/épi est un bon indicateur du rendement potentiel tout au moins.

Les résultats obtenus montrent que l'héritabilité du caractère « nombre d'épillets/épi » semble être tantôt co-dominante (Ammar 6 x Vitron), tantôt dominante (croisement réciproque Vitron X Ammar 6), tantôt transgressive pour le croisement Simeto X Ammar6.

Avec une moyenne de 25 épillets /épi en F2, par rapport aux parents (Simeto avec 20 épillets/épi, Ammar6 avec 20 épillets/épi.

Cette expression à travers les générations F2 est ainsi d'une utilité extrême pour la sélection de géotypes performants.

CONCLUSION

ET PERSPECTIVES

Conclusion générale :

L'amélioration de la résistance des céréales au déficit hydrique à travers l'utilisation de traits physiologiques et morphologiques est un processus qui consomme beaucoup de temps. Les traits doivent être entièrement évalués en termes d'héritabilité et d'interrelation au rendement sous des conditions environnementales diverses, avant de développer des stratégies d'amélioration génétique.

Compte tenu du fait qu'il y a tellement de facteurs, aussi bien chez la plante que dans son environnement, impliqués dans la réponse au déficit hydrique, le progrès génétique ne peut qu'être lent.

Le criblage du germoplasme, la préservation et l'échange de matériel génétique jouent un rôle important et continuent d'être d'une grande importance dans le futur, en tant qu'efforts pour améliorer la résistance des céréales au déficit hydrique.

Ainsi, au regard des résultats obtenus, il serait opportun d'insister sur les traits phénotypiques des variétés. Les traits morphologiques, connus comme étant des traits d'adaptation au stress hydrique, certains peuvent être transférés dans des variétés sensibles afin d'améliorer leur comportement lors du stress.

L'améliorateur a besoin de connaître comment des traits peuvent être hérités. Par ce faire, certains géotypes pourront ainsi surmonter les conditions drastiques environnementales ; le stress hydrique en particulier.

A travers ces résultats, qui donnent un aperçu global sur les potentialités génétiques des cultivars, il conviendrait aussi de un choix entre une stratégie adaptative, l'une étant une stratégie analytique, dite trait par trait, l'autre stratégie synthétique ou multi caractère, où plusieurs traits seront pris ensemble en tant que critères de sélection.

La présente contribution aura au moins permis de discriminer et en même temps d'évaluer l'héritabilité de quelques traits morphologiques. Cette approche nous aide à obtenir un « type idéal », c'est-à-dire un géotype capable de rassembler plus d'un trait d'adaptation.

Des expressions simultanées de la tolérance au stress hydrique chez le blé peuvent résulter soit à partir de réponses physiologiques, biochimiques et phénotypiques.

Ainsi, un génotype qui peut surmonter des environnements sub- optimaux, serait celui qui contiendrait certaines de ces expressions qui serviraient d'accommodation temporaire et de tolérance à des degrés différents de sévérité du stress hydrique.

Le phénotypage constituerait ainsi un segment du processus de sélection chez le blé, en ce sens que le rendement en grains est le produit final de toutes ces interactions entre les traits morpho-physiologiques et biochimiques.

Si nous jetons un œil en particulier sur le génotype Ammar 6, ce dernier a le rendement en grain le plus élevé (55.28qx/ha), en comparaison à Simeto (48 qx/ha) ou à Vitron (45.05 qx/ha).

Sachant que le rendement est une construction obtenue grâce à plusieurs composantes, autres que le rendement lui-même, Ammar 6 est de notre point de vue, un idéotype. Il rassemble plus d'un trait désirable, contribuant à l'élaboration finale en grains. Enfin, les autres traits auront aussi été d'une importance tout aussi égale pour un rendement élevé.

L'idéotype dont il est question (Ammar 6) jouit des performances et aptitudes suivantes :

- Au plan phénotypage, il a des feuilles érigées et un dépôt de cire (waxiness) très prononcé.
- Au plan physiologique, il a un RWL faible, ce qui lui confère une faible perte d'eau pendant la période du stress.
- Au plan osmorégulation : il a une accumulation progressive en proline, en protéines totales et en sucres solubles
- Au plan de l'héritabilité des caractères phénotypiques de tolérance au stress hydrique : une texture foliaire en F1 (waxiness) provenant de Ammar6 ; un type de feuille en F1 (érigées, provenant de Ammar6)
- Une transgressivité du caractère hauteur de la plante F1 (113cm pour la F1 Ammar 6 x Vitron et 115cm pour la F1 provenant du croisement SimetoX Ammar6).
- En F2 : le caractère « waxy » est transmis en F2 beaucoup plus par le génotype Ammar 6.
- Le caractère « erect leaf » est également transmis en F2 par le génotype Ammar 6.

Conclusion générale

- Le nombre d'épillets/épi est transmis de manière variable selon le type de croisement utilisé, conduisant à une héritabilité tantôt co-dominante, tantôt dominante tantôt transgressive dans le cas du croisement Simeto X Ammar 6.

Ainsi, le diagramme suivant pourrait être proposé en tant que modèle physiologique de tolérance au stress hydrique :

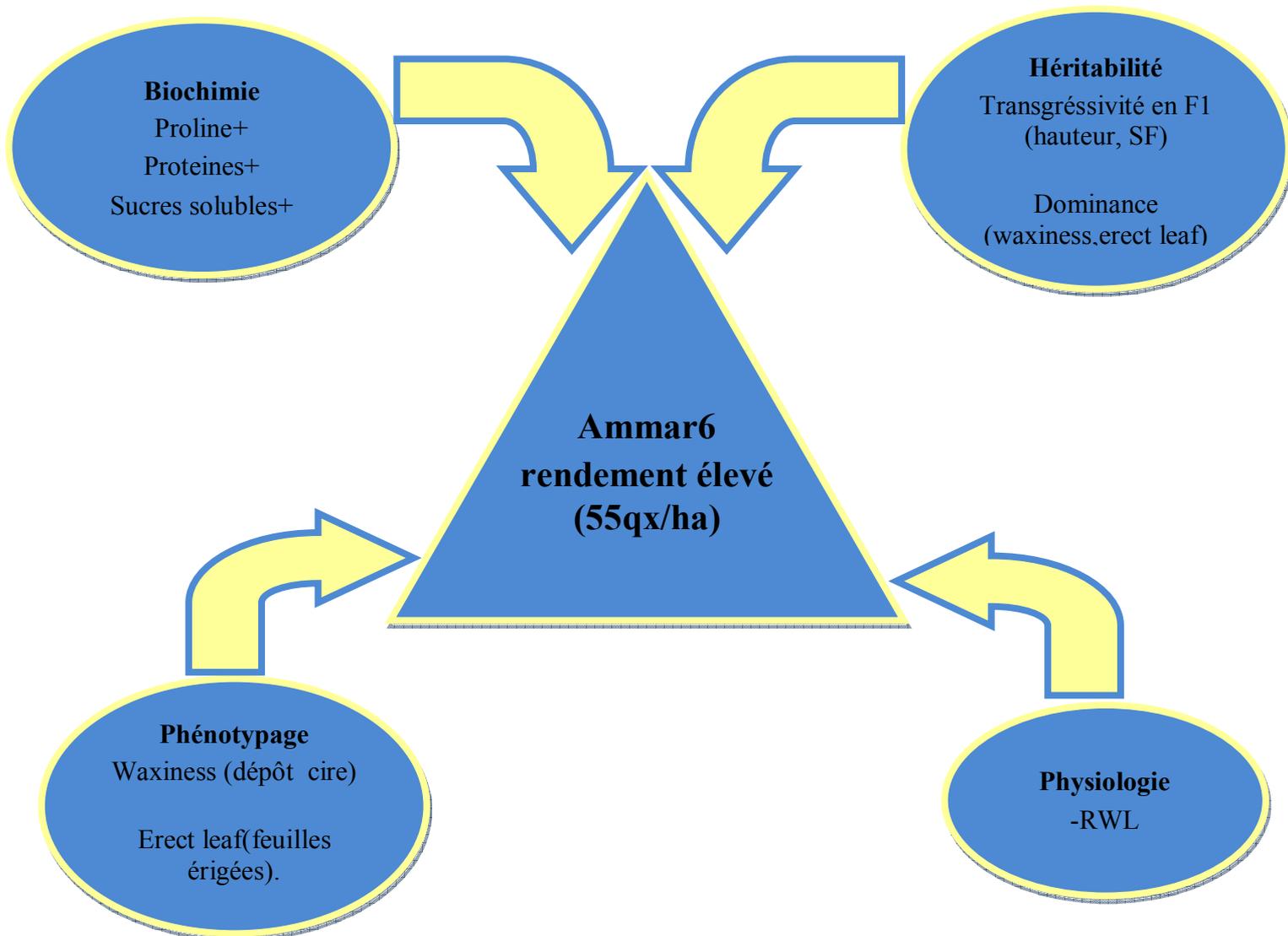


Fig 38 : proposition d'un idéotype pour la tolérance au stress hydrique

Perspectives

S'il est vrai que le phénotypage demeure une voie obligée dans l'amélioration génétique et la sélection du blé dur, il n'en demeure pas moins vrai aussi que le recours à d'autres outils scientifiques puisse être recommandé. Les marqueurs génétiques, utilisant les voies biotechnologiques peuvent être d'un grand apport dans la compréhension des mécanismes adaptatifs au stress hydrique.

- Un travail sur quelques marqueurs de tolérance au stress hydrique est à encourager.
- Valoriser le présent travail par l'utilisation d'un nombre plus important de variétés
- Passer à une étude complémentaire sur l'interaction Génotype – Milieu en menant un essai sur champ dans plusieurs étages bioclimatiques.
- Continuer l'approche du phénotypage en utilisant les croisements zygotiques en vue d'incorporer les traits désirables.
- Aller vers des sélections au sein de populations ségréantes avancées pour l'obtention de lignées prometteuses.
- Confectionner progressivement un germoplasme où figureraient à la fois des lignées fixées et des populations en ségrégations.
- Continuer vers la sélection d'ideotypes/ étage bioclimatique.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- ABBASSENE F., BOUZERZOUR H., HACHEMI L. 1998. Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum Desf.*) en zone aride d'altitude. *Annal. Agron. INA*, 18 :24-36 p.
- 2- ABDELGUERFI A., LAOUAR M., (2000). Les ressources génétiques des blés en Algérie. Passé, présent et avenir. Actes du premier Symposium International sur la filière de blé. Enjeux et Stratégies. Office Algérien International sur la filière de blé. Alger, Algérie.7-9 Février. 133-148 p.
- 3- Abdul Baki , A.A. 1969. Relationship of glucose metabolism in germinability and vigor in barley and wheat seeds. *Crop Science*, 9: pp 732-737.
- 4- ACEVEDO E., 1991B. Morph-physiological traits of adaptation of cereals to Mediterranean environments. In Improvement and management of winter cereals under temperature, drought and salinity stress (ACEVEDO E., FERERES E., GIMENEZ C. and SRIVASTAVA J.P. eds). Edit. Proceedings of the ICARDA-INIA symposium, Cordoba Spain, pp 85-96.
- 5- ACHIT M.M., KETATA H., 1986.- Breeding strategy for improving durum wheat in mediterranean rainfed areas. Proceeding of 4 th International Wheat Conference, 2 - 9 may, Rabat, Morroco.
- 6- ACUNA BOTWRIGHT T.L., HE X., WADE L.J. 2012. Temporal variation in root penetration ability of wheat genotypes through thin wax layers in contrasting water regimes and in the field. *Field Crops Research*. Vol. 138, pp. 1–10.
- 7- AHMADI.H. ET BAJELAN.B. 2008. Heritability of drought tolerance in wheat. *American Eurasian J. Agric. Environ. Sci*, Vol 3, pp 632-635.
- 8- AIT KAKI Y.1993. Contribution à l'étude des mécanismes morpho physiologiques de tolérance au stress hydrique sur 05 variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*). Mémoire Magister. Univ. Annaba, 116 p.
- 9- AL HAKIMI A., 1992. Evolution de la variabilité génétique des caractères d'adaptation :Ji la sécheresse chez les espèces primitives (sauvages et cultivées) de blé tétraploïde. Thèse D.E.A., Montpellier, 166 p.
- 10- ALI DIB T. 1990. Contribution à l'étude de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur. Etude de la diversité des caractères phénologiques et morphologiques d'adaptation. Thèse de Doctorat, Montpellier, 180p.
- 11- AOSA. Rules for testing seeds. Association of official seed analysts. 1978. *Journal of seed technology*.
- 12- ARAUS J L, SANCHEZ C AND LLORENC, CABRERA-BOSQUET., 2010. Is heterosis in maize mediated through better water use? *New Phytologist*, vol. 187, pp. 392–406.
- 13- ASHRAF M. ET T. MC. NEILLY. 2004. Slinity tolerancein brassica oil seeds.*Reviews in Plant Sciences*, 23, 2, 157- 174.
- 14- AYED S., A.OTHMANI, M. MRABIT, N.RASSAA, A. MBARKI, M. REZGUI, M. BENYOUNES. 2017. Selection of morpho-physiological traits associated with terminal drought stress tolerance in durum wheat genotypes.. *Journal of New Sciences*, Vol.11 article 2.

