

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Nature et de la Vie



THESE

Présentée par

BOUZID Assia

Pour l'obtention du diplôme de doctorat de troisième cycle (LMD)

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Biologie

Spécialité : Adaptation et productivité des plantes cultivées

THEME

**Effet de déficit hydrique et la nature de l'organe sur l'activité
des enzymes de formation de l'amidon lors de remplissage du
grain chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.)**

Soutenu le 07/07/2021 devant le jury composé de :

Président	Pr. MEDERBEL Khalladi	Université de Tiaret
Examineur	Pr. BELKHOUDJA Moulay	Université Oran 1 ABB
Examineur	Pr. DELLAL Abdelkader	Université de Tiaret
Examineur	Pr. LOTMANI Brahim	Université de Mostaganem
Directeur de thèse	Pr. ADDA Ahmed	Université de Tiaret

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicace

Je tiens à dédier cette thèse :

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leur dévouement, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mes frères et sœurs :

Amine, Aziz et Nasreddine, Fatima, Wahiba et son mari, Asma et ma belle-sœur Samia, et notre princesse « Miral »

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de réussite.

Une dédicace à ma grande famille universitaire et mes meilleurs amis.

Assia BOUZID

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon professeur et directeur de thèse, Monsieur **ADDA Ahmed** qui m'a encadré tout au long de cette thèse. Qui il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués. Il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Merci également pour sa disponibilité et le temps passé à la correction de ce manuscrit.

J'adresse mes chaleureux remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail :

Je remercie Monsieur **MEDERBEL Khalladi**, Professeur à l'Université de Tiaret, d'avoir aimablement accepté de présider ce jury. Qu'il me soit permis de lui témoigner mon sincère et profond respect.

Je remercie également Monsieur **BELKHODJA Moulay**, Professeur à l'Université Oran 1 Ahmed Ben Bella, de l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur **DELLAL Abdelkader**, Professeur à l'Université qui me fait l'honneur de participer à mon jury pour examiner ce travail et pour m'avoir accueilli dans son laboratoire.

Je veux adresser tous mes remerciements à Monsieur **LOTMANI Brahim**, Professeur à l'université de Mostaganem pour m'avoir fait l'honneur de juger ce travail.

Je voudrais également exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur **José M. ROMERO RODRIGUEZ**, doyen de la faculté de biologie de l'Université de Séville en Espagne, Monsieur **Federico VALVERDE ALBACETE**, et Madame **Maria Teresa RUIZ PEREZ** qui m'ont accueilli au sein de leur laboratoire, c'est grâce à eux que j'ai pu concilier avec bonheur mes recherches. Ainsi, mes remerciements s'adressent à **Isabel, Gloria, Fernando, Pedro et Carol**, merci pour votre disponibilité, votre gentillesse, votre patience et vos précieux conseils. J'ai beaucoup apprécié de travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Je remercie Monsieur **KOUADRIA Sidahmed** pour le soutien, et les précieux conseils.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers l'ensemble de mes collègues du Laboratoire biotechnologie végétale spécialement Mme **MOKHFI Fatima. Z**, et M^{lle} **BENCHOHRA**

Atika, et *Sara*. J'ai apprécié la qualité de votre travail, votre bonne humeur et même vos blagues! J'aurai plaisir à travailler avec vous.

Je voudrais témoigner ma profonde reconnaissance à Mr *Ait Hammo M.*, Mr *Chohim K.* Mr *Zemour K.* et Mr *Arous A.* Mr *Ameur M.* pour la collaboration et l'aide précieuse.

Mes sincères remerciements vont également à toute l'équipe du laboratoire de santé animal de ex ITMA de Tiaret particulièrement à Monsieur *Abdelly M.*, Monsieur *Agad H.*, et *Redouane* pour leur précieuse aide et collaboration.

À toute personne qui a participé de près ou de loin à la finalisation de ce travail, *Boumedine Amina, Benfatma Aicha, Djenaoui Houria, Bakhtaoui, Meriem, Zoukel Fouzia, Amara Sabrina, Kelikhi Fatima Zohra, Smail Messaouda et Mekhloufi Mohamed Abdelmadjid*, qu'elle trouve ici l'expression de mes reconnaissances les plus sincères.

Je remercie mes collègues *Felouah oumchikh, Tahir Fatiha, Hogase Farida, Belkhodja leila, Ghlamallah yassia, Hadj Chaib radia, Benzerrouk nadia, Belhachmi asma, Merdoud asma, Abdelhamid kawther*, faire la recherche à leur côté a été un réel plaisir.

Un remerciement spécial à mon amie *Ramdani Manar!!* Sans votre aide, je risquerais d'être en Espagne, bloquée et attendant l'ouverture des frontières.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à tous les membres de ma famille et mes amis pour leur soutien assidu, leur aide et leur patience pendant toutes ces années de thèse.

ملخص

نقص الماء هو المشكل الرئيسي الذي يحد بشكل كبير من إنتاجية الحبوب في الجزائر. واحدة من أكثر المراحل ضعفا تجاه الجفاف هي من بداية مرحلة تشكل الجذوع حتي مرحلة النضج الفسيولوجي. في الواقع، نقص الماء في هذه الفترة يغير بشكل مفرط عملية تعبئة الحبوب وبالتالي يغير وزنها وجودتها.

يمثل تحمل النبات لنقص المياه بعد مرحلة تشكل الحبوب الذي يتضمن الحفاظ على طول عمر أعضائه استراتيجية أساسية لتقليل تأثيره على عملية الملء. تحقيقا لهذه الغاية، اهتمت هذه الدراسة بتقييم آثار نقص الماء على تكوين الحبوب وتطوير جودتها. كما تم قياس هذه التأثيرات كميًا على مصادر الإمداد التمثيلي للحبوب المكونة والتغيرات الكمية والنوعية لاحتياطيات الحبوب الرئيسية وأجزاء النشا والبروتين. يتم تحقيق تعبئة الحبوب بشكل مشترك من خلال التمثيل الضوئي الحالي لجميع مكونات عنق السنبله والسنبله من جانب وإعادة تعبئة الاحتياطيات من ناحية أخرى. في ظل ظروف نقص المياه في 60% CC و 30% CC، يبدو أن إعادة تعبئة الاحتياطيات هي المصدر الرئيسي لتوافر الاستيعاب المطلوب لملء الحبوب، بسبب انخفاض طول عمر أعضاء التمثيل الضوئي في ظل ظروف الجفاف. نقص الماء يسرع من عملية تعبئة الحبوب ويقلل من النشا والبروتين. ومع ذلك، فإن تكوين هذه المكونات الاحتياطية يتغير بسبب نقص المياه. تم تسريع تكوين النشا عن طريق زيادة نشاط تركيبات النشا، والتي تتكون أساسًا من الأميلوز أكثر من الأميلوبكتين على عكس حالات الإمداد الأمثل بالمياه.

تمت دراسة محتوى البروتين الكلي وتوصيف ملف تعريف البروتين الإجمالي باستخدام SDS Protein Gels

لاستكشاف تأثير الإجهاد المائي على هذه البروتينات، وجدنا من خلال هذه الدراسة عدة بروتينات مثل: rRNA N- glycosidase, HMW glutenin, Low-molecular-weight glutenin subunit التي لها اختلافات في محتوى عجز المياه.

الكلمات المفتاحية: القمح الصلب، تعبئة الحبوب، نقص المياه، تشريح الحبوب، نشاط الإنزيم، ملف البروتين.

Résumé

Le déficit hydrique constitue le principal stress abiotique limitant grandement la productivité des céréales en Algérie. L'une des phases les plus vulnérables aux effets de la sécheresse s'étale de la montaison à la maturité physiologique. En effet, une alimentation hydrique déficiente durant cette époque altère excessivement les processus du remplissage et modifie par conséquent le poids et la qualité du grain. La tolérance post-anthèse de la plante au déficit hydrique impliquant la préservation de la longévité de ses organes représente une stratégie primordiale pour atténuer l'impact des contraintes sur le processus du remplissage. A cet effet, une évaluation des effets des régimes hydriques déficients sur la formation du grain et l'élaboration de sa qualité a été concernée par cette étude. Egalement ces effets ont été quantifiés sur les sources d'approvisionnement en assimilés du grain en formation et les variations quantitatives et qualitatives des principales réserves du grain, les fractions amylicée et protéique. Le remplissage du grain est assuré conjointement par la photosynthèse courante de tous les constituants de l'épi et du col de l'épi d'un côté et la remobilisation des réserves de l'autre. En situation de déficit hydrique dans les traitements conduits à 60%CC et 30%CC, il s'annonce que la remobilisation des réserves constitue la principale source de disponibilité des assimilés indispensable au remplissage du grain, du fait de la longévité réduite des organes photosynthétisants sous l'effet de la sécheresse. La déclaration de la sécheresse accélère le processus du remplissage du grain et réduit sa teneur en amidon et en protéines. Cependant, la composition de ces constituants des réserves est modifiée par le déficit hydrique. La formation d'amidon a été accélérée par accroissement d'activité des amidon-synthases, est constitué principalement par l'amylose que par l'amylopectine contrairement aux situations, d'alimentation hydrique optimale. Une détermination de la teneur totale en protéines et caractérisation du profil des protéines brutes à l'aide de gels protéiques SDS été fait pour explorer l'influence du stress hydrique sur ce paramètre et résulte une identification de protéines particulières tel que le rRNA N-glycosidase, HMW glutenin, Low-molecular-weight glutenin subunit qui présentent des différences dans leur teneur sous déficit hydrique.

Mots clés : blé dur, remplissage du grain, déficit hydrique, anatomie du grain, activité enzymatique, profil protéique.

Abstract

The water deficit constitutes the main abiotic stress that greatly limits the productivity of cereals in Algeria. One of the most vulnerable phases to the effects of drought is from the bolting to the physiological maturity. Indeed, a deficient hydrous supply during this period alters excessively the processes of the filling and consequently alters its weight and its quality.

The post-anthesis tolerance of the plant to water deficit involving the preservation of the longevity of its organs represents a primordial strategy to reduce the impact of the constraints on the filling process. To this end, an evaluation of the effects of the deficient water regimes on the formation of the grain and the development of its quality was concerned by this study. Also, these effects were quantified on the sources of assimilate supply of the forming grain and the quantitative and qualitative variations of the main grain reserves, the starch and protein fractions. Grain filling is achieved jointly by current photosynthesis of all spike and spike peduncle constituents on one side and remobilization of reserves on the other. Under water deficit conditions in the 60%CC and 30%CC treatments, it appears that reserve remobilization is the main source of assimilate availability required for grain filling, due to the reduced longevity of photosynthesizing organs under drought conditions. The declaration of drought accelerates the process of grain filling and reduces its starch and protein content. However, the composition of these reserve constituents is altered by the water deficit. The formation of starch was accelerated by increasing the activity of starch synthases, is constituted mainly by amylose than by amylopectin contrary to the situations, of optimal water supply. A determination of the total protein content and characterization of the crude protein profile using SDS protein gels was done to explore the influence of water stress on this parameter and resulted in the identification of particular proteins such as rRNA N-glycosidase, HMW glutenin, Low-molecular-weight glutenin subunit which present differences in their content under water deficit.

Keywords: durum wheat, grain filling, water deficit, grain anatomy, enzyme activity, protein profile.

Liste des figures

Figure 01: Phylogénie du blé dur (Debiton et al., 2010).....	06
Figure 02: Le cycle de développement de la plante de blé dur.....	09
Figure 03: Histologie de la graine	10
Figure 04 : Couches cellulaires du grain de blé (Debiton et al., 2010).....	11
Figure 05 : Structure des molécules d'amylose et d'Amylopectine (Sauget et al., 2014).....	12
Figure 06 : Voie de biosynthèse de l'amidon et du métabolisme associé dans les tissus photosynthétiques et non photosynthétiques. (a) La synthèse de l'amidon assimilable dans la feuille. (b) La synthèse de l'amidon de réserve dans les tissus de stockage. (c) La voie de synthèse de l'amidon à partir de G1P. Abréviations : BT1 Brittle-1 protein (transporteur ADPglucose), TPT triose phosphate/Pi translocator, GPTG6P/Pi translocator, G1PT putative G1P transporter (Jeon, 2010).....	14
Figure 07: Présentation des différents épis et grains des génotypes Waha, ACSAD1361, Mexicali75, Oued Zenati et Langlois.....	25
Figure 08 : Le dispositif de l'expérimentation au stade montaison dans les conditions optimales (photo originale prise le 30 mars 2016).....	27
Figure 09 : Représentation du dispositif expérimental adopté, au stade montaison sous 3 régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC) et 5 génotypes à savoir : 1 - Waha, 2- ACSAD1361, 3 - Mexicali75, 4 - Oued Zenati, 5 - Langlois	27
Figure 10 : Coupe au niveau de la graine en formation, 1 : diamètre de l'albumen, 2, diamètre de la couche d'aleurone, 3 : diamètre des téguments (photo original).....	29
Figure 11 : Effet de déficit hydrique et la variabilité génotypique sur la teneur relative en eau, chez les différents génotypes testés sous les différents régimes hydriques.....	30
Figure 12 : Ratios de croissance en longueur de l'épi exprimés en centimètre par jour mesurés chez les cinq génotypes et sous les régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	34
Figure 13 : Evolution relative d'organisation d'albumine amylicé (A) et de la couche d'aleurone (B) au cours de remplissage du grain chez les génotypes étudiés sous les trois régimes hydrique (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	38
Figure 14 : Le dispositif de l'expérimentation au stade épiaison (photo originale prise le 24 avril 2017).....	44

Figure 15 : Le dispositif expérimental avec trois lots conduits à 100%, 60% et 30% de la capacité au champ.....	45
Figure 16 : Traitement de l'excision et de l'ombrage : 1. Plante contrôle, 2. plante avec barbes excisées, 3. plante avec la dernière feuille excisée, 4. plante avec système foliaire entier excisé, 5. plante avec pédoncule caché, 6. plante avec épi caché, 7. plante entière caché.....	45
Figure 17 : Contribution relative des différents organes au remplissage du grain de cinq géotypes de blé dur sous trois régimes hydriques (30 % FC, 60 % FC, 100 % FC). SP- plante avec pédoncule caché, SS- plante avec épi caché, SPL- plante entière caché, EA-plante avec barbes excisées, EFL- plante avec la dernière feuille excisée, EFS- plante avec système foliaire entier excisé.....	53
Figure 18 : Electrophorégramme des protéines totales des grains matures des cinq géotypes chez les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	74
Figure 19 : Electrophorégramme des protéines solubles dans le sel des grains matures des cinq géotypes chez les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	76
Figure 20 : Electrophorégramme des protéines solubles dans l'alcool des grains matures des cinq géotypes chez les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	78
Figure 21 : La moyenne géotypique de la teneur des sucres simples au niveau de la graine dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	82
Figure 22 : Cinétique de dépôt des sucres simples au niveau du grain chez cinq géotypes de blé dur dans trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	82
Figure 23 : Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	85
Figure 24 : Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype Waha dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	86
Figure 25 : Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype ACSAD1361 dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	86
Figure 26 : Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype MEXICALI75 dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	87
Figure 27 : Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype OUED ZENATI dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	87

Figure 28: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype LANGLOIS dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	88
Figure 29: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	89
Figure 30: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype Waha dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	89
Figure 31: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype ACSAD1361 dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	90
Figure 32: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype MEXICALI75 dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	90
Figure 33: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype OUED ZENATI dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	91
Figure 34: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le géotype LANGLOIS dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)	91

Liste des tableaux

Tableau 01: Les caractéristiques des génotypes utilisés.....	25
Tableau 02: Effet de déficit hydrique et les variations génotypique sur la teneur relative en eau de la dernière feuille	30
Tableau 03: Effets de la nature des génotypes sur la biométrie des plantes au stade maturité cultivées sous trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	31
Tableau 04: Les résultats moyens des paramètres biométriques de la plante de blé dur au stade maturité sous trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)....	33
Tableau 05: Différents traitements appliqués pour évaluer la contribution de la translocation de la réserve et de la photosynthèse courante de différents organes du blé dur dans le remplissage des grains.....	44
Tableau 06 : Les conditions d'analyses des échantillons pour la détermination de la teneur en amidon, amylose et amylopectine.....	46
Tableau 07: Effets du génotype, du régime hydrique, des traitements et leurs interactions sur le poids relatif des grains et la contribution relative des différents organes dans son remplissage, des cinq génotypes conduits sous les trois régimes hydriques adoptés. Les différences sont exprimées par le test F.....	50
Tableau 08: Résultats moyens du poids relatifs des grains des différents traitements des cinq génotypes conduits sous trois régimes hydriques (100%FC, 60%FC,30%FC).....	50
Tableau 09: Effets de l'alimentation hydrique, du génotype, des traitements de l'organe et leurs interactions sur la teneur en amidon, en amylose et en amylopectine des grains mûresdes cinqgénotypes cultivés sous trois régimes hydriques (100%FC, 60%FC,30%FC).....	56
Tableau 10: Les résultats moyennes de la teneur en amidon des grains matures mesurées sur cinq génotypes cultivés sous trois régimes hydrique (100%FC, 60%FC, 30% FC). Le traitement de l'ombrage et l'excision ont été appliqués à l'anthèse et les poudres des grains matures ont été analysées.CC- plante avec pédoncule caché, EC- plante avec épi caché, PC- plante entière caché, SB-plante avec barbes excisées, SF- plante avec la dernière feuille excisée, SEF- plante avec système foliaire entier excisé.....	58
Tableau 11: Les résultats moyennes de la teneur en amylose (AM) , amylopectine (AP) et le ratio amylose/amylopectine des grains matures mesurées sur cinq génotypes cultivés sous trois régimes hydrique (100%FC, 60%FC, 30% FC). Le traitement de l'ombrage et l'excision ont été appliqués à l'anthèse et les poudres des grains matures ont été analysées. CC- plante avec pédoncule caché, EC- plante avec épi caché, PC- plante entière caché.....	59

Tableau 12: Les résultats moyennes de la teneur en amylose (AM) , amylopectine (AP) et le ratio amylose/amylopectine des grains matures mesurées sur cinq génotypes cultivés sous trois régimes hydrique (100%FC, 60%FC, 30% FC). Le traitement de l'ombrage et l'excision ont été appliqués à l'anthèse et les poudres des grains matures ont été analysées. SB-plante avec barbes excisées, SF- plante avec la dernière feuille excisée, SEF- plante avec système foliaire entier excisé.....	60
Tableau 13: effet de la variabilité génotypique et le régime hydrique sur la teneur en chlorophylle.....	70
Tableau 14: Résultats moyens (unité SPAD) et évolution de la teneur en chlorophylle de la dernière feuille des cinq génotypes cultivés dans les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	70
Tableau 15: Effets de la nature des génotypes sur la biométrie des plantes au stade maturité cultivées sous trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).....	71
Tableau 16: résultats moyens et l'évolution de la teneur des protéines totaux, des protéines solubles dans sel et solubles dans l'alcool des grains matures des cinq génotypes chez les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC) en µg/mg de matière sèche.....	73
Tableau 17: Le niveau relatif et le poids moléculaire des bandes des protéines totales quantifiées à l'aide du logiciel Image Lab et normalisées par rapport aux niveaux de protéines de la bande 5. Les différents bands marquée étoile sont identifiés par spectrométrie de masse MALDI-TOF.....	75
Tableau 18: Le niveau relatif et le poids moléculaire des bandes des protéines correspondant à la fraction soluble dans le sel quantifiées à l'aide du logiciel ImageLab et normalisées par rapport aux niveaux de protéines de la bande 5. La bande marquée par étoile est identifiée par spectrométrie de masse MALDI-TOF.....	77
Tableau 19: Le niveau relatif et le poids moléculaire des bandes des protéines correspondant à la fraction soluble dans l'alcool quantifiées à l'aide du logiciel ImageLab et normalisées par rapport aux niveaux de protéines de la bande 3. La bande marquée par étoile est identifiée par spectrométrie de masse MALDI-TOF.....	79
Tableau 20: listes des protéines identifiés par spectrométrie de masse MALDI-TOF.....	80

Liste des annexes

Annexe 01 : quelques photos des stades de developpement de la plante	99
Annexe 02 : Les courbes d'étalonnage des différents éléments dosés.....	100
Annexe 03 : 1- La preparation du gel protéique, 2- la migration, 3,4- la coloration et la décoloration avec la solution de distinction, 5,6- le système d'imagerie ChemiDoc (Bio-Rad), 7- le découpeur automatique EXQuest Spot (Bio-Rad), 8- spectrométrie de masse MALDI-TOF (Bruker Daltonics).....	102

Liste des abréviations

ACSAD	Arab Center For The Studies Of Arid Zones And Dry Lands
ADH	Avec Déficit Hydrique
AM	Amylose
AP	Amylopectine
CC	plante avec pédoncule caché,
CR	Capacité de rétention
EC	plante avec épi caché,
ER	Evolution Relative
ICARDA	International Center For Agricultural Reaserch In The Dry Areas
MS	Matière sèche
P ₁	poids sec de sol (obtenu par étuvage pendant 24h à 105°C
P ₂	poids à saturation en eau après 24h
PC	plante entière caché
Pf	poids frais
PMG	Poids De Mille Grains
Ppt	le poids en pleine turgescence
Ps	Poids sec des feuil
SB	plante avec barbes excisées,
SEF	plante avec système foliaire entier excisé.
SF	plante avec la dernière feuille excisée,
SG-FPM	Les sous-unités gluténines de faible poids moléculaire
SG-HPM	Les sous-unités gluténines de haut poids moléculaire
TA	Taux d'amidon
TRE	La Teneur Relative En Eau
TS	Taux des sucres

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
ملخص.....	IV
Résumé	V
Abstract.....	VI
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	X
Liste des annexes.....	XII
Liste des abréviations	XIII
Table des matières	XIV
Introduction générale	1
Chapitre I: Synthèse bibliographique	5
1. Généralité sur l'origine et le développement de la plante de blé dur	6
1.1. Description et origine de l'espèce	6
1.2. Cycle de développement de la plante	7
2. Structure et composition du grain de blé dur	9
2.1. Description et histologie de la graine	9
2.2. La composition en amidon au niveau de la graine de blé dur	11
2.2.1. Description de l'amidon.....	11
2.2.2. Biosynthèse de l'amidon.....	12
2.3. La composition en protéines au niveau de la graine de blé dur	15
2.4. La composition en lipides au niveau du grain de blé dur	16
2.4.1. Lipides apolaires (lipides de réserve du grain).....	16
2.4.2. Lipides polaires (lipides de structure du grain)	16

3. Le remplissage du grain et sa relation avec la composition de la graine.....	16
4. La contribution des différents organes dans le processus de remplissage du grain ...	18
5. Le stress hydrique.....	19
5.1. L'effet de déficit hydrique sur la plante de blé dur	20
5.2. Stratégies d'adaptation de la plante au stress hydrique	20
5.2.1. L'échappement	21
5.2.2. L'évitement de la déshydratation	22
5.2.3. La tolérance à la déshydratation	22
Chapitre II : Effets de l'alimentation hydrique et la variabilité génétique sur la formation de l'épi et l'évolution de la structure du grain	23
1. Introduction	24
2. Matériel et méthodes	25
2.1. Le matériel végétal	25
2.2. Conduite de l'expérimentation	25
2.3. Les mesures effectuées	28
2.3.1. La teneur relative en eau	28
2.3.2. Caractérisation de la plante à maturité.....	28
2.3.3. La cinétique de l'élongation de l'épi	28
2.3.4. L'anatomie de la graine.....	29
2.4. Analyse statistique	29
3. Résultats.....	30
3.1. La teneur relative en eau	30
3.2. Caractérisation biométrique de la plante à maturité	31
3.3. La croissance relative ou ratio de croissance de l'épi	33
3.4. L'évolution de la structure de l'albumen amylicé et la couche d'aleurone en fonction du régime hydrique	35
4. Discussion	39

Chapitre III : La contribution de la remobilisation des réserves et la photosynthèse courante dans le remplissage du grain, sa contenance en amidon et que sa composition	42
1. Introduction	43
2. Matériel et méthodes	44
2.1. Conduite de l'expérimentation	44
2.2. Les mesures effectuées	47
2.2.1. Détermination du poids des grains	47
2.2.2. Dosage de l'amidon, de l'amylose et de l'amylopectine	47
2.2.2.1. Préparation de la courbe d'étalonnage	47
2.2.2.2. Préparation de l'échantillon à analyser	47
2.3. Analyse statistique	48
3. Résultats.....	48
3.1. Effet du génotype, du régime hydrique et la nature de l'organe sur l'élaboration du poids final du grain	48
3.2. La contribution relative des différents organes de la plante sous les trois régimes hydriques adoptés, dans le remplissage du grain.....	51
3.3. La contribution relative des différents organes de la plante sous les trois régimes hydriques adoptés, dans l'élaboration de la fraction polysaccharidique du grain à la maturité physiologique.....	55
c. L'activité photosynthétique courante des organes	57
4. Discussion	62
Chapitre IV: Effets de l'alimentation hydrique et la variabilité génétique sur la transformation enzymatique des sucres simples en amidon, la teneur en protéines et leurs profils au niveau du grain.....	64
1. Introduction	65
2. Matériel et méthodes	66
2.1. Prélèvement des échantillons	66
2.2. Les mesures effectuées	66

2.2.1. La teneur en chlorophylle totale (unité SPAD)	66
2.2.2. Dosage des protéines et électrophorèse sur gel protéique.....	66
2.2.2.1. Préparation des échantillons	66
2.2.2.2. Extraction des protéines	66
a. Obtention d'extraits protéiques totaux	66
b. Fractionnement des protéines des graines matures de blé dur	66
c. Quantification des protéines.....	67
d. Electrophorèse des protéines SDS-PAGE	67
e. Préparation des gels	67
f. Coloration des protéines dans les gels de polyacrylamide et décoloration	68
g. Obtention des images.....	68
h. Spectrométrie de masse et identification des protéines	69
2.2.3. Analyse de l'activité des enzymes de formation de l'amidon à travers la cinétique d'accumulation des sucres simples et de l'amidon au niveau des grains en formation	69
2.2.3.1. Cinétique de sucre simple	69
2.2.3.2. Cinétique de la teneur en amidon	69
2.2.2.3. L'indice de transformation des sucres simples en amidon	70
3. Résultats.....	70
3.1. Teneur en chlorophylles.....	70
3.2. Analyse des protéines	71
3.2.1. Détermination de la teneur en protéines totales, des protéines solubles dans le sel et dans l'alcool au niveau des grains.....	71
a. Résultats moyens de la teneur en protéines totales.....	72
b. Résultats moyens de la teneur en protéines solubles dans le sel.....	72
c. Résultats moyens de la teneur en protéines solubles dans l'alcool	72
3.2.2. Analyses des bandes électrophorétiques des protéines par SDS page.....	73
a. Analyse des protéines totales	74

b. Analyse des protéines solubles dans le sel.....	75
c. Analyse des protéines solubles dans l'alcool.....	78
3.3. Etude de la transformation des sucres simples en amidon au cours du remplissage du grain.....	81
3.3.1. Cinétique de dépôt des sucres simples au niveau du grain	81
3.3.2. Indice de transformation des sucres en amidon.....	83
4. Discussions.....	88
Conclusion générale	91
Références bibliographiques.....	93
Annexes	103

Introduction générale

Introduction générale

La culture du blé dur est l'une des principales spéculations de la filière de production végétale. Elle se répartit partout dans le monde et en Afrique elle se concentre principalement dans les régions méditerranéennes. Ses produits détiennent un rôle majeur dans la sécurité alimentaire et représente la principale source de calories et de protéines pour la population.

En Algérie, les superficies réservées à la culture de cette espèce, représentent environ 40% de la superficie agricole utile. L'importance accordée à cette filière se justifie par sa large utilisation dans l'alimentation de la population locale. Ainsi, les produits fournis constituent un élément-clé dans le modèle de consommation dominant. Néanmoins, sa production demeure faible pour satisfaire les besoins continuellement croissants (Chennafi *et al.*, 2010). De ce fait, la compensation du déficit en ce produit se fait par son importation massive des marchés mondiaux (Benbelkacem *et al.*, 2000). Ainsi, les faibles productions enregistrées au fil des campagnes s'expliquent essentiellement par les rendements faibles et irréguliers obtenus qui sont de l'ordre de 15Qx/ha (moyenne des dix dernières années, 2008/2018) (Fao, 2020).

Il faut noter qu'en Algérie, la culture du blé dur s'heurte à de nombreuses entraves, dont celles d'ordre climatique qui en prennent la part importante (Hazmoune *et al.*, 2000). Effectivement, la sécheresse constitue la principale variable qui réduit grandement les potentialités productives de l'espèce. La pérennité de déclaration de ce stress s'impose à travers les cycles agricoles, du fait que la répartition des aires céréalières en Algérie est majoritairement localisée dans les plaines intérieures et les hauts plateaux, appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride (Labdelli *et al.*, 2013). A ce niveau, la conduite de la culture en conditions pluviales est confrontée aux déclarations des cycles de déficit hydrique et où les disponibilités en eau en constitue un facteur primordial d'élaboration du rendement chez les céréales (Boudjabi *et al.*, 2015). Cependant, les contraintes générées par la sécheresse sont largement tributaires de son intensité et la phase de sa déclaration (Ercoli *et al.*, 2008, Adda *et al.*, 2013).

Plusieurs études ont montré que la résistance à la sécheresse a été associée à plusieurs caractéristiques souvent indissociables, d'ordre phénologique, morphologique et physiologique reflétant différents types d'adaptation (Monneveux et Nemmar, 1986, El Hafid *et al.*, 1998; Adda *et al.*, 2005; Monneveux *et al.*, 2006; Zerrad *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2010; Megherbi *et al.*, 2012).

Le poids et la qualité du grain, constituent les caractéristiques de référence d'évaluation du rendement (Gate, 1995) et par conséquent la productivité chez les différentes espèces céréalières. L'élaboration de ces deux paramètres repose sur le processus de remplissage ou le facteur hydrique en est déterminant. La formation du grain implique son organisation tissulaire et l'accumulation des réserves. Le processus de remplissage du grain chez le blé dur est assuré conjointement par une remobilisation des réserves emmagasinées au niveau des différentes parties de la plante et une élaboration courante des photoassimilats par les différents organes (Blum *et al.*, 1991) et principalement, ceux situés au-dessus du dernier nœud. Il faut noter dans ce contexte que la migration des réserves repose sur un flux de la sève, où l'eau en constitue l'élément dynamique de ce transfert. L'activité photosynthétique courante représente la plus importante contribution dans l'élaboration du grain, mais elle se trouve conditionnée par la longévité des différents organes impliqués. Une déclaration tardive du déficit hydrique au cours de la formation du grain constitue un élément déterminant qui conditionne la longévité de ces organes et la qualité de leur contribution dans ce processus (Slama *et al.*, 2005).

La formation du grain reposant sur le déroulement des différents processus morphogénétiques, est dépendante du bilan de l'activité physiologique de la plante durant cette période. Les multiplications cellulaires responsables de la formation des enveloppes et des tissus de réserves d'une part et l'organisation et le dépôt des réserves d'autre part, sont conditionnées par la disponibilité des nutriments, absorbés et synthétisés par les différentes voies métaboliques de la plante. Durant cette période, la migration des réserves et l'activité photosynthétique courante des principaux organes fonctionnels, constituent les seules voies à actions complémentaires responsables de ces apports nutritionnels.

À ce jour, certains travaux sur la dynamique de la formation d'amidon et l'accumulation de réserves au niveau du grain de blé dur ont été publiés. Mais ceux traitant l'effet du déficit hydrique survenant durant cette phase et ses implications sur les teneurs et la qualité en protéines et amidon et l'organisation de la composition du grain, restent insuffisants. L'enrichissement des données émanant des études du remplissage du grain chez le blé, impose une perfection dans le contrôle. Également, les résultats dégagés des études traitant cette problématique manifestent des imperfections engendrées par les difficultés de contrôle des régimes hydriques adoptés lors des expérimentations. Ainsi, les effets des interactions entre la nature des génotypes et l'environnement de leur conduite restent difficilement perceptibles. Surtout, que certains travaux (Alqudah *et al.*, 2011 ; Gaju *et al.*,

2014), ont évoqué que les effets de l'environnement sur le remplissage du grain et son élaboration qualitative restent largement liés à la nature des cultivars conduits.

Les recherches menées pour la réalisation de la thèse, tentent d'élucider les effets des variations des niveaux d'alimentation hydrique de la plante sur les mécanismes de remplissage du grain chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) et qui concernent conjointement l'édification de son poids et sa qualité. Une partie du travail réalisée a été consacrée à l'étude d'implication des deux voies d'accumulation des réserves du grain, la remobilisation et la photosynthèse courante des organes fonctionnels à cette phase. Une évaluation de la disponibilité des assimilats indispensables à ce processus et via les deux sources, a été faite en fonction des disponibilités des ressources hydriques pour la plante. A cet effet, trois situations hydriques ont été adoptées, optimale (100%CC), un déficit hydrique modéré (60%CC) et un déficit hydrique intense (30%CC).

Les effets d'interaction de l'alimentation hydrique et la variabilité génétique conduite sur la cinétique de remplissage du grain ont été également étudiés. L'activité enzymatique de la polymérisation des sucres simples en amidon a été évaluée par leur disponibilité et leur transformation au sein du grain en formation. Enfin la qualité du grain à maturité a été évaluée par le taux et la composition d'amidon en amylose et amylopectine d'une part, la contenance et la nature des protéines d'autre part.

Les résultats obtenus des recherches menées sont organisés en trois parties dans la thèse. Chaque partie inclue les méthodes utilisées, la présentation des résultats et leur discussion. Ils concernent :

- 1- Effets de l'alimentation hydrique et la variabilité génétique sur la formation de l'épi et l'évolution de la structure du grain ;
 - 2- La contribution de la remobilisation des réserves et la photosynthèse courante dans le remplissage du grain et sa contenance en amidon ainsi que sa composition ;
 - 3- Effets de l'alimentation hydrique sur la transformation enzymatique des sucres simples en polysaccharides, la teneur et le profil protéique au niveau du grain en formation.
-

Chapitre I: Synthèse bibliographique

1. Généralité sur l'origine et le développement de la plante de blé dur

1.1. Description et origine de l'espèce

Le blé est une plante autogame et cléistogame. Elle est monocotylédone herbacée annuelle, à chaume long et souple, l'épi est à rachis solide, à glumes carénées jusqu'à leur base, à glumelles inférieures terminées par une longue barbe, c'est (Naville *et al.*, 2005, Saulnier *et al.*, 2012), et elle présente un feuillage clair, totalement glabre (Simon, 1989).

Le blé dur appartient à la famille des *Poaceae* ou *Graminées* (Surgo et Barron., 2005), le genre *Triticum* (blé) et l'espèce *Triticum durum* Desf. Dans le genre *Triticum* auquel tous les blés appartiennent, il existe trois niveaux de ploïdie ; blé diploïde ($2n = 2x = 14$ chromosomes) comme le blé T. monococcum (AA), le blé tétraploïde ($2n = 4x = 28$) comme T. dicoccoides (BBAA) et le blé hexaploïde ($2n = 6x = 42$) comme le blé tendre T. *aestivum* (BBAADD). D'après Feillet (2000) et Mckey (1986), le croisement entre *Triticum monococcum* ou *Tr. Beoticum* (A) et un *Aegilops* (B) a donné un individu de structure génomique (AB) avec 14 chromosomes. Après un doublement chromosomique est apparu *Triticum turgidum* *Dicoccoides* (AA BB), ancêtre du blé dur qui se serait ensuite diversifié en *Triticum dicoccum* et *Triticum Durum* (blé dur cultivé). Le blé dur appelé ainsi de la dureté de son grain, possède $2n=4x=28$ chromosomes (Figure01).