- 15- BAGGA A.K., RUWAL K.N. & ASANA R.D. 1970. Comparison of some Indian and semi-dwarf Mexican wheat to unirrigated cultivation. *Indian J. agric. Sci.* 40: 421- 427 p.
- 16- BAHLOULI, F., BOUZERZOUR, H., BENMAHAMMED, A. (2005). Selection of stable and high yielding cultivar of durum wheat under semi-arid condition. *Pakistan journal of Agronomy*, 4: 360-365.
- 17- BAJJI, M. (1999). Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur : caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variants somaclonaux sélectionnés In vitro. Thèse de doctorat. Univ Louvain.
- 18- BALDY, C.H. (1992). Effet du climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en méditerranée occidentale. Dans: tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale, Montpellier. Les colloques de l'INRA, 64: 83-100.
- 19- BAMOUN A. 1993. Induction de mutations morphologiques chez le blé et l'orge. Utilisation pour l'amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse. Tolérance à la sécheresse des céréales en zones méditerranéennes. Diversité et amélioration variétale, Montpellier, France, INRA Edition.
- 20- BELAID D. (1987). Aspects de la céréaliculture Algérienne. Edition OPU. Alger, 207 p.
- 21- BELAID, D. 1996. Aspects de la céréaliculture algérienne. INES. D'Agronomie, Batna. 187p.
- 22- BELHASSEN E., THIS D., MONNEVEUX P, 1995." L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. Cahier d'Agriculture t. 251 - 261.
- 23- BELKHARCHOUCHE, H. A BENBELKACEM, H BOUZERZOUR ET A. BENMAHAMMED. 2015. Flag leaf and awns ablation and spike shading effects on spike yield and kernel weight of durum wheat under rainfed conditions. *Adv. Environ. Biol.* 9: 184-191
- 24- BELLINGER Y., BENSAOUD A. & LARHER F. 1991. Physiological significance of proline accumulation, a trait of use to breeding for tress tolerance. Colloque Physiology-Breeding of winter Cereals for Stressed Mediterranean Environments, Montpellier (France). *Les colloques* .55. (éd). Inra. Paris.
- 25- BENABDALLAH N ET BENSALÉM M., 1993. Paramètres morphophysiques de selection pour la résistance à la sécheresse des céréales. In tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale. Tolérance à la sécheresse des céréales en zones méditerranéennes. Diversité et amélioration variétale (MONNEVEUX P. et BENSALÉM M.eds.) Les colloques64INRApp.173-190.
- 26- BENBLIDIA M. 2011. Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et approche économique de la gestion de la demande en eau : Rapport national de l'Algérie. Etude réalisée pour le Plan Bleu.
- 27- BENLARIBI M, 1990. Adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* DEesf.), étude des caractères morphologiques et physiologiques. Thèse de Doctorat. UnJv. Constantine. 164 p

- 28- BENMAHAMMED, A., NOUAR, H., HADDAD, L., LAALA, Z., OULMI, A., &BOUZERZOUR, H. (2010). Analyse de la stabilité des performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. *Biotechnologie. Agron. Soc. Environ*, 14 : 177-186.
- 29- BENNETT D, IZANLOO A, EDWARDS J, KUCHEL H, CHALMERS K. 2012. Identification of novel quantitative trait loci for days to ear emergence and flag leaf glaucousness in a bread wheat (*Triticum aestivum* L.) population adapted to southern Australian conditions. *Theor Appl Genet* 124, pp. 697–711.
- 30- BENSARI M., CALME S.J. & VIALA G. 1990. Répartition du carbone fixé par photosynthèse entre l'amidon et le saccharose dans la feuille de soja : influence d'un déficit hydrique : *Plant phisiol. Biochimie*. 28: 113-124 p.
- 31- BENSEDDIK, B., KHELLOUFI, B. (2000). Impact du risqué climatique sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride : approche éco-physiologique. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 11 (1) :45 -51.
- 32- BERGARECHE C., LLUSIA J., FEBRERO A., BORT J. & ARAUS J.L. 1993. Effect of water stress on proline and nitrate content of barley relationships with osmotical potential, carbon isotope ratio and grain yield. Colloque Diversité génétique et amélioration variétale. Montpellier (France). *Les colloques*.64. (ed). *Inra*. Paris.
- 33- BLUM A. TUBEROSA R. 2018. Dehydration survival of crop plants and its measurement. *J. Exp.Bot.* 69 (5) : 975- 981.
- 34- BLUM A. 1996.Crop responses to drought and the interpretation of adaptation plant growth regulation. 20: 135 - 148 p.
- 35- BLUM A. 2005. Mitigation of drought stress by crop management.
- 36- BONHOMME L., VALOT B., TARDIEU F., ZIVY M. 2012. Phosphoproteome Dynamics Upon Changes in Plant Water Status Reveal Early Events Associated With Rapid Growth Adjustment in Maize.
- 37- BONJEAN A ET PICARD E. 1990. Les céréales à paille origine, historique, économie et sélection. Eds Nathan, 235 p. science of Taibah university, vol. 3, pp. 39-48.
- 38- BORRAS L., VITANTANIO M. 2018. Maize reproductive development and kernel set under limited plant growth environments.*J. Exp. Bot.* 69(13) 3235-3243.
- 39- BOUCHEMAL K; BOULDJAJ R; BELBEKRI M.N; YKHLEF N.ET DJEKOUN A. 2018. Pigments photosynthétiques, enzymes antioxydantes et potentiel osmotique foliaire de dix génotypes de blé dur: effet du stress hydrique. *Erudit- Phytoprotection*. Vol 98, n° 1.p. 1-50
- 40- BOUSBA R., YKHLEF N. & DJEKOUN A. 2009. Water use efficiency and flag leaf photosynthetic in response to water deficit of durum wheat (*Trticum durum* Desf).*World Journal of Agricultural Sciences* 5. 5: 609 -616 p.
- 41- BOUTRAA T, AKHKHA A, AL-SHOAIBI A; ALHEJELI A. 2010. Effect of water stress on growth and water use efficiency (WUE) of some wheat cultivars (*Triticum durum*) grown in Saudi Arabia. *Journal for*
- 42- BOUZOUBAÂ. Z., EL MOUSADIK. A ET BENLAHCEN Y. 2006 - Variation in amounts of epicuticular waxes on leaves of *argania spinosa* (L). *Skeels. Acta Bot. Gallica*, Vol. 153(2), pp. 167-177.

- 43- BRADFORD M., 1976. A rapid and sensitive method for quantification of microorganisms quantities of protein utilising the principles of protein by binding. *Annal. Biochem.* 72, 248-254.
- 44- BRINIS A. ET BELKHODJA M. 2015. Effet de la salinité sur quelques traits physiologiques et biochimiques chez *Atriplex halimus* L. *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 31, pp.42 -51.
- 45- CAI H., BISWAS D.K., SHANG A.Q., ZHAO L.J. & LI W.D. 2007. Photosynthetic response to water stress and changes in metabolites in *Jasminum sambac*. *PHOTOSYNTHETICA* 45. 4: 503 - 509 p.
- 46- CAMPALANS A.; MESSEGUER R., GODAY A. & PAGÈS M. 1999. Plant responses to drought, from ABA signal transduction events to the action of the induced proteins. *Plant Physiol. Biochem.* 37. 5: 327 - 340 p.
- 47- CECCARELLI, S., 2010. Drought and Drought Resistance. *Encyclopedia of Biotechnology in Agriculture and Food*, vol. 1, pp. 205–207.
- 48- CECCARELLI, S., M.M. NACHIT; G.O.FERRERA, M.S.MEKNI, M.TAHIR, VANLEUR AND J.P.SRIVASTAVA.1987. Breeding for strategies for improving cereal yield under drought. *Drought tolerance in winter cereals*. Edited by J.P. Srivastave, E. Porceddu ? e ; ACEVEDO and S.Varma.Published by Wiley and Sons Ltd. P 101- 114.
- 49- CERNUSAK LA, HUTLEY LB, BERINGER J, HOLTUM JAM, TURNER BL. 2011 - Photosynthetic physiology of eucalypts along a sub-continental rainfall gradient in northern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* Vol. 151, pp. 1462–1470.
- 50- CHAHBAR S ET M. BELKHODJA. 2016. Water deficit effects on osmolyts traits in five durum wheat varieties (*Triticum durum*) .*Int. J. Innovation App. Stud.* 17 : 757-767
- 51- CHAHBAR.S .2016. These. Petcu E., Schitea M., Cîrstea V.E. 2009 - The effect of water stress on cuticular transpiration and its association with alfalfa yield. National Agricultural Research and Development Institute Fundulea, 915200 Fundulea, Calarasi County, Romania Number 26/2009.
- 52- CHAIB G., M. BENLARIBI ET T.HAZOUNE. 2015. Accumulation d'osmoticums chez le blé dur sous stress hydrique. *European Scientific Journal*. Vol. 11 n° 24.
- 53- CHENU, K., COOPER, M., HAMMER, G.L., MATHEWS, K.L., DRECCER, M.F., CHAPMAN, S.C., 201. Environment characterization as an aid to wheat improvement: interpreting genotype–environment interactions by modelling water-deficit patterns in North-Eastern Australia. *Journal of Experimental Botany* vol. 62, pp.1743–1755.
- 54- CHIKHI A. C., (1992). Situation de la céréaliculture et perspectives de l'irrigation de complément du blé au niveau de la Mitidja. Thèse Ing. INA. El Harrach. 317 p.
- 55- CIC, 2017. Marché des céréales, disponible sur <http://www.igc.int/>, Conseil international des céréales, consulté le 20/05/2017.
- 56- CLARCKE J.M ; MC CRAIG T.N. 1982. Excised leaf water relation capability as an indicator for droughtresistance of triticum genotypes.*Can.J. Plant Sci.* 62 :571-578.

- 57- CLARKE J.M., RAMAGOSA I., JANA S. , SRIVASTAVAJ.P., MCCAIG T.N. 1989. Relationship of excised leaf water loss rate and yield of durum wheat in diverse environments. *Can.J.Plant Sci.* 69: 1075- 1081.
- 58- CLARKE, J.M. 1987. Use of physiological and morphological traits in breeding programmes to improve drought resistance of cereals. Drought tolerance in winter cereals. Edited by J.P. Srivastava, E. Porceddu ; E. Acevedo and S.Varma. Published by Jhon Wiley and Sons Ltd. P 171- 190.
- 59- CLAVEL D, DRAME N., DIOP., ZUILY-FODIL Y., 2005. Adaptation à la sécheresse et création variétal : le cas de l'arachide en zone Sahélienne. Première partie : revue bibliographique. Edit. OCL. Vol. 12 n° 3, pp 248-260.
- 60- CLOSE T.J. 1996. Dehydrins : emergence of a biochemical role of a family of plant dehydration proteins. *Physiol Plant.* 97 :795 - 803 p.
- 61- CNCC. 2015. Bulletin des variétés de céréales autogames, 255p.
- 62- DAKHEEL A .J., INADJI V.,MAHALAZKSHMI J.M. ET PEACOCK .,1993. Morphophysiological raits with adaptation of durum wheat to harsh Mediterranean environments .Aspects of Applied Biology 34,297-307.
- 63- DARZI H., H. NAJAFI, V. SHARIATI, K. RAZAVI, S.KAMEL. 2018 Evaluation of relationship between kernel size, phenological characteristics and grain yield of local wheat genotypes under water deficit stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 10 (26) : 76-94.
- 64- DE RAISSEC M, 1992. Mécanismes d'adaptation à la sécheresse et maintien de la productivité des plantes cultivées. *Agro Trop.* 46: 29-39 p.
- 65- DÉJARDIN A., SOKOLOV L.N. & KLECZKOWSKI L.A. 1999 .Sugar/osmoticum levels modulate differential abscisic acid-independent expression of two stress-responsive sucrose synthesis genes in *Arabidopsis*. *Biochem J.* 344: 503 -509 p.
- 66- DENCIS, S. KASTORI, R. KOBILSKI, B AND DUGGAN B. 2000. Evaluation of grain yield and its components in wheat cultivars and landraces under near optimal and drought conditions. *Euphitica*. Vol. 113, pp 43-52
- 67- DJEKOUN A. & YKHLEF N. 1996. Déficit hydrique, effets stomatiques et non-stomatiques et activité photosynthétique chez quelques génotypes de blé Tétraploïdes.3ème Réunion du réseau SEWANA, de blé dur IAV HASSAN II (Maroc).
- 68- DOMAGALSKA, M.A., AND LEYSER, O. 2011. Signal integration in the control of shoot branching. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 12, 211–221.
- 69- DRAKE PL, FROEND RH, FRANKSPJ.,2013. Smaller, faster stomata: scaling of stomatal size, rate of response, and stomatal conductance. *Journal of Experimental Botany*, 64, (2), 495–505.
- 70- DURE L. 1993. Structure motifs in LEA proteins of higher plants, in: Close T.J., Bray E.A. Response of Plants to Cellular Dehydration during Environmental Stress, *American Society of Plant Physiologists*, Rockville: 91 - 103 p.
- 71- DWEVEDI S,K. A.ARORA, V.P. SING. 2018. Induction of water deficit stress tolerance wheat dur to exogenous application of plant growth regulators: membrane stability, water relations and photosynthesis, *Photosyntetica*, Vol. 56, Issue 2, pp 478-486.

- 72- EIGENBRODE. S. D. & ESPLIE.K, E. 1995. Effect of plant epicuticular lipids on insect herbivores. *Annual Review of Entomology*, vol. 40, pp. 171-194.
- 73- EL HASSANI T.A. & PERSOONS E. 1994. *Agronomie moderne. Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale.* (éd). *AUPELF-UREF* : 544 p.
- 74- ERCHIDI A.E., BENBELLA M. & TALOUIZTE A. 2000. Relation entre certains paramètres contrôlant les pertes en eau et le rendement en grain chez neuf variétés de blé dur soumises au stress hydrique. *Options méditerranéennes. Série A (Séminaires méditerranéens)*. 40 : 279 - 82 p.
- 75- FAKHRI M., NSARELLAH N., MAHBOUB S., BIDANI A., EL BOUHMADI K. 2008 - Tests morphologiques et biochimiques pour la tolérance au stress hydrique chez le blé dur (*triticum durum* Desf.) *Al Awamia* pp. 123-124.
- 76- FELDMAN M., (2001). *Origin of Cultivated Wheat. In Bonjean A.P. et W.J. Angus. (éd.). The World Wheat Book: a history of wheat breeding. Intercept Limited. Andover. Angleterre* : 3-58 p.
- 77- FEUILLET, P. (2000). *Le grain de blé, composition et utilisation.* Ed INRA. Paris, 88-199.
- 78- FISHER R.A., 1979.- Growth and water limitations to dry wheat yield in Australia a physiological frame work. *J; Aust. Inst, Sei.* 45, 83 - 94.
- 79- FISHER R.A., MAURER R., 1978.- Drought resistance in spring wheat oeltve-s. 1. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.*, 29, 697 - 912.
- 80- FREDOT E., 2005. *Connaissance des aliments.* 1ère édition. Lavoisier. Paris, 397p.
- 81- FRIJA A., CHEBIL A., CHEIKH M'HAMED H. 2013 - Marginal value of irrigation water in Wheat production systems of central Tunisia, 4th International Conference of the African Association of Agricultural Economists, September 22-25, Hammamet, Tunisia.
- 82- GATE, P. (1995). *Ecophysiologie du blé,* Edit. Lavoisier, Paris, Techniques et documentation, 429, p.
- 83- HACINI N., BRINIS L. 2012. Utilisation de quelques marqueurs physiologiques et biochimiques dans l'expression de tolérance au stress hydrique chez 10 géotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf) *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, vol. 25, pp.6- 16.
- 84- HAMBLI.S. 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*. Vol. 11. N°12.
- 85- HAMEED A., BIBI N. AKHTER J. ET IKBAL N. 2011. Differential changes in antioxydants, proteases and lipid peroxyde in flag leaves of wheat genotypes under different levels of water deficit condition. *Plant physiology and Biochemistry*, 49: 178-185.
- 86- HAOJICHRISTODOULOU A., 1987.- The effects of optimum heading date and its stability on yield and consistency of performance barley and durum wheat in dry areas. *J. Agn. Sei. Cambo* 108, 599 - 608.
- 87- HARE P.D. & CRESS W.A. 1997. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant cell and environment*. 21: 535 - 553 p. Harrington, J.F. 1959.

- Effects of fruits maturity and harvesting methods on germination of muskmelon seed. *Proceeding of American Society for Horticulture Science*. 73: 422-430.
- 88- HARE P.D. , CRESSW A. AND VAN STADEN J. 1998. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during plant stress. *Cell and Environment*, 21 : 535- 553.
- 89- HUSEYNOVA I M., 2012 - Photosynthetic characteristics and enzymatic antioxidant capacity of leaves from wheat cultivars exposed to drought. *Biochimica et Biophysica Acta* vol. 1817 pp.1516–1523. *Biochem*: pp. 655-660. in wheat in a controlled environment. *Annals of Botany*, 90, 469-476p.
- 90- JAVELLE M, KLEIN-COSSON C, VERNOUD V, BOLTZ V, MAHER C, 2011 - Genome-wide characterization of the HD-ZIP IV transcription factor family in maize: preferential expression in the epidermis. *Plant Physiol* Vol. 157, pp. 790–803.
- 91- JENKS MA, ASHWORTH . 2010 - Plant Epicuticular Waxes: Function, Production, and Genetics, in *Horticultural Reviews*, Volume 23 (ed J. Janick), John Wiley & Sons, Inc., Oxford, UK.
- 92- KARA K. 2015. Interactions génotype- milieu de variétés de blé tendre sous stress. Thèse de Doctorat Université de Constantine. pp 144.
- 93- KARA K. ET BRINIS L. 2012. Réponse physiologique au stress hydrique de variétés de blé tendre cultivées en Algérie. *European Journal of Scientific Research*. 81(4) : 524-532.
- 94- KARA K., KANOUNI RACHED M., TAHAR A. ET L. BRINIS. 2014. Influence of Mediterranean conditions on yield parameters and quality of bread wheat. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*. 4 (3): 157- 164.
- 95- KAROU, M., HAFFID, R., SMITH, D.N., SAMIR, K. (1998). Roots and shoot growth water use and water use efficiency of spring durum wheat under early – season drouth. *Agronomie*, 18 :186.
- 96- KARROU M., T. OWEIS. 2012 - Water and land productivities of wheat and food legumes with deficit supplemental irrigation in a Mediterranean environment *Agricultural Water Management* vol. 107, pp. 94– 103.
- 97- KERSTIENS, G. 1996A - Cuticular waterpermeability an dits physiological significance. *J. Exper. Bot* vol. 47, pp. 1813-1832.
- 98- KHAYETNEZHAD M , N.ZAEIFIZADEH, R. GHOLAMIN AND SH. JAMAATI. 2010. Study of genetic diversity and path analysis for yield in durum wheat genotypes under water dry conditions. *World App Sci.J.*, 9(6): 655-665.
- 99- KHOLOVÁ, J., HASH, C.T., KUMAR, P.L., YADAV, R.S., KOCOVA, M., VADEZ, V., 2010B – Terminal drought-tolerant pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L) R. Br.] have high leaf ABA and limit transpiration at high vapour pressure deficit. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 61, pp. 1431–1440.
- 100- KILIC H. AND YAGBASANLAR T., 2010. The effect of drought stress on grain yield components and some quality traits of durum wheat cultivars. *Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj*. 38 (1): 164-170.
- 101- KOSMA DK, NEMACHECK JA, JENKS MA, WILLIAMS CE (2010) Changes in properties of wheat leaf cuticle during interactions with Hessian fly. *Plant J*, Vol. 63, pp. 31–43.

- 102- KUNST L., SAMUELS L. 2009 - Plant cuticles shine: advances in wax biosynthesis and export. *Current Opinion in Plant Biology*, Vol. 12, pp.721–727.
- 103- LEBON E., PELLEGRINO A., LOUARN G. AND J. LECOEUR, 2006 - Branch development controls leaf area dynamics in grapevine (*Vitis vinifera*) growing in drying soil. *Annals of Botany* Vol. 98, pp. 175-185.
- 104- LEMON J. 2007. Nitrogen management for wheat protein and yield in Sperance port Zone. Dpt of Agriculture and Food Publisher.
- 105- LEVITT J. 1982. Responces of plants to environmental stress. Acad. Press, N.Y., USA, page: 607.
- 106- LOBELL, D.B., SCHLENKER, W., COSTA-ROBERTS, J., 2011 - Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333, 616–620.
- 107- LONG XY., WANG JR., OUELLET T., ROCHELEAU H., WEI YM. 2010- Genomewide identification and evaluation of novel internal control genes for Q-PCR based transcript normalization in wheat. *Plant Mol Biol* vol. 74, pp. 307–311.
- 108- LORETTI E., DE BELLIS L., ALPI A ET ABBO S. 2001. Why and how do plant cellssense sugars. *Annual of Botanic*, 88: 803-812.
- 109- LOUBANI M. AND ARZAN A., 2011. Morpho- ptraits associated with terminal drought stress tolerance in triticale and wheat. *Agronomy Research*. 9 (1-2), 315-329.
- 110- MACKEY J. (1966). Species relations in *Triticum*. *Proc. 2nd International Wheat Genetic*.
- 111- MAGGIO A., BRESSAN R.A., HASEGAWA P.M. & LOCY R.D. 1997. Moderatly increased constitutive proline does not alter osmotic stress tolerance. *Physiologia Plantarum*. 101 :240 - 246 p.
- 112- MAHDID M., KAMELI A., EHLERT C., SIMONNEAU T. 2011 - Rapid changes in leaf elongation, ABA and water status during the recovery phase following application of water stress in two durum wheat varieties differing in drought tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 49 pp. 1077-1083.
- 113- MAMRUTHA H.M., MOGILI T., K. JHANSI LAKSHMI B, N. RAMA A, DYLAN KOSMA , M. UDAYA KUMAR A, MATTHEW A. JENKS C, KARABA N. NATARAJA. 2010 - Leaf cuticular wax amount and crystal morphology regulate post-harvest water loss in mulberry (*Morus* species). *Plant Physiology and Biochemistry*, Vol.48, pp. 690-696.
- 114- MAMRUTHA H.M., MOGILI T., K. JHANSI LAKSHMI B, N. RAMA A, DYLAN KOSMA , M. UDAYA., MEKHLOUF A., BOUZERZOUR H., BENMAHAMMED A., HADJ SAHRAOUI A., HARKATI N., 2006 - Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Edit. Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 17, Numéro 4, pp 507-13.
- 115- Martinez D.E., Luquez V.M., Bartoli C.G. et Guiamet J.J. 2003. Presistence of photosynthetic components and photochemical efficiency in ears of water stressed wheat. *Physiology Plant*. 119 : 1-7.
- 116- MÉDINA, E. G.AGUIAR, M. GOMEZ, J. ARANDA, J. D. MEDINA AND K. WINTER. 2006 - Taxonomic significance of the epicuticular wax composition in

- species of the genus *Clusia* from Panama. *Biochemical Systematics and ecology*. Volume 34, Issue. Vol.4, pp.319-326.
- 117- MEKHLOUF, A., BOUZERZOUR H., DEHBI F., HANNACHI A. 2001. Rythme de développement et variabilité de réponses du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux basses températures. Tentatives de sélection pour la tolérance au gel. In *Proceeding Séminaire sur la valorisation des milieux semi arides*. Université, Oum El Bouaghi.
- 118- MERAH O., 2001-Potencial importance of water status traits for durum wheat improvement under Mediterranean conditions, *Edit. J. Agric. Sci.* vol. 137, pp 139-145.
- 119- MEZIANI L., BAMMOUN A., HAMOU M. ET BRINIS L., 1992. Essai de définition des caractères d'adaptation du blé dur dans différentes zones agronomique de l'Algérie. In. *Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétales*. Montpellier (France) INRA (Les colloques N°64), 191-203.
- 120- MISRA S.C., SHINDE S., GEERTS S., V.S. RAO A, P. MONNEVEUX. 2010 - Can carbon isotope discrimination and ash content predict grain yield and water use efficiency in wheat? *Agricultural Water Management* , Vol. 97, pp. 57–65.
- 121- MOGHADEM P.A., Y. ALACI., E. KHABIRI. 2014 . Evaluation of yield and some morphological traits of wheat varieties under drought stress. *Int. Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*. Vol 4, Issue 2, pp 121- 125
- 122- MONNEVEUX P., (1991). Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver. In : *l'amélioration des plantes pour l'adaptation au milieu arides* (éd). Aupelf-Uref.J. Eurotxt.L. Paris: 165 -186 p.
- 123- MONNEVEUX P., BELHASSEN E., 1996. The diversity of drought adaptation in the wide. *Plant Growth Regulation* 20, 85 - 92.
- 124- MONNEVEUX P., THIS. 1997. La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la : espoirs et difficultés. *Sécheresse* 8(1): 29-37.
- 125- MONNEVEUX PH. 1991. Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver ? in *L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides* (AUPELF- UREF, ed Jhon Libbey Eurotext, Paris, 165- 186.
- 126- MONNEVEUX PH. ET NEMMAR M. 1986. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre et le blé dur : étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6 : 583- 590.
- 127- MORSLI L., BRINIS L., 2010 - Effet du stress hydrique sur quelques mécanismes physiologiques et biochimiques d'adaptation chez huit génotypes de blé dur (*Triticum Durum* DESF). *Revue des Sciences et de la Technologie, Synthèse*, Vol. 21, pp. 27-37.
- 128- MOTAMEDI M., PARVIZ S. 2018. Biplot analysis of diallel data for water deficit stress tolerance in wheat. *Journal of Plant Genetic Research*. Vol. 4, Issue 2, pp 61-74.
- 129- MUNNS, R., JAMES, R.A., SIRALT, X.R.R., FURBANK, R.T., JONES, H.G., 2010- New phenotyping methods for screening wheat and barley for beneficial responses to water deficit. *Journal of Experimental Botany*, vol. 61, pp. 3499–3507.
- 130- MURPHY C.F., LONGR.C. AND NELSON L.A. 1982. Variability in seedling growth among oat genotypes. *Crop Sci.*, 22 : 1005- 1008.