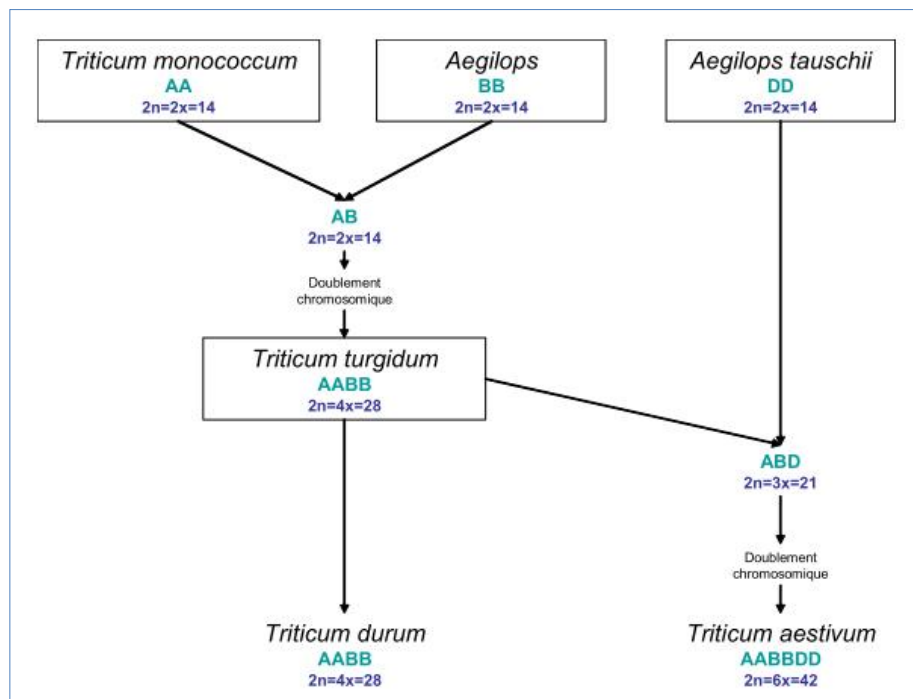


Figure 01: Phylogénie du blé dur (Debiton et al., 2010)

1.2. Cycle de développement de la plante

Le cycle de développement de la plante de blé dur (Figure 02) est composé de deux grandes phases, végétative et reproductrice. La période végétative se caractérise par une croissance strictement herbacée et s'étend du semis jusqu'à fin tallage (Z25, Zadoks *et al.*, 1974). Elle se divise en trois phases :

Une phase germination – levée, où la graine a besoin d'absorber près du quart de son poids d'eau pour germer. Au cours de cette période, les téguments se déchirent, la racine principale, couverte d'une enveloppe appelée « Coléorrhize » apparaît, ensuite, la première feuille fonctionnelle se forme dans un enveloppe appelée « Coléoptile » et amorcent la photosynthèse (Gate, 1995).

Une phase levée –début tallage, au cours de cette phase, la levée se fait réellement dès la sortie des feuilles à la surface du sol. Au sein d'un peuplement, la levée est atteinte lorsque la majorité des lignes de semis sont visibles. Durant la phase semis levée, l'alimentation de la plante dépend uniquement de son système racinaire primaire et des réserves de la graine (Benlaribi *et al.*, 1990;Gate, 1995). Les principaux facteurs édaphiques qui interviennent dans la réalisation de cette phase sont, la chaleur, l'aération et l'humidité, Les caractéristiques propres à la graine comme la faculté germinative et la quantité de réserves (taille des graines) ont aussi un rôle déterminant au cours de cette période (Gate, 1995).

Une dernière phase de début tallage au début montaison. Cette phase est distinguée à travers l'apparition des talles. Cette formation se fait à un rythme régulier égal à celui de l'émission des feuilles. Le nombre de talles produites dépend de la variété, du climat, de l'alimentation minérale et hydrique de la plante, ainsi que de la densité de semis (Maslemeynard, 1980).A partir des bourgeons situés à l'aisselle des talles primaires initiées à la base du brin maître, les talles secondaires peuvent apparaître et être susceptibles d'émettre des talles tertiaires.

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

Cette phase s'étend de la montaison à la floraison en deux phases : Une phase de formation des ébauches qui se manifeste à partir du stade épi à 1 cm. Elle est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent

couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus (Clement , 1971). La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et des manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la gaine.

Une deuxième phase s'étale de l'épiaison à la floraison, la durée de cette phase est d'environ 32 jours, Elle est marquée par la méiose pollinique et l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue la fécondation.

Cette phase est atteinte quand 50 % des épis sont à moitié sortis de la gaine de la dernière feuille (Gate, 1995). Elle correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final de grains par épi.

La période de maturation ; concerne essentiellement les stades de grossissement des grains puis de maturation de ces mêmes grains.

La première étape marque la modification du fonctionnement de la plante qui sera alors orientée vers le remplissage des grains à partir de la matière organique stockée. Au début, le grain s'organise, les cellules se multiplient. A l'issue de cette phase, 40 à 50 % des réserves se sont accumulées dans le grain qui, bien qu'il ait atteint sa taille définitive, se trouve encore vert et mou, c'est le stade « grain laiteux ».

L'autre partie des réserves se trouve encore dans les tiges et les feuilles qui commencent à jaunir. L'accumulation des réserves au niveau des grains proviennent en partie de la photosynthèse nette qui persiste dans les parties vertes de la plante et une partie des réserves accumulées au niveau des autres parties de la plantes et transloquées vers la graine en formation (Merah et al., 2015).

La dessiccation ou la phase de maturation succède au stade pâteux (45 % d'humidité). Au cours de cette phase, la graine perd progressivement son humidité en passant par divers stades (Gate, 1995). Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la teneur en eau du grain pendant 10 à 15 jours. Au-delà de cette période, le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient et passera progressivement aux stades « rayable à l'angle » (20 % d'humidité) puis, « cassant sous la dent » (15-16 % d'humidité).

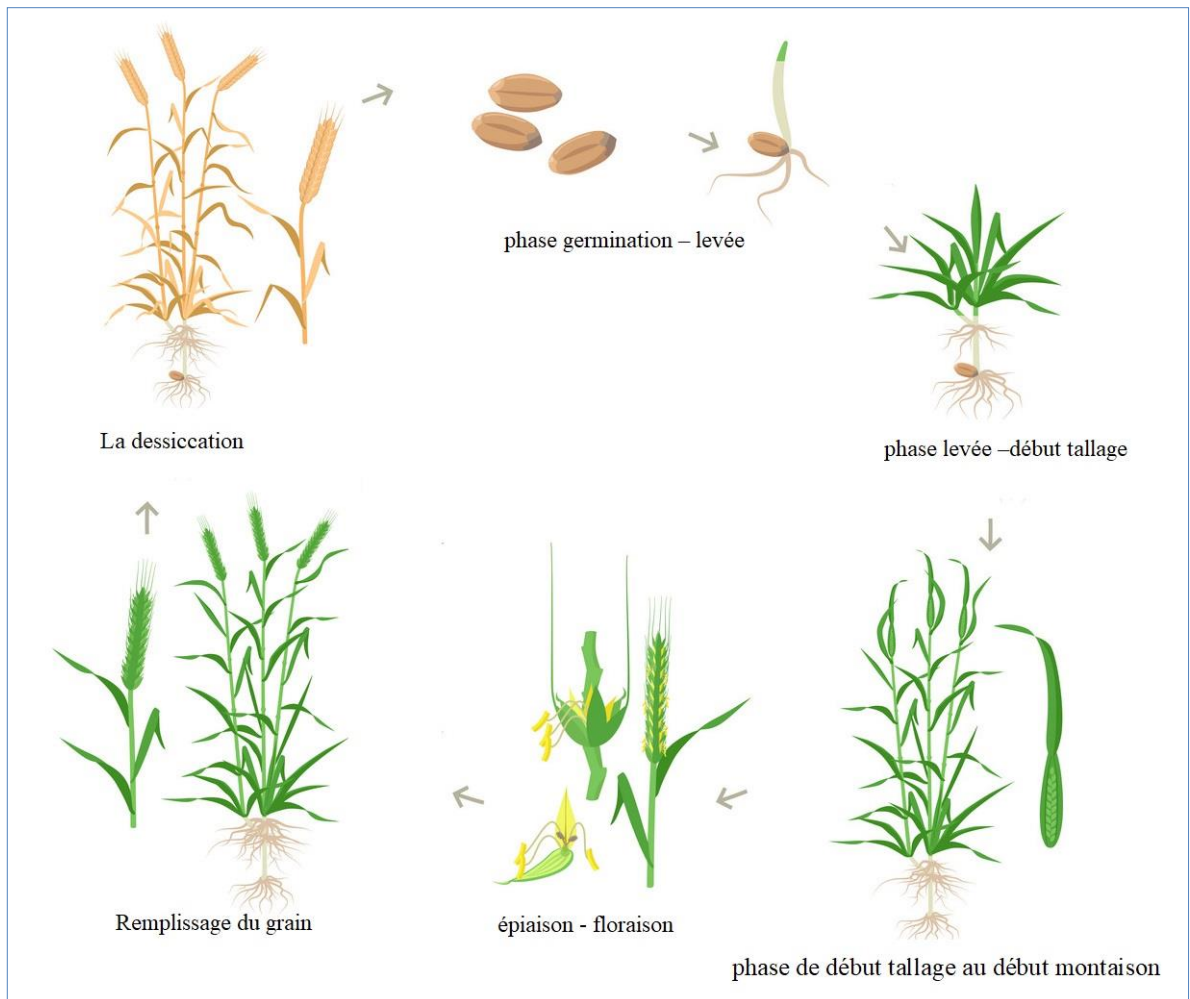


Figure 02 : Le cycle de développement de la plante de blé dur

2. Structure et composition du grain de blé dur

2.1. Description et histologie de la graine

La graine de blé est un fruit sec (caryopse) constitué d'une unique graine intimement soudée à l'enveloppe qui la contient. De la surface externe vers le centre du grain, on distingue l'enveloppe du fruit ou péricarpe puis l'enveloppe de la graine ou testa et enfin à l'intérieur de la graine, l'épiderme du nucelle, l'albumen et le germe (Saulnier *et al.*, 2012). Le germe de la graine est constitué d'un scutellum qui sécrète des enzymes responsables de la dégradation de l'amidon de l'albumen et la libération de sucres simples pour nourrir l'embryon au cours de la germination, aussi, une coléoptile, qui donne par la suite la première feuille à la germination et qui enveloppe les feuilles subséquentes. En plus, on observe une coléorhize qui loge la première racine ou la radicule.

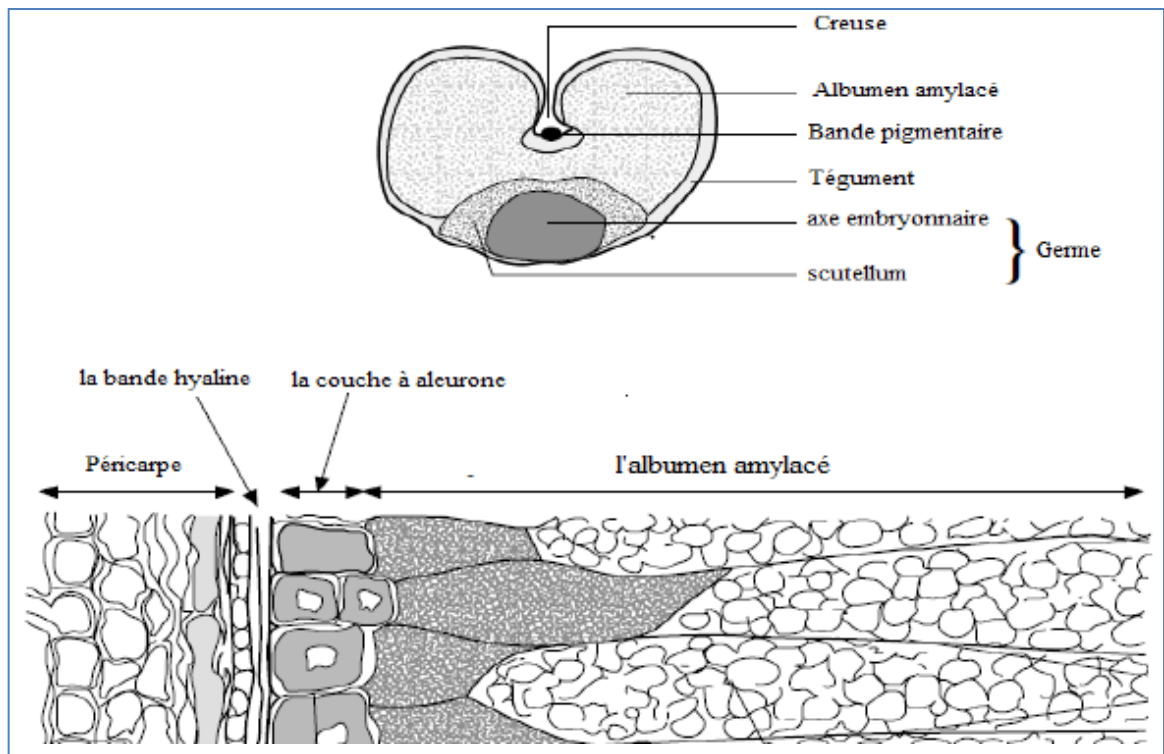


Figure 03 : Histologie de la graine

Les trois parties principales du grain de blé, albumen, enveloppes et germe représentent en viron 80%, 12%, 2.5% (Barron *et al.*, 2012). Et la coupe longitudinale de grain révèle de l'extérieure les parties suivantes : les enveloppes, le germe et l'albumen ou amande. Les enveloppes représentent 14 à 16 % du poids du grain. Elles sont constituées de l'extérieur vers l'intérieur par le péricarpe, les téguments et l'assis protéique. Le péricarpe représente la paroi de l'ovaire, il comprend l'épicarpe, le mésocarpe et l'endocarpe. Le tégument est l'enveloppe de la graine et il comprend le tégument séminal et la bande hyaline. L'assise protéique représente 60% du poids des enveloppes, elle est formée par des cellules à aleurones riches en protéines.

Le germe représente 2,5 à 3% du grain, très riche en matières grasses, matières azotées et vitamines A, E et B. Il est constitué de l'axe embryonnaire et du scutellum. Cette organisation est préservée pour toutes les céréales, avec des variations pour la couche à aleurone qui est en général formée d'une seule assise cellulaire (blé, seigle ou maïs), sauf pour l'orge (3 assises) et le riz (1 à 5 assises).

L'albumen ou amande représente 83 à 85 % du poids du grain, il est composé de 70% d'amidon et de 7% de gluten. Chez le blé dur, l'albumen est corné et vitreux, un peu comme

celui du riz. L'albumen joue un rôle essentiel dans la composition de la semence ; il sert de réserve et ne sera complètement utilisé qu'au moment de la germination.

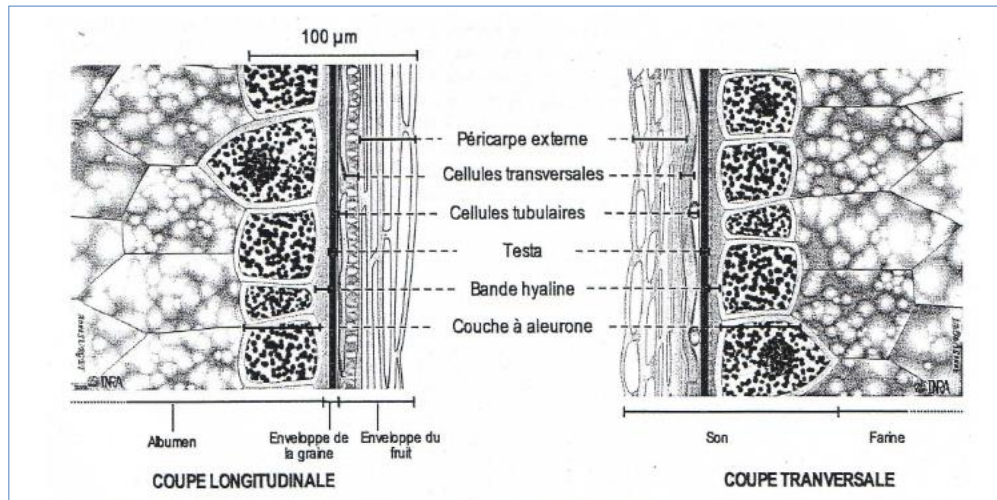


Figure 04 : Couches cellulaires du grain de blé (Debiton *et al.*, 2010)

2.2. La composition en amidon au niveau de la graine de blé dur

2.2.1. Description de l'amidon

Les grains de céréales retiennent l'énergie sous forme d'amidon. La quantité d'amidon contenue dans un grain de blé peut varier entre 60 et 75 % du poids sec total du grain. On trouve l'amidon dans les graines sous forme de granules. Le blé dispose de deux sortes de granules d'amidon : les grands (25-40 µm) lenticulaires et les petits (5-10 µm) sphériques (Massaux *et al.*, 2006). Les granules lenticulaires se forment au cours des 15 premiers jours suivant la pollinisation. Les petits granules, qui représentent environ 88 % du total des granules, apparaissent 10 à 30 jours après la pollinisation. L'ensemble des granules sont synthétisés au niveau des amyloplastes (Hannah et James, 2008). L'amidon est un mélange de deux polymères de D-glucopyranose, l'amylose et l'amylopectine, qui se différencient entre elles par le degré de polymérisation et le nombre de ramification (Sestili *et al.*, 2010).

L'Amylose est un long polymère linéaire d'unité de D-glucose avec des liaisons de type α -1,4 (99%) qui peut aussi posséder quelques ramifications avec des liaisons α -1,6 (25-55%) (Debiton, 2011;Saulinier *et al.*, 2012). Il présente un poids moléculaire compris entre 10^5 - 10^6 g.mol⁻¹ et un degré de polymérisation compris entre 324 et 4920 unités (Singletary, 2000 ; Yoshimoto *et al.*, 2000). La molécule d'Amylose par sa structure linéaire a la capacité de s'enrouler de manière hélicoïdale autour d'acides gras libres, d'alcools ou d'iode.

L'Amylopectine est le polymère hautement ramifié de l'amidon. Il est représenté par une structure branchée avec des liaisons. Il est formé de chaînes d' α -Dglucopyranosyl liées en

α -1,4 mais avec 5 à 6% de liaisons α -1,6 (Saulnier *et al.*, 2012). Il présente un poids moléculaire compris entre 10^8 et 10^9 g.mol⁻¹. Le degré de polymérisation de l'Amylopectine compris entre 9600 et 15900 unités (Takeda *et al.*, 2003; Beckles *et al.*, 2014). Globalement, la longueur des chaînes de ramifications est beaucoup plus courte que celles de l'amylose, elles font en moyenne 18 à 25 unités de long. Les teneurs respectives en Amylose et Amylopectine influencent les propriétés chimique et technologique d'un amidon telles que sa susceptibilité à l'hydrolyse enzymatique.

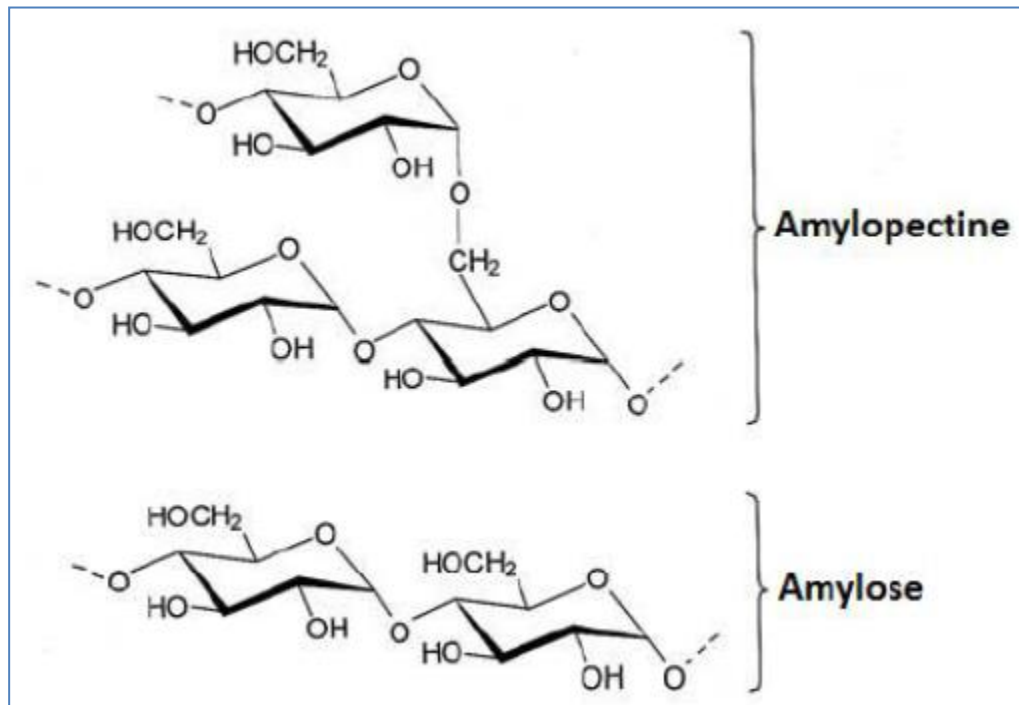


Figure 05 : Structure des molécules d'amylose et d'Amylopectine (Sauget *et al.*, 2014)

2.2.2. Biosynthèse de l'amidon

L'amidon chez les plantes peut être de deux types suivant sa localisation et son utilisation : L'amidon transitoire synthétisé dans les feuilles sert de réserve temporaire de sucres, s'accumule dans les chloroplastes pendant la journée et est ensuite dégradé pendant la nuit pour fournir une source de carbone pour la synthèse de saccharose cytosolique. Ce saccharose peut ensuite être transporté au niveau des organes de réserves. L'amidon de réserve est stocké dans des organes de réserves. Il pourra ainsi être remobilisé en fonction des conditions climatiques ou être utilisé dans le cas de l'amidon de l'albumen lors du processus de la germination (Debiton, 2010). Au cours de la maturation des graines, l'amidon s'accumule dans les amyloplastes et forme une source énergétique principale au début de la germination (Sistili *et al.*, 2010).

La synthèse de l'amidon représente un processus complexe dont la principale matière première est le glucose-6-phosphate (Glc-6P) synthétisé lors de la réaction claire de la photosynthèse et transformé après pour donner une molécule d'ADP-glucose (Farineau, 2006). Cet ADP-glucose est additionné à l'extrémité non réductrice d'un α -(1-4) D-glucane pour donner l'amylose (chaîne linéaire). La transformation de cette chaîne en une chaîne branchée (l'Amylopectine) qui se réalise par la rupture de liaison α -(1-4) et synthèse de liaisons α -(1-6) donne à sa fin l'amidon. Cette synthèse se fait en quatre étapes à partir du glucose disponible, initiation, élongation, branchement et formation des granules. L'amylose et l'Amylopectine sont synthétisées simultanément (Feillet, 2000;Sistili et al., 2010).

L'ADP-glucose pyrophosphorylase (AGPase) catalyse la première étape clé de régulation dans la biosynthèse de l'amidon des plantes supérieures qui produit de l'ADP-Glc et pyrophosphate (PPi) à partir de Glc-1-P et ATP.L'ADP-glucose ainsi formé est utilisé pour la synthèse de l'amidon (Feillet, 2000).

Par la suite, un autre type d'enzymes intervient, les Starch Synthase, divisées en deux groupes : les starch synthases solubles (SSS) et les starch synthases liées aux granules d'amidon (granule bound Starch Synthase, GBSS). Les SSS ont une affinité pour l'ADP-glucose plus importante que les GBSS et sont principalement responsables de l'élongation de l'amylopectine tandis que les GBSS allongent les molécules d'amylose (Debiton, 2011). Il existe cinq classes de starch synthases chez les plantes : GBSS, SSI, SSII, SSIII, SSIV (Li et al., 2003) dont le nombre d'isoformes recensées est de 10 actuellement (Fujita et al., 2006 ; Hirose et Terao, 2004).

Après l'élongation de la chaîne de glucose par les "Starch Synthase", les enzymes de branchement (SBE, Starch Branching Enzymes) catalysent l'hydrolyse d'une liaison α -1,4 et le transfert d'une unité C6-glucosyl sur cette fin réductrice par l'intermédiaire d'une liaison α -1,6 (Debiton, 2011).

Il existe deux groupes de SBE (SBEI et SBEII) qui diffèrent par les longueurs de chaînes transférées in vitro. La SBEII transfère des chaînes plus courtes que la SBEI (Guan et Preiss, 1993 ; Rydberg et al., 2001). Chez les céréales la SBEII possède deux formes proches en structure (SBEIIa et SBEIIb) (Mizuno et al., 2001, Rahman et al., 2001) qui diffèrent in vitro par la longueur des chaînes qu'elles transfèrent dans des conditions d'incubation prolongée. Ainsi la SBEIIb transfère des chaînes plus courtes que la SBEIIa (*Figure 06*).

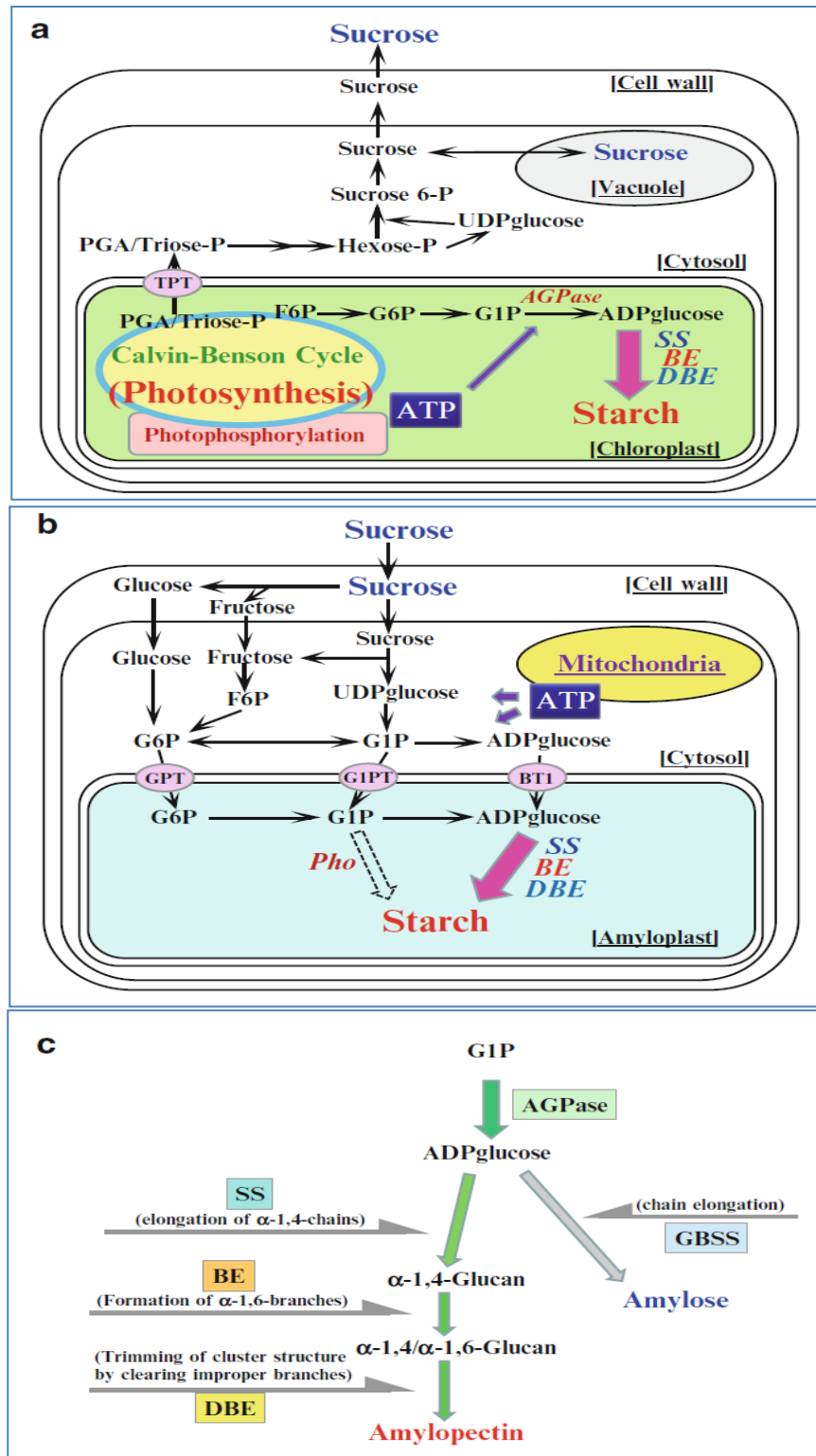


Figure 06 : Voie de biosynthèse de l'amidon et du métabolisme associé dans les tissus photosynthétiques et non photosynthétiques. (a) La synthèse de l'amidon assimilable dans la feuille. (b) La synthèse de l'amidon de réserve dans les tissus de stockage. (c) La voie de synthèse de l'amidon à partir de G1P. Abréviations : BT1 Brittle-1 protein (transporteur ADPglucose), TPT triose phosphate/Pi translocator, GPTG6P/Pi translocator, G1PT putative G1P transporter (Jeon, 2010)

2.3. Composition en protéines au niveau de la graine de blé dur

Le grain de blé dur est constitué d'environ 12 % de protéines, qui sont essentiellement localisées dans l'endosperme et la couche à aleurone. Cette teneur est susceptible de varier énormément (de 8 à 20 % de la matière sèche), en fonction des variétés, des facteurs climatiques, agronomiques et des conditions physiologiques de développement de la plante, des parties histologiques du grain et de la maturation du grain (Debiton, 2010).

Les protéines présentes dans la graine sont généralement classées pour la première fois par Osborne (1907) en quatre groupes selon leurs solubilités dans des solvants spécifiques utilisés successivement pour extraire les protéines (Linden et Lorient, 1994). Et représentent 15 à 20 % des protéines totales :

- a) Les albumines qui sont solubles dans l'eau
- b) Les globulines qui sont solubles dans les tampons salins
- c) Les gliadines qui sont solubles dans une solution d'alcool à 70%
- d) Les gluténines qui sont solubles dans une base ou un acide ou des détergents en présence d'un réducteur.

Cette classification a été revue en 1986 par Shewry et ses collaborateurs qui ont proposé deux grandes catégories :

- a) Les protéines métaboliques : les albumines et globulines, les amphiphiles
- b) Les protéines de réserves : les gliadines et les gluténines représentent 80 à 90 % des protéines totales (Gliadines solubles dans les solutions alcooliques, Gluténines solubles dans les solutions diluées d'acides ou de bases, ainsi que dans les détergents) (Hernandez et al., 2004).

Enfin la classification la plus utilisée est basée sur la mobilité électrophorétique

- Les prolamines polymériques :
 - a. Les sous-unités gluténines de haut poids moléculaire : SG-HPM (80000 et 130000 dalton).
 - b. Les sous-unités gluténines de faible poids moléculaire : SG-FPM (40000 et 50000 dalton)
 - Les prolamines monomériques :
 - a. Les α -gliadines PM de 32000 à 36000daltons.
 - b. Les β - gliadines PM de 37000 à 38000 daltons.
 - c. Les γ -gliadines PM de 38000 à 44000 daltons.
-

- d. Les δ - gliadines PM de 69000 à 78000 daltons.

Les gluténines ont été divisées sur la base de la mobilité électrophorétique en 4 groupes: le groupe A correspondant aux SG-HPM, les groupes B et C d'après (Payne et Cofield, 1979) correspondent aux SG-HPM et le groupe D découvert en électrophorèse bidimensionnelle par Jackson et al., (1983) correspondant aux SG-FPM.

2.4. Composition en lipides au niveau du grain de blé dur

Au niveau des grains, les lipides représentent environ 3 à 4 % (Saulinier et al., 2012). Des niveaux similaires de lipides non polaires et polaires sont présents. En fonction de leur solubilité dans des conditions d'extraction spécifiques, ils sont classés en lipides apolaires et polaires (Van Der Borgh et al., 2004 ; Eliasson et Larsson, 1993).

2.4.1. Lipides apolaires (lipides de réserve du grain)

Sont mono, di et triglycérides et acides gras libres, majoritairement localisés dans le germe. Ils représentent environ 50 % des lipides totaux. Les acides gras polyinsaturés sont dominants dans le germe de blé (environ 60%) tandis que les mono insaturés y représentent 15 à 25 % et les saturés moins de 20 % (Saulinier et al., 2012).

2.4.2. Lipides polaires (lipides de structure du grain)

Phospholipides et glycolipides essentiellement. La grande partie de ces lipides se concentrent dans l'albumen amylicé et une partie se trouve associée au grain d'amidon. D'autres composés lipidiques comme les stérols, tocophérols et caroténoïdes sont également présents dans le grain en faible quantité.

3. Remplissage du grain et sa relation avec la composition de la graine

Le processus de développement des graines, avec un objectif spécifique de compréhension des mécanismes de développement qui permettent la formation de modèles dans divers tissus, est actuellement d'un grand intérêt (Labuschagne et al., 2018). Et nécessaire pour comprendre l'augmentation du poids et de la composition des grains. Le processus de formation des grains dans les céréales influence largement la composition et la valeur nutritionnelle du grain. Le remplissage des grains représente la dernière étape de la croissance des céréales où les ovaires fécondés se transforment en caryopse. La durée et le rythme de ce processus déterminent le poids final du grain, un élément clé du rendement final (Gate, 1995). Selon Maydup et al.(2014) et Yang et al. (2006), le remplissage du grain est le processus d'accumulation et de distribution de la matière sèche dans le grain. Pendant le

remplissage du grain, les glucides issus de la photosynthèse des feuilles sont transportés vers le grain en formation. Le saccharose et les acides aminés sont convertis en amidon et en protéines de stockage, qui représentent finalement environ 90 % de la matière sèche du grain (Prioul et al., 2008). Le remplissage des grains peut être divisé en trois phases, où dans la première phase, le carbone et l'azote sont produits à partir d'hydrates de carbone tels que le glucose, le fructose et la glutamine, et les lipides et protéines sont produits à partir d'organes photosynthétiques et non photosynthétiques (Maydup et al., 2014).

Ainsi, le rendement des cultures céréalières intègre deux composantes principales, le nombre des grains par m² et poids moyen des grains. Il est généralement admis que la détermination de ces deux principales composantes du rendement se chevauchent à peine au cours du cycle de culture du blé, en supposant que l'anthèse est l'étape phénologique pivot de l'effet des conditions environnementales sur ces principales composantes du rendement (Slafer et al., 1994 ; Debiton, 2011.), le moment où les facteurs environnementaux affectant ces deux paramètres sont considérés comme indépendants dans le cas de du blé (Merah et al., 2014 , Samarah et al., 2005).

Effectivement, le rendement en grains du blé est le résultat d'assimilates produits au cours de la vie de la plante. Il peut être divisé en trois composants : la matière sèche produite après l'anthèse et transférée directement dans le grain, la matière sèche produite avant l'anthèse et remobilisée dans le grain lors du remplissage du grain et la matière sèche produite après l'anthèse mais stockée temporairement dans les organes végétatifs avant d'être remobilisée dans le grain (Blum et al., 1983).

Pendant la phase reproductive des céréales, l'activité des racines et l'absorption des nutriments diminue généralement, ce qui entraîne le lancement de processus de remobilisation et l'apport de nutriments vers les graines (Kong et al., 2016). Dans les céréales, une grande quantité d'azote est dérivée de ces réserves remobilisées, un processus qui dépend fortement du génotype et de l'environnement. Selon Triboi et Triboi-Blondel(2002), les plantes de blé accumulent la plupart de leur azote avant l'anthèse, et celui-ci est remobilisé vers l'épi lors du remplissage du grain, où il est utilisé pour la synthèse des protéines du grain.

L'importance relative de chacune de ces sources d'assimilation n'est pas totalement connue, mais il est évident qu'elle varie en fonction de l'espèce, du cultivar et de l'environnement (Maydup et al., 2014).

4. Contribution des différents organes dans le processus de remplissage du grain

En condition de sécheresse, le col de l'épi, les glumes, et barbes détiennent une place importante dans le processus de finition du grain (Baldi, 1974). Ces organes qui sont situées au-dessus du dernier entre-nœud jouent un rôle important dans l'élaboration du grain.

Selon Merah et al. (2014), l'épi joue un rôle essentiel pour assurer des assimilats au grain au cours du remplissage. Ils ont démontré aussi que la présence de cet organe présente un effet significatif sur le poids sec du grain mur. L'ombrage de cet organe provoque une forte réduction du poids du grain et de rendement.

Bort et al. (1994) ont démontré que la présence de la barbe augmente la photosynthèse et par conséquent le poids sec du grain. En présence de la barbe le poids du grain devient supérieur par comparaison avec des plantes sans barbe. Merah et al. (2014) ont reportés que la participation totale des barbes est de 20.8 %.

Les résultats de Fellah et al. (2002), démontrent que la photosynthèse courante et le stockage des substrats carbonés dans le col de l'épi et leur transfert contribuent à un meilleur remplissage du grain.

Selon Merah et al. (2014) et Maydup et al., (2010), dans les conditions optimales, la meilleure source des assimilats est la dernière feuille. Ainsi, la contribution de la dernière feuille dans l'élaboration du rendement est liée aux conditions climatiques du milieu, sa surface, sa longévité et son activité photosynthétique. Pendant la phase épiaison-maturité elle est responsable pour une large part du rendement final en grain.