- 131- NIO S.A., G.R. CAWTHRAY A, L.J. WADE B, T.D. COLMER. 2011 - Pattern of solutes accumulated during leaf osmotic adjustment as related to duration of water deficit for wheat at the reproductive stage. *Plant Physiology and Biochemistry* vol. 49, pp. 1126-1137.
- 132- NOURI L., YKHLEF N. & DJEKOUN A. 2002. Ajustement osmotique et comportement hydrique chez certaines variétés de blé dur : relation avec la tolérance à la sécheresse. Actes de séminaire ' IIIème journées Scientifiques sur le blé'.(éd). Univ. *Mentouri*.Constantine.
- 133- O'TOOLE J.C. ET CRUZ R.T. 1980. Response to leaf potential, stomatal resistance and leaf rolling to water stress. *Plant physiology*, 51: 993-997.
- 134- OULMI A. ; NADJIM S. FELLAHI Z. SALMI M. ; LAALA Z. ; RABTI A. BENMAHAMMED A. 2016. Variabilité génétique, héritabilité et corrélations entre les caractères phéno- morpho- physio et agronomiques des populations F2 de blé dur. *International Journal of Innovation and Applied Studies*. Vol. 17. Pp 1275-1285.
- 135- OURY FX AND GODLIN C. 2007. Yield and grain protein concentration in bread wheat : how to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes. *Euphytica*, 157: 45-57
- 136- PAPADAKIS J.K. (1938). *Ecologie agricole*. Eds Jules Duculot.Gembloux, 303p.
- 137- PASSIOURA J. B. 2012 - Phenotyping for drought tolerance in grain crops: when is it useful to breeders?' functional plant biology, vol. 39 no. 11 pp. 851-859.
- 138- PASSIOURA, J.B, 1996. Drought and drought tolerance. In : Belahssen, E. (Ed). *Drought tolerance in higher plants : Genetical, physiological and molecular biological analysis*. Kluwer Academic Publishers. pp. 3-12.
- 139- PAUL M.H., PLANCHON C., ECOCHARD R.,1979 ; Etude des relations entre développement et la productivité chez le soja. *Annu. Amélio.plantes* 29(5) : 479-792
- 140- PEDRÓ A , SAVINA R., GUSTAVO A. SLAFER 2012 - Crop productivity as related to single-plant traits at key phenological stages in durum wheat *Field Crops Research*, Vol. 138 , pp. 42–51.
- 141- PICARD P.L. 1988. Sélection du blé. *L'intégration des Biotechnologies* : 48-58.
- 142- QUANQI L., BAODIA D., YUNZHOUA Q., MENGYUA L., JIWANGC Z. 2010- Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China. *Agricultural Water Management* vol. 97, pp. 1676–1682.
- 143- Rajeev. Varshney. R. Tuberosa and F.T. Tardieu. 2018. Progress in understanding drought tolerance : from alleles to cropping systems. *J. Exp Bot.* 69 (13): 3175- 3179.
- 144- RICHARDS RA, REBETZKE G, CONDON AG, WATT M. 2011 - Breeding to improve grain yield in water limited environments: the CSIRO experience with wheat. In: Araus JL, Slafer GA, eds. *Crop stress management and global climate change*. CABI: UK. pp. 105-121.
- 145- RIOU C. (1993). *L'eau et la production végétale*. Sécheresse ; 2;75-83.
- 146- RIZZA F., GHASHGHAIEB J., MEYERC S., MATTEUD L., MASTRANGELOD AM., BADECK FW. 2012 - Constitutive differences in water use efficiency between two durum wheat cultivars *Field Crops Research*, Vol. 125, pp: 49–60.

- 147- SALMI. M. 2015. Caractérisation morpho-physiologique et biochimique de quelques générations F2 de blé dur (*Triticum durum*) sous conditions semi-arides. Mémoire de magister en génétique et amélioration des plantes. Univ Ferhat Abbas- Setif 1, pp. 124.
- 148- SCHREIBER L, RIEDER M, SCHORN K. 1996 - Mobilities of organic compounds in reconstituted cuticular wax of barley leaves : effects of monodisperse alcohol ethoxylates on diffusion of pentachlorophenol and tetracosanoic acid. Pesticide science, Vol. 48, pp. 117-124.
- 149- SIDDIQUE M.R.B. , A.HAMID AND M.S. ISLAM. 1999. Drought stress on photosynthetic rate and leaf gas exchange of wheat. Bot. Bull. Acad.Sin., 40 :141-145.
- 150- SLAMA, A., BEN SALEM, M., BEN NACEUR, M., ZID, E.D. (2005). Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. Institut national de la recherche agronomique de Tunisie (Inrat). Univ. Elmanar. Tunisie.
- 151- SOMMER R. PIGGIN C., HADDAD A., HAJDIBO A., HAYEK P., KHALIL Y. 2012- Simulating the effects of zero tillage and crop residue retention on water relations and yield of wheat under rainfed semiarid Mediterranean conditions Field Crops Research, Vol. 132, pp. 40–52.
- 152- TAHRI E., BELABED A. & SADKI K. 1997. Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Bulletin de l'Institut Scientifique. Rebat.21: 81 - 89 p.
- 153- TEARE I.D. & KANEMASU E.T. 1972. Stomatal diffusion resistance and potentialy as affected by preconditioning water stress in the field. *Agronomie Journal* . **68** : 707-708 p.
- 154- THAMEURA., LACHIHEB B, FERCHICHI A. 2012. Drought effect on growth, gas exchange and yield, in two strains of local barley Ardhaoui, under water deficit conditions in southern Tunisia. Science direct. Journal of Environmental Management , Vol. 113, pp. 495 – 500.
- 155- TIAN F., GONG J., ZHANG J., ZHANG M., WANG G., LI A., WANG W. 2013 - Enhanced stability of thylakoid membrane proteins and antioxidant competence contribute to drought stress resistance in the *tasg1* wheat stay-green mutant. Journal of Experimental Botany, Vol 1.
- 156- TRICKER PJ., ELHABTI A. SCMDIT, FLEURY D. 2018. The physiological and genetic drought and heat tolerance in wheat. J.Exp.Bot. 69(13) 3195-3210.
- 157- TURNER N C.1979. Drought resistance and adaptation to water deficits in crops plants. In: stress physiology of crop plants. Musell H.and Staples R ED., New York.
- 158- TURNER N C.1979. Drought resistance and adaptation to water deficits in crops plants. In: stress physiology of crop plants. Musell H.and Staples R ED., New York.
- 159- TURNER N.C. 2018. Turgor maintenance by osmotic adjustment : 40 years of progress. J. Exp.Bot. 69(13) : 3223- 3233.
- 160- TURNER NC. 1986. Adaptation to water deficit: a changing perspective. Aust J Plant Physiol. 13: 175- 90 p.
- 161- VARSHNEY R.K., PAULO M.J., S. GRANDOD, F.A. VAN EEUWIJK, L.C.P. KEIZER, P. GUOD, COMADRAN, J., RUSSELL, J.R., BOOTH, A., PSWARAYI, A., CECCARELLI, S., GRANDO, S., STANCA, A.M., PECCHIONI, N., AKAR, T.,

- AL-YASSIN, A., BENBELKACEM, A., OUABBOU, H., BORT, J., VAN EEUWIJK, F.A., THOMAS, W.T.B., ROMAGOSA, I., 2011- Mixed model association scans of multi-environmental trial data reveal major loci controlling yield and yield related traits in *Hordeum vulgare* in Mediterranean environments. *Theor. Appl. Genet.* Vol. 122, pp. 1363–1373.
- 162- VARSHNEY R.K., PAULO M.J., S. GRANDOD, F.A. VAN EEUWIJK, L.C.P. KEIZER, P. GUOD, COMADRAN, J., RUSSELL, J.R., BOOTH, A., PSWARAYI, A., CECCARELLI, S., GRANDO, S., STANCA, A.M., PECCHIONI, N., AKAR, T., AL-YASSIN, A., BENBELKACEM, A., OUABBOU, H., BORT, J., VAN EEUWIJK, F.A., THOMAS, W.T.B., ROMAGOSA, I., 2011- Mixed model association scans of multi-environmental trial data reveal major loci controlling yield and yield related traits in *Hordeum vulgare* in Mediterranean environments. *Theor. Appl. Genet.* Vol. 122, pp. 1363–1373.
- 163- VYSOTSKAYA LB., KOROBOVA AV., KUDOYAROVA GR. 2008 - Abscisic acid accumulation in the roots of nutrient-limited plants: Its impact on the differential growth of roots and shoots *Journal of Plant Physiology*, Vol. 165, pp. 1274—1279.
- 164- WARDLAWIF. 2002. Interaction between drought and chronic high Temperature during kernel filling.
- 165- WU XL., BAO W. 2012 - Statistical Analysis of Leaf Water Use Efficiency and Physiology Traits of Winter Wheat Under Drought Condition. *Journal of Integrative Agriculture*, Vol. 11(1), pp. 82-89.
- 166- XIAO H., SIDDIQUA M., BRAYBROOK S. AND NASSUTH A. 2006. Three grape genes respond to low temperature, drought and abscisic acid. *Plant Cell of Environment*. 29 : 1410- 1421.
- 167- YANG Z., SINCLAIR TR., ZHUC M., MESSINAC CD., COOPERC M., JAEMO YM. ORDIZ I., JAWORSKI JG., BEACHY RN. 2011- Induced accumulation of cuticular waxes enhances drought tolerance in *Arabidopsis* by changes in development of stomata. *Plant Physiology and Biochemistry*, Vol. 49, pp. 1448-1455.
- 168- YKHLEF N. 2001. Photosynthèse, Activité photochimique et tolérance au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* ; Desf). Thèse de doctorat. Univ.Mentouri. Constantine.

PUBLICATIONS

Etude de quelques expressions morpho- physiologiques chez trois génotypes de blé dur pour la sélection à la tolérance au déficit hydrique

Study of some morpho- physiological expressions in three durum wheat genotypes for drought tolerance selection

Houda Benmounah & Louhichi Brinis *

Laboratoire Amélioration Génétique des Plantes, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

Soumis le :18 /06/2018

Révisé le :27 /07/2018

Accepté le :04/09/2018

ملخص :

تعتبر هذه الدراسة بحث و كشف لطاقة الإنبات لثلاثة أصناف من القمح الصلب ، و هدفها تقييم مستوى نشاطهم . النسبة المئوية للإنبات، النمو في مرحلة مبكرة و تحليل إمتصاص الماء. كانت من ضمن تلك العوامل الترققنا بتحليلها أهم النتائج المتحصل عليها كانت كالتالي :

- بعد 05 أو 10 أيام ليست هناك فرق معتبر في قدرة الإنبات.
- تحليل إمتصاص الماء يدل على ان البذور المستعملة في صحة فسلجية جيدة .
- في الحقل وجود شمع عند الصنف " عمار 6 " برهن انه يمتاز بصفات تأقلمية معتبرة في وجود جفاف أو فقدان مائي .

و في النهاية قد سمحت لنا هذه الدراسة المتواضعة بتحليل دقيق مبني ، و سريع في نفس الوقت و هذا من أجل إستعمال البذور في تجارب حقلية .

الكلمات المفتاحية : قمح صلب – جفاف – فسلجة – تأقلم – نشاط

Résumé :

La présente contribution est une exploration des aptitudes germinatives de semences de trois génotypes de blé dur, permettant d'apprécier le niveau de vigueur de celles-ci. Le pourcentage de germination, la cinétique de croissance à un stade juvénile, le test d'absorption d'eau en sont quelques paramètres effectués. Un autre paramètre physique, à savoir la taille des semences, a aussi été pris en considération ; pour apprécier l'effet intra et inter variétés. Les résultats auxquels nous avons abouti montrent que le pourcentage de germination, exprimé après 5 jours et 10 jours ne semble pas discriminant à ce point et les résultats, malgré de légères variations restent quelque peu similaires. La cinétique de croissance, quant à elle, présente des différences entre les génotypes étudiés. Le test d'absorption d'eau a montré que les génotypes présentent une bonne vigueur. Au champ, il est à remarquer le caractère distinctif de présence de cire (composé donnant une texture lisse des feuilles) chez la variété Ammar6, ce qui lui confère en principe des qualités adaptatives de tolérance au stress hydrique. Cette étude nous aura permis une exploration préliminaire simple, rapide mais fiable tout autant, des semences, avant leur utilisation dans des essais en plein champ.

Mots clés : blé dur-stress hydrique- physiologie- adaptation-vigueur.

Abstract :

The present contribution is an exploration of germinative abilities of seeds from three durum wheat genotypes, allowing us to appreciate level of this vigor. Germination percentage, kinetic growth at seedling stage, water absorption were performed. Another physical parameter, seed size, was also chosen in order to appreciate its effect between and within varieties. Results that have been obtained show that germination percentages, expressed after 5 days and 10 days, does not seem to be discriminating at that point even though some light differences. Kinetic growth shows differences among genotypes. Water absorption showed varieties had higher vigor. Simeto that had the highest thousand kernel weight, seems to be correlated to water absorption test. In the field, waxiness was found in cv Ammar6. This study would have allowed us to perform simple, rapid and reliable tests for early screening before field planting.

Keys words: durum wheat-water stress- physiology- adaptation-vigor.

* Auteur correspondant : lbrinis@yahoo.fr

1. Introduction

Les céréales constituent en Algérie la principale source d'alimentation et représentent environ 3.5 millions d'hectares [1]. Le blé dur occupe à cet effet une place de choix avec ses 1.5 millions d'ha [2]. Malgré les nombreuses tentatives pour augmenter de manière substantielle la productivité, il n'en demeure pas vrai que les rendements n'ont jamais ou presque, excédé les 15qx/ha [3].

Les oscillations en dents de scie des productions céréalières trouvent leur explication dans l'irrégularité et l'imprévisibilité du climat dont les contraintes environnementales, abiotiques en particulier, se font sentir et pèsent sévèrement de tout leur poids sur le potentiel génétique des variétés.