L'ensemble du système foliaire contribue dans l'élaboration du rendement en grain. Richard et al., (1982) in Gate (1995) montrent que l'ensemble des feuilles contribue à hauteur de 40% dans la remobilisation. Ce rôle s'expliquerait par la migration des quantités d'assimilats stockées à son niveau.

Une hauteur de paille importante est une caractéristique désirable en zone semi-aride, suite à ses effets bénéfiques lors des années sèches. Le rendement en grains est associé à une grande quantité d'assimilats stockés et transférés des tiges pour le remplissage des grains (Bahlouli et al., 2008). Une partie de ces réserves est transférée vers la graine ; la tige exerce alors un rôle de relais pour l'alimentation de la graine (Gate, 1995).

En plus la hauteur du chaume est associée à un système racinaire capable d'aller en profondeur, suggérant l'adoption des variétés hautes dans les environnements à faible pluviométrie et dans des sols où il y a une humidité résiduelle exploitable en profondeur (Belkharchouche et al., 2009). La hauteur des plantes, grâce à ses stocks de substrats, minimise la baisse des rendements en grains lors des années difficiles (Fellah et al., 2002).

5. Stress hydrique

Dans le domaine végétal, Le mot stress présente différentes significations mais généralement c'est le changement d'un état physiologique donné causé par des facteurs qui tendent à perturber l'équilibre du système de la plante étudiée (Mahpara et al., 2014). Le stress hydrique est l'un des stress environnementaux les plus importants affectant les conditions de croissance, le développement et le rendement des plantes (Madhava Rao et al., 2006). Le déficit hydrique s'installe dans la plante quand l'absorption ne peut satisfaire la demande de la transpiration (Gate, 1995).

Plusieurs auteurs (Monnveux et al., 1986, Zerrard et al., 2008 ; Adda et al., 2013, Arous et al., 2020) ont montré que la sécheresse sous ses différentes formes, constitue l'un des facteurs majeurs limitant la croissance, le développement et la productivité des différentes espèces végétales.

Il se traduit chez les plantes par une série de modifications qui touchent les caractères morphologique, physiologique (Brisson, 2008) et biochimiques à partir du moment où les besoins en eau de la plante sont supérieures aux quantités disponibles (Mefti et al., 2001).

En Agriculture, la sécheresse est définie comme un déficit marqué et soutenu des précipitations qui réduit significativement les productions agricoles (Mackay, 1986). Sur un plan plus opérationnel, on peut distinguer la sécheresse climatique, la sécheresse hydrologique et la sécheresse agronomique. La sécheresse climatique est généralement liée à l'insuffisance et à l'irrégularité des précipitations annuelles par rapport à une année normale. La sécheresse hydrologique est plus souvent en relation avec le dysfonctionnement des aquifères et des ressources en eaux souterraines.

Enfin la sécheresse agronomique résulte d'un déficit hydrique pouvant intervenir à des stades critiques de développement des cultures et affecte sérieusement les récoltes.

5.1. Effet de déficit hydrique sur la plante de blé dur

Le blé dur est confronté à plusieurs types de sécheresse qui l'affectent au cours de son cycle de développement, il s'agit de : la sécheresse au début de cycle végétatif et qui affecte l'installation de la culture ; la sécheresse au milieu de cycle végétatif et qui affecte principalement la fertilité des organes reproducteurs de la plante ; la sécheresse en fin de cycle végétatif qui affecte la formation et le remplissage du grain.

L'effet du stress dépend de son degré, sa durée, le stade de développement de la plante, le génotype et son interaction avec l'environnement (Labdelli et al., 2011). Selon son intensité et sa date d'apparition au cours du cycle de développement, les blés subissent des déficits hydriques qui affectent plusieurs variables de la plante (Samarah, 2005).

Les déficits hydriques longs se traduisent par des changements progressifs dans la structure de la plante. La racine représente le premier organe de détection de stress hydrique et, en particulier, leur extrémité qui est le site principal pour une telle perception (Moud et al., 2008). Un consensus existe cependant sur le fait que les racines sont les organes dont la croissance est la moins affectée, par rapport aux parties aériennes, végétatives et reproductrices (Soar et Loveys, 2007). Un système racinaire capable d'extraire l'eau du sol est une caractéristique essentielle pour la résistance à la sécheresse. Cette caractéristique revêt une importance particulière sur les cultures qui subissent régulièrement des déficits hydriques de fin de cycle (Khalifaoui, 1990).

Une croissance soutenue du système racinaire en conditions de stress serait, selon certains auteurs, un facteur de résistance au stress hydrique (Wahbi et al., 2011). Le déficit hydrique au stage montaison se traduit par la chute du nombre d'épis produits par m², suite à la régression intense des talles et la baisse du nombre de grains par épi. Le manque d'eau après la floraison, combiné à des températures élevées, entraîne une diminution du poids de 1000 grains par altération de la vitesse de remplissage des grains et de la durée de remplissage (Fellah et al., 2002 ; Boudjabi et al., 2017). Au cours du remplissage des grains, le manque d'eau a pour conséquence une réduction de poids de 1000 grains.

5.2. Stratégies d'adaptation de la plante au stress hydrique

Différents réponses morphologiques, biochimiques et physiologiques sont adoptées par les plantes contre la sécheresse. L'adaptation se définit comme la capacité d'une plante à croître et donner des rendements satisfaisant dans des zones sujettes à des stress de périodicité

connues selon Berthet, (2006). C'est la modification d'une structure ou d'une fonction de la plante.

L'étude de l'adaptation des plantes à la sécheresse est au carrefour de la physiologie, de l'agronomie et de la génétique. Elle illustre l'intérêt des approches pluridisciplinaires et de la modélisation pour aborder des phénomènes complexes.

Selon Parcevaux, (2007), face aux contraintes environnementales d'origine climatique (sécheresse, gel) et d'origine humaine (niveau de fertilisation azotée, pratiques agricoles, etc) pour cela elles possèdent des mécanismes de perception et de signalisation complexe leur paramètre de produire une repense plus en moins spécifique à des stimuli perçus. La résistance à la sécheresse a été associée à plusieurs caractéristiques d'ordre phénologique, morphologique, physiologique et biochimique reflétant différents types d'adaptation, cependant, la sélection pour un mécanisme donné, même bien corrélé avec le rendement, n'aboutit pas automatiquement à l'amélioration de ce dernier. Certaines auteures rapportent que les variétés de céréales doivent être caractérisées par une stratégie regroupant en même temps, un ensemble de mécanismes d'adaptation.

Les formes d'adaptation aux stressés abiotiques définies par Levitt, (1972), les classifient en trois grands types d'adaptation au stress hydriques et qui sont :

5.2.1. L'échappement

Ou esquivé qui consiste à réaliser le cycle pendant la période favorable en évitant la sécheresse terminale (Gate, 1995). Ainsi, selon Meghrabi et al. (2013), la précocité dans l'épiaison constitue une caractéristique souhaitable.

La précocité constitue, de ce fait, un important mécanisme d'esquive du déficit hydrique de fin de cycle. La précocité assure une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau.

En effet, en produisant la biomasse la plus élevée, les génotypes à croissance rapide et à maturité précoce utilisent mieux l'eau disponible et ils sont moins exposés aux stress environnementaux que les génotypes tardifs (Bajji, 1999). De ce fait le rendement grain est positivement corrélé à la précocité d'épiaison (**Mekhlouf**). La précocité de l'épiaison est efficacement utilisée comme critère de sélection pour améliorer les productions des zones sèches (Ali Dib, 1992 ; Ben Salem et al., 1997).

5.2.2. L'évitement de la déshydratation

Ou résistance qui permet le maintien d'un potentiel hydrique élevé dans la plante, elle peut être définie du point de vue physiologique par sa capacité à suivre et à s'accroître et du point de vue agronomique, par l'obtention d'un rendement plus élevé que celui des plantes sensibles (Madhava Rao et al., 2006). Ceci peut être obtenu par une réduction de la transpiration au niveau des cuticules et les stomates incomplètement fermés. Également la réduction de la surface foliaire tend à minimiser la perte en eau avec un effet négatif sur le rendement à cause de la réduction de la capacité photosynthétique.

5.2.3. La tolérance à la déshydratation

La tolérance est une stratégie qui permet à la plante d'assurer ses fonctions métaboliques et physiologique malgré la dégradation de son état hydrique (Blum et al., 1981 ; Grieu et al., 2008). Il apparaitre comme un mécanisme majeur d'adaptation à la sécheresse. Le maintien de la turgescence lors d'un déficit hydrique confère à la plante une meilleure tolérance au déficit hydrique interne. Les solutés d'osmorégulation sont généralement des acides organiques, des acides aminés, des sucres et du proline.

**Chapitre II : Effets de
l'alimentation hydrique et la
variabilité génétique sur la formation
de l'épi et l'évolution de la structure
du grain**

1. Introduction

La culture du blé dur dans les zones pluviales du bassin méditerranéen est vulnérable à l'action de nombreuses entraves climatiques, particulièrement la sécheresse (Moralejo *et al.*, 2006). Selon Bányai *et al.* (2017). La déclaration d'une sécheresse tardive pendant les phases de floraison et de remplissage des grains entraîne une forte réduction du rendement final et altère la qualité du grain (Bányai *et al.*, 2017). Cet évènement a fait l'objet de plusieurs études (Estrada-campuzano *et al.*, 2008, Alqudah *et al.*, 2014, Merah *et Monneveux*, 2015). Ils ont concerné particulièrement, la disponibilité des assimilats avant et après l'anthesis et leur transformation en réserves au cours du remplissage du grain. Néanmoins, la phase post-anthesis ne conditionne pas à elle seule l'élaboration de la qualité du grain à maturité et le déroulement des étapes de la morphogénèse de la plante à des phases antérieures s'avèrent également déterminant dans ce processus. En effet, le déroulement des phases de la formation de l'épi détient une grande influence sur l'élaboration du poids et la qualité du grain. La compréhension des mécanismes qui déterminent la formation des épis et le développement du grain est nécessaire pour comprendre les variations de ces paramètres.

La formation du grain se réalise indistinctement de la morphogénèse de l'épi. La qualité de l'épi estimée à travers ses paramètres morphologiques, le nombre d'épillets et fleurs qu'il différencie seraient des facteurs déterminants dans la qualité de remplissage du grain. Cette partie du travail traite la cinétique de formation de l'épi sous des conditions variables de l'alimentation hydrique de la plante et la variabilité intraspécifique de l'espèce.

Comme s'est montré à travers la bibliographie, la phase montaison s'annonce important dans l'évolution de la formation de l'épi. A cet effet, le suivi de la formation de l'épi a débuté dès la phase épi à 1cm jusqu'au stade épiaison. La formation du grain à travers l'évolution de sa structure (couche d'aleurone, importance d'albumen amylicé et les téguments).

2. Matériel et méthodes

2.1. Le matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette expérimentation est constitué de 5 géotypes d'origines et structure génétique différentes (*Tableau 01*).

Tableau 01: Les caractéristiques des géotypes utilisés

Nom du géotype	Origine	Structure génétique
WAHA	ICARDA	Lignée fixe
ACSAD1361	ACSAD	Lignée fixe
MEXICAL75	CIMMYT	Lignée fixe
OUAD ZENATI	LOCALE	Lignée sélectionné à partir d'une Population locale
LANGLOIS	LOCALE	Lignée sélectionné à partir d'une Population locale



Figure 07 : Présentation des différents épis et grains des géotypes Waha, ACSAD1361, Mexicali75, Oued Zenati et Langlois

2.2. Conduite de l'expérimentation

L'expérimentation a été conduite dans une serre à conditions contrôlées au niveau de la faculté des sciences de la nature et la vie de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie (34°04' N, 1° 33' E).

Les grains des 05 géotypes (*Figure 07*) sont désinfectés et prégermés dans une étuve à 27°C. Après 48 heures, les grains germés sont repiqués dans des cylindres de 120 cm de longueur et 16cm de diamètre, remplis d'un substrat homogène composé de sable, sol et

matière organique à des proportions respectives de 8:3:1 et d'une capacité au champ de 30%, à raison de 4 graines par cylindre.

La capacité au champ a été calculée selon le rapport suivant :

$$\text{Capacité au champ (CC)} = (P_2 - P_1) / P_1 \cdot 100$$

Où : P_1 = poids sec de sol (obtenu par étuvage pendant 24h à 105°C)

P_2 = poids à saturation en eau après 24h

Après levée, les cylindres sont maintenus à 100%CC par irrigation. L'eau d'irrigation est substituée 3 fois au long du cycle de développement de la plante par une solution nutritive de type ACTIVEG puissance20 (20% N + 20% P205 + 20% K20 + 0,4% MgO + 0,8% SO3 + OE).

Au stade début montaison, les cylindres ont été répartis selon trois traitements hydriques. Un traitement maintenu à 100%CC (témoin) et deux autres ayant subis des déficits hydriques d'intensité de 60%CC et 30%CC.

L'application de déficit hydrique été réalisée par arrêt d'irrigation au début de stade tallage. Premièrement dans le lot conduit à 30%CC et 15jours après dans le lot conduit à 60%CC. Au niveau de chaque traitement, chaque génotype est répété 5 fois disposé en randomisation totale, ce qui donne 75 cylindres pour l'ensemble de l'essai (Figure 08, 09).



Figure 08 : Le dispositif de l'expérimentation au stade montaison dans sous régime hydrique 100% (photo originale prise le 30 mars 2016).

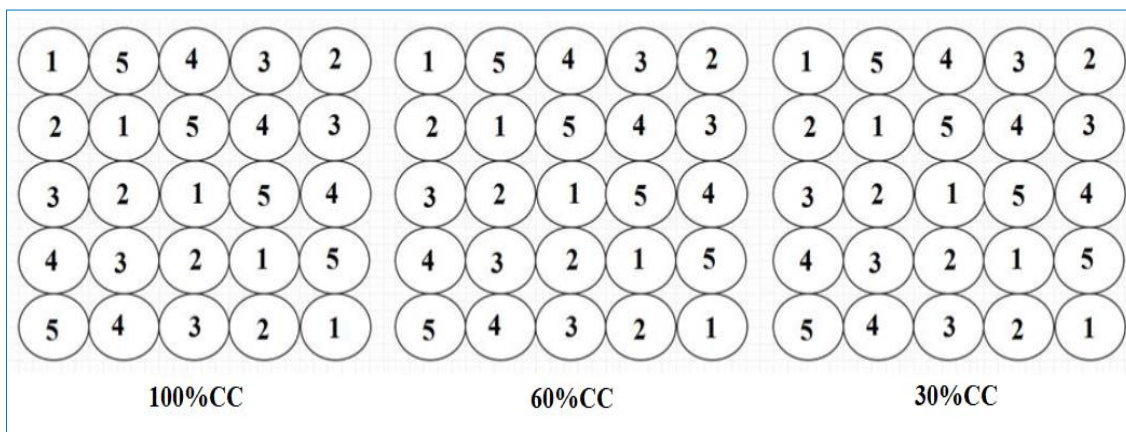


Figure 09 : Représentation du dispositif expérimental adopté, au stade montaison sous 3 régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC) et 5 génotypes à savoir : 1 - Waha, 2- ACSAD1361, 3 - Mexicali75, 4 - Oued Zenati, 5 - Langlois

2.3. Mesures effectuées

2.3.1. Teneur relative en eau

Au début de stade anthèse, la teneur relative en eau été déterminée selon l'équation propose par Bars et Weatherley (1962) in Ahmed *et al.* (2013) sur la dernière feuille complètement différenciée. Les feuilles excisées à la base sont immédiatement pesées, c'est le poids frais (Pf). Elles sont ensuite introduites dans des tubes à essai contenant de l'eau distillée et placée à une température de 4°C pendant 24 heures à l'abri de la lumière. Les feuilles sont essuyées et à nouveau pesées, c'est le poids en pleine turgescence (Ppt). Le poids sec des feuilles (Ps) est déterminé par passage à l'étuve à une température de 80°C pendant 48h.

La teneur relative en eau est déterminée par la formule suivante :

$$\text{TRE} = \frac{\text{Pf} - \text{Ps}}{\text{Ppt} - \text{Ps}} \times 100$$

A ce stade, La surface foliaire a été déterminée avec logiciel Mesurim Pro software, version 3.4 sur une photocopie de la feuille prélevée.

2.3.2. Caractérisation de la plante à maturité sous régimes hydriques

A maturité, une caractérisation morphologique a été effectuée sur les plantes issues des trois traitements hydriques et a porté sur :

- La hauteur de la plante
- La longueur de dernier entre-nœud
- La longueur du col de l'épi
- La longueur de l'épi
- La longueur de la barbe
- Le poids de mille grains a été également évalué.

2.3.3. Cinétique de l'élongation de l'épi

Dès le stade épi a 1cm, cinq prélèvements des épis ont été effectués chaque 5jours. Lors de chaque prélèvement, un tallé est enlevé de chaque dispositif de chaque plant et à chaque traitement hydrique. La longueur de l'épi en formation a été mesurée. Le ratio de la croissance a été déterminé par estimation de la croissance journalière de l'épi.

2.3.4. Anatomie de la graine

Après anthèse, trois prélèvements de grains à 10 jours, 16 jours et 22 jours, ont été réalisés. Des coupes transversales ont été effectuées au niveau des grains de chaque prélèvement. Les grains prélevés sont immédiatement trempés dans un fixateur constitué d'un mélange d'éthanol et acide acétique (17 ; 3), pendant 24 heures. Les échantillons sont ensuite lavés avec l'eau courante pendant un temps égal à la durée de fixation. Après lavage, les échantillons sont déshydratés par un passage dans des bains d'éthanol à concentrations croissantes (50°, 70°, 100°) pendant 10 mn dans chaque bain. Les échantillons sont ensuite sectionnés à main levée sous une binoculaire et colorés avec un mélange de Carmin aluné et vert de méthyle. Les coupes sont ensuite observées par un microscope (Leica B-350) doté d'un logiciel d'analyse de micro image OPTIKA (OPMIAS Ver 1.0).

Les mesures ont porté sur l'épaisseur des enveloppes du grain, l'épaisseur de la couche d'aleurone et l'épaisseur de la couche d'albumen amylicé (Figure 10).

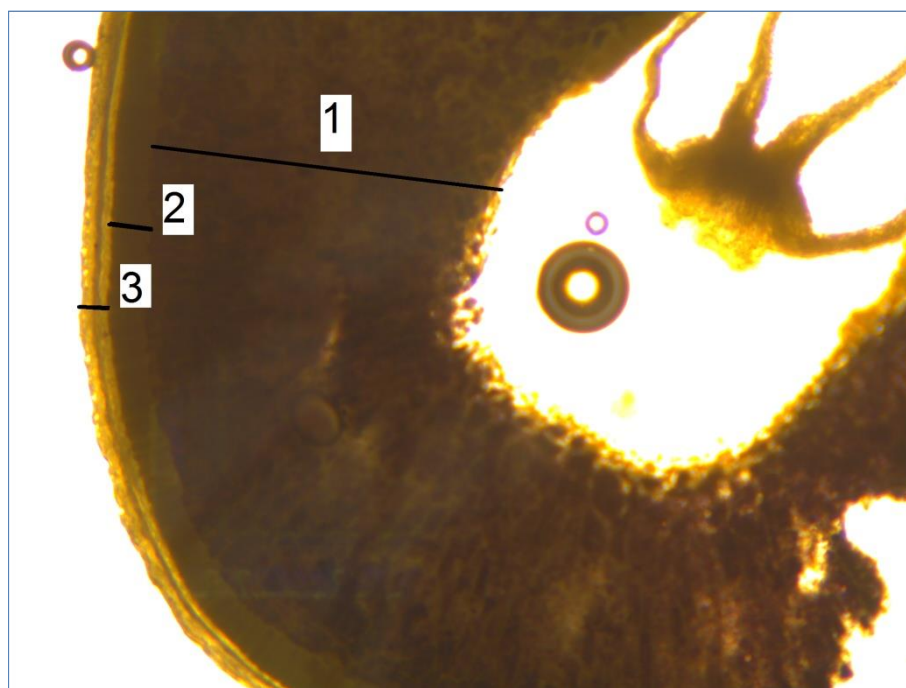


Figure 10: Coupe au niveau de la graine en formation, 1 : diamètre de l'albumen, 2, diamètre de la couche d'aleurone, 3 : diamètre des téguments (photo original), Grossissement 10

2.4. Analyse statistique

Les données ont été analysées avec STATISTICA 0.8 avec ANOVA. Les effets de la sécheresse sur les différents paramètres étudiés ont été calculés avec ANOVA en utilisant des données de plantes cultivées dans trois régimes hydriques %, 60 %, 30 % de la capacité du champ.

3. Résultats

3.1. Teneur relative en eau

L'étude des résultats obtenus (*Tableau 02*) démontre que l'application du déficit hydrique a provoqué de faibles diminutions des valeurs de la teneur relative en eau ($r=0.26^{**}$). Le facteur génotypique n'a permis aucune variation significative de ce paramètre. L'interaction de ces deux facteurs n'a également provoqué une variation notable indiquant ainsi l'absence de toute distinction des génotypes testés à l'égard des variations des régimes hydriques pour le maintien de l'hydratation de la plante.

Les résultats moyens obtenus (*Figure 11*) montrent que chez l'ensemble des génotypes testés et au niveau des trois traitements hydrique adoptés (100%CC, 60%CC, 30%CC), les valeurs de la teneur relative en eau des feuilles sont maintenues à un niveau supérieur à 90%. Une teneur exposant un état de turgescence optimale écartant tout déficit de saturation qui serait induit par l'application du déficit hydrique. Les résultats moyens de la teneur relative en eau (*Figure 11*) exposent qu'au niveau du traitement 100%CC, la variété OUED ZENATI présente la valeur la plus élevée avec 95.3 ± 0.65 et la valeur la plus faible est donnée par ACSAD1361 avec 87.1 ± 7.06 . Au niveau du lot du conduit à 60%CC, les valeurs de ce paramètre varient entre 90.3 ± 0.04 notée chez la variété OUED ZENATI et 78.6 ± 0.39 enregistrée chez le génotype LANGLOIS. Enfin, dans le lot conduit à 30%CC, les valeurs extrêmes de ce paramètre sont extériorisées par les génotypes OUED ZENATI et MEXICALI75 avec respectivement, 90.5 ± 1.16 et 81.5 ± 5.85 .

Tableau 02 : Effet de déficit hydrique et les variations génotypique sur la teneur relative en eau de la dernière feuille

Sources de variation	Test F	Probabilité
Variables		
Génotype	2,19ns	0,0940
Situation hydrique	7,99**	0,0016
Génotype x situation hydrique	0,53ns	0,8236

***significatif à $p < 0.001$, *significative à $p < 0.05$, ns: non significative.

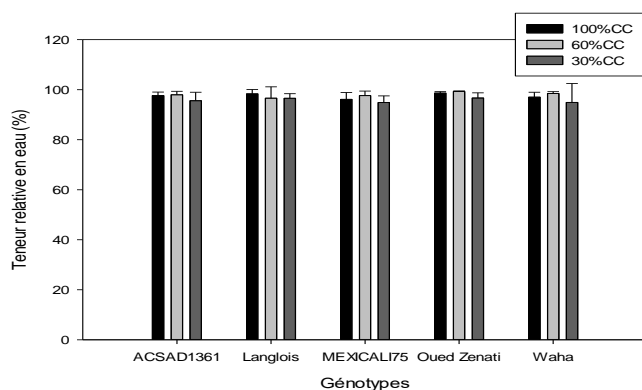


Figure 11: Effet de déficit hydrique et la variabilité génotypique sur la teneur relative en eau, chez les différents génotypes testés sous les différents régimes hydriques

3.2. Caractérisation biométrique de la plante à maturité

Les paramètres morphologiques du matériel végétal au stade maturité se rapportent à la hauteur de la plante, la longueur de dernier entre-nœud, la longueur du col de l'épi, la longueur de l'épi, la longueur de la barbe et la surface foliaire. Les valeurs de ces paramètres varient en fonction des génotypes testés (*Tableau 03*), à l'exception de la longueur de l'épi qui s'avère insensible aux variations de ce facteur. L'alimentation hydrique provoque également modifie significativement l'expression ces paramètres morphologiques, sauf pour le cas de la hauteur de la plante et la longueur de l'épi (*Tableau 03*).

Ainsi, au niveau du lot témoin, les valeurs de la hauteur de la plante sont comprises dans l'intervalle délimité par des extrêmes de 70,3cm±5.78 et 117,5cm±3.18 inscrits respectivement par ACSAD1361 et Langlois. Sous les conditions hydriques de 60%CC, les valeurs enregistrées pour la hauteur de la plante oscillent entre un maximum de 129,3±0.88 et un minimum de 83,0±0.58 observés dans l'ordre chez les génotypes Langlois et Waha. Enfin, dans le lot conduit à 30%CC, les données obtenues pour ce paramètre sont comprises dans un intervalle délimité par des valeurs extrêmes de 70,3±6.06 (Waha) et 122,0±1.15 (Langlois).

Tableau 03: Effets de la nature des génotypes sur la biométrie des plantes au stade maturité cultivées sous trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

	Génotype	Régime hydrique	Génotype x régime hydrique
Hauteur de la plante	0.0000***	0.9447ns	0.0000***
Longueur du dernier entre-nœud	0.0035**	0.0041**	0.0011**
Longueur du col de l'épi	0.0000***	0.0000***	0.0000***
Longueur de l'épi	0.4641ns	0.6287ns	0.4639ns
Longueur de la barbe	0.0000***	0.0005***	0.0000***
Surface foliaire	0,0000***	0,0138**	0,0332**
PMG	0,0000***	0,0000***	0,0000***

***significatif à $p < 0.001$, *significative à $p < 0.05$, ns: non significative.

L'application du déficit hydrique a provoqué une réduction de la longueur du dernier entre nœud. En effet, la moyenne génotypique des valeurs obtenues pour ce paramètre sont de l'ordre de 51.08cm, 48.16cm et 44cm inscrites dans l'ordre sous les traitements hydriques de 100%CC, 60%CC et 30%CC. On note toutefois que les génotypes Oued Zenati et Langlois se distinguent par les longueurs les plus élevées.

Concernant le col de l'épi, les résultats moyens montrent que les variations des valeurs détenues par ce paramètre entre les trois situations hydriques semblent faibles. Dans le traitement hydrique témoin (100%CC), la longueur du col de l'épi vacille entre des extrêmes de 39,0cm±2.65 extériorisée par Waha et 20,5cm±1.89 enregistré par le génotype ACSAD1361.

Dans le traitement conduit à 60%CC, la valeur moyenne génotypique de la longueur du col de l'épi s'évalue à 32.48cm, où les géotypes Waha et Oued Zenati en détiennent les valeurs extrêmes. Enfin sous la situation hydrique du niveau de 30%CC, les valeurs du col de l'épi fluctuent entre 32,0cm±1.53 et 17,8cm±1.42 enregistrées respectivement par les géotypes Oued Zenati et Langlois.

Les variations de grandeur de la longueur de l'épi s'annoncent non significatives. L'influence du régime hydrique et la nature des géotypes s'avère faible sur les faibles variations de ce paramètre. Les longueurs moyennes génotypiques sont de l'ordre de 6.40, 6.22 et 6.62cm relevées respectivement sous les traitements hydriques, 100%CC, 60%CC et 30%CC. Au niveau du lot témoin (100%CC), les géotypes Mexicali75 et Langlois se distinguent par les épis les plus longs (*Tableau 04*). Au niveau du lot mené à 60%CC, les longueurs de l'épi oscillent entre 5,2cm±0.44 (Waha) et 7,3cm±1,20 (Mexicali75), alors que chez les plantes conduites à une humidité de 30%CC les valeurs extrêmes sont détenues par Waha (6.7cm±0.33) et Mexicali75 (5,7cm±0.44).

Les valeurs relatives à la longueur de la barbe sont également variables parmi les géotypes et en fonction du régime hydrique appliqué aux plantes. Ainsi, les valeurs moyennes génotypiques sont de l'ordre 11.81cm (traitement à 100%CC), 9.36cm (60%CC) et 9.68cm (30%CC). On relève que les plus longues barbes d'épi ont été obtenues dans le traitement hydrique témoin, où les géotypes les géotypes, Langlois et Oued Zenati ont inscrit les plus hautes valeurs avec dans l'ordre 20.80 et 10.83cm.

Les moyennes génotypiques de la surface de la dernière feuille varient faiblement entre les trois traitements hydriques où les valeurs observées atteignent 88.46cm², 83.5cm² et 90.88cm² respectivement dans sous les traitements hydriques de 100%CC, 60%CC et 30%CC. On a constaté que les géotypes Waha, Oued Zenati et Langlois se caractérisent par les valeurs des surfaces les plus élevées et à travers les trois traitements hydriques.

L'analyse des résultats statistiques montre que l'application du déficit hydrique a provoqué une diminution du poids de mille grains (*Tableau 04*). En effet, les moyennes génotypiques enregistrées sont de 53.73g, 47.49g et 39.03g relevées respectivement dans les traitements hydriques de 100%CC, 60%CC et 30%CC. Sous les conditions hydriques optimales (100%CC), les géotypes Waha et ACSAD1361 se distinguent par le PMG le plus élevé, alors que dans les conditions hydriques sévères (30%CC), ce sont les géotypes, ACSAD1361 et Oued Zenati qui ont enregistré les poids de mille grains les plus élevés.

Tableau 04 : Les résultats moyens des paramètres biométriques de la plante de blé dur au stade maturité sous trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

Génotype	Situation hydrique	Hauteur de la plante (cm)	Longueur de dernier entre-nœud (cm)	Longueur du col de l'épi (cm)	Longueur de l'épi (cm)	Longueur de la barbe (cm)	La surface foliaire (cm ²)	Poids de mill grain (g)
WAHA	100%CC	89,0 ±5.20	55,7 ±1.86	39,0 ±2.65	6,5 ±0.87	8,33 ±0.33	103,00 ±2.65	41,58 ±2.31
WAHA	60%CC	83,0 ±0.58	50,0 ±2.08	46,3 ±3.76	6,7 ±0.33	7,83 ±0.44	81,00 ±1.73	50,92 ±2.92
WAHA	30%CC	70,3 ±6.06	32,3 ±2.33	20,8 ±2.20	7,2 ±1.36	9,00 ±0.58	100,50 ±0.87	35,09 ±1.48
ACSAD1361	100%CC	70,3 ±5.78	37,0 ±3.51	20,5 ±1.89	5,2 ±0.44	8,43 ±0.87	78,60 ±0.35	52,52 ±1.26
ACSAD1361	60%CC	93,1 ±3.41	42,7 ±1.45	26,0 ±1.73	6,0 ±0.58	7,50 ±1.04	84,40 ±3.89	53,20 ±1.96
ACSAD1361	30%CC	121,5 ±0.87	45,3 ±0.88	24,0 ±2.33	6,6 ±0.23	11,00 ±0.58	93,73 ±4.75	31,91 ±1.35
MEXICALI75	100%CC	110,0 ±5.77	52,7 ±4.06	30,7 ±2.33	7,3 ±1.20	10,00 ±0.02	79,90 ±5.60	55,86 ±1.58
MEXICALI75	60%CC	89,0 ±4.04	44,7 ±1.76	31,7 ±2.03	5,7 ±0.44	8,50 ±1.27	74,53 ±6.86	38,29 ±1.94
MEXICALI75	30%CC	87,0 ±1.53	50,7 ±1.20	28,0 ±3.21	7,3 ±0.33	8,73 ±0.44	79,30 ±3.75	29,05 ±1.12
OUED ZENATI	100%CC	104,5 ±0.87	54,7 ±5.17	37,7 ±2.96	6,0 ±0.58	10,83 ±1.15	98,50 ±0.29	55,13 ±0.72
OUED ZENATI	60%CC	100,0 ±1.15	50,7 ±5.81	31,5 ±2.36	6,7 ±0.33	10,00 ±0.67	97,10 ±1.10	44,45 ±0.58
OUED ZENATI	30%CC	90,3 ±1.45	48,3 ±2.03	32,0 ±1.53	6,0 ±0.58	9,33 ±0.67	98,20 ±3.35	42,60 ±2.54
LANGLOIS	100%CC	117,5 ±3.18	55,3 ±2.33	26,7 ±1.45	7,0 ±0.76	20,80 ±0.92	82,60 ±4.04	63,57 ±1.47
LANGLOIS	60%CC	129,3 ±0.88	52,7 ±3.71	26,9 ±0.58	6,0 ±0.25	12,97 ±0.90	80,45 ±4.58	50,58 ±3.64
LANGLOIS	30%CC	122,0 ±1.15	43,4 ±2.91	17,8 ±1.42	6,0 ±0.58	10,33 ±0.33	82,67 ±4.95	56,49 ±1.58

3.3. La croissance relative ou ratio de croissance de l'épi

Le ratio de croissance de l'épi a été estimé par la croissance journalière de l'épi obtenue par une moyenne de cinq prélèvements au cours de sa formation. Des différences significatives des valeurs du ratio ont été constatées. Ces variations ont été imposées par le régime hydrique appliqué et la nature des génotypes conduits (*Figure 12*). Ainsi, chez tous les génotypes et à degrés différents, l'application des niveaux d'alimentation hydrique déficients a provoqué un net accroissement des valeurs du ratio de croissance de l'épi. Toutefois, cette influence s'est montrée différente parmi les cinq génotypes testés.

Au niveau du traitement conduit à 60%CC, l'augmentation de la valeur moyenne génotypique du ratio est de 57.17 et elle atteint un taux d'accroissement de 87.29% chez les plantes conduites sous un régime hydrique de 30%CC. Cependant, cette progression reste valable durant les premières phases de la morphogénèse de l'épi (épi à 1cm).

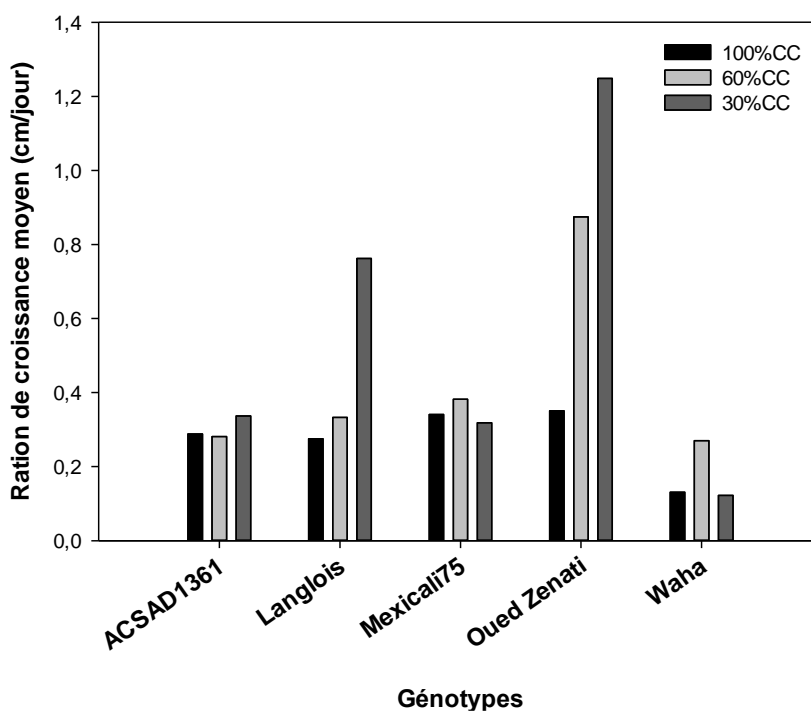


Figure12 : Ratios de croissance journalière moyens (cm/jours) mesurés chez les cinq génotypes et sous les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

Un accroissement régulier en fonction de la réduction d'humidité du substrat a été constaté chez les deux génotypes locaux, Oued Zenati et Langlois. Chez le premier génotype (Oued Zenati) le ratio de la croissance de l'épi est de 0.351cm/jour et accroit pour atteindre des valeurs de 0.875cm/jour (60%CC) et 1.249cm/jour (30%CC) approuvant ainsi des taux d'augmentation respectifs de 149.36% et 256.03%. Pour le génotype Langlois, la croissance est de 0.275cm/jour, 0.333cm/jour et 0.763cm/jour inscrite respectivement sous les traitements hydriques, témoin (100%CC), 60%CC et 30%CC, illustrant ainsi une accélération de la croissance de l'épi à des taux de 20.92% et 176.97% provoquée par l'application du déficit hydrique aux niveaux respectifs de 60%CC et 30%CC. Les mêmes tendances ont été relevées chez le génotype ACSAD1361 mais à des taux plus faibles.

Les deux génotypes Mexicali75 et Waha ont manifesté des comportements différents dans l'accomplissement de la croissance de l'épi (*Figure 12*). Chez ces génotypes, l'application du déficit hydrique à une intensité de 60%CC a provoqué une augmentation du ratio de croissance à des taux dans l'ordre de 12.06% et 105.95%. Tandis que l'application du déficit hydrique sévère au niveau du traitement conduit à 30%CC, a provoqué une nette diminution du ratio de la croissance de l'épi à des niveaux de -6.63% et -6.79% respectivement chez Mexicali75 et Waha.

3.4. L'évolution de la structure de l'albumen amylicé et la couche d'aleurone en fonction du régime hydrique

Le remplissage du grain chez le blé dur est basé sur l'évolution de la formation des téguments et le dépôt des réserves, essentiellement l'amidon au niveau de l'albumen amylicé et les protéines dans la couche d'aleurone. L'évolution de dépôt des réserves amylicées et protéiques a été déterminée par la progression de leurs structures relatives par rapport à celle du grain à différentes époques. Les résultats obtenus indiquent que l'organisation de ces deux caractéristiques dépend du régime hydrique adopté et la nature du génotype concerné.

1. Le génotype ACSAD1361

Chez ce génotype, l'épaississement relatif de l'albumen amylicé suit une tendance plus ou moins constante (*Figure 13*) avec une faible régression au cours de la troisième phase, sauf en conditions de déficit hydrique sévère (30%CC). Ainsi, dans le traitement hydrique témoin (100%CC), l'évolution relative atteint des valeurs de 0.731, 0.806 et 0.878 relevées au cours des trois prélèvements. Une tendance similaire a été relevée sous les conditions de 30%CC où elle est de 0.874, 0.824 et 0.88.

L'évolution relative de la couche d'aleurone est plus affectée par les régimes hydriques appliqués. En conditions d'alimentation hydrique témoin (100%CC) et de déficit hydrique modéré, on assiste à une accentuation de dépôt de protéines évaluée par épaississement relative de la couche d'aleurone (*Figure 13*). Sous les conditions de déficit hydrique sévère (30%CC), l'évolution relative est faible et constante au cours des périodes de prélèvement.

On constate alors que chez le génotype ACSAD1361, l'organisation de l'albumen amylicé est faiblement influencée par le régime hydrique appliqué, tandis qu'une situation contraire s'est révélée pour l'organisation de la couche d'aleurone où elle augmente dans les conditions hydriques optimales qu'elle est excessivement inhibée par l'accentuation du déficit hydrique.

2. Le génotype Waha

Chez le génotype Waha, l'évolution relative de la couche d'albumen amylicée suit une tendance constante. Ainsi, on assiste à une légère augmentation au cours du deuxième prélèvement pour se stabiliser plus ou moins ensuite à la troisième observation. Les valeurs obtenues au cours de cette période sont de l'ordre de 0.925, 0.832 et 0.909 relevées respectivement sous les régimes hydriques de 30%CC, 60%CC, et 100%CC. Ce qu'on peut constater est que l'évolution de la couche d'albumen amylicé n'est que faiblement influencée par les variations des régimes hydriques appliqués aux plantes.

La tendance d'évolution de la couche d'aleurone s'annonce différente. En effet, on remarque une nette diminution de son épaisseur au cours du deuxième prélèvement pour croître ensuite et atteint des valeurs de l'ordre de 0.025 (30%CC), 0.096 (60%CC) et 0.095 (100%CC). Quoique l'importance d'épaississement s'avère variable en fonction des régimes hydriques où elle est plus élevée en conditions d'alimentation hydrique optimale, mais sa progression est identique et s'opère indifféremment du facteur hydrique.

Le génotype Waha s'avère moins sensible aux variations du régime hydrique pour l'évolution d'organisation des tissus d'accumulation des réserves amylacées et protéiques.

3. Le génotype Mexicali75

Concernant ce génotype, la cinétique d'évolution de l'albumen amylacé suit une tendance similaire à celles enregistrées chez les deux premiers génotypes. D'une façon générale elle se définit par une stabilité sauf qu'elle est inhibée en grandeur avec l'accentuation du déficit hydrique. Ainsi, au niveau du lot témoin (100%CC), les valeurs de l'évolution relative sont de l'ordre de 0.822, 0.818 et 0.912. A l'opposé en conditions de déficit hydrique sévère (30%CC), ces données sont de l'ordre de 0.843, 0.910 et 0.785. En comparant les courbes d'évolution en fonction du régime hydrique appliqué, on synthétise que le déficit hydrique inhibe l'évolution de la couche d'albumen amylacé (*Figure 13*).

Concernant l'évolution d'épaississement de la couche d'aleurone et se basant sur celle enregistrée au niveau du traitement hydrique témoin (100%CC), on relève que les variations des régimes hydriques influent de façon significative sur ce processus. Ainsi, en conditions hydriques optimales (100%CC) et sous un déficit hydrique modéré (60%CC), la stabilisation d'organisation de la couche d'aleurone est précoce. A l'opposé, en conditions de déficit hydrique sévère, on constate qu'il y'a un report d'organisation du tissu des réserves protéiques. Dans ces conditions, la déficience d'alimentation hydrique a provoqué une progression d'accumulation des protéines qu'on peut assimiler aux protéines de stress.

4. Le génotype Oued Zenati

Pour le génotype Oued Zenati, l'évolution relative d'organisation d'albumen semble n'être nullement influencée par les variations des régimes hydriques appliquées aux plantes. Sauf qu'une légère tendance à la baisse a été provoquée par le déficit hydrique sévère au cours de la troisième observation. En se référant à cette cinétique on constate que ce génotype s'avère tolérant au déficit hydrique pour l'organisation de l'albumen amylacé (*Figure 13*).

La même constatation est faite pour la cinétique d'évolution relative de la couche d'aleurone au niveau du grain en formation. Ce génotype se distingue par une stabilité d'évolution de cette composante du grain sous les conditions de variation des régimes

hydriques appliqués (*Figure 13*). Ainsi une augmentation d'épaississement relative de la couche d'aleurone a été constatée certes de grandeurs différentes au niveau du deuxième prélèvement pour se terminer ensuite par une régression de cette croissance relative lors du troisième prélèvement. Cette tendance présente une similitude à travers les trois régimes hydriques adoptés.

5. Le génotype Langlois

Chez le génotype Langlois, les mêmes constatations que celles relevées chez le génotype Oued Zenati, ont été faites. En référant à l'évolution relative déterminée sous les conditions hydriques optimales (100%CC), les régimes hydriques déficients (60%CC, 30%CC) n'ont eu aucun effet pénalisant dans l'évolution d'épaississement relative de la couche d'albumen amylicé au niveau du grain en formation. Sauf que les grandeurs d'importance de ce tissu s'avèrent variables et dépendent de l'alimentation hydrique de la plante. Ainsi, au niveau du lot témoin (100%CC), les valeurs d'évolution relative sont de l'ordre de 0.920, 0.784 et 0.808, obtenues respectivement lors du premier, second et troisième prélèvement. Au niveau du lot conduit à 30%CC, ces valeurs atteignent dans l'ordre, 0.727, 0.810 et 0.898.

Concernant la tendance d'évolution de couche d'aleurone, également aucun impact des variations des régimes hydriques a été constaté sur cette progression (*Figure 13*). Ainsi, la tendance a été caractérisée par une augmentation deuxième prélèvement) et enfin une régression d'épaississement relative de la couche d'aleurone (troisième prélèvement) et ce au niveau des plantes issues des trois traitements hydriques, 100%CC, 60%CC et 30%CC.

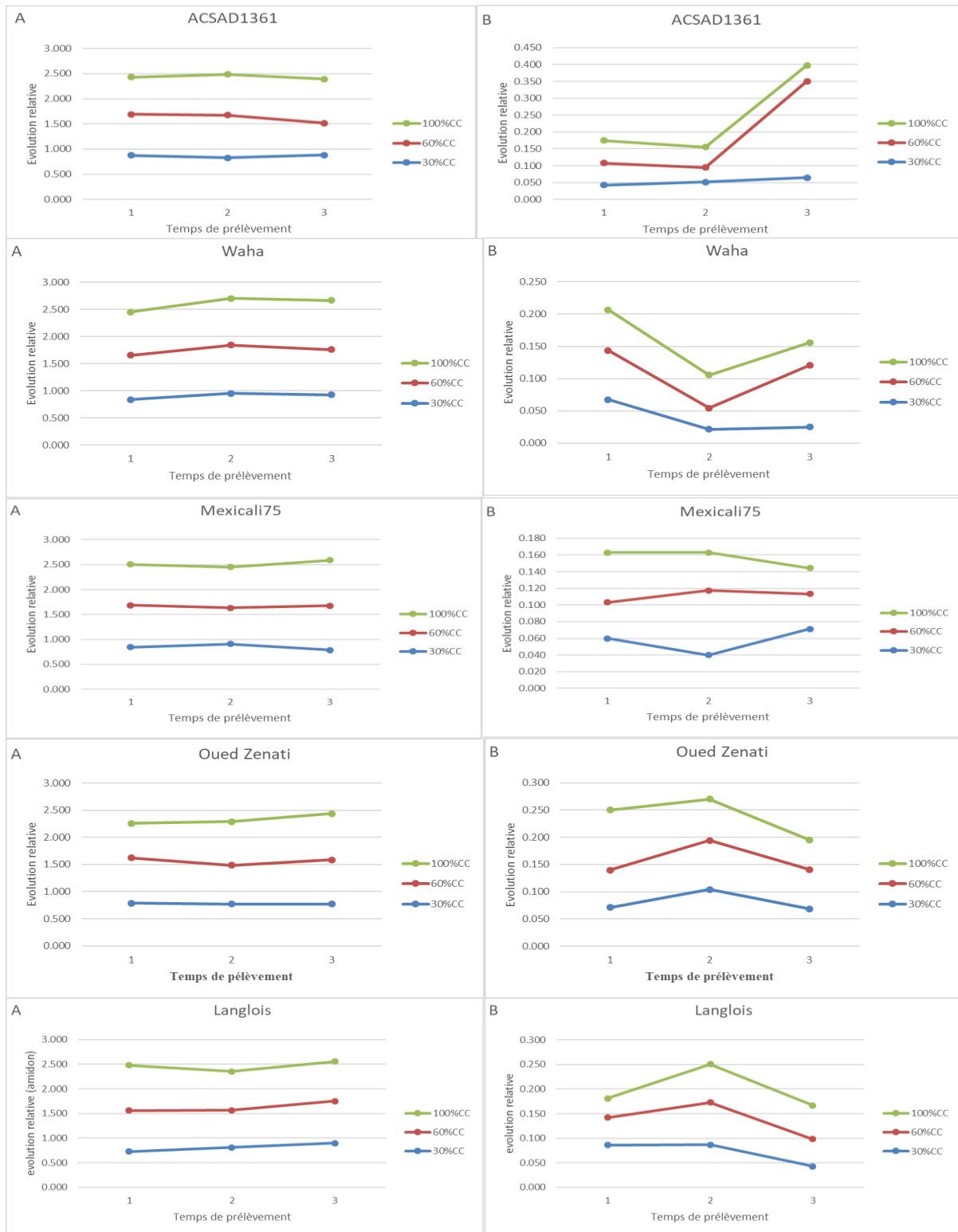


Figure 13 : évolution relative d'organisation d'albumen amyliacé (A) et de la couche d'aleurone (B) au cours de remplissage du grain chez les génotypes étudiés sous les trois régimes hydrique (100% CC, 60% CC, 30% CC)

4. Discussion

Les génotypes utilisés se définissent par des traits morphologiques et phénologiques de grandeurs très distinctes. Leur caractérisation les classe en deux groupes. Dans un premier groupe s'intègrent les deux génotypes locaux, Oued zenati et Langlois. Ils se distinguent par leur tardiveté et leur vigueur morphologique, exprimée par les longueurs de chaume, de col d'épi, du dernier entre-nœud, et de l'épi, les plus élevées. Les autres génotypes, Waha, ACSAD1361 et MEXICALI 75 appartiennent au second groupe et qui se définissent par la précocité de leur cycle et des grandeurs de caractères caulinaires plus faibles. En conditions d'alimentation hydrique optimale, ces différences morphologiques se sont manifestées en inscrivant les particularités distinctives des génotypes utilisés. L'application du déficit hydrique a eu un impact très important sur l'expression de ces caractéristiques. Ainsi, une réduction globale de l'ensemble des paramètres a été observée sous les deux niveaux de déficience d'alimentation hydrique (30%CC, 60%CC). Ces résultats se confirment par les travaux de Attia (2007) et Belkharouch et al. (2009) qui ont démontré que les grandeurs de la partie caulinaire s'avèrent les plus sensibles aux variations des états d'alimentation hydrique de la plante, où elles sont très réduites sous les effets de la sécheresse. On note également que les paramètres des deux génotypes locaux (Oued Zenati et Langlois) étaient plus affectés que ceux des autres génotypes. Cette influence distinctive est prouvée par les travaux de Blum et al., 1997 et Gambín et al., 2008 qui ont démontré que l'impact de la sécheresse était plus marqué sur les génotypes aux longueurs plus élevées par rapport à ceux dites de paille courte.

L'établissement de la longueur finale de l'épi n'a été que faiblement influencé par les deux facteurs de notre étude. Ainsi, l'impact des déficits hydriques appliqués était statistiquement insignifiant. Différentes situations expliqueraient ce résultat. La transformation du méristème caulinaire et le déclenchement de la morphogénèse des constituants de l'épi se réaliserait à une période très précoce de la phase fin tallage-début montaison, alors que l'application du déficit hydrique par arrêt d'arrosage à ce stade n'influencerait que faiblement l'état hydrique du substrat de culture. Ceci est prouvé par l'évaluation de la teneur relative en eau des plantes expérimentées qui s'est maintenue à des taux supérieurs à 90%. Également l'élaboration de la longueur de l'épi par la formation du rachis serait moins sensible au déficit hydrique que les autres traits morphologiques (Soar et Loveys, 2007 ; Attia, 2007).

Les résultats de l'étude démontrent que l'effet du déficit hydrique sur la cinétique de croissance de l'épi était très important. Il a été également constaté que ce processus se réalisait en fonction de la nature des cultivars utilisés. En effet, l'application du déficit hydrique et l'accentuation de son intensité induisent une accélération de la vitesse de croissance de l'épi. Ce comportement permettrait une compensation de la croissance avec la réduction de la période de la morphogénèse de l'épi qui serait écourtée en situation de déficit hydrique. Cette faculté compensatoire s'annonce très prononcée chez les deux cultivars locaux, Oued Zenati et Langlois par rapport aux autres génotypes introduits (Waha, ACSAD1361, Mexicali75). Les variations de la vitesse de croissance ont abouti à une faible sensibilité de l'élongation de l'épi sous les différents régimes hydriques et ce qui a été prouvé par nos résultats relatifs aux variations de la longueur de l'épi à la maturité physiologique. Le phénomène de compensation de la croissance chez les végétaux a été évoqué par certains travaux et on cite ceux de Debaeke et al. (1996) ; Larbi et al., 2000 et Rassaa et al., (2008) ont démontré que sous les conditions environnementales défavorables, l'accélération de la croissance et par conséquent le raccourcissement de la durée d'accomplissement du cycle chez les végétaux, constituent une stratégie d'adaptation pour l'évitement de déclaration des contraintes.

Selon ces résultats, la dépression des capacités productives des céréales et particulièrement le blé dur est imposée grandement par la qualité des grains et non par leur nombre au niveau de chaque épi. En effet, la faible sensibilité d'élaboration de la longueur de l'épi à l'égard du déficit hydrique comme a été révélée préserve ainsi le nombre d'épillets et de fleurs par épi. Dans ce contexte plusieurs travaux (Schu et al., 2001; Ping et al., 2006 ; Ercoli et al., 2008;) ont démontré que les faibles rendements enregistrés en conditions de sécheresse chez le blé dur résultent principalement de la détérioration du poids et le qualité du grain, générée par le contraintes de ce stress.

La cinétique d'organisation de la structure du grain par l'aménagement des tissus d'accumulation des réserves amylacées et protéiques, est significativement variable en fonction des génotypes expérimentés et des situations hydriques adoptées. On a constaté d'une façon générale l'établissement de deux tendances antagonistes entre l'accroissement du tissu amylacé et la couche d'aleurone au niveau du grain en formation.

Les génotypes, ACSAD1361 et Waha se caractérisent par une accélération de la phase d'organisation du tissu des réserves amylacées entre le premier et le second prélèvement qui est accompagnée par une faible épaisseur de la couche d'aleurone. A partir du deuxième

prélèvement, on constate une atténuation d'épaississement de la couche amylacée et un accroissement de la couche d'aleurone.

Le second groupe intègre les deux génotypes Algériens, Oued Zenati et Langlois et chez lesquels, l'épaississement du tissu des réserves amylacées était croissant durant les trois phases des mesures et à partir du deuxième prélèvement on a constaté une nette diminution d'épaississement de la couche d'aleurone.

Enfin le génotype Mexicali se distingue une faible réorientation d'orientation d'organisation des deux tissus de réserves amylacées et protéiques. Au-delà du deuxième prélèvement, on relève une faible diminution d'épaississement de la couche amylacée accompagnée d'une faible augmentation d'épaississement de la couche d'aleurone.

La sensibilité au déficit hydrique pour l'organisation des réserves protéiques distinguent également les génotypes testés en deux groupes. Les génotypes Oued Zenati, Langlois et Waha semblent être plus tolérants au déficit hydrique sévère et à l'opposé les génotypes ACSAD1361 et Mexicali75 s'annoncent plus sensibles. L'organisation quantitative et qualitative a été reconnue par les travaux de Kara et al., (2011) et Dettori et al., (2017) comme un critère de criblage de tolérance au déficit hydrique tardif survenant au cours des phases de formation et de remplissage du grain chez les blés.

**Chapitre III : Contribution de la
remobilisation des réserves et la
photosynthèse courante dans le
remplissage du grain, sa contenance
en amidon et ses composants**

1. Introduction

La sécheresse est une cause majeure de la réduction de la productivité et de la qualité des cultures céréalières dans le monde (Merah *et al.*, 2001 ; Mohammadi *et al.*, 2015). Cela est particulièrement vrai dans les zones méditerranéennes où les plantes sont soumises à des précipitations faibles et irrégulières.

En Algérie, la zone de culture des céréales est localisée dans des zones bioclimatiques semi-arides. Ces zones sont souvent soumises aux effets d'une température élevée couplée à une faible pluviométrie lors de la formation des grains, ce qui affecte leur remplissage et leur qualité (Samarah *et al.*, 2011 ; Dettori *et al.*, 2017).

La plupart des études montrent que la tolérance à la sécheresse est associée à plusieurs caractéristiques morphologiques, physiologiques et biochimiques et que les plantes répondent à la sécheresse par de nombreuses modifications survenant dans tous les organes végétaux (El Hafid *et al.*, 1998 ; Adda *et al.*, 2005 ; Monneveux *et al.*, 2006 ; Zerrad *et al.*, 2008 ; LI *et al.*, 2010 ; Megherbi *et al.*, 2012). Cependant, peu de travaux traitent les effets de la sécheresse sur le remplissage des grains et leur qualité.

Selon Flagella *et al.* (2010), l'influence de la sécheresse sur la composition des grains et leur qualité technologique dépend du niveau de stress et du moment où elle se produit. Il a été confirmé que le stade de la reproduction est le plus sensible au déficit hydrique (Nielsen *et al.*, 2018). Pendant la période de remplissage du grain, la source d'assimilation est la photosynthèse courante, mais elle est conditionnée par la longévité des différents organes impliqués. Également, la translocation des réserves stockées accumulées dans les organes (Maydup *et al.*, 2012 ; Royo *et al.*, 2018).

Le poids des grains est étroitement lié au schéma de croissance des graines et au dépôt de deux composés principaux, l'amidon et les protéines. Des études montrent que la sécheresse post-anthèse affecte ces processus (Muurinen *et al.*, 2009) en diminuant la participation des parties vertes de la plante (Mahpara *et al.*, 2015). L'accumulation d'amidon dans l'endosperme représente de 65 % à 75 % du poids sec final (Yang *et al.*, 2004) et elle varie considérablement selon les cultivars et la situation hydrique (Yi *et al.*, 2014).

Le carbone fixé dans les feuilles vertes est transloqué vers les graines et converti en amidon (Nakamura *et al.*, 1989). Ce polyglucane insoluble est un mélange de deux polymères de glucose, l'amylose et l'amylopectine (Dian *et al.*, 2003). L'amylopectine constitue 70-80% de l'amidon total, contenant des chaînes linéaires de divers degrés de polymérisation (Li *et al.*,

2000). Le stress de la sécheresse qui se produit au cours du premier stade de développement des grains diminue le potentiel de coulage des grains en réduisant le nombre de cellules endospermiques et d'amyloplastes formés (Yang *et al.*, 2006).

À ce jour, certains travaux sur la dynamique de la formation de l'amidon et l'accumulation des réserves pendant le développement du blé dur ont été publiés. Mais l'effet du déficit en eau pendant la phase de croissance des plantes de blé et les résultats sur la composition des graines, en particulier l'amidon, l'amylose et les composants de rendement, sont restés obscurs. Selon certaines études (Alqudah *et al.*, 2011 ; Gaju *et al.*, 2014), les effets de l'environnement sur la formation des grains et l'élaboration de leur qualité restent largement liés à la nature des cultivars étudiés. Un problème supplémentaire est la difficulté à contrôler l'effet des variations génotypiques, de la sécheresse et des participations d'organes dans des conditions environnementales non contrôlées.

Le principal objectif de cette partie de notre étude est d'élucider l'effet du déficit en eau sur le poids final du grain et sa teneur en amidon. Le rapport amylose/amylopectine de l'amidon est déterminé. La présente étude s'intéresse également à l'implication de différents organes végétaux dans ces processus. Par conséquent, différents génotypes ont été menés sous différents apports d'eau dans des conditions contrôlées.

2. Matériel et méthodes

2.1. Conduite de l'expérimentation

L'essai a été mené en conditions contrôlées, dans une serre à la faculté des sciences de la nature et la vie de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, en Algérie (34°04'N, 1°33'E).

Les grains de cinq génotypes (*Tableau 01*) désinfectés et prégermés sont repiqués dans des cylindres de 120 cm de longueur et 16 cm de diamètre, remplis d'un substrat homogène composé de sable, sol et terreaux (8: 3: 1) avec une capacité de rétention d'eau de 32%, à raison de 4 plantules par cylindre. Les cultivars ont été cultivés dans des conditions de serre à 29°±3°/14°±2° (jour/nuit) ; températures, 70±5%/90±5% (jour/nuit) ; humidité relative, et régime 14h/10 h (lumière/obscurité).

Le dispositif expérimental (*Figure 14*) adopté est en randomisation total, il comporte trois traitements hydriques. Un lot témoin conduit à un régime d'irrigation de 100% de la capacité au champ et deux autres traitements ayant subi des déficits hydriques progressifs de 60% et 30% de la capacité au champ au stade anthèse. L'application de déficit hydrique est faite par arrêt d'irrigation au début de stade épiaison. Premièrement dans le lot de conduit à

30% de la capacité au champ et après 15j dans le lot conduit à 60% de la capacité au champ. L'eau d'irrigation est substituée 3 fois au long du cycle de développement de la plante par une solution nutritive de type ACTIVEG puissance20. Au niveau de chaque traitement hydrique, chacun des 5 géotypes est répété 6 fois.

Trois jours après l'anthesis, six traitements ont été appliqués pour étudier la contribution relative de la photosynthèse courante des différents organes et la remobilisation des réserves, dans le remplissage du grain et l'élaboration de sa composition (Tableau 05, Figure 16). L'excision consiste à l'ablation de l'organe concerné à sa base et l'ombrage a été réalisé par la couverture de l'organe avec du papier aluminium muni de quelques perforations de faible diamètre afin de faciliter les échanges hydrique et gazeux.

Tableau 05 : Différents traitements appliqués pour évaluer la contribution de la translocation de la réserve et de la photosynthèse courante de différents organes du blé dur dans le remplissage des grains

Type de contribution	Organe	Traitement
Photosynthèse courante	Les barbes	Excision
	La dernière feuille	Excision
	Le système foliaire	Excision
	Col de l'épi	Ombrage
	Épi	Ombrage
Remobilisation des réserves	La plante entière	Ombrage



Figure 14: Le dispositif de l'expérimentation au stade épisaison (photo originale prise le 24 avril 2017)

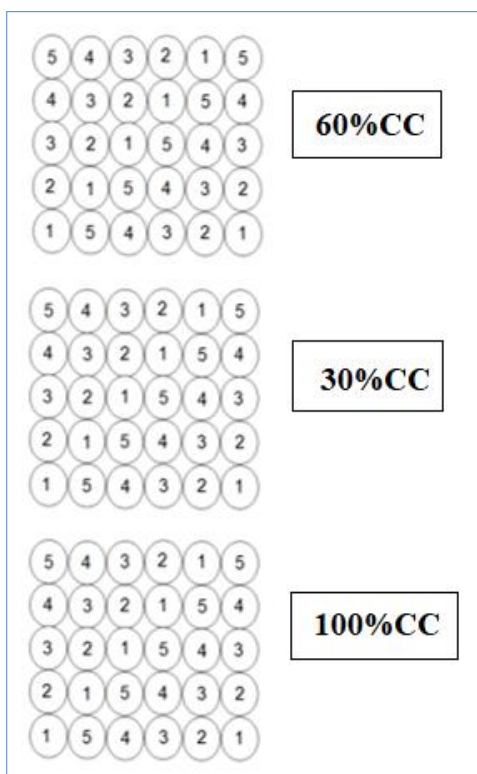


Figure15: Dispositif expérimental avec trois lots conduits à 100%, 60% et 30% de la capacité au champ



Figure 16: Traitement de l'excision et de l'ombrage : 1. Plante contrôle, 2. plante avec barbes excisées, 3. plante avec la dernière feuille excisée, 4. plante avec système foliaire entier excisé, 5. plante avec pédoncule caché, 6. plante avec épi caché, 7. plante entière caché.

2.2. Mesures effectuées

2.2.1. Détermination du poids des grains

À maturité, les plantes de chaque dispositif de remplissage et au niveau des trois traitements hydriques, ont été récoltées. Le poids de mille grains a été déterminé. La contribution relative de chaque organe au remplissage du grain et l'obtention de son poids final a été déterminée suivant la méthode suivante (Maydup et al., 2010):

$$CR = \left[\frac{\text{le poids des grains de la plante témoin} - \text{le poids des grains de la plante traitée}}{\text{le poids des grains de la plante témoin}} \right] \times 100$$

2.2.2. Dosage de l'amidon, de l'amylose et de l'amylopectine

2.2.2.1. Préparation de la courbe d'étalonnage

Dans un bécher de 250 ml, disperser 0,5g d'amidon dans 20 ml d'eau distillée et ajouter 80 ml d'eau distillée bouillante. Agiter légèrement le mélange et continuer l'ébullition pendant 5 min sur une plaque chauffante pour obtenir une solution d'amidon limpide. Refroidir le mélange, le transférer dans une fiole jaugée de 100 ml et le compléter au trait de jauge avec l'eau distillée. Ceci constitue une solution mère d'amidon à 5 mg/ml.

2.2.2.2. Préparation de l'échantillon à analyser

Prendre 0.1g de la poudre des grains bien broyés et y ajouter 5 ml de 1N KOH. Bien homogénéiser la solution à la température ambiante et la neutraliser ensuite avec 5 ml de 1 N HCl. Mettre ensuite le mélange en ébullition au bain-marie pendant 15min. Centrifuger le mélange à 3000 tours/min pendant 10min et récupérer le surnageant pour l'utiliser au dosage de l'amidon. Préparer les tubes (échantillons) conformément au tableau ci-dessous

Tableau 06 : Les conditions d'analyses des échantillons pour la détermination de la teneur en amidon, amylose et amylopectine

Réactif/ échantillon	Échantillon
Échantillon (ml)	0.05
H2O (ml)	4.85
Réactif I2/KI (ml)	0.1
- Incubation pendant 10min	
- Lecture 580 pour l'amidon	
- Lecture 720 pour amylose	

L'amidon et l'amylose ont tous deux été calculés à partir de la courbe standard développée en suivant la méthode mentionnée ci-dessus et exprimée en g.100g⁻¹ de matière sèche. La différence spectrale est destinée à doser l'amylopectine.

2.3. Analyse statistique

Les données ont été analysées avec STATISTICA 0.8 avec ANOVA. Les effets de la sécheresse sur les différents paramètres étudiés ont été calculés avec ANOVA en utilisant des données de plantes cultivées dans trois régimes hydriques %, 60 %, 30 % de la capacité du champ) et traites avec l'excision ou l'ombrage.

3. Résultats

3.1. Effet du génotype, du régime hydrique et la nature de l'organe sur l'élaboration du poids final du grain

Les poids des grains produits par les cinq génotypes varient significativement (*Tableau 07*) en fonction des trois régimes hydriques adoptés et des différentes sources impliquées dans son remplissage (traitements) ($p < 0.001$). Des effets importants émanent également de l'interaction de ces facteurs sur l'élaboration du poids des grains ($p < 0.001$).

Les poids des grains s'annoncent les plus élevés chez les plantes témoins issues du lot conduit à 100%CC. Ainsi, les valeurs obtenues (*Tableau 10*) varient entre $2.016g \pm 0.014$ et $1.489g \pm 0.023$ enregistrées respectivement chez les génotypes Langlois et Waha.

Dans le même traitement (plante témoin), l'application du déficit a provoqué une réduction du poids des grains. En effet, dans le lot conduit à 60%CC, les valeurs exprimées fluctuent dans l'intervalle délimité par des extrêmes de $1.712g \pm 0,003$ et $1.445g \pm 0,018$ relevés dans l'ordre chez les génotypes Langlois et Oued Zenati. Les génotypes, Langlois et Oued Zenati ont inscrit les plus grandes réductions des poids relatifs des grains en atteignant des taux respectifs de 15 et 14%. A l'opposé, le reste des génotypes s'avèrent moins sensibles à cette réduction où les taux sont inférieurs à 4%.

Chez les plantes conduites sous un régime hydrique de 30%CC, les poids relatifs des grains vacillent entre $1.625g \pm 0.025$ et $1.075g \pm 0.008$ inscrits respectivement par les génotypes Langlois et ACSAD1361. Pour ce traitement et sous ce régime hydrique, les réductions du poids des grains se montrent encore plus importantes où elles atteignent un taux de 34% relevé chez Mexicali75.

L'application des différents traitements pour l'évaluation des différentes sources d'élaboration du poids final du grain (ombrage, excision) a provoqué de nettes réductions des valeurs déterminées. Les plus grands taux de cette régression ont été relevés dans le traitement d'ombrage de plante entière et ce au niveau des trois traitements hydriques (*Tableau 08*). Les valeurs des poids des grains obtenus sous le régime hydrique de 100%CC sont comprises entre $0.590g \pm 0,036$ (Waha) et $0.275 \pm 0,005$ (Mexicali75). Les taux des réductions du poids par

rapport à ceux fournis par les plantes témoins sont supérieurs à 60% et atteignent un maximum de 82% relevé chez le génotype Maxicali75. Cette évolution nous indique que la photosynthèse courante de la partie caulinaire détient une part très élevée dans le processus de remplissage du grain et l'élaboration de son poids final. Pour le même dispositif (plante cachée) et au niveau du lot conduit à 60%CC, les poids dégagés par l'ensemble des génotypes fluctuent dans l'intervalle délimité par des extrêmes de $0.574g \pm 0,022$ (Waha) et $0.0288g \pm 0,030$ (Maxicali75). Des réductions très élevées ont été également constatées par rapport aux plantes témoins issues du même régime hydrique, où elles varient entre 82% (Maxicali75) et 61% (Waha).

Enfin dans le lot conduit à 30%CC et pour le même dispositif, les poids relatifs des grains s'annoncent très faibles et fluctuent entre $0.560g \pm 0.012$ (Langlois) et $0.282g \pm 0,013$ (ACSAD1361). Par conséquent, la réduction moyenne des poids par rapport à ceux des plantes témoins est de l'ordre de 70%.

L'apport de l'activité photosynthétique de l'épi dans la formation du poids final du grain s'annonce également élevée. Dans le lot du régime hydrique témoin (100%CC), les poids des grains des plantes à épis ombrés varient entre $1.148g \pm 0.055$ et $0.858g \pm 0.011$, valeurs inscrites dans l'ordre par les génotypes Langlois et Oued Zenati. Tandis que pour le même traitement et sous le régime hydrique de 60%CC, les poids relatifs des grains baissent pour atteindre des valeurs comprises entre $0.975g \pm 0.002$ et $0.763g \pm 0.089$ extériorisées respectivement par les génotypes Langlois et Maxicali75. Enfin dans le lot conduit sous le régime hydrique de 30%CC, les valeurs des poids relatifs des grains diminuent davantage pour s'inscrire dans un intervalle borné des valeurs extrêmes de 0.766 ± 0.057 (Oued Zenati) et 0.545 ± 0.032 (ACSAD1361).

Chez les plantes où a procédé par l'excision de la dernière feuille et au niveau du lot conduit à 100%CC, les poids relatifs des grains varient entre $1.930g \pm 0.039$ et $1.181g \pm 0.037$ enregistrés dans l'ordre chez les génotypes Langlois et Mexicali75. Pour le même dispositif et en appliquant un déficit hydrique d'une intensité modérée (60%CC), les valeurs de ces poids sont délimitées par des extrêmes évalués à $1.540g \pm 0.077$ (Langlois) et $1.245g \pm 0.041$ (ACSAD1361). L'accentuation du déficit dans le lot mené à 30%CC, le génotype Langlois s'est distingué parmi l'ensemble en inscrivant la valeur la plus élevée en atteignant $1.437g \pm 0.044$ et à l'opposé, le génotype Maxicali75 a inscrit le plus faible poids avec une valeur de $0.862g \pm 0.049$.

Dans le dispositif où on a pratiqué l'excision de l'ensemble des étages foliaires, s'est soldée par une faible réduction des poids des grains. En conséquence, sous le régime hydrique témoin (100%CC), les poids relatifs des grains s'annoncent peu affectés par cette opération et détiennent des valeurs supérieures à 1g et rejoignent un maximum de $1.878g \pm 0.027$ relevé chez le génotype Langlois. Les réductions provoquées par l'application du déficit hydrique du niveau de 60%CC se montrent relativement faibles et les valeurs inscrites oscillent dans une plage de données bornée par des extrêmes de $1.515g \pm 0.066$ (Langlois) et $1.083g \pm 0.082$ (ACSAD1361). Enfin, l'application du déficit hydrique sévère (30%CC) s'est soldée par l'élaboration des poids relatifs des grains dont les valeurs varient entre $0.815g \pm 0.061$ (ACSAD1361) et $1.425g \pm 0.062$ (Langlois).

Concernant l'ombrage du col de l'épi, les variations des régimes hydriques appliqués aux plantes n'ont pas provoqué de grandes variations dans l'élaboration du poids final du grain. Ainsi, les valeurs obtenues au niveau du lot témoin se montrent élevées pour atteindre un maximum de $1.738g \pm 0.014$ inscrit par le génotype Langlois. Au niveau du lot conduit sous 60%CC, les poids obtenus varient entre $1.528g \pm 0.059$ (Langlois) et $1.237g \pm 0.05$ (Waha). On note à ce régime hydrique que le taux de réduction moyen est de l'ordre de 8% par rapport au lot témoin (100%CC). Sous le régime hydrique de 30%CC, le taux de réduction moyen a été évalué à 26% et où les poids moyens inscrits par l'ensemble des génotypes est compris dans l'intervalle délimité par 0.882g (Mexicali75) et $1.520g \pm 0.009$ (Langlois).

Dans le dispositif où a pratiqué l'excision de la barbe de l'épi, les valeurs du poids relatifs des grains s'élèvent à un maximum de l'ordre de $1.915g \pm 0.024$ (Langlois) et se limitent par un minimum de $1.311g \pm 0.033$ obtenu par le génotype ACSAD1361. Au niveau du lot conduit sous un régime hydrique de 60%CC, les poids régressent et se concentrent dans un intervalle limité par $1.492g \pm 0.054$ et $0.998g \pm 0.029$ extériorisés respectivement par les génotypes Langlois et Oued Zenati. Enfin dans le lot conduit sous un régime de 30%CC, les valeurs des poids des grains obtenues oscillent entre $0.783g \pm 0.061$ (ACSAD1361) et $1.380g \pm 0.05$ (Langlois).