Les nouvelles variétés, dites intensives, à haut potentiel de rendement, sont le plus souvent sélectionnées sur la base de leur niveau de rendement sans tenir compte des traits d'adaptation qui sont des régulateurs de la production en zones arides et semi- arides [4]. Ces variétés, si en milieu favorable elles arrivent à exprimer leur potentiel de rendement, en régime pluvial, elles sont moins productives, eu égard à l'interaction génotype- milieu.

Selon [5], le rendement est à peine aux environs de 15qx/ha. En 2016, la production de blé en Algérie a atteint 3 500 000 tonnes [6]. Les faibles niveaux de rendement sont souvent expliqués par l'irrégularité de la pluviométrie et la sensibilité de la majorité des cultivars aux maladies fongiques.

La difficulté d'obtenir ou de sélectionner des génotypes prometteurs de rendement et de stabilité, réside dans le concept même de sélection [3].

La sélection directe au champ a néanmoins montré ses limites. La sélection indirecte, basée sur l'expression physiologique de certains traits, se trouve être une alternative intéressante [7]. Cette dernière peut à travers une évaluation exploratrice à un stade juvénile, précoce donc, de mieux identifier, quantifier mais hiérarchiser aussi des traits d'adaptation [3] ; [8] ; [9] et [10].

[11], [8] et [12] ont étudié et identifié des paramètres phénologiques, morphologiques et physiologiques, utilisés comme critère de criblage dans le processus d'amélioration génétique du blé pour la tolérance aux stress environnementaux, le stress hydrique en particulier.

Le stress hydrique limite la croissance des plantes ainsi que la productivité végétale [13]. De nombreuses études ont montré que lors d'un déficit hydrique, les plantes adoptent des stratégies qui diffèrent d'une espèce à une autre et qui font intervenir une large combinaison de facteurs morphologiques, physiologiques et biochimiques [14].

L'objectif de cette contribution vise à apprécier l'aptitude physiologique chez trois variétés de blé dur, aux stades de la germination et de la croissance des plantules. Parmi les attributs de la semence, sa capacité à germer, à germer vite, et à avoir une cinétique de croissance qui la crédite d'une bonne vigueur. Cette expression première à la germination constituerait un trait intéressant en faveur d'une variété dont les performances agronomiques peuvent être prédites sur la base des résultats au stade juvénile. De plus, nous souhaitons établir un lien entre ces données physiologiques et celles obtenues sur terrain et qui concernent des traits morphologiques de tolérance au stress hydrique. La texture de la feuille (cireuse ou glaucescente) et la position de celle-ci (érigée-semi érigée et tombante) ont été sélectionnées.

2. Matériel et méthodes

Matériel végétal

Trois variétés de blé dur ont servi de matériel génétique de base à savoir cv Vitron, cv Ammar6 et cv Simeto dont les origines respectives sont l'Espagne, le CIMMYT, et l'Italie. L'essai a été réalisé au laboratoire à des fins d'analyses physiologiques, de semences en particulier et au champ pour des notations de traits d'adaptation.

Dispositif expérimental

un bloc complètement randomisé a été choisi. Chaque variété comprend trois traitements avec trois répétitions.

10 graines / pot ont été semées à une profondeur de 6 cm.

Les traitements :

- T0 : absence de stress à la capacité au champ. Celle-ci a été évaluée à 250 ml par pot.
- T1 : stress de sévérité de 60% de la capacité au champ
- T2 : stress de sévérité de 30% de la capacité au champ.

Le stade de prélèvement des échantillons pour analyse eurent lieu au stade phénologique de 5 feuilles (plantule de 5 feuilles).

Analyses effectuées au laboratoire

Les analyses effectuées ont concerné dans un premier temps le PMG. Ce trait morphologique est considéré comme déterminant de la qualité technologique de semences.

Ensuite le % de germination a été évalué pour quantifier l'aptitude physiologique des trois variétés utilisées. Le test de vigueur et de viabilité a été réalisé respectivement à 5 jours et 10 jours dans les conditions optimales du laboratoire. (Température à 20°C et 60% d'humidité relative). Ces conditions sont celles préconisées par l'I.S.T.A (International Seed Testing Association).

La cinétique de croissance a été exécutée sur papier buvard (15 graines/ répétition). Les longueurs des racines et coléoptiles ont été évaluées journalièrement jusqu'à 12 jours ; au terme desquels l'essai pris fin.

Un test d'absorption d'eau a été effectué sur un lot de semences de 10 gr, trempé dans de l'eau et pesé toutes les 3 heures. La dernière pesée s'effectue après 48heures car au-delà, la germination physiologique s'opère (percée du coléoptile) et s'ensuit une perte d'eau.

Au champ : un essai de trois génotypes a été installé selon un dispositif expérimental des blocs complètement randomisés avec 3 blocs (répétitions), chaque parcelle élémentaire constituée de 6 rangs de 2.5 m de long, espacés de 20 cm. L'espacement entre les variétés est de 50 cm.

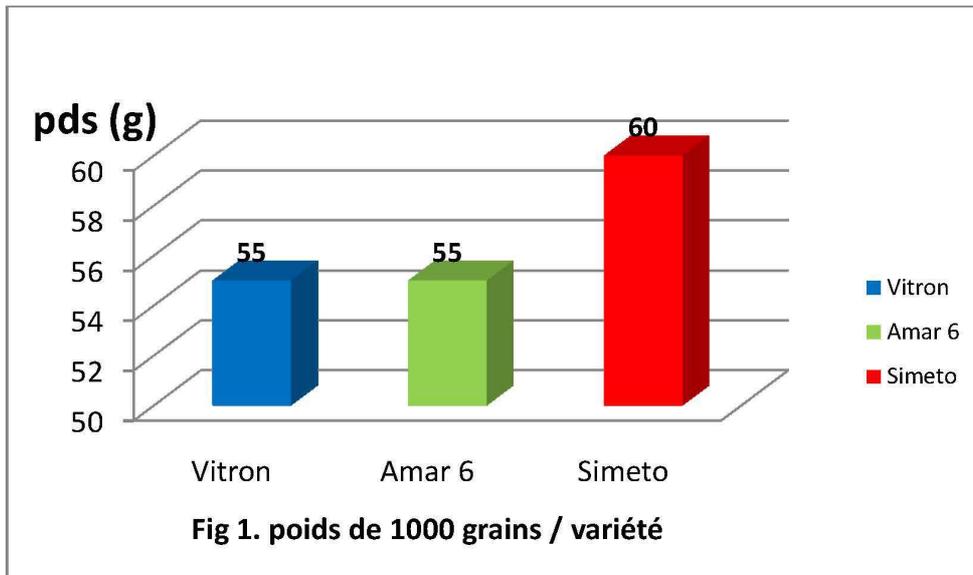
Les notations prises : deux traits physiologiques ont été ciblés pour la présente contribution. Il s'agit de :

- L'apparence de la feuille : érigée- semi- érigée- tombante
- La texture de la feuille : cireuse (waxiness), glaucescence

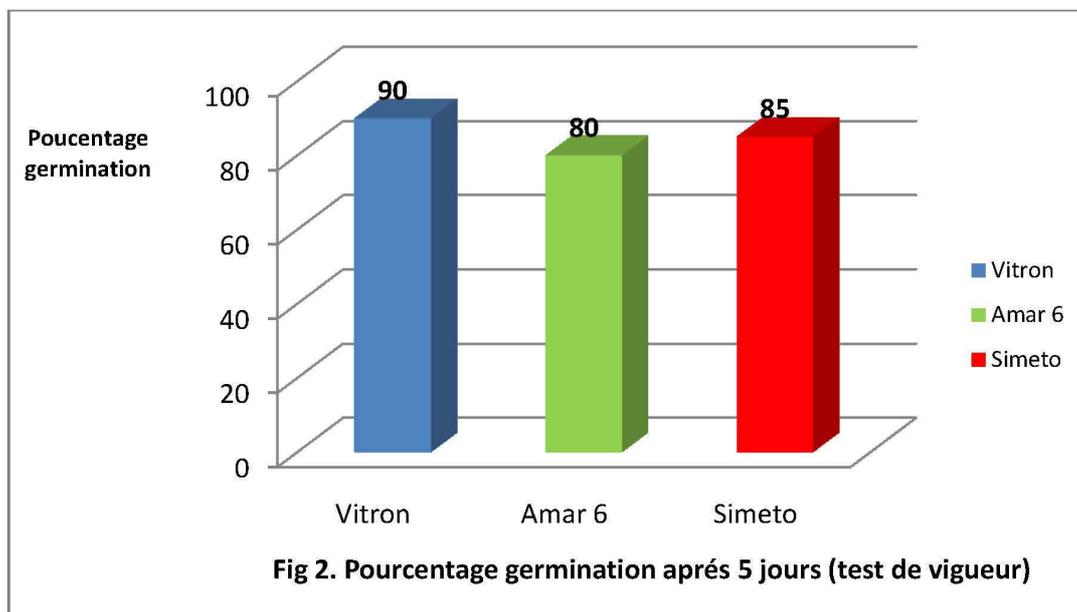
3. Résultats

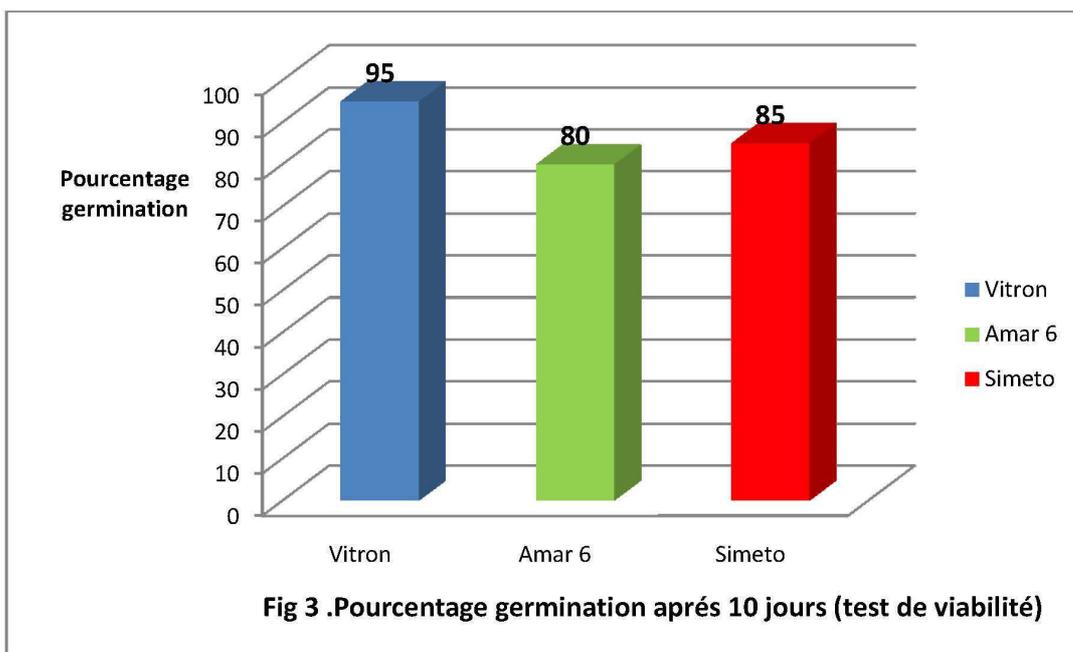
A l'issue de ce travail et au regard des résultats obtenus, illustrés soit par tableaux, soit par graphes, soit par histogrammes, il en ressort les points essentiels suivants :

- Le PMG (poids de 1000 grains), souvent utilisé comme un déterminant ou attribut important de qualité chez les semences, s'avère être le plus élevé chez la variété Simeto (60 grammes) fig 1. Ceci étant, les PMG des deux autres variétés (Vitron et Amar 6) ne sont pas négligeables non plus. Un PMG élevé va nécessairement impliquer un poids spécifique élevé des variétés, ce qui favorisera un rendement élevé lorsque les conditions sont optimales, en absence de stress.

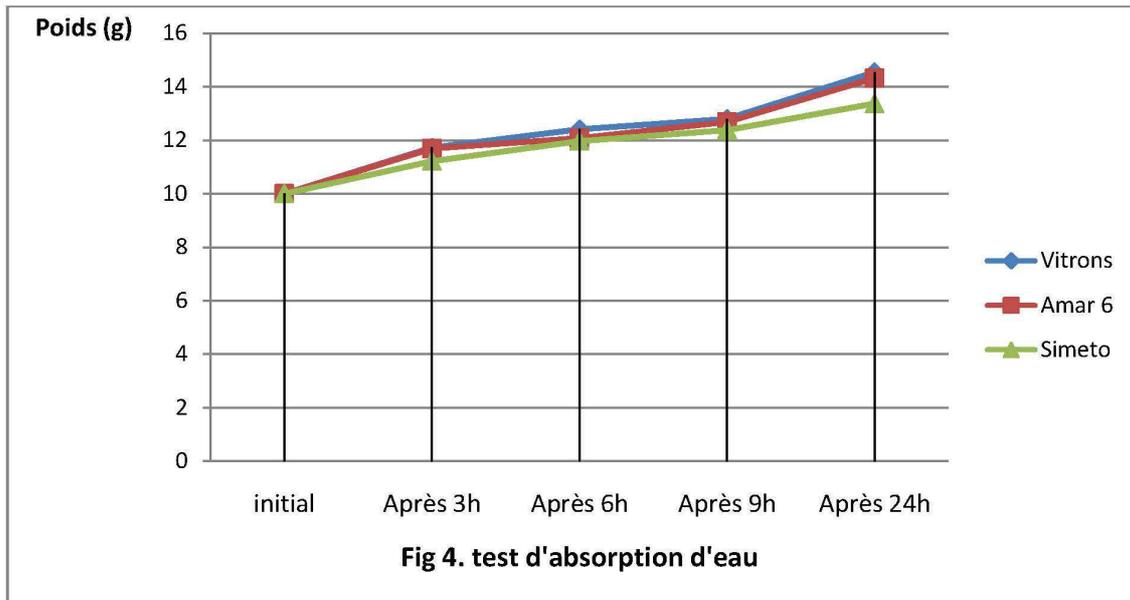


- **Le pouvoir germinatif** a montré un niveau élevé pour les trois variétés (fig 3), à cette différence près pour Vitron (95%) après 10 jours de germination. Ce test constitue en soi un test de viabilité (durée requise selon les normes ISTA [15]), alors qu'après 5 jours (fig2), les résultats, quelque peu similaires et élevés en tous cas, reflètent une bonne vigueur des semences des trois variétés. Ceci prouve que les génotypes mis en expérimentation ont une bonne santé physiologique, traduite par une viabilité et une vigueur appréciables.



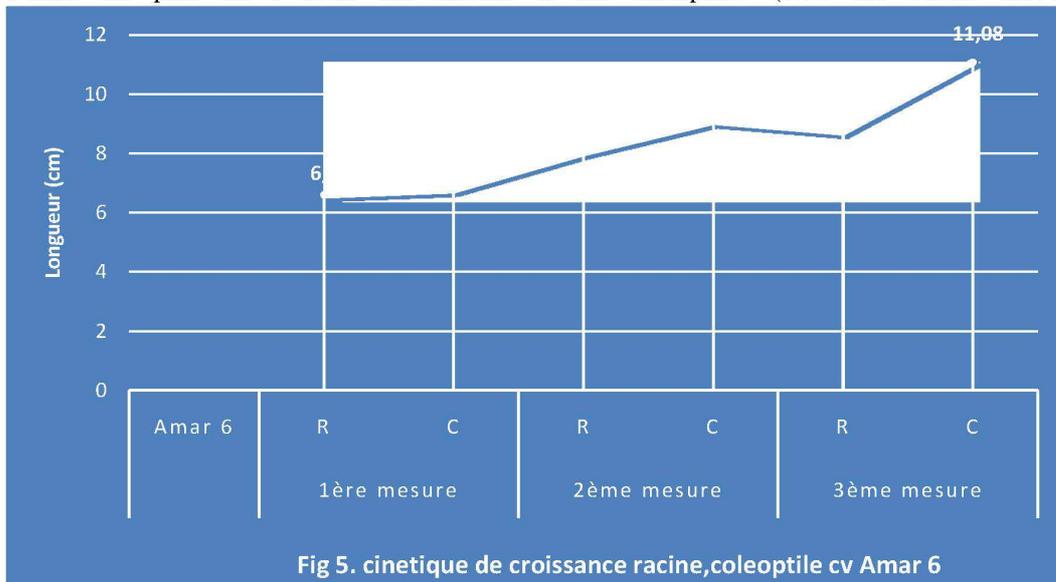


- **Le test d'absorption d'eau** (fig4), qui selon certains auteurs [16], doit discriminer entre les variétés selon la régulation du flux d'eau pendant une certaine durée (48h), a montré que la variété Simeto était celle qui absorbait le moins d'eau ; d'où l'hypothèse d'une meilleure intégrité membranaire de ses semences. Au-delà de 48 heures, les graines vont être à saturation, le péricarpe éclate et le point de rupture au niveau de l'embryon entrainera une perte d'eau et d'exsudats (leachates).
- Le fait aussi que le PMG de cette variété soit le plus élevé (60g), il est possible de faire un lien de corrélation négative. Plus le PMG est élevé, moins le génotype absorbera d'eau, même s'il reste encore à affiner et confirmer cette approche déductive. La composition nutritionnelle, telle la masse molaire protéique avec une densité de 1.2 par rapport à l'amidon, de densité 0.8, selon [17], peut en effet expliquer d'abord pourquoi un PMG peut-il être élevé, ensuite déduire que s'il est élevé, c'est en partie grâce à une nutrition azotée adéquate qui lui confèrera un bon PMG grâce à la translocation des photoassimilats vers la graine.



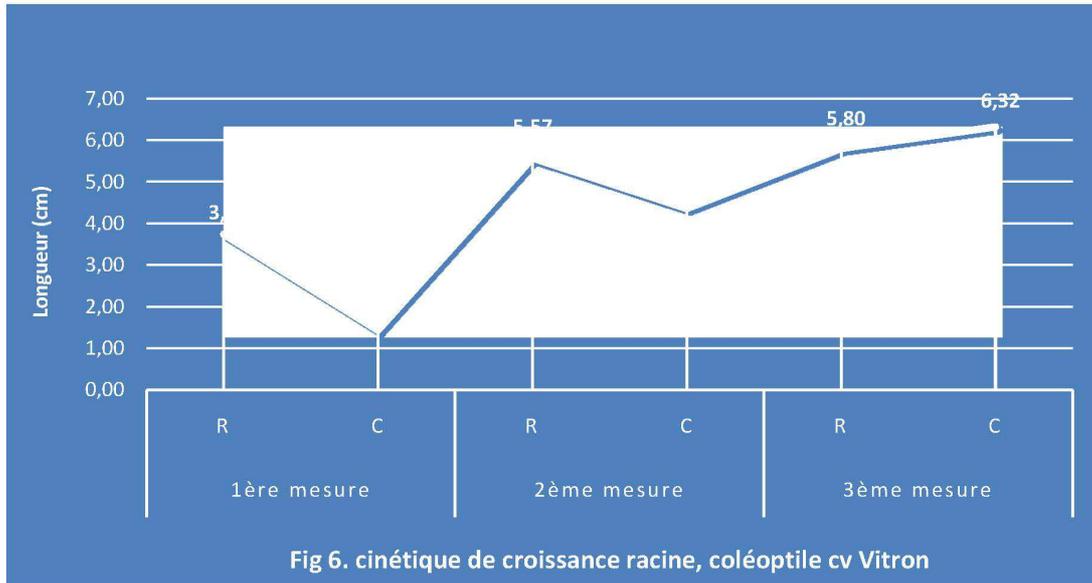
- Cinétique de croissance :
- variété Amar 6

La vitesse de germination (fig 5) évalue l'élongation du coléoptile et des racines principales. Les résultats obtenus par génotype montrent que la cinétique de croissance suit une courbe ascendante et ce, pendant 15 jours (période pendant laquelle l'essai a été suivi). Pendant la première mesure, les racines et les coléoptiles ont une longueur moyenne à peu près égale (6.60cm contre 6.77cm respectivement). Pendant la seconde phase de mensuration, les coléoptiles prennent légèrement le dessus sur les racines (9.08 cm contre 8.03), alors qu'à l'issue de la troisième et dernière mensuration, l'écart est plus élevé entre les racines et les coléoptiles (8.72 cm contre 11.08 cm).

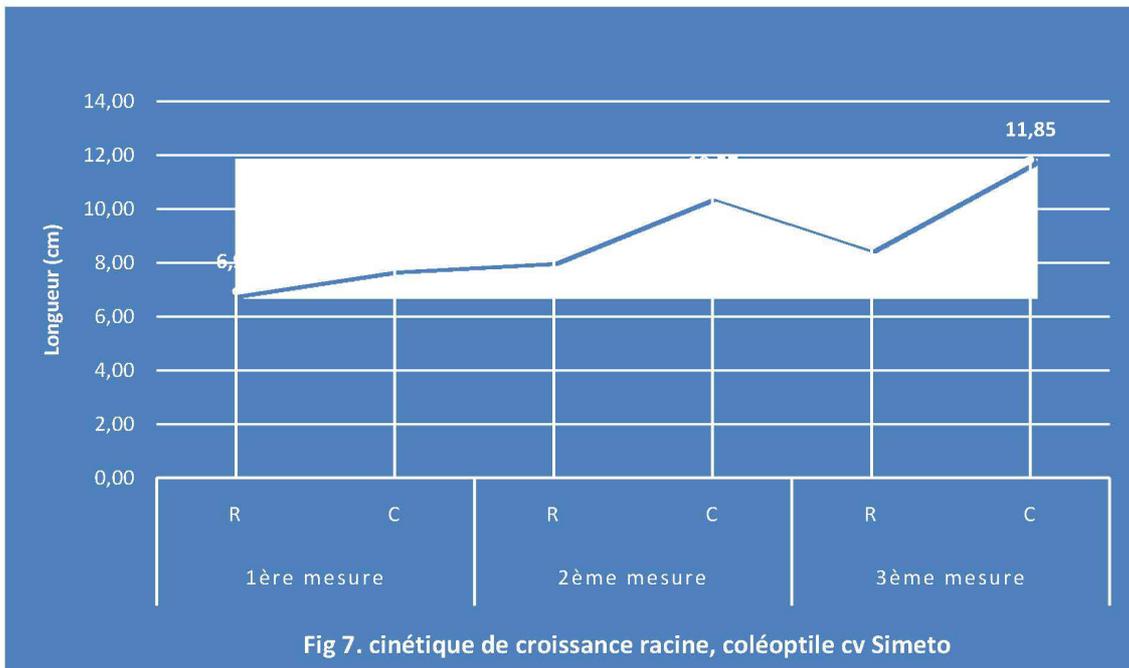


- Variété Vitron : Contrairement à la variété Amar6, les racines ont une longueur plus élevée lors de la première mesure (3.74 cm contre 1.43 cm respectivement). Pendant la seconde phase de croissance, les racines demeurent encore supérieures en longueur (fig6) par rapport

aux coléoptiles (5.57 cm contre 4.36 cm). A l'issue du test, les coléoptiles ont surpassé en longueur les racines légèrement (6.32 cm contre 5.80 cm respectivement).



- **Variété Simeto** : si pendant la première mesure les longueurs moyennes des racines et des coléoptiles semblent être relativement rapprochées (6.95cm pour les racines et 7.85cm pour les coléoptiles), la seconde phase est plus discriminante (8.17cm contre 10.57 cm, alors que les dernières mesures vont en faveur des coléoptiles (11.85) contre 8.63cm pour les racines. (fig7)



Ces résultats montrent la spécificité génotypique qui se traduit par des manifestations physiologiques particulières et qui sont pour un bon nombre d'entre elles, liées au corpus génétique de l'espèce, voire de la variété.

Ces résultats seront encore davantage révélateurs lorsqu'un stress abiotique, le stress hydrique en l'occurrence est imposé à ces variétés. Cela permettrait d'élucider les mécanismes adaptatifs et de pouvoir associer ces traits d'accommodation à d'autres traits phéno-morphologiques. Ainsi, il en ressort que des modèles physiologiques peuvent être déduits grâce à cette démarche de sélection trait par trait, appelée aussi approche analytique.

Au champ : dans la perspective d'une approche multi caractères, synthétique et corrélative entre différents traits d'adaptation au stress hydrique, il a été possible d'identifier les traits suivants :

- Feuille pendante (flag leaf) pour Vitron
- Semi pendante pour Simeto
- Feuille érigée (erect leaf) pour Ammar6

L'aspect présence de texture lisse foliaire (dépôt de cire) a aussi été pris en considération. La variété Ammar6 possède ce caractère qui lui confère une adaptation toute indiquée sous des conditions de hautes températures et déficit hydrique.

4. Conclusion

Les résultats obtenus pour ce volet de physiologie de semences constituent un préalable pour la suite de l'exploration au stade juvénile, grâce aux tests prédictifs. La sélection indirecte, qui, tiendra compte à la fois des performances obtenues pendant la germination mais aussi des aptitudes exprimées au stade plantule, nous permettra de procéder à un criblage de traits susceptibles d'être intégrés dans un programme d'amélioration génétique du blé dur. La sélection directe qui consiste seulement à quantifier le rendement en grains, a montré quelque peu ses limites et ce, compte tenu de l'imprévisibilité et de l'irrégularité des paramètres du climat. Pour se rapprocher davantage des prévisions de rendement, nous préconiserons une exploration fine des géotypes étudiés en vue d'identifier des marqueurs prédictifs de tolérance au stress hydrique. Ces marqueurs peuvent être phénologiques (esquive pour échapper au stress) ; physiologiques (production de photoassimilats) ; élaboration d'osmorégulateurs de tolérance au stress imposé (accumulation de proline, de sucres solubles et de protéines).

Ces produits issus de catabolisme ou de protéolyse serviront de bio protecteurs de la cellule. Il reviendra à l'améliorateur d'apprécier la participation et la part de chacun de ces marqueurs selon leur importance et d'en faire bon usage en les intégrant dans le processus de sélection variétale.

Références

- [1] MADR 2014. Annuaire statistique du ministère de l'agriculture et du développement rural, MADR Algérie, série B : pp 77
- [2] Megherbi A, Mehdadi Z., Toumi F., Moueddene K. et Bouadjra S.E.B.2012. Tolérance à la sécheresse du blé dur (*Triticum durum* Desf) et identification des paramètres morpho-physiologiques d'adaptation dans la région de SBA. *Acta Botanica Gallica*. Vol 159 (1), pp 137-143.
- [3] Brinis L.1995. Effets du stress hydrique sur quelques mécanismes morphophysiologiques des traits d'adaptation et déterminisme génétique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) Recherche d'héritabilité transgressive en F1. Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences, Univ. Badji Mokhtar, Annaba. 156p.
- [4] Lalla Z. 2010. Analyse en chemin des relations entre le rendement en grains et les composantes chez des populations F3 de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous conditions semi-arides. Mémoire de magister, Faculté des Sciences, Département d'Agronomie. Université Ferhat Abbas, Sétif. 97p.
- [5] Benbelkacem A.E.K. 2013. Rapport national des activités du projet INRA-ICARDA 2012-2013. Pp : 45.
- [6] FAO. 2014. Données statistiques des cultures. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>, 18.02.2017.