Tableau 07 : Effets du génotype, du régime hydrique, des traitements et leurs interactions sur le poids relatif des grains et la contribution relative des différents organes dans son remplissage, des cinq génotypes conduits sous les trois régimes hydriques adoptés. Les différences sont exprimées par le test F

	Génotype	Régime hydrique	Traitements	Genotype x régime hydrique	Génotype x traitements
Poids des grains	165.59***	346.53***	635.07***	18.86***	10.60***
Contribution relative	6.244***	4.382**	527.244***	2.183**	7.205***

, * Différences significatifs au seuil de $p < 0.01$ et $p < 0.001$, respectivement

Tableau 08 : Résultats moyens du poids relatifs des grains des différents traitements des cinq génotypes conduits sous trois régimes hydriques (100%FC, 60%FC, 30%FC) en g/100gMS

Traitements	Régime hydrique	ACSAD1361	LANGLOIS	MEXICALI75	OUED ZENATI	WAHA
Col caché	100%CC	1,376±0,028	1,738±0,014	1,432±0,021	1,652±0,014	1,261±0,011
	60%CC	1,317±0,039	1,528±0,059	1,419±0,075	1,325±0,022	1,237±0,050
	30%CC	0,942±0,016	1,520±0,009	0,882±0,000	1,186±0,096	0,985±0,095
Plante cachée	100%CC	0,330±0,016	0,571±0,075	0,275±0,005	0,549±0,062	0,590±0,036
	60%CC	0,368±0,078	0,564±0,011	0,288±0,030	0,479±0,055	0,574±0,022
	30%CC	0,282±0,013	0,560±0,012	0,186±0,015	0,486±0,029	0,445±0,025
Epi caché	100%CC	0,959±0,027	1,148±0,055	0,945±0,021	0,858±0,011	0,988±0,032
	60%CC	0,928±0,048	0,763±0,089	0,975±0,002	0,792±0,042	0,942±0,005
	30%CC	0,545±0,032	0,603±0,016	0,648±0,054	0,766±0,057	0,773±0,045
Plante témoin	100%CC	1,511±0,021	2,016±0,014	1,533±0,007	1,675±0,017	1,489±0,023
	60%CC	1,468±0,060	1,712±0,003	1,603±0,013	1,445±0,018	1,468±0,050
	30%CC	1,075±0,008	1,625±0,025	1,009±0,037	1,336±0,071	1,213±0,052
Barbes excisées	100%CC	1,311±0,033	1,915±0,024	1,427±0,035	1,530±0,021	1,313±0,010
	60%CC	1,202±0,078	1,493±0,054	1,442±0,010	0,998±0,029	1,279±0,027
	30%CC	0,783±0,061	1,380±0,050	0,785±0,012	0,862±0,030	1,014±0,052
Dernière feuille excisée	100%CC	1,196±0,043	1,930±0,039	1,181±0,037	1,582±0,039	1,271±0,086
	60%CC	1,245±0,041	1,540±0,077	1,255±0,077	1,289±0,025	1,280±0,010
	30%CC	0,984±0,027	1,437±0,044	0,862±0,049	1,017±0,034	1,131±0,033
Feuilles excisées	100%CC	1,075±0,005	1,878±0,027	1,116±0,041	1,529±0,074	1,156±0,063
	60%CC	1,083±0,082	1,515±0,066	1,152±0,076	1,221±0,083	1,210±0,037
	30%CC	0,815±0,061	1,427±0,062	0,850±0,018	1,005±0,055	1,049±0,011

3.2. La contribution relative des différents organes de la plante sous les trois régimes hydriques adoptés, dans le remplissage du grain

L'élaboration du poids final du grain chez le blé comme toutes les céréales, repose sur la disponibilité des assimilats, leur migration et leur transformation en substances de réserves au niveau de cette entité. La disponibilité des assimilats est assurée par deux processus conjointement fonctionnels à partir de l'anthèse, la photosynthèse courante et la remobilisation des réserves stockées principalement dans les différentes parties de la tige. La photosynthèse

courante prise en charge par les organes végétatifs caulinaires est conditionnée principalement par leur longévité et leur activité, soumises aux variations des niveaux d'alimentation hydrique de la plante. La remobilisation des réserves est du ressort des processus métaboliques indispensables à leur dégradation. La translocation de ces assimilats vers les grains en formation repose sur la circulation de la sève et dont la disponibilité hydrique en constitue un facteur déterminant.

La contribution relative des différentes sources pour le remplissage du grain dépend de la nature des cultivars et des ressources hydriques disponibles. Les résultats obtenus (*Figure 17*) démontrent que l'élaboration du poids final du grain dépend grandement de deux sources, la remobilisation des réserves et la photosynthèse courante de constituants de l'épi. Ainsi chez l'ensemble des génotypes testés, les résultats obtenus prouvent que la contribution relative de la remobilisation des réserves représente la principale source dans le remplissage du grain. Ainsi, les valeurs de cette contribution sous les trois régimes hydriques adoptés s'élèvent à plus de 60% et se limite à un maximum de 82% et ce chez les cinq génotypes expérimentés. Cette contribution est équivalente au niveau des trois régimes hydriques retenus, sauf chez le génotype Waha où elle augmente avec l'accentuation du déficit hydrique. Chez ce génotype, les valeurs de cette implication sont de l'ordre de 60.3%, 60.67% et 63.09% enregistrées respectivement sous les régimes hydriques de 100%CC, 60%CC et 30%CC. Chez les autres cette contribution se révèle faiblement supérieure chez les plantes conduites en situation hydrique témoin (100 %CC).

La seconde position de la contribution est détenue par l'activité photosynthétique courante de l'épi. Les valeurs moyennes de cette contribution relevées chez l'ensemble des génotypes sont de l'ordre de 40%, 42% et 45% obtenues respectivement sous les régimes hydriques de 100%CC, 60%CC et 30%CC. Cette tendance révèle que l'implication de cet organe dans le remplissage du grain s'accroît encore en conditions de déficit hydrique. Pour les valeurs distinctes relevées au niveau des trois régimes hydriques, on constate que dans le lot témoin (100%CC) la contribution relative de cet organe enregistre des valeurs comprises entre 48.74% (Oued Zenati) et 33.52% (Waha). Dans le lot conduit à 60%CC, cet intervalle est délimité par des valeurs extrêmes de l'ordre de 55.47% (Langlois) et 35.62% (Waha). Enfin sous le régime hydrique de 30%CC, les valeurs de la contribution relative enregistrées varient entre 49.29% et 35.27%, relevées dans l'ordre chez les génotypes ACSAD1361 et Mexicali75.

Le rôle que détient la barbe de l'épi dans le remplissage du grain est variable en fonction de la nature du génotype et du régime hydrique adopté. Les résultats obtenus indiquent (*Figure 17*) que les parts de cette contribution s'annoncent plus élevées en conditions de déficit hydrique, particulièrement sévère. Ainsi, les valeurs moyennes de cette contribution concernant l'ensemble des génotypes progressent de 9% (100%CC), 18% (60%CC) à 23% (30%CC). On note dans ce contexte que chez le génotype Oued Zenati où cette implication s'annonce parmi les plus importante et qui enregistre des valeurs progressant de 8%, 31% à 34% respectivement au sein des lots conduits à 100%CC, 60%CC et 30%CC.

La contribution de l'activité photosynthétique du col de l'épi se montre faible relativement aux autres sources, particulièrement dans les situations hydriques optimales (100%CC). Les valeurs moyennes enregistrées s'échelonnent de 9% (100%CC), 11% (60%CC) à 12% (30%CC). L'exception de cette contribution a été constatée chez le génotype Waha où ses valeurs s'avèrent les plus élevées en inscrivant 15%, 16% et 19% respectivement dans les lots conduits à 100%CC, 60%CC et 30%CC.

La contribution relative de la dernière feuille et l'ensemble des étages foliaires est variable suivant les génotypes et les situations hydriques adoptées. Pour la dernière feuille, les valeurs de sa photosynthèse courante sont de l'ordre de 14% (100%CC), 14% (60%CC) et 13% (30%CC). Tandis que celle des autres foliaires, elle détient des valeurs progressant de 19% (100%CC), 19% (60%CC) et 18% (30%CC). La contribution relative de la dernière feuille augmente sensiblement avec l'accentuation du déficit, chez le génotype Oued Zenati et ce en inscrivant des valeurs croissantes s'étendant de 5%, 11% à 23% en passant respectivement par les niveaux d'alimentation hydrique de 100%CC, 60%CC à 30%CC (*Figure 17*).

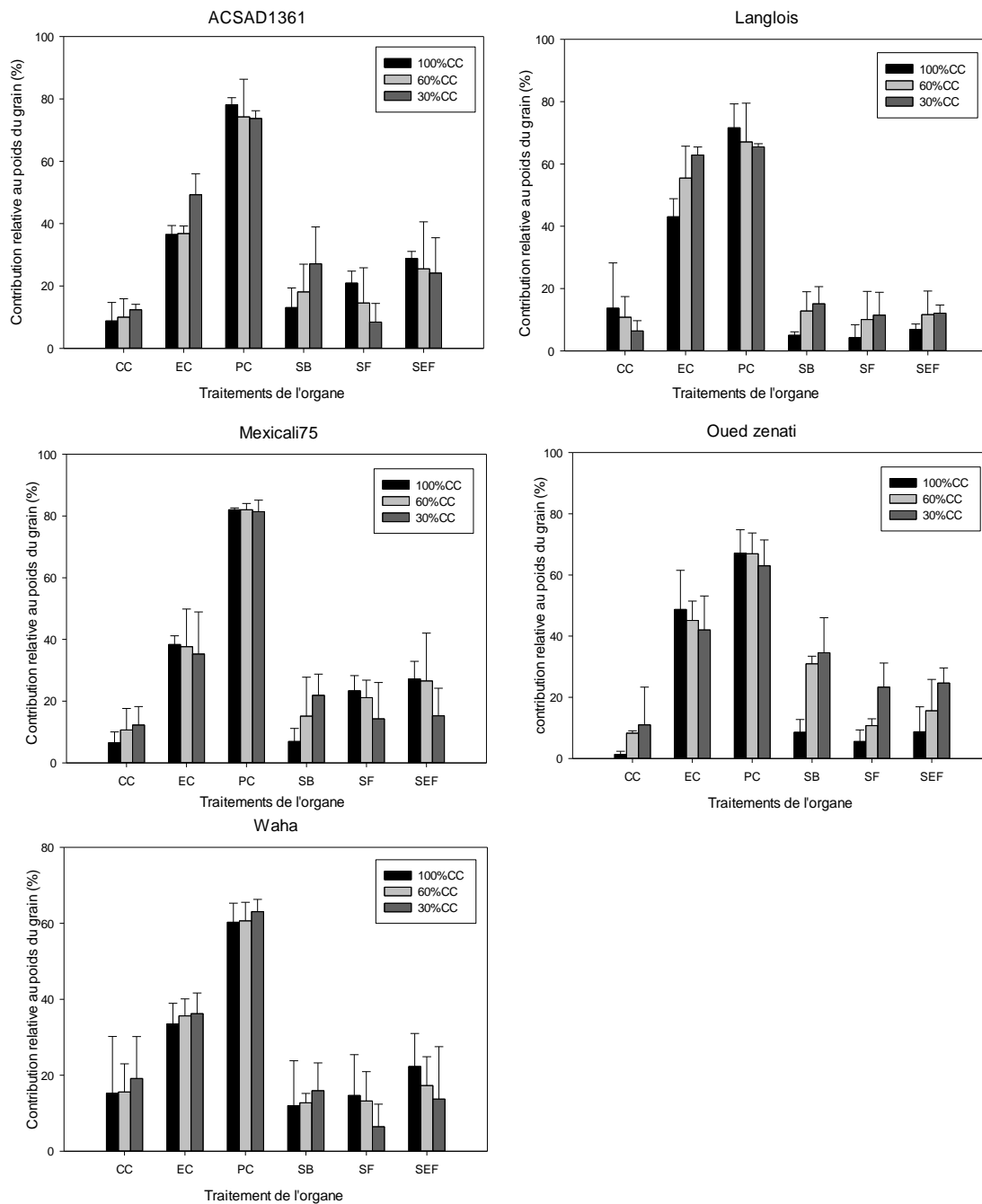


Figure 17: Contribution relative des différents organes au remplissage du grain de cinq géotypes de blé dur sous trois régimes hydriques (30 % FC, 60 % FC, 100 % FC). CC- plante avec pédoncule caché, EC- plante avec épi caché, PC- plante entière caché, SB- plante avec barbes excisées, SF- plante avec la dernière feuille excisée, SEF- plante avec système foliaire entier excisé.

3.3. Contribution relative des différents organes de la plante sous les trois régimes hydriques adoptés, dans l'élaboration de la fraction polysaccharidique du grain à la maturité physiologique

a. Plante témoin

La fraction polysaccharidique du grain à maturité est représentée par les teneurs, d'amidon, d'amylose et d'amylopectine. L'analyse des résultats obtenus des dosages de ces constituants (*Tableau 10*) révèle que leur élaboration est grandement influencée par la nature des génotypes conduits ($p < 0.001$), la contribution des différents organes impliqués dans le remplissage du grain ($p < 0.001$) et les variations des régimes hydriques retenues ($p < 0.001$). Les interactions de ces facteurs permettent également des variations significatives des valeurs obtenues de ces constituants ($p < 0.001$).

Chez les plantes témoins la teneur en amidon des grains, ses deux constituants ainsi que leur rapport varient significativement parmi les différents régimes hydriques appliqués. Concernant la teneur en amidon, les valeurs obtenus sous les trois régimes hydriques oscillent aléatoirement ce qui suppose qu'ils sont fortement influencés par la nature des génotypes testés. Ainsi, la collection des génotypes se distinguent en deux groupes. Dans un premier s'intègrent les génotypes, Langlois, Mexicali75, Oued Zenati et Waha, chez les quels la teneur en amidon s'avère plus élevée sous les conditions hydriques optimales (100%CC) et diminue ensuite sous les régimes hydriques déficients (60%CC, 30%CC). Le génotype ACSAD1361 se distingue en inscrivant une teneur en amidon plus faible comparativement avec celles inscrites en conditions de déficit hydrique avec ses deux intensités.

Les résultats moyens (*Tableau 12*) illustrent que les taux d'amidon dans le lot conduit à 100%CC, varient entre $92,711\text{g}/100\text{gMS} \pm 1,997$ et $22,933\text{g}/100\text{gMS} \pm 1,543$, relevés respectivement chez les génotypes Oued Zenati et ACSAD1361. Dans le lot conduit à 60%CC, les taux obtenus sont limités par des extrêmes équivalents à $13,600\text{g}/100\text{gMS} \pm 2,400$ (Maxicali75) et $67,711\text{g}/100\text{gMS} \pm 1,497$ (ACSAD1361). Enfin, en conditions de déficit hydrique sévère (30%CC), les valeurs moyennes des teneurs d'amidon vacillent entre $17,067\text{g}/100\text{gMS} \pm 1,037$ (Langlois) et $72,504\text{g}/100\text{gMS} \pm 1,229$ (Oued Zenati).

Au niveau du même traitement (plante témoin), la composition de l'amidon en amylose, amylopectine et leur rapport présente également des variations importantes en fonction du génotype et du régime hydrique adopté. Aucune tendance d'évolution des teneurs de ces constituants n'a été dégagée par les résultats obtenus. On remarque d'une façon générale que la teneur en amylopectine est supérieure par rapport à celle d'amylose et ce au

niveau des trois régimes hydriques conduits. Les teneurs en amylose en conditions hydriques optimales (100%CC) atteignent un maximum de $36,111\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,973$ et un minimum de $8,333\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,551$. Dans le lot conduit à 60%CC, les teneurs obtenues pour ce constituant fluctuent entre $30,15\text{g}/100\text{gMS}\pm 1,555$ et $8,013\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,931$, dégagées respectivement par les génotypes ACSAD1361 et Oued Zenati.

Concernant la fraction d'amylopectine, les résultats moyens sont plus élevés et pareillement variables en fonction des génotypes et entre les trois régimes hydriques. En absence du déficit hydrique (lot conduit à 100%CC), les fractions déterminées varient entre $56,6\text{g}/100\text{gMS}\pm 1,229$ et $14,6\text{g}/100\text{gMS}\pm 1,234$ relevées dans l'ordre chez les génotypes Oued Zenati et ACSAD1361. L'application du déficit hydrique modéré (60%CC), permet l'obtention des valeurs extrêmes qui sont de l'ordre de $37,562\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,198$ (ACSAD1361) et $3,215\text{g}/100\text{gMS}\pm 2,4$ (Maxicali75). Enfin en conditions de déficit hydrique sévère (30%CC), les fractions déterminées sont comprises dans l'intervalle délimité par $41,125\text{g}/100\text{gMS}\pm 4,544$ et $9,503\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,584$, obtenues dans l'ordre par les cultivars Oued Zenati et Langlois.

b. Remobilisation des réserves

La remobilisation des réserves (plante entièrement ombrée) dans l'élaboration des constituants polysaccharidiques du grain dépend du génotype et des régimes hydriques appliqués aux plantes. Les teneurs en amidon et ses constituants au niveau du grain s'annoncent plus faibles que celles inscrites au niveau des plantes témoins et ce dans les trois lots hydriques. La teneur en amidon des grains récoltés sur les plantes conduites sous le régime hydrique témoin (100%CC) a inscrit des valeurs délimitées par des extrêmes de $69,6\text{g}/100\text{gMS}\pm 1,942$ et $14,4\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,653$ extériorisées dans l'ordre par les génotypes Waha et Mexicali75. Les teneurs en amidon déterminées chez les plantes conduites sous les deux régimes de déficit hydrique sont plus faibles. On constate que dans le lot mené à 60%CC, ces valeurs atteignent un maximum de $30,4\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,701$ (ACSAD1361) et un minimum de $11\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,2$ (Mexicali75). Enfin sous les conditions de déficit hydrique sévère (30%CC), la teneur en amidon augmente comparativement aux autres régimes hydriques, chez les génotypes Mexicali75 et Oued Zenati en inscrivant des valeurs respectives de $66,133\text{g}/100\text{gMS}\pm 1,147$ et $76,8\text{g}/100\text{gMS}\pm 0,494$. A l'opposé, chez le reste des génotypes et sous ces conditions hydriques les teneurs en amidon régressent significativement.

Les résultats moyens obtenus (*Tableau 10/11*) indiquent que d'une manière générale, la fraction d'amylopectine présente des teneurs plus élevées que celle d'amylose. Cette

constatation a été relevée chez l'ensemble des géotypes testés et dans les trois lots des régimes hydriques adoptés. Pour la teneur en amylose, les valeurs enregistrées varient entre 25.256g/100gMS±2.109 et 5.769g/100gMS±0.684, indistinctement des régimes hydriques appliqués. La valeur maximale des teneurs en amylopectine, dans le lot témoin (100%CC) et de 44.344g/100gMS±2.847 (Waha). L'application du déficit hydrique s'est accompagnée de teneurs de valeurs maximales estimées à 26.477g/100gMS±1.785 (60%CC) et 54.588g/100gMS±0.656 inscrites respectivement par les géotypes Langlois et Oued Zenati.

Tableau 09: Effets de l'alimentation hydrique, du géotype, des traitements de l'organe et leurs interactions sur la teneur en amidon, en amylose et en amylopectine des grains mûres des cinq géotypes cultivés sous trois régimes hydriques (100%FC, 60%FC, 30%FC).

	Géotype	Régime hydrique	Traitement de l'organe	Géotype * Régime hydrique	Géotype * Traitement de l'organe
Teneur en amidon	89.93***	540.09***	58.29***	106.75***	38.25***
Teneur en Amylose	89.402***	25.880***	25.88***	66.782***	12.597***
Teneur en Amylopectine	31.398***	325.507***	39.504***	57.977***	29.170***

*** Significatif a $p < 0.001$.

c. Activité photosynthétique courante des organes

Des implications variables conditionnées par la nature de l'organe et le régime hydrique ont été constatées dans le dépôt d'amidon et ses constituants dans le grain (*Tableau 11*).

La contribution moyenne génotypique de l'activité photosynthétique courante des organes situés au dessus du dernier nœud dans le dépôt d'amidon au niveau du grain est à des taux de 57%, 75% et 49% respectivement sous les régimes hydriques de 100%CC, 60%CC et 30%CC. Ce qu'on peut déduire de ces résultats est que l'application d'un déficit hydrique modéré (60%CC) s'est accompagnée d'une augmentation des assimilats indispensables à la synthèse d'amidon au niveau du grain en formation. A l'opposé, l'accentuation d'intensité du déficit hydrique (30%CC) s'est soldée d'une nette diminution de leur contribution, ce qui s'expliquerait par une inhibition du déroulement de leur activité photosynthétique et une réduction de leur longévité.

Au niveau du traitement hydrique témoin (100%CC), l'activité photosynthétique de l'épi et du système foliaire s'annonce la plus impliquée dans le dépôt d'amidon au niveau du grain. Leur ombrage a permis une diminution respective de 71% et 66% dans le dépôt de ce constituant des réserves du grain.

Au niveau du traitement hydrique de 60%CC, la contribution du col de l'épi, la barbe, l'épi, la dernière feuille et l'ensemble du système foliaire était similaire. Ainsi, les taux respectifs relevés étaient de l'ordre de 77%, 77%, 78%, 74% et 73%. Tandis qu'en situation de déficit hydrique sévère (30%CC), l'activité photosynthétique de l'épi s'avère la plus impliquée pour assurer la disponibilité des assimilats indispensables à la synthèse d'amidon au niveau du grain lors de son remplissage.

Concernant la composition de l'amidon, l'implication des différents organes de la plante par leur activité photosynthétique impose également des variations importantes et qui dépendent également des régimes hydriques appliqués aux plantes (*Tableau 9*). Ainsi, l'excision ou l'ombrage du col de l'épi, l'épi, la barbe, la dernière feuille et la totalité des feuilles a permis de fournir un amidon avec un ratio amylose/amylopectine d'une moyenne génotypique de l'ordre de 0.88, 1.49 et 0.80 relevés respectivement sous les régimes hydriques, témoin (100%CC), 60%CC et 30%CC (*Tableau 10*).

Selon ces données, on constate qu'en absence de l'activité photosynthétique des organes situés au dessus du dernier nœud et sous les conditions d'un déficit hydrique modéré (60%CC) l'amidon de réserve est constitué essentiellement d'amylose. Tandis que sous les conditions d'un déficit hydrique sévère (30%CC), l'amidon est constitué d'une fraction d'amylose supérieure à celle d'amylopectine et reflète les rapports déterminés au niveau du traitement hydrique témoin (100%CC).

Pour les différents organes et en situation hydrique témoin (100%CC), l'ombrage de l'épi et l'excision du système foliaire ont eu un important effet sur la modification du ratio amylose/amylopectine en augmentant la fraction d'amylose (*Tableau 11/12*). Dans le lot conduit à 60%CC, c'est l'excision des feuilles qui a eu le plus impact sur la modification du ratio en permettant d'atteindre une valeur supérieure à 1. Enfin, en situation de déficit hydrique à un niveau de 30%CC, c'est l'absence d'activité photosynthétique de l'épi qui a détenu l'effet de cette modification en augmentant le ratio à une moyenne génotypique de 1.13.

Tableau 10: Résultats moyennes de la teneur en amidon des grains matures mesurées sur cinq géotypes cultivés sous trois régimes hydrique (100%FC, 60%FC, 30% FC). Le traitement de l'ombrage et l'excision ont été appliqués à l'anthèse et les poudres des grains matures ont été analysées. CC- plante avec pédoncule caché, EC- plante avec épi caché, PC- plante entière caché, SB-plante avec barbes excisées, SF- plante avec la dernière feuille excisée, SEF- plante avec système foliaire entier excisé.

AMIDON (g.100g ⁻¹ of MS)	régimes hydrique (%CC)	Control	CC	PC	EP
ACSAD1361	100	22,933±1,543	14,400±0,980	33,200±1,617	6,000±0,231
	60	67,711±1,497	15,200±0,864	30,400±0,701	19,200±1,878
	30	25,600±0,854	62,400±0,533	14,867±0,900	15,200±1,903
LANGLOIS	100	67,022±2,294	84,600±2,580	38,400±2,847	49,600±0,654
	60	14,800±1,540	12,800±0,980	26,133±1,067	15,900±0,957
	30	17,067±1,037	87,200±3,266	32,200±0,600	73,045±2,832
MEXICALI75	100	72,711±2,616	51,467±2,778	14,400±0,653	21,600±1,699
	60	13,600±2,400	30,778±1,905	11,000±0,200	11,800±1,510
	30	60,267±2,620	79,200±2,040	66,133±1,147	19,067±2,857
OUED ZENATI	100	92,711±1,997	80,978±1,708	29,867±1,676	15,667±1,224
	60	18,333±1,906	28,400±0,490	27,200±0,327	23,867±2,900
	30	72,504±1,229	45,400±1,305	76,800±0,494	54,667±3,491
WAHA	100	51,200±1,633	93,500±1,900	69,600±1,942	53,200±2,078
	60	19,000±1,435	29,067±1,996	20,800±1,613	40,800±0,462
	30	21,333±0,074	33,333±1,188	28,600±1,925	15,200±0,327
AMIDON (g.100g ⁻¹ of MS)	régimes hydrique (%FC)	Control	SB	SF	SEF
ACSAD1361	100	22,933±1,543	31,000±1,337	24,356±1,420	35,200±1,592
	60	67,711±1,497	12,133±0,933	67,600±0,654	16,800±0,653
	30	25,600±0,854	8,600±1,579	97,600±0,654	50,933±0,399
LANGLOIS	100	67,022±2,294	29,200±1,388	54,400±1,619	48,800±0,854
	60	14,800±1,540	12,000±0,954	20,800±1,081	35,200±0,548
	30	17,067±1,037	88,800±0,952	15,200±0,741	86,538±2,554
MEXICALI75	100	72,711±2,616	50,200±1,133	28,400±0,400	22,933±1,135
	60	13,600±2,400	20,800±1,848	8,800±0,974	21,800±0,757
	30	60,267±2,620	50,400±0,925	64,600±3,800	46,800±3,926
OUED ZENATI	100	92,711±1,997	85,200±1,449	62,967±0,702	45,333±1,815
	60	18,333±1,906	29,600±1,919	17,000±1,740	29,333±0,458
	30	72,504±1,229	56,000±0,825	64,000±1,394	71,315±1,103
WAHA	100	51,200±1,633	44,000±1,307	33,867±1,148	17,400±1,400
	60	19,000±1,435	41,600±1,665	14,400±0,142	30,600±1,052
	30	21,333±0,074	33,600±1,932	29,600±0,771	23,400±1,793

Tableau 11: Résultats moyennes de la teneur en amylose (AM) , amylopectine (AP) et le ratio amylose/amylopectine des grains matures mesurées sur cinq géotypes cultivés sous trois régimes hydrique (100%FC, 60%FC, 30% FC). Le traitement de l'ombrage et l'excision ont été appliqués à l'anthèse et les poudres des grains matures ont été analysées. CC- plante avec pédoncule caché, EC- plante avec épi caché, PC- plante entière caché,

Genotype	Water supply (%FC)	Control			CC			PC			EP		
		AM	AP	Ratio	AM	AP	Ratio	AM	AP	Ratio	AM	AP	Ratio
ACSAD1361	100	8,333 ±0,551	14,600 ±1,234	0,57	8,301 ±0,096	6,099 ±1,076	1,36	9,808 ±1,091	23,392 ±1,330	0,42	4,615 ±0,444	1,385 ±0,675	3,33
	60	30,150 ±1,555	37,562 ±0,198	0,80	8,205 ±0,091	6,995 ±0,953	1,17	6,026 ±1,459	24,374 ±1,725	0,25	8,269 ±1,526	10,931 ±0,240	0,76
	30	7,308 ±0,666	18,292 ±0,666	0,40	24,231 ±3,567	38,169 ±1,221	0,63	5,160 ±0,901	9,706 ±1,800	0,53	5,192 ±1,047	10,008 ±1,227	0,52
LANGLOIS	100	32,372 ±5,428	34,650 ±0,571	0,93	28,269 ±0,111	56,331 ±1,469	0,50	11,923 ±1,110	26,477 ±1,785	0,45	25,385 ±0,125	24,215 ±0,525	1,05
	60	10,192 ±0,111	4,608 ±0,651	2,21	5,962 ±0,111	6,838 ±0,986	0,87	12,254 ±0,423	13,879 ±1,138	0,88	5,962 ±1,355	9,938 ±0,618	0,60
	30	7,564 ±0,453	9,503 ±0,584	0,80	36,755 ±1,406	50,445 ±3,254	0,73	6,106 ±0,144	26,094 ±0,744	0,23	47,115 ±1,492	25,930 ±0,912	1,82
MEXICALI75	100	26,111 ±1,462	46,600 ±0,159	0,56	19,231 ±1,285	32,236 ±1,821	0,60	7,308 ±0,628	7,092 ±0,906	1,03	9,327 ±1,289	12,273 ±0,266	0,76
	60	10,385 ±0,524	3,215 ±2,400	3,23	11,538 ±2,324	19,239 ±1,154	0,60	4,904 ±1,189	6,096 ±1,621	0,80	5,481 ±0,454	6,319 ±1,436	0,87
	30	24,744 ±1,179	35,523 ±1,454	0,70	28,462 ±0,297	50,738 ±1,971	0,56	28,846 ±0,551	37,287 ±0,360	0,77	12,692 ±0,396	6,374 ±0,553	1,99
OUED ZENATI	100	36,111 ±0,973	56,600 ±1,229	0,64	25,983 ±1,249	54,995 ±1,665	0,47	5,769 ±0,684	24,097 ±1,738	0,24	7,083 ±0,642	8,583 ±0,751	0,83
	60	8,013 ±0,931	10,321 ±2,547	0,78	13,590 ±0,262	14,810 ±0,752	0,92	13,077 ±0,981	14,123 ±0,237	0,93	9,487 ±0,594	14,379 ±0,199	0,66
	30	31,378 ±0,980	41,125 ±4,544	0,76	19,808 ±0,867	25,592 ±2,979	0,77	22,212 ±0,934	54,588 ±0,656	0,41	22,692 ±0,666	31,974 ±0,315	0,71
WAHA	100	11,923 ±0,684	39,277 ±1,041	0,30	28,622 ±4,321	64,878 ±1,454	0,44	25,256 ±2,109	44,344 ±2,847	0,57	20,128 ±1,258	33,072 ±0,820	0,61
	60	9,615 ±2,397	9,385 ±3,806	1,02	10,897 ±1,573	18,169 ±0,609	0,60	6,442 ±1,189	14,358 ±0,317	0,45	13,462 ±0,666	27,338 ±1,128	0,49
	30	6,923 ±1,246	14,410 ±0,882	0,48	14,103 ±0,635	19,231 ±6,800	0,73	15,288 ±1,874	13,312 ±0,746	1,15	5,641 ±1,573	9,559 ±1,669	0,59

Tableau 12 : Résultats moyennes de la teneur en amylose (AM) , amylopectine (AP) et le ratio amylose/amylopectine des grains matures mesurées sur cinq géotypes cultivés sous trois régimes hydrique (100%FC, 60%FC, 30% FC). Le traitement de l'ombrage et l'excision ont été appliqués à l'anthèse et les poudres des grains matures ont été analysées. SB-plante avec barbes excisées, SF- plante avec la dernière feuille excisée, SEF- plante avec système foliaire entier excisé

Genotype	Water supply (%FC)	Control			SB			SF			SEF		
		AM	AP	Ratio	AM	AP	Ratio	AM	AP	Ratio	AM	AP	Ratio
ACSAD1361	100	8,333 ±0,551	14,600 ±1,234	0,57	13,173 ±1,573	17,827 ±2,899	0,74	10,577 ±1,221	13,779 ±2,201	0,77	11,795 ±0,865	23,405 ±2,058	0,50
	60	30,150 ±1,555	37,562 ±0,198	0,80	7,019 ±0,865	5,114 ±0,068	1,37	24,545 ±1,115	43,055 ±1,115	0,57	13,269 ±0,707	3,531 ±0,681	3,76
	30	7,308 ±0,666	18,292 ±0,666	0,40	3,558 ±0,921	5,042 ±2,352	0,71	30,769 ±0,365	66,831 ±0,625	0,46	13,590 ±4,313	37,344 ±4,132	0,36
LANGLOIS	100	32,372 ±5,428	34,650 ±0,571	0,93	9,808 ±0,333	19,392 ±4,721	0,51	17,308 ±2,221	37,092 ±2,398	0,47	24,487 ±1,689	24,313 ±1,689	1,01
	60	10,192 ±0,111	4,608 ±0,651	2,21	11,154 ±1,025	0,846 ±0,101	13,1 8	10,128 ±1,258	10,672 ±3,822	0,95	13,846 ±0,254	21,354 ±0,425	0,65
	30	7,564 ±0,453	9,503 ±0,584	0,80	38,462 ±0,254	50,338 ±0,524	0,76	14,615 ±1,002	0,585 ±0,075	24,9 8	43,269 ±2,277	43,269 ±2,277	1,00
MEXICALI 75	100	26,111 ±1,462	46,600 ±0,159	0,56	19,968 ±1,979	30,232 ±2,400	0,66	11,346 ±0,577	17,054 ±0,977	0,67	12,821 ±1,820	10,113 ±0,794	1,27
	60	10,385 ±0,524	3,215 ±2,400	3,23	8,077 ±1,776	12,723 ±3,624	0,63	5,000 ±0,415	3,800 ±0,124	1,32	10,481 ±0,364	11,319 ±0,393	0,93
	30	24,744 ±1,179	35,523 ±1,454	0,70	13,077 ±0,324	37,323 ±0,354	0,35	11,635 ±1,173	52,965 ±0,627	0,22	11,923 ±0,222	34,877 ±3,704	0,34
OUED ZENATI	100	36,111 ±0,973	56,600 ±1,229	0,64	24,231 ±2,041	60,969 ±0,408	0,40	26,987 ±3,955	35,979 ±3,916	0,75	15,641 ±1,335	29,692 ±0,610	0,53
	60	8,013 ±0,931	10,321 ±2,547	0,78	14,038 ±1,021	15,562 ±2,899	0,90	11,218 ±1,190	5,782 ±0,755	1,94	10,513 ±2,143	18,821 ±3,862	0,56
	30	31,378 ±0,980	41,125 ±4,544	0,76	37,981 ±0,654	18,019 ±4,654	2,11	25,962 ±0,332	38,038 ±2,008	0,68	33,173 ±0,462	38,142 ±2,961	0,87
WAHA	100	11,923 ±0,684	39,277 ±1,041	0,30	21,346 ±2,020	22,654 ±3,394	0,94	18,590 ±0,635	15,277 ±3,514	1,22	12,212 ±0,673	5,188 ±0,727	2,35
	60	9,615 ±2,397	9,385 ±3,806	1,02	14,808 ±1,261	26,792 ±3,532	0,55	10,385 ±0,566	4,015 ±1,628	2,59	12,660 ±1,174	17,940 ±5,303	0,71
	30	6,923 ±1,246	14,410 ±0,882	0,48	12,212 ±0,399	21,388 ±4,311	0,57	3,173 ±0,288	26,427 ±2,615	0,12	5,000 ±0,570	18,400 ±3,830	0,27

4. Discussion

La phase de remplissage est une étape déterminante dans l'élaboration du poids et la composition du grain de blé dur. Ils atteignent leur poids final à la maturité physiologique (Samarah et al., 2010). Plusieurs facteurs influent les processus d'élaboration de ces deux traits. Ils se distinguent en paramètres environnementaux et caractères intrinsèques propres au matériel végétal.

L'accomplissement de ces deux caractéristiques définissant la qualité du grain, est commandé par la disponibilité des assimilats indispensables à la réalisation des processus métaboliques impliqués. A cet effet, deux sources détiennent l'amendement du grain en formation, en ces ressources, la photosynthèse courante et la remobilisation des réserves emmagasinées dans différents sites de la plante (Arous et al., 2020). L'activité photosynthétique concerne divers organes, principalement la dernière feuille (Merah et al., 2015; Ying-hua et al., 2014; Blandino et al., 2009), le col de l'épi (Li et al., 2010), l'épi (Gaju et al., 2014; Xu et al., 2016) et les barbes (Maydup et al., 2014; Merah et al., 2015).

Une autre source qui est également essentielle pour le remplissage des grains est la remobilisation des assimilats contenus dans divers organes de la plante, particulièrement la tige (Masoni et al., 2007). L'acuité de contribution de ces sources et leur durabilité dépendent étroitement des facteurs climatiques, notamment l'alimentation hydrique et les exigences thermiques (Ercoli et al., 2008). En effet, la survenue des périodes de sécheresse et des hautes températures durant les stades de formation du grain chez le blé dur affectent grandement son poids final et sa qualité (Fokar et al., 1998).

Suivant cette étude, les variations des régimes d'alimentation hydrique des plantes au stade post-anthèse modifient largement le poids et la composition d'amidon chez les grains en formation. L'application du déficit hydrique à l'anthèse réduit significativement le poids final des grains. Cette influence résulterait d'accélération de la période reproductrice, à une réduction du temps de remplissage des grains et à une accumulation plus faible de matière sèche (Alqudah et al., 2011). Néanmoins, cette influence dépend du comportement du matériel végétal vis-à-vis de ce stress. On note par conséquent dans ce contexte que le remplissage du grain dépend de la contribution de chaque organe selon les deux processus et leur longévité respective sous les conditions de sécheresse.

Selon les résultats dégagés de cette étude il se démontre que la contribution des épis par leur photosynthèse courante fournit les plus grandes quantités d'assimilats aux grains en

formation. Effectivement, les enveloppes et même le grain au cours de ses premières étapes de développement contribuent à un niveau plus élevé que les autres organes dans ce processus de remplissage. Ceci est confirmé par les travaux de Maydup et *al.* (2014), qui montrent l'importance des composantes des épis dans le développement du grain. Selon les résultats obtenus, sous les conditions d'alimentation hydrique déficientes, les barbes semblent également jouer un rôle important dans ce processus. Ceci est prouvé par de nombreux travaux (Bort et *al.*, 1994; Maydup et *al.*, 2014) qui ont démontré l'importance des barbes dans la formation des grains des céréales.

Sous les conditions de sécheresse et avec une limitation de la longévité des organes et de leurs activités photosynthétiques, la remobilisation des réserves constitue une source de contribution assez importante dans le remplissage du grain.

Nos résultats démontrent que le régime hydrique, la nature des génotypes et des sources d'approvisionnement du grain en assimilats influent significativement l'élaboration de la qualité du grain. Ainsi, la contenance des grains en amidon diminue autant avec l'accentuation d'intensité du déficit hydrique. Certains travaux avaient démontré une telle influence (Epron et *al.*, 1996 ; He et *al.*, 2012). La contribution des différents organes dans la formation des grains détient également une influence conséquente dans la teneur en amidon et sa composition.

Les résultats indiquent qu'en conditions d'alimentation hydrique optimales l'amidon au niveau des grains est composé essentiellement d'amylopectine. A l'opposé, l'application du déficit hydrique se solde par une modification de cette composition en augmentant la teneur en amylose. De pareilles modifications ont été révélées par Labuschagne et *al.* (2007) qui avaient démontrés que le déficit hydrique provoque de profonds changements dans la structure d'amidon dans les grains du blé.

**Chapitre IV: Effets de
l'alimentation hydrique et la
variabilité génétique sur la
transformation enzymatique des
sucres simples en amidon, la teneur
en protéines et leurs profils au niveau
du grain**

1. Introduction

La formation d'amidon au niveau du grain est un processus très complexe. Les principales formes de stockage des glucides hydrosolubles dans les tiges de blé sont les fructanes et le saccharose (Sestili et al., 2016). Ce stockage culmine bien avant la période de remplissage du grain dans des conditions d'humidité adéquates et diminue au cours des derniers stades de développement du grain pour fournir une proportion élevée des assimilats nécessaires au développement simultané du grain représentées majoritairement par l'amidon et les protéines. Le remplissage du grain est conditionné par l'activité des enzymes responsable de la formation de l'amidon qui interviennent dans l'accumulation et la transformation des sucres simples et de la matière sèche au niveau des grains en formation.

Au cours du développement du grain, l'endosperme est le site de synthèse de la majeure partie de l'amidon qui s'accumule dans le grain. Certains auteurs montrent qu'en fonction de la diminution du rendement, des céréales soumises à la sécheresse présenter des altérations de l'activité enzymatique biosynthétique de l'amidon (Thitisaksakul *et al.*, 2012). Les modifications d'expression d'enzymes de la voie de biosynthèse de l'amidon peuvent être évaluées au niveau des grains matures. La teneur et la qualité des protéines produits dans les conditions de stress on fait l'objet de plusieurs études. Ainsi, l'approche de protéomique été déjà utilisé pour caractériser les protéines dans le germe, l'endosperme et la fraction de son (Barron et al., 2017).

Comprendre comment le stress modifie la composition et l'accumulation de l'amidon dans l'endosperme des céréales peut améliorer les prédictions de la qualité des grains dans les conditions environnementales extrêmes. Ainsi, dans cette étude, nous avons évalué l'activité enzymatique de la polymérisation des sucres simples en amidon par leur disponibilité et leur transformation au sein du grain en formation. Ensuite, nous avons procéder par une évaluation de la qualité du grain à maturité par la contenance et le profil protéique.

2. Matériel et méthodes

2.1. Prélèvement des échantillons

Les grains ayant servis à la réalisation des mesures ont été récoltés à maturité de l'essai du chapitre 3 (La contribution de la remobilisation des réserves et la photosynthèse courante dans le remplissage du grain, sa contenance en amidon et que sa composition), sur les plantes témoins des trois traitements hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC).

2.2. Les mesures effectuées

2.2.1. La teneur en chlorophylle totale (unité SPAD)

Le taux de chlorophylle au niveau des feuilles a été mesuré 10 jours après l'anthèse à l'aide d'un chlorophyllo-mètre SPAD 502 de marque Minolta. Trois prises de mesure ont été effectuées au niveau de la feuille étendard des plants conduits sous les trois régimes hydriques.

2.2.2. Dosage des protéines et électrophorèse sur gel protéique

2.2.2.1. Préparation des échantillons

Les grains mûrs de chaque épi ont été broyées avec un moulin à vibrations RETSCH MM400, Allemagne, pendant 11 secondes à une fréquence de vibration de 28 Hz et 50mg de poudre ont été utilisés dans toutes les extractions (*Annexe 3*).

2.2.2.2. Extraction des protéines

a. Obtention d'extraits protéiques totaux

Pour obtenir des extraits protéiques totaux, la matière végétale broyée a été homogénéisée dans un tampon d'extraction [Tris-HCl 100 mM pH 7,9 ; MgCl₂ 10 mM ; EDTA 1 mM pH 8 ; glycérol 10% (v/v) ; inhibiteurs de protéase (Sigma) 1% (v/v) et PMSF 1 mM] et transféré dans un tube Eppendorf. Après une centrifugation à 16000g pendant 20 min à 4°C, le surnageant contenant la fraction protéique soluble a été récupéré (Larre *et al.*, 2010).

b. Fractionnement des protéines des graines matures de blé dur

Les différentes fractions des protéines de réserve ont été extraites de manière séquentielle, en tirant parti de la solubilité différente des protéines (Larre *et al.*, 2010). 100mg de poudre ont été homogénéisés dans 0,9ml de tampon A [tampon de phosphate de sodium 50 mM pH 8 ; NaCl 0,5 M et inhibiteur de protéase 1% (v/v)] et conservés pendant une nuit à 4°C. L'extrait a été ensuite centrifugé à 10000g pendant 10 minutes à 4°C et le surnageant a été recueilli. Le précipité a été lavé à nouveau avec 1,5ml de tampon A, et le surnageant obtenu a été ajouté à la fraction obtenue précédemment. Ces deux surnageant correspondent à la fraction de protéines solubles dans le sel. Cette fraction a été dialysée dans de l'eau distillée afin d'en éliminer les sels.

Le processus de fractionnement a été poursuivi avec les protéines présentes dans le précipité. Après lavage avec de l'eau milliQ pour éliminer les traces de protéines de la première fraction, 0,9 ml de tampon B [isopropanol ou éthanol à 50% (v/v) ; 1% (p/v) de DTT et 1% (v/v) d'inhibiteur de protéase] a été ajouté et maintenu sous agitation à température ambiante pendant 1h. Après centrifugation à 10000g pendant 10mn à 4°C, on obtient le surnageant correspondant à la fraction protéique soluble dans l'alcool. Après récupération de deux fractions des protéines solubles dans le sel et l'alcool qui sont très dilués, une précipitation avec une solution de Trichloroaceticacid (TCA 10%) pendant 30min à 4°C a été effectuée. Les échantillons sont ensuite centrifugés en 16000g pendant 20min et lavés avec l'Acétone glacial 3 fois. Ensuite 200µl de tampon d'extraction [Tris-HCl 100 mM pH 7,9 ; MgCl₂ 10 mM ; EDTA 1 mM pH 8 ; glycérol 10% (v/v) ; inhibiteurs de protéase (Sigma) 1% (v/v) a été ajoutée à chaque échantillon. Ces solutions ont été utilisées pour la migration sur gel polyacrylamide après la quantification par la méthode de Bradford (1976).

c. Quantification des protéines

Les protéines de chaque fraction (total, sel, alcool) ont été quantifiées par la méthode de Bradford (1976) avec le réactif commercial Bradford Protein Assay (Bio-Rad). Une solution de 100µg/ml a été préparée à partir d'une solution mère d'ovalbumine 1mg/ml pour la courbe d'étalonnage. Ainsi, 2.5µl de chaque échantillon ont été incubés avec 1ml de Réactif de Bradford diluée 5fois pendant 15min. après les solutions sont dosées au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 595nm.

d. Electrophorèse des protéines SDS-PAGE

La séparation analytique des protéines a été réalisée par électrophorèse sur des gels de polyacrylamide dans des conditions dénaturantes (SDS-PAGE), dans un système discontinu (Laemmli, 1970) (*Annexe 3*).

e. Préparation des gels

La séparation par la technique SDS-page nécessite la préparation de deux types de gels: un gel de séparation et un gel de concentration. Le gel de séparation permet le fractionnement des protéines selon leurs poids moléculaires, alors que le gel de concentration permet de stocker les impuretés (tamis, etc....) et de tasser les protéines, avant leur entrée dans le gel de séparation.

Le gel de séparation a été préparé avec 12 % d'acrylamide [acrylamide:bis-acrylamide 29:1 (v/v)] et 0,1 % (p/v) de SDS dans un tampon Tris-HCl 1,5 M de pH 8,8. Le gel de

concentration a été préparé à 4 % (p/v) d'acrylamide [acrylamide:bis-acrylamide 29:1 (v/v)] et contenait les mêmes composants sauf que le tampon utilisé était du Tris-HCl 0,5 M pH 6,8. Les gels ont été polymérisés en ajoutant une solution préalablement congelé à -20°C de persulfate d'ammonium à 10 % (v/v) et en utilisant le TEMED (Bio-Rad) comme catalyseur. Le gel de concentration a été appliqué entre les plaques sur le dessus du gel de séparation après sa polymérisation et le peigne a été rapidement inséré dans celui-ci, ce qui a permis au gel de polymériser pendant 15 minutes. Le peigne a ensuite été enlevé avant d'appliquer les échantillons.

La concentration des différents échantillons a été identifiée selon la méthode de BRADFORD (1976), une solution de 100µg/µl de chaque échantillon à été complétés avec un tampon de chargement (TC) 4x et du -β-mercaptoéthanol 9:1 (45µ/ puis), et bouillis pendant 10 min avant l'application. La composition du TC 4x était la suivante : Tris-HCl 62 mM pH 6,8 ; SDS 2% (p/v), 2-mercaptoéthanol 5% (v/v), glycérol 10% (v/v) et bleu de bromophénol 0,05% (p/v). Un mélange de protéines commerciales (Precision plus protein standards Duel color, Bio-Rad) a été utilisé comme norme de taille moléculaire.

La taille des gels était de 13*13 cm et leur épaisseur de 1mm. L'électrophorèse a été réalisée dans une chambre d'électrophorèse Hoefer SE600 chroma (Bio-Rad) de format standard 18x16cm ergonomique, avec double unité verticale à un voltage constant de 250 V pendant 3-4 h à 4°C et en utilisant un tampon électrolytique Tris-HCl de 25 mM pH 8,3 ; 0,19 M Glycine et 0,1% SDS (p/v) (*Annexe 3*).

f. Coloration des protéines dans les gels de polyacrylamide et décoloration

Les protéines des gels de polyacrylamide ont été visualisées par coloration au bleu de Coomassie. Les gels ont été mis pendant une nuit dans une solution de bleu de Coomassie à 0,275% (p/v) dans un agitateur (*Annexe 3*). Les gels ont été lavés avec une solution de distinction jusqu'à ce que le fond des gels soit complètement décoloré alors que les plateaux de protéines restaient tachés. La solution de distinction est une solution formée de 40 % (v/v) de méthanol et de 10% (v/v) d'acide acétique et 50% (v/v) de l'eau distillé.

g. Obtention des images

Une fois que les bandes d'intérêt ont été obtenues sur des gels d'acrylamide. Les images ont été visualisées à l'aide d'un système d'imagerie ChemiDoc (Bio-Rad) avec l'aide du logiciel Image Lab version 6.0.0, 2017 (*Annexe 3*) (la couleur noir des gels est dû au traitement avec le logiciel).

Le logiciel Image Lab est un programme d'acquisition et d'analyse d'images qui vous permet d'analyser le gel, de capturer des données d'images optimisées et de générer un rapport complet en quelques secondes seulement.

h. Spectrométrie de masse et identification des protéines

Une fois les protéines colorées dans les gels d'acrylamide, les bandes d'intérêt ont été obtenues à l'aide du découpeur automatique EXQuest Spot (Bio-Rad). Par la suite, et de manière automatisée, les protéines ont été soumises à un processus de digestion de la trypsine dans une station robotisée Bruker avant leur analyse par spectrométrie de masse MALDI-TOF (BrukerDaltonics). Le traitement des échantillons et leur analyse ultérieure par spectrométrie de masse MALDI-TOF ont été effectués par le service de protéomique de la cicCartuja-SEVILLA, Spain (*Annexe 3*).

2.2.3. Analyse de l'activité des enzymes de formation de l'amidon à travers la cinétique d'accumulation des sucres simples et de l'amidon au niveau des grains en formation

2.2.3.1. Cinétique de sucre simple

Les sucres simples (glucose, fructose et saccharose) sont extraits par un solvant capable de les solubiliser et de bloquer les activités enzymatiques susceptibles de les dégrader, ils sont dosés par la méthode de Schields et Burnett (1960) in Labdelli, (2011).

Le principe de la réaction est basé sur la condensation des produits de dégradation des oses neutres par l'acide sulfurique, ce dernier très concentré, transforme à chaud les oses en dérivés du furfural qui donnent une corrélation bleu vert avec l'anthrone.

Le matériel végétal prélevé (50mg) de la graine en formation est laissé 24h dans 2ml d'éthanol à 80%. L'extrait obtenu est dilué 10fois avec l'éthanol à 80%. De la solution obtenue, 1ml sont prélevés auxquels on ajoute 2 ml de réactif composé de 0.2 mg d'anthrone pur additionnée à 100ml d'acide sulfurique H₂SO₄. Le réactif est préparé 4heures à l'avance. Le mélange extrait réactif doit être maintenu dans la glace fondante.

Après agitation, les tubes sont placés au bain marie à 92°C pendant 8 min. puis refroidis pendant 30min à l'obscurité. L'absorbance est lue au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 585. La concentration des sucres est exprimée en mg/100mg de matière sèche.

2.2.3.2. Cinétique de la teneur en amidon

Le dosage de la teneur en amidon a été effectué selon la méthode Thivend et al. (1965) (voir p46).

2.2.2.3. L'indice de transformation des sucres simples en amidon

L'indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau des grains en formation a été déterminé. Il a été calculé par le rapport d'évolution des taux des sucres simples et d'amidon, évalués à trois périodes post-anthèse au niveau des grains en formation.

L'accumulation des sucres simples au niveau du grain a été évaluée par la différence du taux des sucres entre deux prélèvements consécutifs. L'évolution du taux d'amidon a été déterminée selon le même principe. L'indice de transformation des sucres en amidon a été déterminé selon la méthode suivante:

1. La transformation pendant la première période:

$$\text{Indice E1} = \text{TS } 16j - \text{TS } 7j / \text{TA } 16j - \text{TA } 7j$$

2. La transformation pendant la deuxième période:

$$\text{Indice E2} = \text{TS } 25j - \text{TS } 16j / \text{TA } 25j - \text{TA } 15j$$

Avec :

TS : Taux des sucres

TA : Taux d'amidon

3. Résultats

3.1. Teneur en chlorophylles

La teneur en chlorophylle mesurés 10 jours après l'anthèse varie significativement en fonction des régimes hydriques appliqués pour l'ensemble des génotypes utilisés. Egalement, l'interaction du régime hydrique et variabilité a provoqué des variations significatives de ce paramètre (*Tableau 13*).

Dans le traitement hydrique témoin (100%CC), la teneur en chlorophylles totale oscille entre 33.70 ± 3.01 et 48.57 ± 1.71 (unité SPAD) enregistrée chez les génotypes Langlois et Mexicali75 respectivement (*Tableau 14*). L'application du déficit hydrique au niveau de 60%CC a provoqué une augmentation de la teneur en chlorophylles par rapport au traitement hydrique témoin, pour enregistrer des taux variant entre 10.02% et 30.85% manifestés respectivement chez les génotypes ACSAD1361, Mexicali75 et Oued Zenati.

Sous les conditions hydriques de 30%CC, la teneur en chlorophylles augmente davantage en comparaison avec les autres traitements hydriques et chez l'ensemble des génotypes utilisés pour atteindre des valeurs comprises dans l'intervalle délimité par 59.9 et 47.6 (unité SPAD).

Tableau 13 : Effet de la variabilité génotypique et le régime hydrique sur la teneur en chlorophylle

	Génotype	Situation hydrique	Génotype x Situation hydrique
Teneur en chlorophylle (unité SPAD)	6.899***	66.658***	7.650***

*** Différences significatifs au seuil de $p < 0.001$

Tableau 14 : Résultats moyens (unité SPAD) et évolution de la teneur en chlorophylle de la dernière feuille des cinq génotypes cultivés dans les trois régimes hydriques (100% CC, 60% CC, 30% CC)

Genotype	100%CC	60%CC	Évolution 60%	30%CC	Évolution 30%
Waha	36.8	40.9	10.02	59.9	38.60
ACSAD1361	40.4	40.1	-0.83	58.2	30.53
MEXICALI75	48.6	43.5	-11.73	51.6	5.82
OUED ZENATI	35.8	29.0	-23.45	52.5	31.81
LANGLOIS	33.7	48.7	30.85	47.6	29.20

3.2. Analyse des protéines

3.2.1. Détermination de la teneur en protéines totales, des protéines solubles dans le sel et dans l'alcool au niveau des grains

Les teneurs en protéines totales, des protéines solubles dans le sel et l'alcool au niveau des grains matures sont représentées dans le tableau 18. Les résultats montrent que le régime hydrique et la variété ont un effet significatif sur les variations de la teneur en protéines totales et la fraction de protéines solubles en sel ($p < 0.001$). La teneur en protéines solubles dans l'alcool ne varie qu'en fonction du régime hydrique ($p < 0.001$) (Tableau 15).

Tableau 15 : Effets de la nature des génotypes sur la biométrie des plantes au stade maturité cultivées sous trois régimes hydriques (100% CC, 60% CC, 30% CC)

	Génotype	Situation hydrique	Interaction génotype*situation hydrique
La teneur en protéines totaux	72,23***	88.93***	47,85***
La teneur en protéines solubles dans le sel	17,517***	71,393***	5,313***
La teneur en protéines solubles dans l'alcool	2,6862ns	24,7087***	2,5487**

, * Différences significatifs au seuil de $p < 0.01$ et $p < 0.001$, respectivement

a. Résultats moyens de la teneur en protéines totales

Les résultats indiquent que dans le traitement de 100%CC, ce sont les génotypes Waha et Langlois qui inscrivent les plus hautes valeurs de cette fraction avec respectivement 29.32 et 32.33 $\mu\text{g}/\text{mgMS}$. L'application du déficit hydrique au niveau de 60%CC permet une distinction entre les génotypes pour l'accumulation des protéines. A ce niveau, les génotypes se distinguent en deux groupes. Le premier groupe intègre les génotypes ACSAD1361, Mexicali75 et Oued Zenati qui ont enregistré une augmentation de la teneur en protéines à des taux respectifs de 8.90%, 11.93% et 15.10%. Le deuxième groupe constitué de Langlois et Waha ont enregistré des diminutions respectives de 7.83% et 18.39%. Dans le traitement conduit à 30%CC, les génotypes ACSAD1361, Mexicali75 et Oued Zenati inscrivent des augmentations respectives de 34.04%, 30.04% et 24.61%. A l'opposé, les génotypes Langlois et Waha enregistrent des diminutions de la teneur en protéines totales à des niveaux respectifs de 4.95% et 20.88%.

b. Résultats moyens de la teneur en protéines solubles dans le sel

Les teneurs de la fraction protéique soluble dans le sel varient parmi les génotypes au sein et entre les trois traitements hydriques. Les résultats indiquent qu'à l'échelle du traitement hydrique témoin (100%CC), les valeurs obtenues sont comprises entre les extrêmes de 13.56 $\mu\text{g}/\text{mgMS}$ enregistré par Waha et 25.32 $\mu\text{g}/\text{mgMS}$ inscrit par Oued Zenati. Dans le traitement conduit à 60%CC, on a constaté une réduction de la teneur de cette catégorie des protéines, chez l'ensemble des génotypes à l'exception de mexicali75 qui a enregistré une augmentation de 28.53%. Dans le lot conduit à 30%CC, on a relevé une augmentation de la teneur de ces protéines chez l'ensemble des génotypes. Ainsi, les génotypes Waha, ACSAD1361 et Mexicali75 se distinguent parmi la collection en inscrivant les plus importantes augmentations avec des taux respectifs de 84.81%, 72.83% et 71.15%. Les génotypes Oued Zenati et Langlois ont inscrit des taux plus faibles avec respectivement, 14.42% et 6.84%.

c. Résultats moyens de la teneur en protéines solubles dans l'alcool

D'une manière générale, la teneur en protéines solubles dans l'alcool diminue en fonction du déficit hydrique appliqué. Dans les conditions de 100%CC, la teneur en protéines solubles dans l'alcool varie entre une valeur maximale de 13.10 $\mu\text{g}/\text{mgMS}$ (Waha) et une autre minimale de 6.40 $\mu\text{g}/\text{mgMS}$ (Oued Zenati). Dans le traitement conduit à 60%CC, les teneurs inscrites varient entre 17.06 $\mu\text{g}/\text{mgMS}$ et 6.08 $\mu\text{g}/\text{mgMS}$. La diminution de cette teneur est

encore marquée sous les conditions de 30%CC où elles sont délimitées pas un maximum de 3µg/mgMS (Tableau 16).

Tableau 16 : résultats moyens et l'évolution de la teneur des protéines totaux, des protéines solubles dans sel et solubles dans l'alcool des grains matures des cinq génotypes chez les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC) en µg/mg de matière sèche

	Génotype	100%CC	60%CC	Evolution 60%	30%CC	Evolution 30%
Protéine totaux µg/mg MS	WAHA	29.31	23.92	-18.39	27.86	-4.95
	ACSAD1361	24.27	26.43	8.90	34.04	40.26
	MEXICALI75	25.57	28.62	11.93	30.04	17.48
	OUED ZENATI	24.17	27.82	15.10	24.61	1.82
	LANGLOIS	32.33	29.8	-7.83	25.58	-20.88
Protéines solubles en sel µg/mg MS	WAHA	13.56	10.06	-25.81	25.06	84.81
	ACSAD1361	17.48	16.53	-5.43	30.21	72.83
	MEXICALI75	15.60	20.05	28.53	26.70	71.15
	OUED ZENATI	25.32	18.23	-28.00	28.97	14.42
	LANGLOIS	17.24	13.39	-22.33	18.42	6.84
Protéines solubles en alcool µg/mg MS	WAHA	13.10	17.06	30.23	1.78	-86.41
	ACSAD1361	12.39	6.08	-50.93	2.14	-82.73
	MEXICALI75	9.66	6.09	-36.96	1.79	-81.47
	OUED ZENATI	6.40	13.49	110.78	3.02	-52.81
	LANGLOIS	9.29	6.92	-25.51	1.87	-79.87

3.2.2. Analyses des bandes électrophorétiques des protéines par SDS page

Afin d'étudier plus en détail les éventuelles altérations biochimiques des graines dans la situation de déficit hydrique, leur teneur en protéines de réserve a été analysée. Ainsi, les protéines de l'endosperme ont été fractionnées en fonction de leur solubilité différentielle. Par ce procédé, des fractions protéiques solubles dans le sel (tampon phosphate de sodium et NaCl), et solubles dans l'alcool ont été obtenues. En outre, des extractions de protéines totales ont été effectuées. Les différentes fractions obtenues ont été séparées par électrophorèse verticale dans des gels d'acrylamide. L'utilisation de l'électrophorèse SDS-PAGE permet de détecter des différences dans les profils protéiques en fonction du génotype et de la situation hydrique adoptée. Elle permet de la faire également la différence en termes de présence et d'absence de bandes, de leurs intensités et de leurs poids moléculaires.

a. Analyse des protéines totales

Une diversité quantitative appréciable de protéines synthétisées apparaît (Figure 18, tableau 17), ainsi, la méthode d'extraction des protéines totales a été suffisante pour détecter 17 bandes de poids moléculaires compris entre 94.2kDa et 20kDa.

L'analyse des niveaux relatifs des différentes bandes dans les trois situations hydriques révèle des changements qualitatifs et quantitatifs. Ainsi, dans la première zone entre 100 et 70kDa, nous avons détecté trois bandes présentes chez l'ensemble des génotypes dans les différents régimes hydriques. Dans la zone entre 70 et 50kDa, trois bandes ont été détectées. Les niveaux relatifs de ces bandes sont majoritairement supérieurs dans les conditions de déficit hydrique de 30%CC. Une bande unique a été observée dans cette zone chez le génotype Langlois dans les trois régimes hydriques avec un poids moléculaire de 62.1kDa. L'analyse de cette bande par spectrométrie de masse MALDI-TOF a montré que cette protéine est un Beta-amylase (OS=Triticum turgidum subsp. Durum). Dans la troisième zone, entre 50kDa et 20kDa, dix bandes ont été marquées chez l'ensemble des génotypes dans les différents régimes hydriques adoptés à l'exception d'une bande n=12 de poids moléculaire 34.2kDa. Cette dernière est présente uniquement chez le génotype Oued Zenati dans les graines issues des lots 60%CC. Pareillement, l'analyse des bandes 14, 15 et 17 par spectrométrie de masse MALDI-TOF a montré l'existence des différentes protéines tels que rRNA N-glycosidase (OS=Triticum turgidum subsp. Durum) (bande 14), le Peroxiredoxin (OS=Triticum turgidum subsp. Durum) et Chitinase (OS=Triticum turgidum subsp. Durum) (bande 15) et NB-ARC domain-containing protein(OS=Triticum turgidum subsp. Durum) (bande 17). Ces trois bandes présentent des variations significatives de leurs niveaux relatifs en fonction de génotypes et de la situation hydrique.

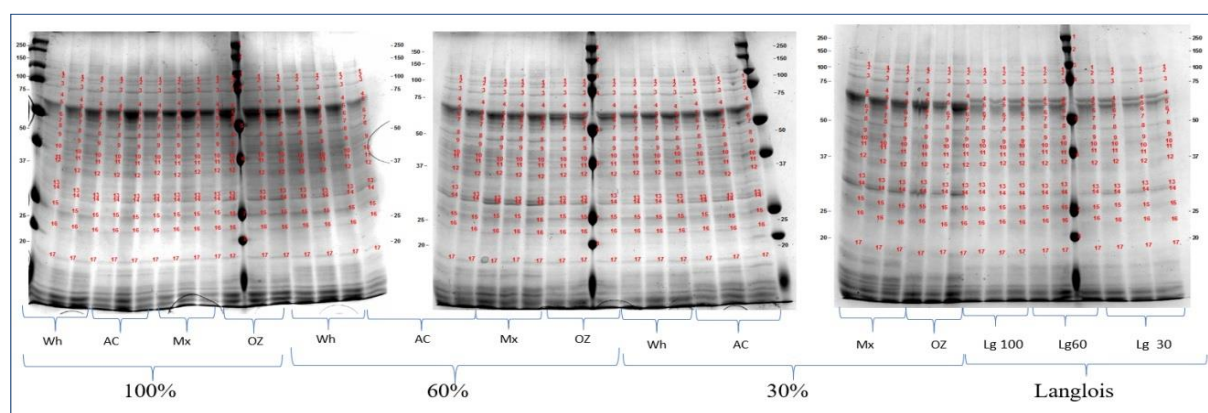


Figure 18: Electrophorogramme des protéines totales des grains matures des cinq génotypes chez les trois régimes hydriques (100% CC, 60% CC, 30% CC)

Tableau 17 : niveau relatif et le poids moléculaire des bandes des protéines totales quantifiées à l'aide du logiciel Image Lab et normalisées par rapport aux niveaux de protéines de la bande 5. Les différents bands marquée étoile sont identifiés par spectrométrie de masse MALDI-TOF

Génotype	Situation hydrique	1	2	3	4*	6	7	8	9	10	11	12	13	14*	15*	16	17*
ACSAD1361	30%FC	23.2	21.5	22.1	/	35.1	41.0	16.9	26.6	49.7	27.2	/	47.6	24.9	54.6	12.6	29.4
	60%FC	8.0	16.8	26.5	/	26.8	37.2	23.7	8.2	10.2	10.2	/	40.9	26.7	41.8	27.3	25.4
	100%FC	37.7	10.2	28.0	/	25.1	21.3	26.4	66.3	10.3	10.2	/	42.9	24.4	33.8	25.9	30.8
LANGLOIS	30%FC	46.4	14.3	27.0	100.2	53.3	14.5	47.5	14.5	14.5	14.5	/	14.5	68.5	14.5	14.4	14.3
	60%FC	28.6	12.8	33.8	79.7	19.7	61.1	24.6	12.9	12.9	12.9	/	12.9	45.4	13.0	12.8	12.8
	100%FC	25.1	10.2	25.2	60.5	10.5	10.4	25.9	10.4	10.4	10.3	/	10.3	43.5	10.3	10.3	10.3
MEXICALI75	30%FC	30.6	9.4	40.0	/	9.7	9.6	37.0	9.6	9.6	9.6	/	9.6	80.3	9.6	42.7	9.4
	60%FC	24.1	21.4	24.8	/	30.4	36.5	27.5	29.9	25.8	10.0	45.7	31.5	29.7	51.3	28.9	24.9
	100%FC	36.1	9.8	24.2	/	22.7	25.9	26.6	46.7	9.6	9.6	/	32.2	25.6	36.3	24.2	36.6
OUED ZENATI	30%FC	24.2	10.1	29.8	/	16.0	10.2	29.4	10.2	10.2	10.2	/	10.2	79.8	10.3	48.9	10.2
	60%FC	10.0	26.6	28.6	/	34.2	34.6	30.8	18.4	43.4	17.4	/	53.9	21.4	37.2	23.6	49.4
	100%FC	41.4	15.4	25.0	/	20.9	51.0	27.6	42.0	12.8	13.7	/	26.7	26.2	35.0	28.8	30.4
WAHA	30%FC	28.9	28.4	29.0	/	37.8	33.9	25.6	32.8	26.7	30.5	/	46.7	25.8	65.1	29.9	33.6
	60%FC	35.0	10.5	31.2	/	24.5	31.3	32.1	38.4	34.3	27.4	/	35.9	22.0	59.5	40.7	35.0
	100%FC	19.1	10.1	28.2	/	26.0	10.3	17.0	49.9	12.9	16.1	/	29.6	27.6	39.8	26.8	25.4
PMkDa		94.2	87.5	73.8	62.1	54.1	51.2	46.3	42.4	38.2	36.2	34.2	28.9	28.0	25.1	22.2	20

b. Analyse des protéines solubles dans le sel

Des différences importantes dans la quantité de fractions protéiques solubles dans le sel ont été constatées. Ainsi, les résultats ont révélé un total de 20 bandes électrophorétiques sur les gels des grains issus des traitements hydriques de 100%, 60% et 30%CC (*Figure 19*). La taille des polypeptides révélés variait de 70.24kDa à moins de 20kDa. Après analyse il s'illustre une variation de présence/absence de bandes électrophorétiques parmi les génotypes et les différentes situations hydriques. Seules les bandes 1-2-4-10-15-16-17-18-19-20 étaient présentes chez l'ensemble des génotypes et dans les trois régimes hydriques adoptées. Le niveau relatif de ces bandes est variable en fonction des facteurs d'étude.

Un deuxième groupe de bandes électrophorétiques (6-7-8-9-11-12-13-14) ont été majoritairement inhibé en condition de déficit hydrique sévère. Ainsi, on peut citer l'absence des bandes 8, 9 et 14 dans les trois situations hydriques chez les génotypes Langlois et Oued Zenati. L'identification de la bande 11 par spectrométrie de masse MALDI-TOF a révélé à un polypeptide de type rRNA N-glycosidase OS=Triticumturgidumsubsp. Durum d'un poids

moléculaire de 27.5kDa. Ce polypeptide a été déjà identifié au niveau de la bande 14 avec PM=28kDa par la méthode d'extraction des protéines totales.

Dans les mêmes conditions de l'expérimentation, nous avons détecté la présence de la bande 3 au niveau des graines des génotypes Langlois et Oued Zenati dans les deux lots conduits à 60% et 30%CC. Également chez le génotype ACSAD1361 au niveau du lot conduit à 60%CC.

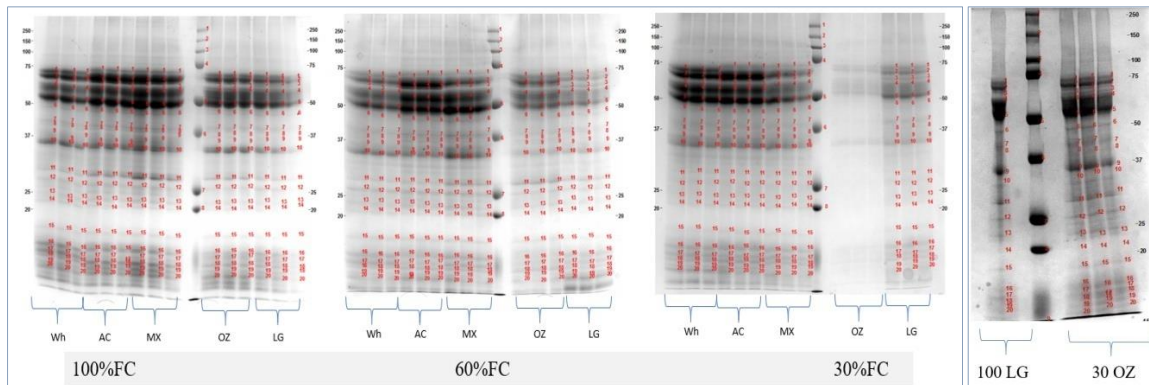


Figure 19: Electrophorégramme des protéines solubles dans le sel des grains matures des cinq génotypes chez les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

Tableau 18 : niveau relative et le poids moléculaire des bandes des protéines correspondant à la fraction soluble dans le sel quantifiées à l'aide du logiciel Image Lab et normalisées par rapport aux niveaux de protéines de la bande 5. La bande marquée par étoile est identifiée par spectrométrie de masse MALDI-TOF

Génotype	Situation hydrique	1	2	3	4	6	7	8	9	10	
ACSAD1361	30%FC	45.9	118.9	/	115.5	/	/	/	57.6	60.0	
	60%FC	31.1	85.7	26.0	110.4	/	26.7	39.1	52.1	62.1	
	100%FC	29.0	104.6	/	84.8	29.2	37.7	31.4	52.0	60.3	
LANGLOIS	30%FC	101.5	74.6	42.5	116.6	/	63.4	/	/	71.6	
	60%FC	72.7	74.1	62.5	84.9	34.3	28.6	/	/	93.3	
	100%FC	40.0	56.6	/	105.9	25.5	25.2	/	/	68.9	
MEXICALI75	30%FC	53.3	78.0	/	109.2	/	/	/	26.8	70.9	
	60%FC	28.7	66.6	/	97.9	23.1	83.4	38.9	58.3	54.7	
	100%FC	24.3	88.6	/	90.4	26.3	29.2	27.4	54.5	56.5	
OUED ZENATI	30%FC	53.2	42.8	21.9	69.6	13.8	20.0	/	/	83.4	
	60%FC	58.8	66.8	35.8	101.6	10.7	20.2	/	/	84.7	
	100%FC	46.3	88.3	/	134.0	27.6	51.6	/	/	77.4	
WAHA	30%FC	56.9	83.9	/	115.2	/	/	/	57.0	56.2	
	60%FC	59.1	95.6	/	132.0	/	10.0	/	/	85.7	
	100%FC	54.0	86.2	/	100.4	46.2	43.5	/	/	88.0	
PM kDa		70.24	64.06	59.28	55.96	44.97	39.45	38.21	35.91	33.35	
Génotype	Situation hydrique	11*	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ACSAD1361	30%FC	/	/	/	8.4	8.4	47.8	37.0	42.1	31.6	23.9
	60%FC	8.5	45.9	/	8.2	34.0	50.8	8.5	34.3	29.6	50.2
	100%FC	34.6	48.1	38.6	46.8	32.0	48.2	29.1	33.1	30.9	29.5
LANGLOIS	30%FC	/	/	/	/	9.9	71.2	65.2	33.8	12.1	17.3
	60%FC	91.2	10.2	/	/	12.2	70.2	23.9	42.0	48.9	84.4
	100%FC	34.7	33.5	/	/	14.9	32.8	29.5	29.8	34.4	35.6
MEXICALI75	30%FC	/	/	/	9.8	9.7	43.8	46.6	33.8	9.9	29.3
	60%FC	36.1	41.4	31.5	23.2	28.7	47.3	39.8	22.0	16.9	26.7
	100%FC	47.2	32.8	29.6	28.9	37.6	37.8	26.9	34.4	27.7	33.4
OUED ZENATI	30%FC	11.1	20.1	6.2	/	6.1	18.8	17.1	17.0	6.2	12.5
	60%FC	60.1	35.6	10.2	/	41.5	119.4	22.7	50.1	10.2	49.2
	100%FC	51.7	39.1	/	/	61.6	54.6	50.2	51.1	46.0	56.8
WAHA	30%FC	/	/	/	8.2	8.2	50.1	40.1	39.7	31.0	55.8
	60%FC	17.0	50.2	/	9.5	35.6	64.1	48.7	29.2	19.6	28.4
	100%FC	33.7	75.8	44.2	44.7	48.0	50.4	60.9	43.4	46.0	70.4
PM kDa		27.51	25.81	21.97	20.20	20.00	<20	<20	<20	<20	<20

c. Analyse des protéines solubles dans l'alcool

L'étude de gel de migration des protéines solubles dans l'alcool des cinq génotypes et sous les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC), nous a permis d'identifier 11 bandes électrophorétiques de tailles variables entre 92.9kDa et 28.3kDa (Figure 20).