- [7] Monneveux P. et Nemmar M. 1986. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre et le blé dur ; étude de l'accumulation de la proline au cours de cycle de développement. *Agronomie*, 6 :583-590.
- [8] Monneveux P. 1991. Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales d'hiver. In : l'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides (AUPELF-UREF, ed) John Libbey Eurotext, Paris, 165-186.
- [9] Acevedo, E. 1985. Assessing crop and plant attributes for cereal improvement in water limited Mediterranean environments. J. Wiley ed. P.303-320
- [10] Nachit M.M. et Jarrah M. 1986. Association of some morphological charters to grain yield in durum wheat under mediterranean dryland conditions. *Rachis.*, 5 :33-35.
- [11] Clarke J.M. 1987. Use of physiological and morphological traits in breeding programs to improve drought resistance of cereals. In : Drought tolerance in winter cereals (JP Srivastava, E Porceddu, E Acevedo, S Varma, eds) John Wiley and Sons, UK, 171-189.
- [12] Passioura J. B. 1996. Drought and drought tolerance. *Plant growth regulation* 20: 79-83. Kluwer Academic Publishers
- [13] Wang W., Vinocur B. et Altman A. 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures : towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218: 1-14
- [14] Monneveux P. et Belhassen E., 1997. Drought tolerance in higher plants. Kluwer Academic Publishers.177p
- [15] ISTA. 1978. Rules for testing seeds. Association of official seed analysis. *Journal of Seed Technology*, Vol 3, number 3
- [16] Harrington J.F. 1959. Effect of fruit maturity and harvesting methods on germination of muskmelon seed. *Proceeding of American Society for horticultural Science*. 73: 422- 430.
- [17] Abdul Baki. A.A. 1969. Relationship of glucose metabolism in germinability and vigor in barley and wheat seeds. *Crop Science*, 9: pp. 732- 737

Nomenclatures

Fig: figure

Cm: centimètre

g: gramme

Pds: poids

PMG: poids de mille grains

PHENOTYPICAL EXPRESSION IN THREE DURUM WHEAT VARIETIES ASSOCIATED TO DROUGHT TOLERANCE TRAITS

BENMOUNAH Houda* and BRINIS Louhichi

*Plant Breeding Laboratory, Faculty of Sciences, Department of Biology
Badji Mokhtar University, 23000 Annaba, Algeria*

E-mail: houda2179@yahoo.fr

(Received 10 June 2020 - Accepted 17 October 2020)

Abstract.- Phenotypical markers have been used on three durum wheat varieties in the field conditions, in order to much more understand the morphological characterization. The objective was also to link the results obtained in the field with others concerning physiological ones for drought tolerance. Results that have been obtained showed that dates of heading and flowering were almost the same for the three varieties. Around fifteen days were separating the two phenological phases. In a morphological point of view, varietal phenotype shows different leaves as far as texture is concerned. Presence or absence of waxiness appears as being a specific parameter to each cultivar. Leaf area is more important for Simeto, followed by Vitron and Ammar 6. Tillering is higher for Simeto. Height of plants does not seem to be discriminating between varieties. This contribution allowed us to characterize main differences in terms of phenotyping; with the objective to incorporate and integrate such relevant traits in wheat breeding program, under water deficit conditions. By doing this, useful morphological traits can be further used for modeling adapted genotypes.

Key words: Durum Wheat, Phenotyping, Morphology, Yield, Water Deficit

EXPRESSION PHÉNOTYPIQUE CHEZ TROIS VARIÉTÉS DE BLÉ DUR ASSOCIÉE AUX TRAITS DE TOLÉRANCE AU STRESS HYDRIQUE

Résumé.- Des marqueurs phénotypiques sont utilisés sur trois variétés de blé dur, en conditions de plein champ, dans le but de mieux comprendre la caractérisation morphologique. L'objectif était aussi de lier les résultats obtenus au champ, avec d'autres traits physiologiques en rapport avec le stress hydrique. Les résultats obtenus ont montré que les dates d'épiaison et de floraison étaient similaires pour les trois variétés. Il y a eu 15 jours entre les deux phases phénotypiques. Sur un plan morphologique, le phénotypage variétal montre différents types de feuilles, concernant la texture foliaire. La présence ou l'absence de cire (waxiness) apparaît comme étant un paramètre spécifique à chaque cultivar. La surface foliaire est plus importante chez la variété Simeto, suivie de Vitron et de Ammar 6. Le tallage est plus élevé chez la variété Simeto. La hauteur des plantes ne semble pas avoir été discriminante entre les variétés. Cette contribution a permis de caractériser les principales différences en terme de phénotypage; avec l'objectif d'incorporer et d'intégrer de tels traits déterminants dans un programme d'amélioration génétique du blé, sous les conditions de déficit hydrique. En adoptant une telle démarche, des traits morphologiques utiles peuvent être utilisés pour la modélisation de génotypes adaptés.

Mots clés: Blé dur, Phénotypage, Morphologie, Rendement, Stress hydrique.

Introduction

Water deficit represents a major abiotic constraint to wheat cultivars. SIAL *et al.* (2017) reported that genotypes showed a variable response to various water deficit conditions for their physiological traits [1]. Water stress affects every factor of plant growth and the productivity of a crop, modifying its morphology and phenology as well

SIAL *et al.* (2017), TURNER and BEGG (1981), BLUM (1988), AKRAM *et al.* (2004), SAYRE *et al.* (1995), REYNOLDS *et al.* (1999) and MIRBAHAR *et al.* (2009) have pointed out the fact that several morphological traits, such as coleoptiles length, seed size, early ground cover, thickness of the stem, had something to do with the level of the genotypes tolerance to drought [1-7]. Leaf anatomical traits (waxiness, leaf rolling, thickness) are considered as a reliable drought adaptative parameter [5]. Water deficit can occur at any phenological stage of the plant [8;9]. Tolerance to drought is becoming a so complicated mechanism by which plants build their own specific adaptative strategies [10,11]. Among those, a variety can withstand to drought by escape strategy, by modifying the cycle, becoming either earlier or later [12]. Plant may behave during water stress by maintaining a high hydric potential. This may result in the reduction of the transpiration occurring in the cuticles and stomates [13]. Glaucousness, waxiness are genetic traits that may be expressed during water stress [14]. Reduction of leaf area tends, according to ARRAUDEAU (1989) [15], to minimize transpiration but can also lead to yield decrease because of the reduction of photosynthetic capacity [16]. According to CASALS (1996) and EL MOURID (1988), plants accumulate osmoticum, such as proline, in order to maintain osmotic strength balance after decrease of hydric potential had occurred [17,18]. WANG *et al.* (2003) [19] report other factors, such as reduction of the transpiration by getting stomates closed and reducing leaf area [20]. This may maintain turgor high [21,22]. In the presence of water deficit, hydric potential may decrease because of the maintaining turgid status [23]. SUHEB (2011) have established mapping waxy for wheat drought lines [24]. Leaf epicuticular wax deposition is, according to SUHEB *et al.* (2018) and BOWNE *et al.* (2012) one of the several traits important, during drought tolerance due to its relationship with decreased water loss from the leaf surface [25,26]. Water deficit is one of the primary causes of decreasing wheat yields [27]. Leaf epicuticular wax has a determinant role in the adaptation of wheat to high temperatures and moisture deficit conditions. According to HUSEYNOVA (2012), many individual compounds are increased to provide osmoprotective functions which prevent the desiccation of enzymes [28]. NIO *et al.* (2011) have shown that cuticle wax accumulation is associated with drought tolerance in wheat near isogenic lines. The authors reported that there was a relationship between wax deposition and grain yield. Plant water status goes progressively through three main stages according to development of water stress [29]. During initial phase, transpiration and assimilation will be functioning as there was no water limit. This phase will continue until the level of root absorption cannot anymore satisfy climatic demand undergone by leaf canopy [30].

In order to restore equilibrium between climatic demand and soil availability, stomatal regulation seems to be a relevant pathway for specific mechanism to be steadily used [31]. LEBON *et al.* (2006) have shown that when water deficit is severe, stomata will be closed and photosynthetic activities are inhibited [32]. Plant growth stops before a decrease in water content [33]. The first effects of water deficit is a reduction of growth speed of the stem cells [34] and an important reduction of the size of leaf surface as well [35]. Feakins and Sessions (2010) emphasized on water deficit on yield components, in particular, number of grain/spike and mean kernel weight [36]. FAKHRI *et al.* (2008) have shown that the number of spike/m² is not affected by water deficit during the 3 nodes stage [37]. However, waxiness represents, according to [38], a physiological way by which plant can avoid desiccation when water is a limiting factor. Glaucousness of the leaves is linked to the presence of waxy cuticle [32]. The presence of trichomes, by increasing radiations reflectance, limits increase of leaf temperature and contributes to limit loss of water by transpiration [39]. Other researchers [40], working on wheat, report that a high wax

accumulation on the flag leaf, leads to a weak water retention. Limitation of water loss can be attributed to reduction of transpiration surface [41].

1.- Material and Methods

Plant material

Three durum wheat varieties have been used for the trial. It concerns: Vitron, an improved cross from CIMMYT and selected in Spain; Simeto from Italy and Ammar6, line from CIMMYT genetic material.

Experimental design

The trial: was conducted in a farm located at 15 km, southwest Annaba a randomized complete bloc was chosen. The varieties were sown in three replications, six rows each, 2.5 m length and 1m width. Space between rows was 20cm and 50 cm between plots (varieties). Density or rate of planting was 120kg/ha and depth 8cm. The trial was under rainfall conditions and no irrigation was provided. Fertilization was applied at seedling stage. Ammo nitrate was added at rate of 2qx/ha.

Field notations

The notations have been made on: morphological parameters: stem- leaf (table I), Phenological parameters: heading and flowering stage (tab. II) and some yield components (tab. II).

Morphological characteristics

Leaf characteristic

Type and texture of the leaf: these two parameters were evaluated at naked eye. (table I).
Leaf area (cm²): Leaf area concerned the flag leaf and was determined by [42] which consisted in cutting a fresh leaf, cutting the space occupied by the leaf in paper, weighting it. At the same time we take 1cm² of the paper, weight it and get the appropriate total weight of the leaf by deduction. (tab. I).

Stem characteristic

Height of the plant: was measured from the bottom to the plant to end of the spike. Three replications were done for getting the mean of the plant height. (tab. I).

Nature of the stem: we have made transversal cut between the 4th and the 5th internode and we have estimated whether or not the stem was: filled or semi filled. (tab. I).

Diameter of the stem: (expressed in mm) is measured after flowering is occurred, between the 4th and 5th internode with pied à coulisse (tab. I).

Thickness of the stem: measured after flowering has occurred, between 4th and 5th internode, we make transversal cross section and read the thickness of the stem using pied à coulisse dial (tab. I).

Phenological parameters

Heading: number of days from seeding up to heading stage. This stage is scored when 50% of the spikes appear (tab. II).

Flowering: this stage is scored at the apparition of the stamens in almost half of the spikes. (tab. II).

Yield components

Tillering number: it was determined by direct count of tillers, three replications by genotype (tab. II).

Number of spike/m²: it was determined also by direct count of the number of spike present in one m² (tab. II).

2.- Results and discussion

The results we are presenting concern exclusively some aspects by which we wanted to discuss what is happening in the field, in terms of genotypes responses to specific environment. These are expressed through numerous morphological and phenological traits as well. In order to get some supplementary explanation on how some durum wheat varieties are behaving through its organs, we have chosen main traits, which are stem leaf and spike. Often, researchers spend useless time in making numerous analysis in lab to predict future yield performance or tolerance to abiotic and biotic stress imposed to the varieties. To our conviction, in a plant breeder point of view, it is suitable to take in account what happen first in the field. In doing this, it surely help to give better explanation whenever yield and tolerance are concerned. So, these results are to be considered as pre requisite research aspect before going deeply in fundamental details, even though they are necessary and reliable too.

Leaf characteristic

Type of the leaf: cv Vitron has flag leaf. At the mean time cv Ammar 6 has erect leaf and cv Simeto has semi- erect leaf (tab. I). This trait is considered as important because it participates to adaptative strategies of the varieties under water deficit. Varieties that have erect leaf are those that will regulate their transpiration.

Leaf texture: waxiness and glauscesness. According to the results that have been obtained in the present study, a phenotypic diversity does exist. (tab. I).

Vitron: waxy (medium)

Ammar 6: waxy (excessive, pronounced wax)

Simeto: lack of wax and glauscesness.

Leaf area: Leaf area is more important for Simeto (54.67cm²). Vitron (54.17cm²) followed by Ammar 6 (53.55cm²) (tab. I).

Stem characteristic

Height of the plant: In a general manner, the three genotypes responded similarly. Height of plants translates a semi dwarf biological model, as compared to traditional and local varieties which all are tall varieties. Height is a useful parameter in phenotypic study because it may help in predicting yields through different levels of fertilization, especially nitrogen; tall varieties being sensitive to mechanical lodging. Also, as far as stem is

concerned, the three varieties have semi- filled stem with however slight thicker stem for Ammar 6 and Simeto compared to Vitron (tab. I).