On distingue 4 groupes de bandes électrophorétiques en fonction de leurs expressions dans les conditions de l'expérimentation. Ainsi, le premier groupe englobe les bandes 1-10-11 qui sont présentes uniquement dans le lot conduit à 100%CC et ce chez l'ensemble des génotypes étudiés. La bande phorétique 1 a été identifiée comme la protéine HMW glutenin OS=*Triticum turgidum* subsp. Durum.

Le deuxième groupe est représenté par la bande 8 avec un poids moléculaire de 40kDa se distinguant par sa présence généralisée chez l'ensemble de génotypes et sous les trois traitements hydriques.

Le troisième groupe englobe les bandes 4- 5- 6 -7 qui sont majoritairement inhibées dans les conditions de stress sévère (30%CC). L'analyse de la bande 6 à révélé la présence de trois protéines, le AAI domain-containing protein OS=*Triticum turgidum* subsp. Durum , Low-molecular-weight glutenin subunit OS=*Triticum turgidum* subsp. Durum. Et le Alba domain-containingprotein OS=*Triticum turgidum* subsp. Durum.

Enfin, le quatrième groupe qui englobe la bande 2, cette bande est présente uniquement au niveau de génotype Langlois dans les trois situations hydriques adopté.

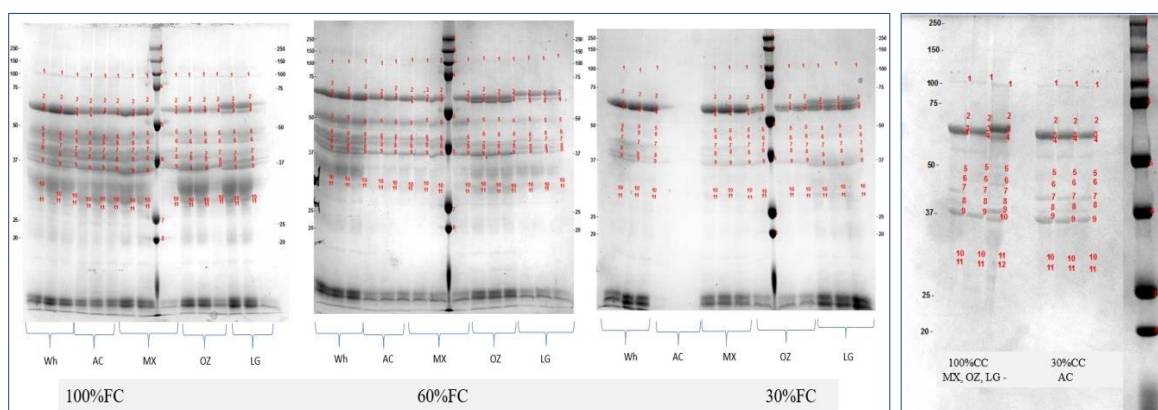


Figure 20: Electrophorégramme des protéines solubles dans l'alcool des grains matures des cinq génotypes chez les trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

Tableau 19 : niveau relatif et le poids moléculaire des bandes des protéines correspondant à la fraction soluble dans l'alcool quantifiées à l'aide du logiciel Image Lab et normalisées par rapport aux niveaux de protéines de la bande 3. La bande marquée par étoile est identifiée par spectrométrie de masse MALDI-TOF

Genotype	water level supply	1*	2	4	5	6*	7	8	9	10	11
ACSAD1361	100%FC	22.8	/	73.5	38.7	66.4	/	48.4	43.7	112.3	8.4
	60%FC	/	/	/	59.8	49.0	35.3	17.4	65.4	/	/
	30%FC	/	/	/	/	/	18.9	38.8	69.1	/	/
LANGLOIS	100%FC	59.7	201.9	154.7	96.4	117.4	/	110.6	123.9	125.2	20.8
	60%FC	/	166.0	/	110.9	71.4	/	79.9	110.6	/	/
	30%FC	/	179.5	97.5	/	/	/	23.9	/	/	/
MEXICALI75	100%FC	10.8	/	53.1	35.1	59.9	/	47.1	64.1	62.7	8.4
	60%FC	/	/	/	61.2	46.9	27.2	29.6	65.6	/	/
	30%FC	/	/	/	/	/	/	7.0	/	/	/
OUED ZENATI	100%FC	11.3	/	31.3	71.4	46.1	50.9	46.3	89.8	57.8	29.4
	60%FC	/	/	49.9	71.3	/	/	51.5	88.4	/	/
	30%FC	/	/	62.5	/	/	/	14.4	/	/	/
WAHA	100%FC	12.7	/	57.9	30.4	43.9	32.8	30.8	36.7	66.2	22.2
	60%FC	/	/	/	60.7	52.3	32.6	24.4	43.4	/	/
	30%FC	/	/	/	/	/	31.0	23.2	27.1	/	/
PM kDa		92.9	63.5	57.0	55.2	46.1	42.5	40.0	36.9	34.4	28.3

Tableau 20 : listes des protéines identifiées par spectrométrie de masse MALDI-TOF

	bande	Géotype	Protéine identifiée	Résultats de la recherche MASCOT
protéines totaux	15	100% WAHA	Peroxioredoxin OS=Triticumturgidumsubsp. Durum	A0A446M0K7
	15	100% WAHA	Chitinase OS=Triticum turgidumsubsp	A0A446XZN5
	17	30% LANGLOIS	NB-ARC domain-containing protein OS=Triticum turgidum subsp. Durum	A0A446TQC4
	4	30% LANGLOIS	Beta-amylase OS=Triticumturgidumsubsp. Durum	A0A446SKR1
	14	30% OUED ZENATI	rRNA N-glycosidase OS=Triticumturgidumsubsp. Durum	A0A446UTR7
protéines solubles dans le sel	11	30% OUED ZENATI	rRNA N-glycosidase OS=Triticumturgidumsubsp. durum	A0A446UTR7
protéines solubles dans l'alcool	1	100% LANGLOIS	HMW glutenin OS=Triticumturgidumsubsp. durum	K4N1X7
	6	100% LANGLOIS	AAI domain-containingprotein OS=Triticumturgidumsubsp. durum	A0A446IHE3
	6	100% LANGLOIS	Low-molecular-weight glutenin subunit OS=Triticum turgidum subsp. durum	D5FPE1
	6	100% LANGLOIS	Alba domain-containingprotein OS=Triticumturgidumsubsp. durum	A0A446JPT3

3.3. Etude de la transformation des sucres simples en amidon au cours du remplissage du grain

3.3.1. Cinétique de dépôt des sucres simples au niveau du grain

L'accumulation des sucres simples au niveau du grain pendant son remplissage s'annonce variable parmi les géotypes expérimentés et les traitements hydriques retenus. On constate une augmentation de la teneur en sucres dans le grain entre la première à la deuxième date de prélèvement. Une telle évolution concerne toutes les plantes des trois traitements hydriques. Après 16 jours du début de l'anthèse, la tendance d'accumulation des sucres régresse, et principalement dans les grains des plantes conduites sous le régime hydrique de 30%CC.

Les taux des sucres simples mesurés à trois époques post-anthèse diminuent avec l'installation du déficit hydrique (*Figure 21*). Dans le traitement hydrique témoin (100%CC), les taux des sucres présentent des évolutions à partir de 6.18mg/100mgMS, atteint un maximum de 9.76mg/100mgMS pour décroître ensuite à un niveau de 4.10mg/100mgMS. Les mêmes tendances ont été observées au niveau des deux autres traitements hydriques. Dans le lot conduit à 60%CC, l'évolution présente des valeurs de l'ordre de 5.10mg/100mgMS, 7.45mg/100mgMS et 3.35mg/100mgMS. Enfin sous le régime hydrique de 30%CC, ces taux atteignent des valeurs de 3.33mg/100mgMS, 4.89mg/100mgMS et 2.46mg/100mgMS.

Dans le traitement hydrique témoin (100%CC), les géotypes ACSAD1361, Langlois, Oued Zenati et Mexicali75 se distinguent par des taux de sucres supérieurs et également leur accumulation plus élevée entre les deux premiers prélèvements (*Figure 22*). Une réduction des taux de sucres a été constatée lors du troisième prélèvement, chez les mêmes géotypes et dans les conditions hydriques similaires. Parmi ce groupe, le géotype ACSAD1361 a enregistré des taux progressifs des sucres au niveau du grain à des valeurs de 7.69mg/100mgMS, 11.51mg/100mgMS et 4.61mg/100mgMS relevées respectivement lors du premier, second et troisième prélèvement. Les mêmes tendances concernent l'accumulation des sucres dans les grains, chez les plantes conduites sous 60%CC, mais à des taux inférieurs (*Figure 22*). Dans le lot conduit à 30%CC, les teneurs en sucres solubles quoi qu'elles sont plus faibles par rapport aux deux autres traitements hydriques, augmentent également entre les deux premiers prélèvements pour régresser ensuite pendant la troisième mesure (*Figure 22*). Pour le premier prélèvement les taux de sucres sont compris dans l'intervalle délimité par 2.60mg/100mgMS (ACSAD1361) et 4.72mg/100mgMS (Mexicali75). Tandis qu'au cours du deuxième prélèvement, ces valeurs sont de l'ordre de 3.51mg/100mgMS (ACSAD1361) et

6.75mg/100mgMS (MEXICALI75). Enfin, lors du troisième dosage les valeurs extrêmes sont 1.68mg/100mgMS (Langlois) et 3.32mg/100mgMS (MEXICALI75).

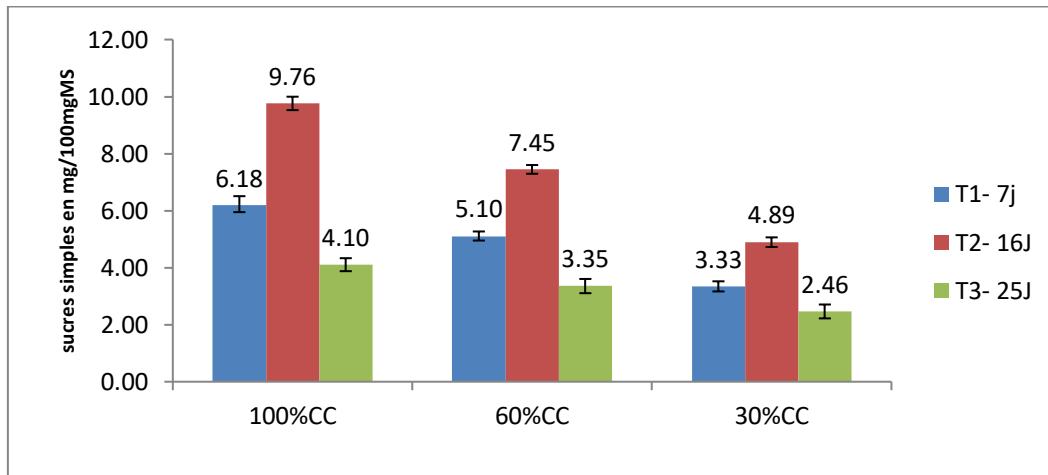


Figure 21: La moyenne génotypique de la teneur des sucres simples (mg/100mgMS) au niveau de la graine dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

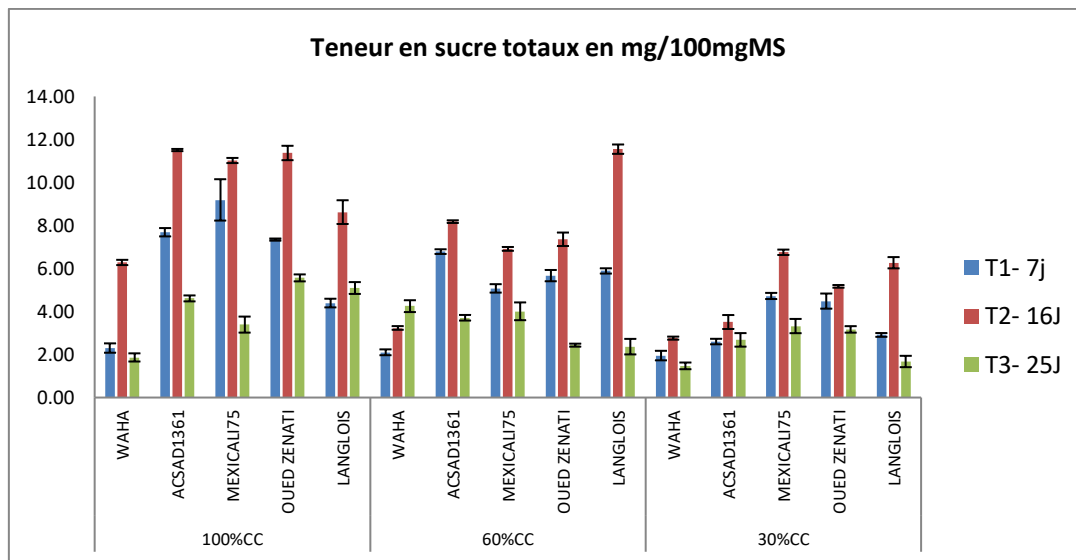


Figure 22: Cinétique de dépôt des sucres simples (mg/100mgMS) au niveau du grain chez cinq géotypes de blé dur dans trois régimes hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

3.3.2. Indice de transformation des sucres en amidon

Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau du grain en formation déterminé à deux étapes différentes, 6jrs-16jrs et 16jr-25jr est dépend significativement en fonction de régime hydrique appliquée (*Figure 23*).

D'une manière générale, les valeurs de cet indice augmentent avec l'installation de déficit hydrique particulièrement au cours de la deuxième phase. Ainsi, au cours de la première phase les valeurs progressent de 8.72, 14.23, et 16.50 relevées respectivement sur les conditions hydrique 100%CC, 60%CC et 30%CC.

Concernant la deuxième phase, l'activité de transformation des sucres simple en amidon progresse fortement du traitement hydrique témoin au lot mené à 60%CC pour passé d'une valeur de 25.69 à 55.79. Elle régresse ensuite sous les conditions de déficit hydrique sévère (30%CC) pour atteindre une valeur de 26.

Toutefois, les activités distinctives des génotypes se démarquent de cette moyenne génotypique. Ce qu'on remarque à travers ces résultats est que le déficit hydrique est à l'origine d'une accélération du processus de dépôt des réserves amylicées au niveau des graines en formation. Cependant, cette évolution est fortement tributaire de l'intensité de déficit hydrique. Elle présente un maximum en condition de déficit hydrique modéré (60%).

Les situations relatives à chaque génotype se présentent comme suit:

1. Le génotype Waha

L'indice de transformation des sucres de la première phase augmente avec la régression d'humidité du substrat de culture (*Figure 24*). Ainsi, ses valeurs sont de l'ordre de 9.91, 23.50 et 55.98 obtenues respectivement dans les traitements hydriques de 100%, 60% et 30%CC. Une tendance contraire caractérise la deuxième phase d'évolution de transformation où les valeurs progressent entre 16.44, 7.64 et 8.89.

2. Le génotype ACSAD1361

L'indice de transformation des sucres en amidon s'annonce plus élevé au cours de la deuxième phase (16j-25j) par rapport à la première et ce au niveau des trois traitements hydriques (*Figure 25*). Pour chaque phase, l'indice de transformation est plus élevé en conditions hydriques optimales. Ainsi, l'activité au cours de la première période est d'une valeur de 15.05, et diminue ensuite pour atteindre des taux de 1.16 et 2.20 enregistrés respectivement sous les régimes hydriques de 60% et 30%CC. Pour la seconde phase, les

valeurs d'indice de transformation des sucres sont de l'ordre de 70.62, 10.04 et 5.64 inscrites dans l'ordre sous les traitements hydriques de 100%, 60% et 30%CC.

3. Le génotype Mexicali75

L'indice de transformation des sucres simples en amidon pour ce génotype s'annonce différent par rapport à ceux des autres génotypes. L'activité de transformation est plus élevée au cours de la deuxième phase pour les trois régimes hydriques. La particularité pour ce génotype réside dans le fait que pour les phases d'activité, l'indice est plus élevé en situation de déficit hydrique et plus précisément dans le traitement conduit à 60%CC (*Figure 26*). Les valeurs d'indice de transformation pour la première phase sont de l'ordre de 1.71 (100%CC), 11.58 (60%CC) et 4.73 (30%CC). Ces valeurs progressent davantage au cours de la deuxième phase pour atteindre 33.63, 137.97 et 8.86 enregistrées dans l'ordre sous les régimes hydriques de 100%, 60% et 30%CC.

4. Le génotype OUED ZENATI

Chez le génotype OUED ZENATI, les mêmes tendances concernent l'évolution d'indice de transformation des sucres (*Figure 27*), que celles relevées chez le génotype MEXICALI75. En effet pour la deuxième phase de cette activité, l'application du déficit hydrique au seuil de 60%CC s'est accompagnée d'une augmentation significative d'indice de transformation des sucres en amidon. Ainsi, les valeurs obtenues de ce processus s'élèvent à 5.49, 38.35 et 3 pour les traitements hydriques respectifs de 100%CC, 60%CC et 30%CC. Enfin pour la première phase d'activité (6jrs-16jrs), l'activité s'annonce plus faible et enregistrent des valeurs de l'ordre de 4.34, 7.26 et 2.61, respectivement au niveau des traitements hydriques de 100%CC, 60%CC et 30%CC.

5. Le génotype LANGLOIS

Le génotype Langlois, se distingue de l'ensemble des génotypes par une évolution de la transformation des sucres simples en fonction des régimes hydriques appliqués (*Figure 28*). Cette particularité concerne particulièrement la deuxième de l'activité de transformation des sucres. Elle divulgue ainsi que l'indice de transformation augmente excessivement avec l'accentuation du déficit hydrique où les valeurs enregistrées ont progressé de 2.29, 84.92 à 103.62, respectivement sous les traitements hydriques de 100%CC, 60%CC et 30%CC.

L'estimation de cette activité au cours de la première phase a révélé des intensités de transformation plus faibles mais plus élevées en situation de déficit hydrique. Elles sont de

l'ordre de 12.62, 27.62 et 17.04 relevées dans l'ordre dans les lots conduits à 100%CC, 60%CC et 30%CC.

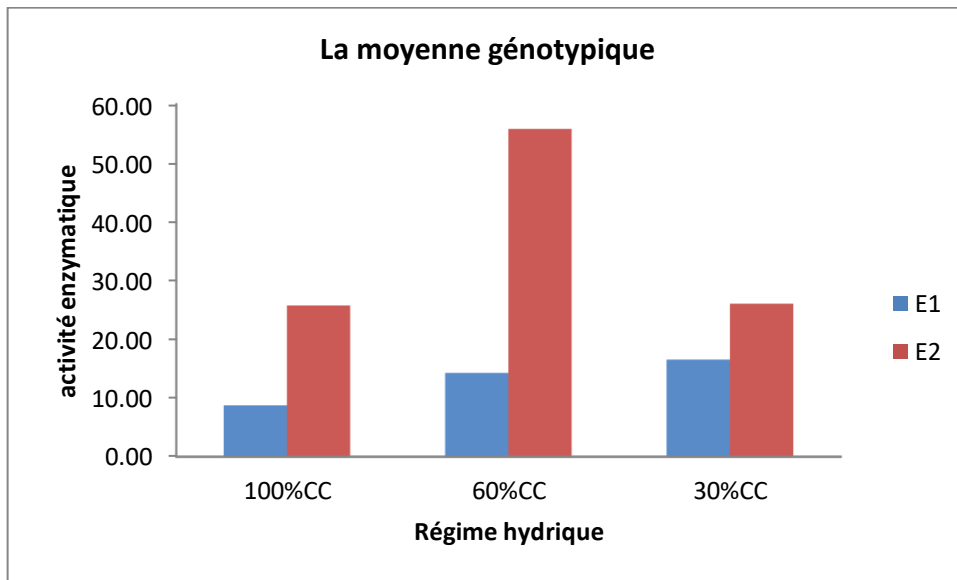


Figure 23: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

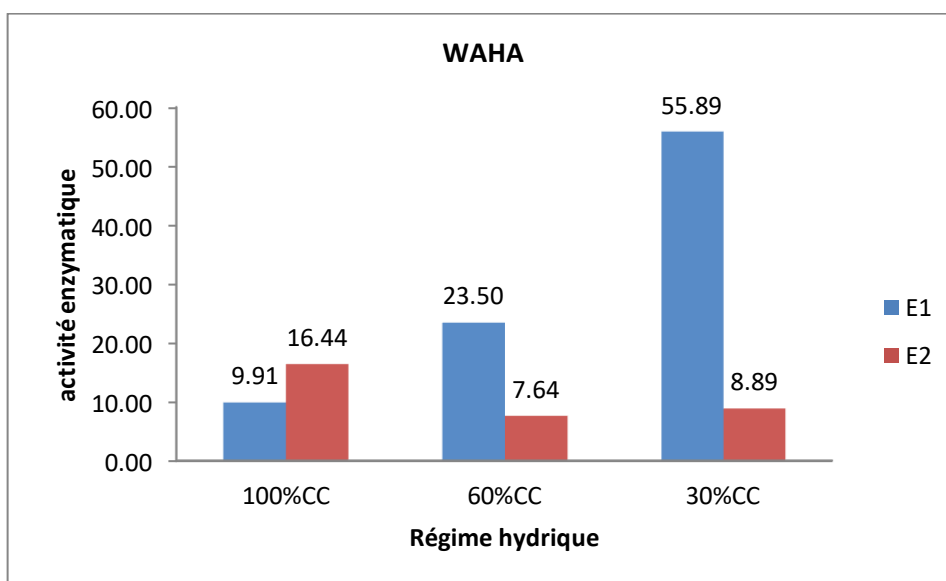


Figure 24: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le génotype Waha dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

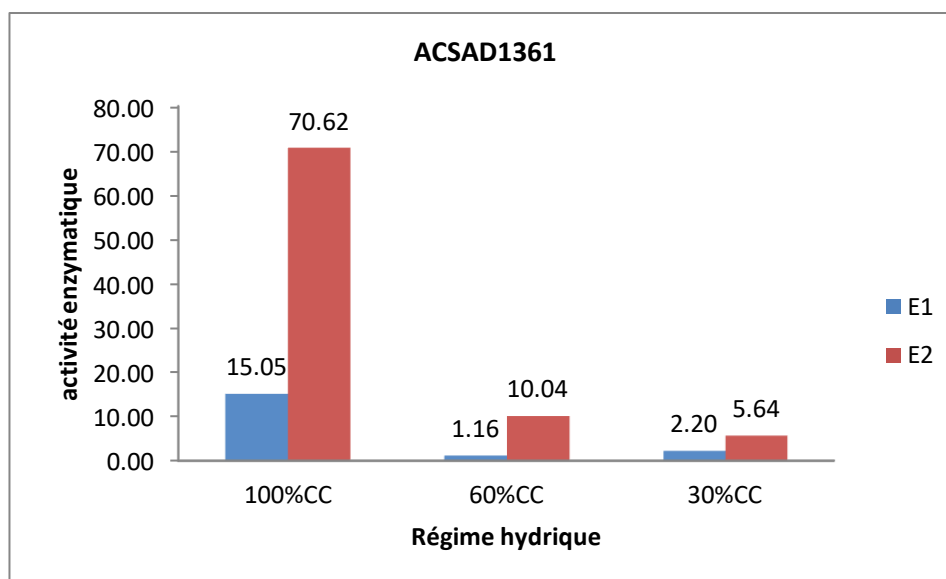


Figure 25: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le génotype ACSAD1361 dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

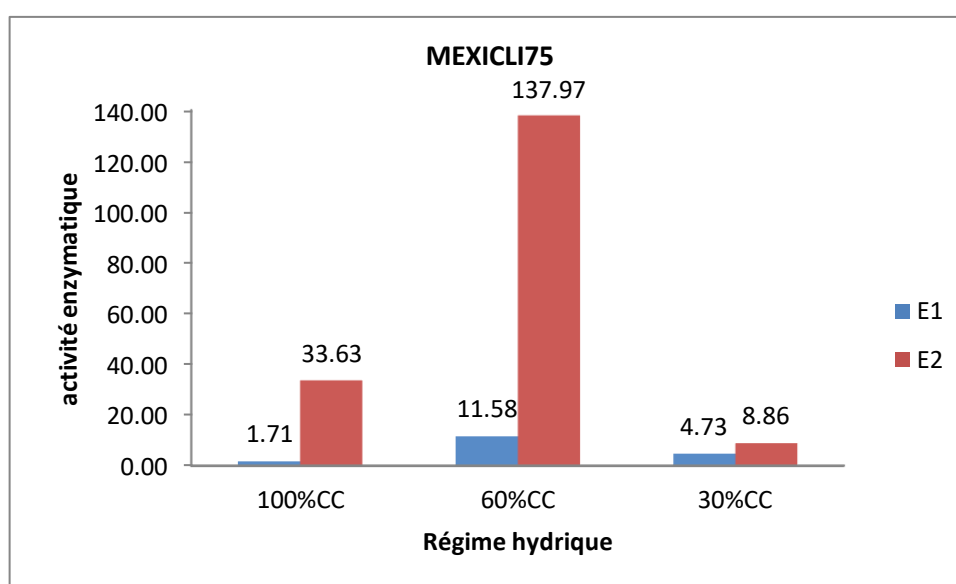


Figure 26: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le génotype MEXICALI75 dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

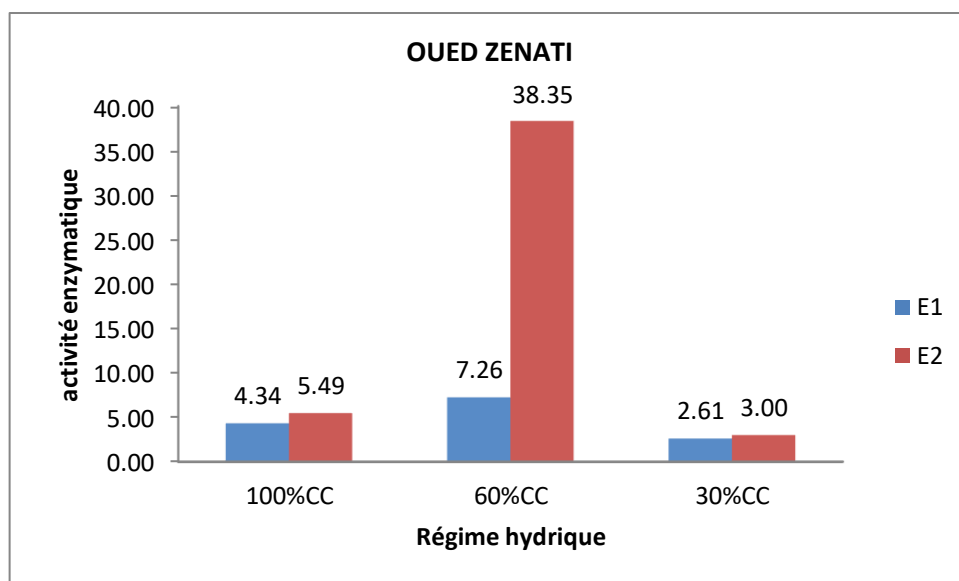


Figure 27: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le génotype OUED ZENATI dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

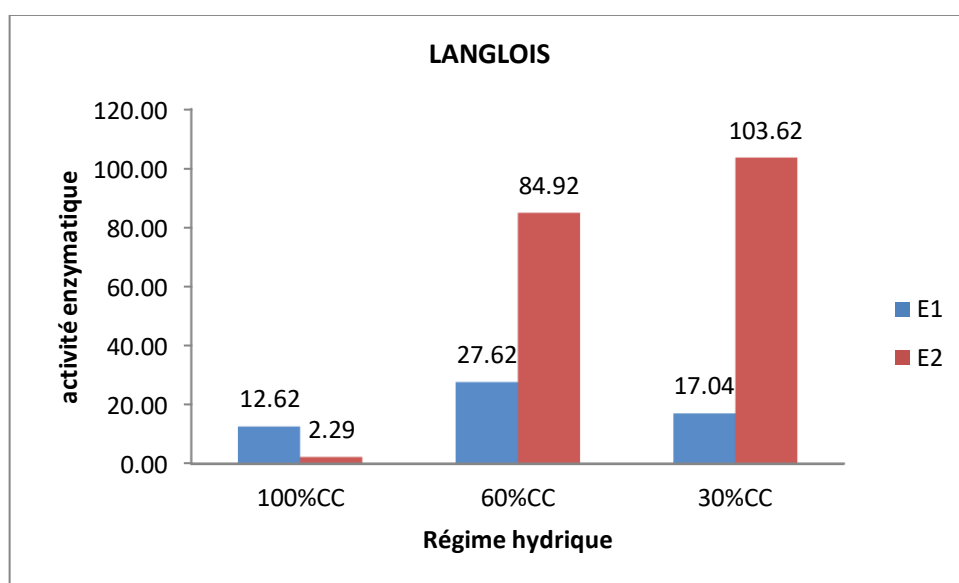


Figure 28: Indice de transformation des sucres simples en amidon au niveau de la graine (activité enzymatique) chez le génotype LANGLOIS dans les trois situations hydriques (100%CC, 60%CC, 30%CC)

4. Discussions

La composition des réserves des grains de blé dur à maturité est représentée essentiellement de deux fractions, l'amidon et les protéines. La fraction polysaccharidique est issue de la transformation des sucres simples au site même de son emmagasinement, l'albumen du grain en formation. Les particularités qualitatives et quantitatives de ces constituants dépendent du flux des substrats et les processus de leurs transformations. Les sucres simples, photoassimilés produits d'activité photosynthétique de la plante (Wang et al., 2017) constituent ces substrats qui après polymérisation en amidon représentent avec la fraction protéique environ 60% à 80% des réserves des grains de blé dur (Wang et al., 2007; Merah et al., 2015).

L'élaboration de la qualité du grain dépend inévitablement de la quantité des assimilés et des processus de leur transformation. Lors du remplissage du grain, deux principales sources assurent l'approvisionnement en assimilés du grain en formation, la photosynthèse courante post-anthèse des différents organes végétatifs et reproducteurs et la redistribution des réserves accumulées à différents sites de la plante. La durée d'activité des organes est déterminante pour la disponibilité des substrats indispensables au remplissage du grain (Merah et al., 2015). La croissance et l'activité végétatives dépendent de nombreux facteurs du milieu, dont l'alimentation hydrique en constitue l'élément abiotique le plus déterminant (Slama et al., 2005). En effet, la longévité des différents organes de la plante durant la période reproductrice et qui constitue la source de disponibilité des photoassimilés, est grandement conditionnée par la qualité de la nutrition hydrique de la plante (Arous et al., 2020 ; Bouzid et al., 2020). La déclaration du déficit hydrique et sa sévérité durant cette période est préjudiciable à l'accumulation des réserves au niveau du grain chez le blé dur (Adda et al., 2013). Les résultats émanant de ces recherches sont confirmés par ceux obtenus lors de la présente étude. En effet, l'alimentation hydrique conditionne la disponibilité quantitative des sucres simples indispensables à la formation d'amidon et sa mise en réserve. Le déficit hydrique a provoqué une diminution des taux de sucres simples au niveau du grain en formation. Cette action s'accroît davantage en situation de déficit hydrique sévère (30%CC). Néanmoins, l'appauvrissement du grain en sucres simples durant sa formation n'aboutirait nullement à une quelconque altération des processus catalytiques de leur polymérisation en amidon. Effectivement, selon nos résultats, la déclaration du déficit hydrique s'est accompagnée d'une nette augmentation d'indice de transformation des sucres simples en amidon au cours du remplissage du grain. Ces résultats se confirment par ceux de l'étude

réalisée par Yang et *al.*, (2001) qui montrent que la déclaration d'un déficit hydrique au cours de la période de remplissage du grain, amélioré la remobilisation des réserves de carbone préétablies aux grains et accéléré le remplissage du grain. L'accélération de la formation d'amidon n'induit pas évidemment l'augmentation de sa teneur au niveau du grain, sous ces conditions. Les résultats obtenus prouvent que la teneur en amidon au niveau du grain à la maturité physiologique, baisse en conditions de déficit hydrique. Ces résultats se confirment par les travaux de Wang et *al.* (1993) et Yi et *al.* (2014) qui avaient prouvé qu'un déficit hydrique modéré peut réduire jusqu'à 40 % la teneur d'amidon des grains de blé dur. Selon Yi et *al.* (2014), le stress hydrique pendant le stade de la floraison a réduit les activités des enzymes de synthèse de l'amidon, réduisant ainsi l'accumulation d'amidon et sa composition dans les grains. Dans le même contexte Mukerjea et *al.* (2002) avaient démontré que les enzymes biosynthétiques de l'amidon sont affectées différemment par les changements des conditions environnementales et ce selon la nature des génotypes concernés.

La fraction protéique du grain de blé dur est également déterminante dans l'élaboration du poids final et sa qualité. Cette fraction représente entre 10 à 12% en moyenne du poids sec du grain (Shewry et *al.*, 2002).

Les résultats obtenus sur la teneur en protéines totales selon la méthode de Bradford (1976) révèlent des changements quantitatifs chez les cinq génotypes étudiés dans les trois situations hydriques, 100, 60 et 30%CC. Le fractionnement des protéines en fraction solubles en sel et en alcool présente des résultats distincts. La première fraction représente la fraction hétérogène de protéines classées en albumines/globulines solubles dans l'eau salée. Les albumines/globulines constituent environ 20 % des protéines de l'endosperme et contrôlent les voies métaboliques pendant le développement et la germination des grains (Mazzeo et *al.*, 2017). Les valeurs obtenues dans notre expérimentation dépassent cette limite surtout dans les conditions de déficit hydrique sévère où on note une accumulation importante de 30µg/mg chez le génotype ACSAD1361.

La deuxième fraction représente les gliadines. Ces dernières sont des protéines solubles dans l'alcool, traditionnellement sous-classées en fractions α/β -, γ - et ω , selon leur mobilité électrophorétique (Mazzeo et *al.*, 2017). L'application de déficit hydrique avec ses deux intensités provoque une forte diminution des doses de cette fraction.

Des études montrent que l'électrophorèse des protéines est un outil puissant pour l'identification de la diversité génétique et la SDS-PAGE est principalement considérée

comme une technologie cohérente car les protéines de stockage des graines sont très indépendantes des fluctuations environnementales (Larré et *al.*, 2010).