Table I.- Morphological traits of three durum wheat varieties

| Variety | Leaf | | | Stem | | | |
|----------------|---|---|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| | Type of leaf - Erect -Semi erect -flag | Leaf texture - Waxiness - glaucesness | Leaf area (cm ²) | Stem - filled - semi -filled | Height of plant (cm) | Stem diameter (4-5 Nodes) | Thickness of stem (mm) |
| Vitron | Flag | Waxy + | 54,17 | Semi -filled | 107,83 | 4,25 | 1,04 |
| Ammar 6 | Erect | Waxy ++ | 53,55 | Semi -filled | 111 | 3,62 | 1 |
| Simeto | Semi- erect | Glaucsesnes- Waxiness - | 54.67 | Semi-filled | 108,66 | 4,33 | 1,06 |

Diameter of the stem: diameters are different in size. Simeto has 4.33mm; Vitron has 4.25mm and Ammar 6 has 3.62mm (tab. I). These variations may have been due to origin or even the pedigree of the variety.

Thickness of the stem: stems have a thickness around 1mm, no major difference appears from one variety to another (tab. I).

Tillering: is expressed as number of tillers/plant: Concerning this specific trait, Simeto seems to have an advantage (12 tillers/ plant), as compared to Ammar 6 with 10 tillers/ plant and Vitron with 9tillers (tab. II). Tillering is in fact an agronomic component which has something to do in yield determination. However, some varieties may be well performing, with a high yield potential even though number of tillers are low [43]. Under some environmental conditions, when water supply is not a limiting factor, yield may be attained by other parameters such as thousand kernels weight or number of grains / spike. Under the conditions where the trial was realized, number of tillers may justify a high yield because of the irregular rainfall conditions. Thus, the more tillers we have higher will be the productivity.

Number of spike/ m²: the parameter seems to be correlated with tillering. In fact, Simeto which had the highest tillering, had also a higher number of spike/m² (421spikes) (tab. II).

Table II.- Phenological traits of three durum wheat varieties

| Variety | Phenology | |
|----------------|-------------------|---------------------|
| | Heading (days) | Flowering (days) |
| Vitron | 137 | 153 |
| Ammar 6 | 139 | 151 |
| Simeto | 141 | 152 |

Phenological parameters

Heading stage: the three varieties headed at the same time because they are improved varieties, so called intensive ones and have almost a similar trend for their phenology (137days, 139days and 141days for respectively Vitron, Ammar6 and Simeto (table II).

Flowering stage: were 153 days for Vitron, 151 days for Ammar 6 and 152 days for Simeto (tab. II). It appears that phenology, as shown by these results, at least for the present experiment, has not to be taken as a reliable tool of selection. We aim to confirm

this in using more genotypes in the same trial in order to better discriminate between those parameters that are worth to be used in a wheat breeding improvement program.

As far as yield components are concerned, Ammar 6 seems to be the best in its expression of giving more spike/m², more grains per spike and ultimately estimate yield (55.28 Qx/ha) (tab. III). Simeto is also well expressing its agronomic potential through number of spikes/m² (421) (tab. III) and through its thousand kernel weight (60g) (table III). The current study aims to emphasize on how much important is to explain the final end product, grain yield, using other characteristics than classic ones such as yield components. These are other morphological traits that are associated in elaborating such yield. As we have seen, waxiness had determinant role in helping varieties to withstand abnormal conditions during cropping. Also physical nature of the stem contributes and enhances plants to support heavy load of grains and by mean, in getting higher yield.

Table III.- Yield components and estimate yield for three durum wheat genotypes

| Variety | Tillering | Number of spikes/ m ² | Number of grain/spike | TKW (g) | Theoretical Yield (Qx /ha) |
|---------|-----------|----------------------------------|-----------------------|---------|----------------------------|
| Vitron | 9 | 390 | 21 | 55 | 45,04 |
| Ammar 6 | 10 | 437 | 23 | 55 | 55,28 |
| Simeto | 12 | 421 | 19 | 60 | 48 |

Conclusion

Characterization of certain phenotypic traits allowed us to identify genotypic diversity of three durum varieties. Among conclusions that may be brought, in a morphological stand of point, the varieties that have been used for this purpose, showed differences in their respective traits. It was somewhat expected to get these differences because of their genetic polymorphism.

Among those results, variability does exist for leaves (surface and texture), stem (in relation to their thickness) and their height. These traits are to be used in plant breeding improvement for wheat program. In doing this, appropriate crosses can be made in order to introduce desirable traits in some specific cultivars. We shall progressively reach this in matching such traits, obtention of «ideotype», a variety that may gather more than one desirable character. However, study of such traits has to be performed in order to know their inheritance.

Among genetic traits, some are monogenic while others are polygenic. Actually we emphasize on looking after these desirable traits in order to correct varieties in which such character are lacking. To make more efficient the strategy of the current research, we aim to use more scientific tools, in terms of physiological and biochemical analysis of the plants for a much better understanding of the endogenous responses expressed as adaptative pathways.

References

- [1].- Sial M. A., Mangrio S. M., Bux H., Channa A. W. and Shaikh M., 2017.- Effect of water stress on some physiological traits of bread wheat genotypes. Pak. J. Agril. Engg., Vet. Sci, 33 (1): 1-11.

- [2].- Turner N. C. and Begg J. E., 1981.- Plant water relations and adaptation to stress. *Pl. Sci*, 58: 97- 131
- [3].- Blum. A., 1988.- Improving wheat grain filling under stress by stem reserve mobilization. *Euphitica*, 100 (1): 77-83.
- [4].- Akram H. M., Iqbal M. S., Saeed M., Yar A., Ali A., Sahi K. A. and Nadeem M. A., 2004.- Drought tolerance studies of wheat genotypes. *Pak. J. Biol.Sci*, 7 (1): 90- 92.
- [5].- Sayre K. D., Acevedo E. and Austin R. B., 1995.- Carbon isotope discrimination and grain yield for three bread wheat germplasm groups grown at different levels of water stress. *Field crops. Res*, 41: 45-54.
- [6].- Reynolds M. P., Skovmand B., Trethowan R. M. and Pfeiffer W.H., 1999.- A concept model for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*. 58(2): 177-186.
- [7].- Mirbahar A. A., Markhand G. S., Mahar A. R., Abro S. A. and Kanhar N. A., 2009.- Effect of water stress on yield and yield components of wheat varieties. *Pak. J. Bot*, 41(3): 1303- 1310.
- [8].- Benlaribi. M., 1990.- Adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.), étude des caractères morphologiques et physiologiques. Thèse de Doctorat., Univ. Constantine, 164p.
- [9].- Baldy C., 1992.- Indicateurs de la contrainte hydrique. *Sécheresse*, 6: 175-177.
- [10].- Turner N. C., 1979.- Drought resistance and adaptation to water deficit in crop plants. In: *Stress and physiology in crop plants*. H. Mussel., RC. Staoles., Eds Wiley., New York, 343- 372.
- [11].- Nachit M., Ketata H., 1985.- Breeding strategy for improving durum wheat in mediterranean rainfed areas. *Drought tolerance in winter cereals*. Ed.J.P. srivastava, Pp 101-114.
- [12].- Levitt J. 1972.- Responses of plants to environmental stress. Acad. Press, N. Y., USA, 607p.
- [13].- Belhassen E., This D., Monneveux P., 1995.- L'adaptation génétique face aux contraintes de sécheresse. *Cahiers d'Agriculture* 1: 251-261.
- [14].- Gate P. H., 1995.- Ecophysiologie du blé. Technique et documentation. Lavoisier., Paris, 351p.
- [15].- Arraudeau M., 1989.- Breeding strategies for drought in cereals, CAB international, Pp 107-116.
- [16].- Bidinger. F.R., Witcombe JR., 1989. Evaluation of specific deshydration tolerance traits improvement of drought resistance. In *drought resistance in cereals*

F.W.G.Baker of CAB international, 151- 164.

- [17].- Casals M. L., 1996.- Introduction des mécanismes de résistance à la sécheresse dans un modèle dynamique de croissance et développement du blé dur. Thèse de Doctorat de l'INRA., Paris Grignon, 93p.
- [18].- El mourid M., 1988. Performance of wheat and barley cultivars under different soil moisture regimes in semi arid region. Ph.D dissertation, Iowa State University Ames., USA, 229p.
- [19].- Wang W. X., Brak T., Vinocur B., Shseyov O. and Altman A., 2003.- Abiotic resistance and chaperones: possible physiological role of SPI, a stable and stabilising protein from populus. In: Vasil. IK (ed). Plant biotechnology 2000 and beyond., Kluwer., Dordrecht, Pp. 439-443.
- [20].- Karou M., Haffid R., Smith D. N., Samir K., 1998.- Roots and shoots growth water use and water use efficiency of spring durum wheat under early season drought. *Agronomie*, 18: 180-186.
- [21].- Monneveux. P. et Nemmar, M., 1986.- Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.): étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6: 583-590.
- [22].- Bouzoubaa Z., Elmourid M., Karrou M. et El Gharous M., 2001.- Manuel d'analyse chimique et biochimique des plantes., Eds. INRA Maroc, in *Int.J.Biosci.* vol.11: 205-212.
- [23].- Monneveux P. and This D., 1997.- La génétique face aux problèmes de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse: espoirs et difficultés. *Sécheresse*, 1, 8: 29-37.
- [24].- Suheb M., 2011.- *Fundamental for life: Soil, Crop and Environmental Sciences.* ASA. CSSA International Annual Meetings., San Antonio, TX. Oct: 16-19.
- [25].- Suheb M., Trevis D., Huggins., Beecher F., 2018.- The role of leaf epicuticular wax in the adaptation of wheat to high temperatures and moisture deficit conditions. *Crop Science*, 58 (2): 679-689.
- [26].- Bowne J. B., Tim A. Erwin., Juttner J., Schnurbusch T., Landridge P., Bacic A. and Rosser U., 2012.- *Molecular Plant*, vol 5, Issue 2, pages 418- 429.
- [27].- Guo J., Wen X., Xiaocong Y., 2016.- Cuticular wax accumulation is associated with drought tolerance in wheat near isogenic lines. *Front Plant Sci*, vol 7 :1809.
- [28].- Huseynova I. M., 2012.- Photosynthetic characteristics and enzymatic antioxidant capacity of leaves from wheat cultivars exposed to drought. *Biochemical et Biophysica Acta*, vol. 1817: 1516-1523.
- [29].- Nio S. A., Cawthray G. R., Wade L. J., Colmer T. D., 2011.- Pattern of solutes accumulated during leaf osmotic adjustment as related to duration of water deficit

- for wheat at the reproductive stage. *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 49: 1126-1137.
- [30].- Bennet D., Izanloo A., Edwards J., Kuchel H., Chalmers K., 2012.- Identification of novel quantitative trait loci for days to ear emergence and flag leaf glaucousness in a bread wheat (*Triticum aestivum* L.) population adapted to southern Australian conditions. *Theor Appl Genet*, 124: 697-711.
- [31].- Kameli A. and Losel D. M. 1995.- Contribution of carbohydrates and other solutes to osmotic adjustment in wheat leaves under water stress. *J. Plant Physiol*, 145: 363-366.
- [32].- Lebon E., Pellegrino A., Louarn G. and Lecoeur J., 2006.- Branch development controls leaf area dynamics in grapevine (*Vitis vinifera*) growing in drying soil. *Annals of Botany*, vol.98: 175-185.
- [33].- Domagalska M. A. and Leyser O., 2011.- Signal integration in the control of shoot branching. *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.*, 12: 211-221.
- [34].- Pedro A., Savina R., Gustavo A. Slafer., 2012. Crop productivity as related to single-plant traits at key phenological stages in durum wheat. *Field Crops Research*, vol. 138: 42-51.
- [35].- Richards R. A., Rebetzke G., Condon A. G., Watt M., 2011.- Breeding to improve grain yield in water limited environments: the CSIRO experience with wheat. In: Araus. L.J., Slafer. G.A. eds. *Crop stress management and global climate change.*, CABI: UK, Pp 105-121.
- [36].- Feakins S. J., Sessions A. L., 2010.- Controls on the D/H ratios of plant leaf waxes in arid ecosystem. *Geochimica et Cosmologica Acta*, vol. 74: 2128- 2141.
- [37].- Fakhri M., Nasrellah N., Mahboub S., Bidani A., El bouhmadi K., 2008.- Tests morphologiques et biochimiques pour la tolérance au stress hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Al Awamia*, Pp 123-124.
- [38].- Kosma D. K., Nemachek J. A., Jenks M. A., Williams C. E., 2010.- Changes in properties of wheat leaf cuticle during interactions with Hessian fly. *Plant J*, vol, 63: 31-43.
- [39].- Mahdid M., Kameli A., Ehlert C., Simonneau T., 2011.- Rapid changes in leaf elongation, ABA and water status during recovery phase following application of water stress in two durum wheat varieties differing in drought tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, vol 49: 1077-1083.
- [40].- Paul M. H., Planchon C., Ecochard R., 1979.- Etude des relations entre le développement foliaire, le cycle de développement et la productivité chez le soja. *Améliorations végétales*, 29: 479-492.
- [41].- Benbelkacem A. E. K., Mekni M. and Rasmusson D. C., 1984.- Breeding for high tiller number and yield in barley. *Crop.Sci*, vol. 24 (5): 968-972.