Les profils des protéines des graines dans notre étude sont utilisés comme un outil prometteur pour distinguer les cultivars de cette espèce de blé. Cependant, seules quelques études ont indiqué que l'identification des cultivars n'était pas possible avec la méthode SDS-PAGE.

Des différences considérables dans la quantité de fractions protéiques sont trouvées ainsi que l'identification par MALDI-TOF a révélé l'existence des protéines telles que rRNA N-glycosidase, HMW glutenin, AAI domain-containingprotein, Low-molecular-weight glutenin subunit, Alba domain-containingprotein. Le HMW-GS représente environ 12% des protéines de stockage des grains, ce qui correspond à environ 1 - 1.7% du poids sec de la semoule (Rasheed et *al.*, 2014). Ces derniers présentent des rôles importants dans la défense cellulaire et la protection vis à vis les variations des conditions environnementales.

Conclusion générale

Les zones céréalières en Algérie sont affectées par la sécheresse qui réduit significativement la productivité des différentes espèces et notamment le blé dur qui en représente la spéculation la plus importante. Les impacts de ce stress s'expriment différemment sur la formation du rendement et ce en fonction de son intensité, sa persévérance et la phase de sa déclaration. La sécheresse tardive survenant durant les stades post-anthèse de la céréale et qui souvent associée à l'hyperthermie, réduit le poids du grain et modifie la composition de ses réserves. La lutte contre les contraintes générées par la sécheresse inclut certainement l'application d'irrigation d'appoint, mais avec la rareté des ressources hydriques elle demeure inaccessible dans la plupart des exploitations agricoles et la création d'un matériel végétal plus tolérant représente un objectif inévitable qu'il faudra intégrer dans toute stratégie de développement de cette filière agricole.

Le remplissage du grain et l'élaboration de son poids final et la composition de ces réserves dépend de la disponibilité des assimilats et leur transformation en réserves particulièrement amylacée et protéique. L'approvisionnement en assimilats des processus métaboliques d'organisation des réserves au niveau du grain pendant son remplissage est assuré conjointement par la photosynthèse courante des organes de la plante et la remobilisation des réserves emmagasinées dans différentes parties caulinaires de la plante. L'efficacité de fonctionnement de ces deux sources repose sur la longévité des organes impliqués et qui est conditionnée par la nature des géotypes et l'alimentation hydrique des plantes. Les résultats émanant du présent travail indiquent que le remplissage du grain, particulièrement en situation de déficit hydrique est assuré essentiellement par la photosynthèse courante des constituants de l'épi et du col de l'épi d'une part et la remobilisation des réserves de la tige et leur translocation vers le grain en formation d'autre part. La longévité des organes assurant la part de la photosynthèse courante dans l'organisation du grain au cours de sa maturation dépend de leur nature biologique et leur sensibilité à la dessiccation. Ainsi, la contribution de tous les organes situés au dessus du dernier nœud, à l'exception de la feuille étendard, s'avère élevée dans le remplissage du grain. En conditions de déficit hydrique, l'hydrolyse des réserves et leur translocation vers le grain imposeraient une utilisation énergétique à plus faible taux que celle qu'exigerait le maintien de l'activité photosynthétique des organes durant ce processus.

L'alimentation hydrique des plantes détient une grande influence sur le déroulement des processus biochimique impliqué dans la polymérisation quantitative et qualitative des réserves du grain du blé dur. Ainsi, sous les conditions d'alimentation hydrique déficiente, la teneur en amidon des grains baisse. Cette diminution s'explique par une faible disponibilité des sucres simples indispensables à la polymérisation de ce polysaccharide et ce qui explique une faible affluence des photoassimilés durant cette période. Les résultats indiquent que la cadence de dépôt d'amidon au niveau des grains en formation s'accélère en situation de sécheresse. Ce résultat démontre la faible sensibilité du groupe des enzymes amidon-synthétase à l'abaissement du potentiel osmotique.

On note également qu'en conditions de sécheresse, l'amidon des grains est formé essentiellement d'amylose. Ce résultat prouve l'existence des degrés de sensibilité des enzymes au déficit hydrique différents. Ainsi, la polymérisation linéaire (α 1-4) s'annonce moins sensible que la polymérisation latérale (α 1-6).

Les résultats du présent travail démontrent également que la morphogénèse de l'épi par l'établissement de la longueur du rachis est moins sensible au déficit hydrique. Toutefois sa fertilité et la qualité des grains formés manifestent des réactions contraires.

Les différentes fractions protéiques suivant leurs particularités biochimiques respectives (milieux de solubilisation) sont variables en fonction des génotypes de l'alimentation hydrique adoptée. La caractérisation du profil des protéines brutes à l'aide de gels protéiques SDS nous a permis d'identifier 17 bandes électrophorétiques sur les gels de protéines totales, 20 bandes électrophorétiques sur les gels de protéines solubles en sel, et finalement 11 bandes électrophorétiques sur les gels de protéines solubles en alcool.

L'absence ou la présence de ces bandes électrophorétiques et de la variation du niveau relatif de ces bandes est essentiellement liée au régime hydrique appliqué et la nature de génotype. L'analyse de protéines issus des trois fractions par spectrométrie de masse MALDI-TOF a permis d'identifier 9 protéines. La sélection des bandes est basée sur leur variation sous l'effet de régime hydrique ou bien la présence particulière dans un génotype donné.

Références bibliographiques

Q

- Adda A, M. Sahnoune, M. Kaid-Harch, and O. Merah, "Impact of water deficit intensity on durum wheat seminal roots," *Comptes Rendus - Biol.*, vol. 328, no. 10–11, pp. 918–927, 2005.
- Adda, S. Soualem, A Labdelli, M Sahnoune, O Merah, "Effets du déficit hydrique sur la structure de la zone pilifère des racines séminales du blé dur," *Rev. Ecol.*, no. 9, 2013.
- Ahmed and S. Farooq, "Growth and physiological responses of wheat cultivars under various planting windows," *J. Anim. Plant Sci.*, vol. 23, no. 5, pp. 1407–1414, 2013.
- Alqudah M., R. Sharma, R. K. Pasam, A. Graner, B. Kilian, and T. Schnurbusch, "Genetic dissection of photoperiod response based on gwas of pre-anthesis phase duration in spring barley," *PLoS One*, vol. 9, no. 11, pp. 1–27, 2014.
- Alqudah, R. Sharma, R. K. Pasam, A. Graner, B. Kilian, and T. Schnurbusch, "Genetic dissection of photoperiod response based on gwas of pre-anthesis phase duration in spring barley," *PLoS One*, vol. 9, no. 11, pp. 1–27, 2014.
- Arous, A. Adda, , M. Belkhodja, , A. Bouzid, O.Merah, "The contribution of green plant parts to grain filling of durum wheat under water deficit". *Bulg. J. Agric. Sci.*, 26 (4): 809–815. 2020.
- Attia F., "Effet du stress hydrique sur le comportement ecophysique et la maturite phenolique de la vigne vitis vinifera l.: etude de cinq cepages autochtones de midi-pyrenees," *Thèse Dr. Inst. Natl. Polytech. TOULOUSE*, vol. 163, p. 194, 2007.

B

- Bahlouli, H. Bouzerzour, A. Benmahammed And K. L. Hassous, " Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (Triticum durum Desf.) Cultivars under semi-arid conditions". *Agro*, 4: 360-365. 2005.
- Bajji, , S. Lutts, , J. Kinet, M., "Physiological changes after exposure to and recovery from polyethylene glycol-induced water deficit in callus cultures issued from durum wheat (Triticum durum Desf.) Cultivars differing in drought resistance". *Journal of Plant Physiology*, 156(1), 75–83. 2000.
- Bányai *et al.*, "South African Journal of Botany Phenotypical and physiological study of near-isogenic durum wheat lines under contrasting water regimes," *South African J. Bot.*, vol. 108, pp. 248–255, 2017.
- Bányai, J, Maccaferri, M, Cané, M A Monostori, I, Spitkó, T, Kuti, C, Mészáros, K, Láng, L, Pál, and I. Karsai, "South African Journal of Botany Phenotypical and physiological study of near-isogenic durum wheat lines under contrasting water regimes," *South African J. Bot.*, vol. 108, pp. 248–255, 2017.
- Barron, Abecassis S., Chaurand M., Lullien P.,Mabille F., Rouau X., Sadoudi A., Samson M., "Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche". *Innovation Agronomique*, 19 :51-62. 2012.

- Barron, U. Holopainen-Mantila, S. Sahlstrom, A. K. Hotekjolen, and V. Lullien-Pellerin, "Assessment of biochemical markers identified in wheat for monitoring barley grain tissue," *J. Cereal Sci.*, vol. 74, pp. 11–18, 2017.
- Beckles M. and M. Thitisaksakul, "How environmental stress affects starch composition and functionality in cereal endosperm," *Starch/Staerke*, vol. 66, no. 1–2, pp. 58–71, 2014.
- Belkharouch, S. Fellah, H. Bouzerzour, A. Benmahammed, N. Chellal, "Vigueur De Croissance, Translocation Et Rendement En Grains Du Ble Dur (*Triticum Durum* Desf) Sous Conditions Semi Arides". *Courrier Du Savoir*, 09 :17-24. 2009.
- Ben Salem M., M. Ben Naceur, E. Zid, and R. H. Karray, "Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance," *Sécheresse*, vol. 16, no. 3, pp. 225–229, 2005.
- Benbelkacem and K. Kellou, "Evaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L . var . durum) cultivées en Algérie," vol. 110, pp. 105–110, 2000.
- Benlaribi M., "Étude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf)," *Agronomie*, vol. 10, pp. 305–322, 1990.
- Berthet, "Dictionnaire de biologie". *De Boeck et Larcier s.a. 1ère édition. Edition De Boeck Université* : 15-16. 2006.
- Blandino M., A. Pilati, and A. Reyneri, "Field Crops Research Effect of foliar treatments to durum wheat on flag leaf senescence , grain yield , quality and deoxynivalenol contamination in North Italy," vol. 114, pp. 214–222, 2009.
- Blum ; L. Shpiler, "Heat tolerance for yield and its components in different wheat cultivars ". *Euphytica* 51: 257–263, 1991.
- Blum, J. Mayer, and G. Golan, "Chemical desiccation of wheat plants as a simulator of post-anthesis stress. II. Relations to drought stress," *F. Crop. Res.*, vol. 6, no. C, pp. 149–155, 1983.
- Bort J., A. O. Febrer, T. Amaro, J. Araus, "Role of awns in ear water-use efficiency and grain weight in barley". *Agronomie, EDP Sciences*, 14 :133-139, 1994.
- Boudjabi, M. Kribaa, and H. Chenchouni, "Journal of King Saud University – Science Sewage sludge fertilization alleviates drought stress and improves physiological adaptation and yield performances in Durum Wheat (*Triticum durum*): A double-edged sword," *J. King Saud Univ. - Sci.*, 2017.
- Boudjabil, M. Kribaa, and H. Chenchouni, "Original article : growth , physiology and yield of durum wheat (*Triticum durum*) treated with sewage sludge," *EXCLI J.*, vol. 14, no. 1611–2156, pp. 320–334, 2015.
- Bouزيد A, A. Arous, O. Felouah, O. Merah, A. Adda, "Contribution of Current Photosynthesis and Reserves Remobilization in Grain Filling and Its Composition of Durum Wheat Under Different Water Regimes". *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 68 (6):937-945. 2020.
- Brisson, "Modéliser la réponse des cultures à la contrainte hydrique avec le modèle STICS pour comparer des stratégies et anticiper les changements climatiques". *Note technique Agroclim INRA Avignon*, pp : 9-18. 2008.

C

Chennafi, M. Makhoulouf, and A. L. Ayadi, “Réponse des variétés contrastées de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à la date d’implantation sous semis direct en milieu semi-aride,” *Options Méditerranéennes. Séries A. Mediterr. Semin.*, vol. 19000, no. 96, pp. 63–70, 2011.

Clement M., Pandcourt G., Prats J. “Les céréales“ .Ed. J-braille, P351, 1971.

D

Debaeke P. and M. Cabelguenne, “du rendement du blé d’hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d’un modèle de simulation de la culture de blé d’hiver en conditions d’,” ..., vol. 16, no. 1, pp. 25–46, 1996.

Debiton, “Identification des critères du grain de blé (*Triticum aestivum* L.) favorables à la production de bioéthanol par l’étude d’un ensemble de cultivars et par l’analyse protéomique de lignées isogéniques waxy,” *Univ. Blaise Pascal*, 2010.

Dettori M., C. Cesaraccio, and P. Duce, “Field Crops Research Simulation of climate change impacts on production and phenology of durum wheat in Mediterranean environments using CERES-Wheat model,” *F. Crop. Res.*, vol. 206, pp. 43–53, 2017.

Dian, H. Jiang, Q. Chen, F. Liu, and P. Wu, “Cloning and characterization of the granule-bound starch synthase II gene in rice: Gene expression is regulated by the nitrogen level, sugar and circadian rhythm,” *Planta*, vol. 218, no. 2, pp. 261–268, 2003.

Dib A and P. Monneveux, “Adaptation à la sécheresse et notion d’idéotype chez le blé dur .I. Caractères morphologiques d’enracinement,” *Agronomie*, vol. 12, pp. 371–379, 1992.

E

El Hafid, D. H. Smith, M. Karrou, and K. Samir, “Morphological attributes associated with early-season drought tolerance in spring durum wheat in a mediterranean environment,” *Euphytica*, vol. 101, no. 3, pp. 273–282, 1998.

Epron and E. Dreyer, “Starch and soluble carbohydrates in leaves of water-stressed oak saplings,” *Ann. des Sci. For.*, vol. 53, pp. 263–268, 1996.

Ercoli L., L. Lulli, M. Mariotti, A. Masoni, and I. Arduini, “Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability,” *Eur. J. Agron.*, vol. 28, no. 2, pp. 138–147, 2008.

Ercoli, L. Lulli, M. Mariotti, A. Masoni, and I. Arduini, “Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability,” *Eur. J. Agron.*, vol. 28, no. 2, pp. 138–147, 2008.

Estrada-Campuzano, D. J. Miralles, and G. A. Slafer, “Genotypic variability and response to water stress of pre- and post-anthesis phases in triticale,” *Eur. J. Agron.*, vol. 28, no. 3, pp. 171–177, 2008.

F

Farineau, Morot-Gaudry J.F., “La Photosynthèse, Processus Physique, Moléculaire Et Physiologique“. INRA.402P, 2006.

- Feillet P., "Le grain de blé. Composition et utilisation". *Mieux comprendre*. INRA. ISSN: 1144- 7605. ISBN:2- 73806 0896- 8. p 308, 2000.
- Fellah, H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Djekoun, "Sélection pour améliorer la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum durum* Desf)". *Actes Inst. Agron. Vet.* (Maroc) 22 (3): 161-168. 2002.
- Flagella, M. M. Giuliani, L. Giuzio, C. Volpi, and S. Masci, "Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality," *Eur. J. Agron.*, vol. 33, no. 3, pp. 197–207, 2010.
- Fokar M., A. Blum, and H. T. Nguyen, "Heat tolerance in spring wheat. II. Grain filling," *Euphytica*, vol. 104, pp. 9–15, 1998.
- Fujita *et al.*, "Function and characterization of starch synthase I using mutants in rice," *Plant Physiol*, vol. 140, no. 3, pp. 1070–1084, 2006.

§

- Gaju *et al.*, "Relationships between physiological traits, grain number and yield potential in a wheat DH population of large spike phenotype," *F. Crop. Res.*, vol. 164, no. 1, pp. 126–135, 2014.
- Gambín B. L., L. Borrás, and M. E. Otegui, "Kernel weight dependence upon plant growth at different grain-filling stages in maize and sorghum," *Aust. J. Agric. Res.*, vol. 59, no. 3, pp. 280–290, 2008.
- Gate P., "Écophysiologie du blé". Ed. *ITCF. Technique et Documentation. Lavoisier*, Paris, 419 p. 1995.
- Gonzalez-Hernandez J.L., E.M. Elias, S. Kianian, "Mapping genes for grain protein concentration and grain yield on chromosome 5B of *Triticum turgidum* (L.) var. *dicoccoides*". *Euphytica* 139, 217–225, 2004.
- Grieu, P. Maury, P. Debaeke, and S. Ahmad, "Améliorer la tolérance à la sécheresse du tournesol : apports de l'écophysiologie et de la génétique.", *Innov. Agron.*, vol. 4, pp. 91–99, 2008.
- Guan H.P., and J.Preiss, "Differentiation of the properties of the branching isozymes from maize (*Zea mays*)". *Plant Physiol.* 102, 1269–1273, 1993.

ℋ

- Hannah and M. James, "The complexities of starch biosynthesis in cereal endosperms," *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 19, no. 2, pp. 160–165, 2008.
- Hazmoune, "Erosion des variétés de blé dur cultivées en Algérie . Perspectives," In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges . Zaragoza : CIHEAM (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 40)*, vol. 294, pp. 291–294, 2000.
- He F., R. Goyal, A. Laroche, M. L. Zhao, and Z. X. Lu, "Water stress during grain development affects starch synthesis, composition and physicochemical properties in triticale," *J. Cereal Sci.*, vol. 56, no. 3, pp. 552–560, 2012.
- Hirose and T. Terao, "A comprehensive expression analysis of the starch synthase gene family in rice (*Oryza sativa* L.)," *Planta*, vol. 220, no. 1, pp. 9–16, 2004.

§

- Jackson E.A, L.M.Holt, and P.I.Payne. Characterisation of high molecular weight gliadin and low- molecular weight glutenin subunits of wheat endosperm by two dimensionel electrophoresis and the chromosomal localisation of their controlling genes. 1983.
- Jeon J. S., N. Ryoo, T. R. Hahn, H. Walia, and Y. Nakamura, “Starch biosynthesis in cereal endosperm,” *Plant Physiol. Biochem.*, vol. 48, no. 6, pp. 383–392, 2010.

K

- Kara. Y. et C. E. BELLKHIRI, “étude des caractères d’adaptation au déficit hydrique de quelques variétés de blé dur et d’espèces sauvages apparentées : intérêt potentiel de ces variétés pour l’amélioration de la production,” *Courrier du Savoir*, pp. 119–126, 2011.
- Khalfaoui J.-L., “Genetic of adaptation to drought of cultivated species and consequences on plant breeding,” *Bull. la Société Bot. Fr. Actual. Bot.*, no. 137 (1), pp. 125–137, 1990.
- Kong, Y. Xie, L. Hu, B. Feng, and S. Li, “Field Crops Research Remobilization of vegetative nitrogen to developing grain in wheat (*Triticum aestivum* L .),” *F. Crop. Res.*, vol. 196, pp. 134–144, 2016.

L

- Labdelli, “Etude des effcets des variations morpho-structurales du système racinaire pour la tolérance à la sécheresse du blé dur (*Triticum durum* Desf .),” *Mémoire de Magister, d’oran es-senia* , p. 78, 2011.
- Labdelli, A. Adda, and S. Soualem, “Étude des caractères morphologiques et anatomiques des racines séminales du blé dur (*Triticum durum* Desf .) soumis au déficit hydrique en milieu hydroponique,” *Revue Ecologie-Environnement* no. 9, 2013.
- Labuschagne M. T., “A review of cereal grain proteomics and its potential for sorghum improvement,” *J. Cereal Sci.*, vol. 84, pp. 151–158, 2018.
- Lahouel, “Etude de l ’ adaptation et la productivité (rendement et qualité des huiles) du tournesol en conditions de déficit hydrique .,” *thèse Doctorat. Univ. Tiaret*, p. 154, 2019.
- Larbi, A. Mekliche, R. Abed, and M. Badis, “Effet du déficit hydrique sur la production de deux variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L . var . durum) en région semi-aride,” vol. 297, pp. 295–297, 2000.
- Larre A, S. Penninck, B. Bouchet, V. Lollier, O. Tranquet, S. Denery-Papini, “Brachypodium distachyon grain: Identification and subcellular localization of storage proteins,” *J. Exp. Bot.*, vol. 61, no. 6, pp. 1771–1783, 2010.
- Larsson H., A. C. Eliasson, “Influence of starch granule surface on the rheological behaviour of wheat flour dough“ . *J. Texture Stud*, 28, 487–501, 1997.
- Levitt, ”Responses of plant to environmental stresses. In water radiation, salt and other stresses”. 2 eds. *Academic press, New York*, pp. 275-282. 1980.

Li H., D. Jiang, B. Wollenweber, T. Dai, and W. Cao, "Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat," *Eur. J. Agron.*, vol. 33, no. 4, pp. 267–275, 2010.

Linden, D. Lorient, "Biochimie agro-industrielle". *Masson*, Paris, 1994.



Madhava Rao K.V., A.S. Raghavendra, K. Janardhan Reddy, "Printed in the Netherlands. Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants". *Springer*: 1-14 p. 2006.

Mahpara, S. T. Hussain, and J. Farooq, "Drought Tolerance Studies in Wheat (*Triticum aestivum* L.)," *Cercet. Agron. Mold.*, vol. 47, no. 4, 2015.

Masle-Meynard J., Sebillotte M., "Etude de l'hétérogénéité d'un peuplement de blé d'hiver. II. - Origine des différentes catégories d'individus du peuplement ; éléments de description de sa structure". *Agronomie, EDP Sciences*, 1 (3), pp.217-224, 1981.

Masoni, L. Ercoli, M. Mariotti, and I. Arduini, "Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type," *Eur. J. Agron.*, vol. 26, no. 3, pp. 179–186, 2007.

Massaux *et al.*, "L' amidon natif du grain de blé : un composé naturel à valoriser par la connaissance de ses propriétés," pp. 1–7, 2006.

Maydup M. L., M. Antonietta, J. J. Guiamet, and E. A. Tambussi, "The contribution of green parts of the ear to grain filling in old and modern cultivars of bread wheat (*Triticum aestivum* L.): Evidence for genetic gains over the past century," *F. Crop. Res.*, vol. 134, pp. 208–215, 2012.

Maydup M. L., M. Antonietta, J. J. Guiamet, C. Graciano, J. R. López, and E. A. Tambussi, "The contribution of ear photosynthesis to grain filling in bread wheat (*Triticum aestivum* L.)," *F. Crop. Res.*, vol. 119, no. 1, pp. 48–58, 2010.

Mazzeo L., Maria Fiorella, Di Stasio, S. D'Ambrosio, Chiara, Arena, Simona, Scaloni, Andrea, Corneti, R. Ceriotti, Aldo, Tuberosa, G. Siciliano, Rosa Anna, Picariello, and G. Mamone, "Identification of Early Represented Gluten Proteins during Durum Wheat Grain Development," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 65, no. 15, pp. 3242–3250, 2017.

Mckay A, "La sécheresse : une perspective globale. In : La sécheresse : la crise est- elle imminente ? " *compte rendu du symposium canadien d'hydrologie* n0 : 16 p. 1986.

Mefti M., A. Abdelguerfi, and A. Chebouti, "Etude de la tolérance à la sécheresse chez quelques populations de *Medicago truncatula* (L .) Gaertn .," vol. 176, pp. 173–176, 2001.

Megherbi A, Z. Mehdadi, F. Toumi, K. Moueddene, and S. E. B. Bouadjra, "Tolérance à la sécheresse du blé dur (*Triticum durum* Desf.) et identification des paramètres morpho-physiologiques d'adaptation dans la région de Sidi Bel-Abbès (Algérie occidentale)," *Acta Bot. Gall.*, vol. 159, no. 1, pp. 137–143, 2012.

Mekhlouf, H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Hadj Sahraoui, And N. Harkati, "Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride," *Sécheresse (Montrouge)*, vol. 17, no. 4, pp. 507–513, 2006.

- Merah and P. Monneveux, "Contribution of Different Organs to Grain Filling in Durum Wheat under Mediterranean Conditions I. Contribution of Post-Anthesis Photosynthesis and Remobilization," *J. Agron. Crop Sci.*, vol. 201, no. 5, pp. 344–352, 2015.
- Merah O., E. Deléens, and P. Monneveux, "Relationships between carbon isotope discrimination, dry matter production, and harvest index in durum wheat," *J. Plant Physiol.*, vol. 158, no. 6, pp. 723–729, 2001.
- Mizuno, E. Kobayashi, M. Tachibana, T. Kawasaki, T. Fujimura, K. Funane, M. Kobayashi, T. Baba, "Characterization of an Isoform of Rice Starch Branching Enzyme, RBE4, in Developing Seeds", *Plant and Cell Physiology*, 42, P349–357, 2001.
- Mohammadi, B. Sadeghzadeh, and H. Ahmadi, "ScienceDirect Field evaluation of durum wheat landraces for prevailing abiotic and biotic stresses in highland rainfed regions of Iran," *CJ*, vol. 3, no. 5, pp. 423–433, 2015.
- Monneveux and M. Nemmar, "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*, vol. 6, no. 6, pp. 583–590, 1986.
- Monneveux, D. Rekika, E. Acevedo, and O. Merah, "Effect of drought on leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, transpiration efficiency and productivity in field grown durum wheat genotypes," *Plant Sci.*, vol. 170, no. 4, pp. 867–872, 2006.
- Moralejo M., C. Royo, M. Moragues, and L. F. Garcá, "Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the Mediterranean basin I : Yield components," *F. Crop. Res.*, vol. 95, pp. 194–205, 2006.
- Moud and K. Maghsoudi, "Salt Stress Effects on Respiration and Growth of Germinated Seeds of Different Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars.," *World J. Agric. ...*, vol. 4, no. 3, pp. 351–358, 2008.
- Mukerjea R., L. Yu, and J. F. Robyt, "Starch biosynthesis: Mechanism for the elongation of starch chains," *Carbohydr. Res.*, vol. 337, no. 11, pp. 1015–1022, 2002.
- Muurinen, P. Peltonen-sainio, A. Rajala, K. Hakala, and P. Ma, "Field Crops Research Spring wheat response to timing of water deficit through sink and grain filling capacity," vol. 114, pp. 263–271, 2009.

Œ

- Nakamura, K. Yuki, S. Park, and T. Ohya, "Carbohydrate Metabolism in the Developing Endosperm of Rice Grains," *Plant Cell Physiol.*, vol. 30, no. 6, pp. 833–839, 1989.
- Naville M., "La biodiversité des espèces cultivées : Analyse dans le cas de blé. Université paris". *Boutiques des sciences*, 2005.
- Nielsen A, M. F. Vigil, and W. B. Henry, "Field Crops Research Skip row planting configuration shifts grain sorghum water use under dry conditions," *F. Crop. Res.*, vol. 223, no. January, pp. 66–74, 2018.

P

- Parcevaux S.D., L. Huber. *Bioclimatologie. Concepts et applications*. Editions Quae, 336 p., 2007.

- Ping L. I. U., G. U. O. Wen-shan, P. U. Han-chun, F. Chao-nian, Z. H. U. Xin-kai, and P. Yong-xin, "Effects of High Temperature on Antioxidant Enzymes and Lipid Peroxidation in Flag Leaves of Wheat During Grain Filling Period," vol. 5, pp. 425–430, 2006.
- Prioul L., V. Méchin, and C. Damerval, "Molecular and biochemical mechanisms in maize endosperm development: The role of pyruvate-Pi-dikinase and Opaque-2 in the control of C/N ratio," *Comptes Rendus - Biol.*, vol. 331, no. 10, pp. 772–779, 2008.

R

- Rahman, A.Regina, Z. Li, Y. Mukai, M. Yamamoto, B. Kosar-Hashemi, S. Abrahams, & M. K. Morell, "Comparison of starch-branching enzyme genes reveals evolutionary relationships among isoforms. Characterization of a gene for starch-branching enzyme IIa from the wheat genome donor *Aegilops tauschii* ". *Plant physiology*, 125(3), 1314–1324. 2001.
- Rasheed A., X. Xia, Y. Yan, R. Appels, T. Mahmood, and Z. He, "Wheat seed storage proteins: Advances in molecular genetics, diversity and breeding applications," *J. Cereal Sci.*, vol. 60, no. 1, pp. 11–24, 2014.
- Rassaa N., H. Ben Haj Salah, and K. Latiri, "Thermal responses of Durum wheat *Triticum durum* to early water stress. Consequence on leaf and flower development," *Comptes Rendus - Biol.*, vol. 331, no. 5, pp. 363–371, 2008.
- Royo, K. Ammar, C. Alfaro, S. Dreisigacker, L. Fernando, and D. Villegas, "Field Crops Research Effect of Ppd-1 photoperiod sensitivity genes on dry matter production and allocation in durum wheat," *F. Crop. Res.*, vol. 221, no. March 2017, pp. 358–367, 2018.
- Rydberg, L. Andersson, R. Andersson, P. Åman, and H. Larsson, "Comparison of starch branching enzyme I and ii from potato," *Eur. J. Biochem.*, vol. 268, no. 23, pp. 6140–6145, 2001.

S

- Samarah H., "Review article Methods for studying root colonization by introduced," *Agronomie*, vol. 23, pp. 407–418, 2005.
- Samarah N.H., "Effects of drought stress on growth and yield of barley", *Agron. Sustain. Dev.* 25, 145–149. 2005.
- Sauget. "Développement de matériaux composites fibreux hautes performances à matrice biosourcée". *Thèse de Doctorat, Université de Lorraine*, 2014.
- Saulnier, "Les grains de céréales: diversité et compositions nutritionnelles," *Cah. Nutr. Diet.*, vol. 47, no. 1 SUPPL. 1, pp. S4–S15, 2012.
- Schu M. and A. Fangmeier, "Growth and yield responses of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Minaret) to elevated CO₂ and water limitation," vol. 114, 2001.
- Sestili *et al.*, "Plant Science The down-regulation of the genes encoding Isoamylase 1 alters the starch composition of the durum wheat grain," *Plant Sci.*, vol. 252, pp. 230–238, 2016.
- Sestili, M. Janni, A. Doherty, E. Botticella, R. D'Ovidio, S. Masci, H. D. Jones and D. Lafiandra., "Increasing the amylose content of durum wheat through silencing of the SBEIIa genes.," *BMC Plant Biol.*, vol. 10, p. 144, 2010.

- Shewry P. R. and N. G. Halford, "Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization.," *J. Exp. Bot.*, vol. 53, no. 370, pp. 947–958, 2002.
- Shewry R., A. S. Tatham, J. Forde, M. Kreis, and B. J. Mifflin, "The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment". *Journal of Cereal Science*, 4, 97-106, 1986.
- Simon H., P. Codaccioni, X. Lecoœur, "Produire des céréales à paille". *Technique et documentation*, 333p. 1989.
- Singletary W., "Starch synthesis and grain filling in wheat," *Dev. Crop Sci.*, vol. 26, pp. 79–105, 2000.
- Slafer and R. Savin, "Source-sink relationships and grain mass at different positions within the spike in wheat," *F. Crop. Res.*, vol. 37, pp. 39–49, 1994.
- Slama A., M. Ben Salem, M. Ben Naceur, E. Zid, "Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance". Article De Recherche, 16 : 225-9, 2005.
- Soar C.J., B.R. Loveys, "The effect of changing patterns in soil-moisture availability on grapevine root distribution, and viticultural implications for converting full- cover irrigation into a point-source irrigation system". *Australian Journal of Grape & Wine Research*, 13:pp 2-13. 2007.
- Surget, Barron C., 2005. "Histologie du grain de blé", *Association pour le progrès des industries céréalières*, Paris: pp 3-7.

Ɔ

- Thitisaksakul M., Maysaya, Tananuwong, Kanitha, Shoemaker, Charles F., Chun, Areum, Tanadul, Orn U Ma, Labavitch, John M., Beckles, "Effects of timing and severity of salinity stress on rice (*Oryza sativa* L.) yield, grain composition, and starch functionality," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 63, no. 8, pp. 2296–2304, 2015.
- Triboi and A. M. Triboi-Blondel, "Productivity and grain or seed composition: A new approach to an old problem - Invited paper," *Eur. J. Agron.*, vol. 16, no. 3, pp. 163–186, 2002.

Ɔ

- Vahamidis P., A. Stefopoulou, V. Kotoulas, and D. Lyra, "Field Crops Research Yield , grain size , protein content and water use efficiency of null-LOX malt barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem," *F. Crop. Res.*, vol. 206, pp. 115–127, 2017.
- Van Der Borgh, H. Goesaert, W. S. Veraverbeke, and J. A. Delcour, "Fractionation of wheat and wheat flour into starch and gluten: Overview of the main processes and the factors involved," *J. Cereal Sci.*, vol. 41, no. 3, pp. 221–237, 2005.

Ɔ

- Wahbi A and S. A. Shaaban, "Relationship between carbon isotope discrimination ($\delta^{13}C$), yield and water use efficiency of durum wheat in Northern Syria," *Agric. Water Manag.*, vol. 98, no. 12, pp. 1856–1866, 2011.
- Wang F., A. Sanz, M. L. Brenner, and A. Smith, "Sucrose Synthase, Starch Accumulation, and Tomato Fruit Sink Strength," *Plant Physiol*, vol. 101, no. 1, pp. 321–327, 1993.

Xu L., H. bin Tao, P. Wang, and Z. lin Wang, "Slight shading after anthesis increases photosynthetic productivity and grain yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) due to the delaying of leaf senescence," *J. Integr. Agric.*, vol. 15, no. 1, pp. 63–75, 2016.

ㄚ

Yang J., J. Zhang, Z. Wang, G. Xu, and Q. Zhu, "Activities of Key Enzymes in Sucrose-to-Starch Conversion in Wheat Grains Subjected to Water Deficit during Grain Filling 1," vol. 135, no. July, pp. 1621–1629, 2004.

Yang, J., et Zhang, J. "Grain filling of cereals under soil drying", *New Phytologist* 169: 223–236. 2006.

Yi R. D., Bing, Zhou, Yu Fei, Gao, Ming Yue, Zhang, Zhuang, Han, Yi, Yang, Guang Dong, Xu, Wenjuan, Huang, "Effect of drought stress during flowering stage on starch accumulation and starch synthesis enzymes in sorghum grains," *J. Integr. Agric.*, vol. 13, no. 11, pp. 2399–2406, 2014..

Ying-hua, S. U. N. Na-na, H. Jia-pei, Z. Qi, W. Chao, and X. U. E. Qing-wu, "Effect of Source-Sink Manipulation on Photosynthetic Characteristics of Flag Leaf and the Remobilization of Dry Mass and Nitrogen in Vegetative Organs of Wheat," *J. Integr. Agric.*, vol. 13, no. 8, pp. 1680–1690, 2014.

ㄓ

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

Zerrad,, B. S. Maataoui,, S. Hilali,, L. D. Biochimie,, T. D. Mohammedia, T. D. Settata, Etude Comparative Des Mécanismes Biochimiques De Résistance Au Stress, 9(2), 27–36, 2008.

Zhongyi Li M. K. M., Greg Mouille, Behjat Kosar-Hashemi, Sadequr Rahman, Bryan Clarke, Kevin R. Gale, Rudi Appels, "The Structure and Expression of the Wheat Starch Synthase III Gene. Motifs in the Expressed Gene Define the Lineage of the Starch Synthase III Gene Family," *Plant Physiol.*, vol. 123, no. 2, pp. 613–624, 2000.

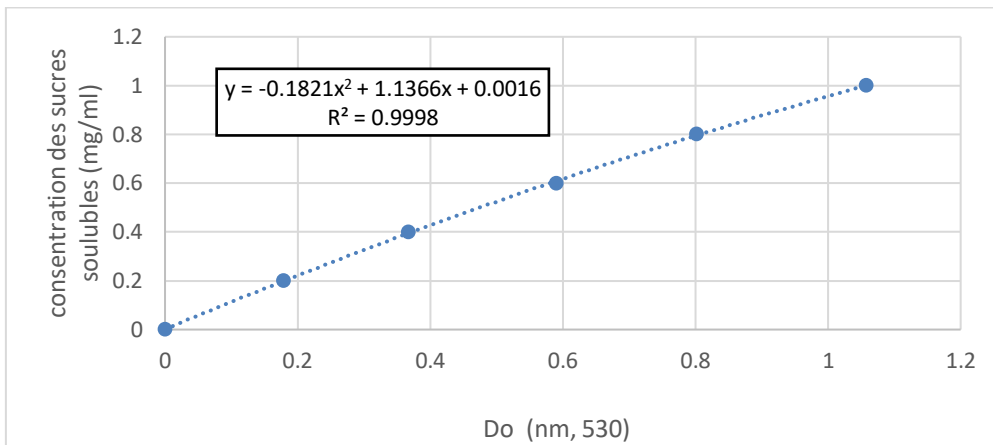
Annexes

Annexe 01 : quelques photos des stades de developpement de la plante

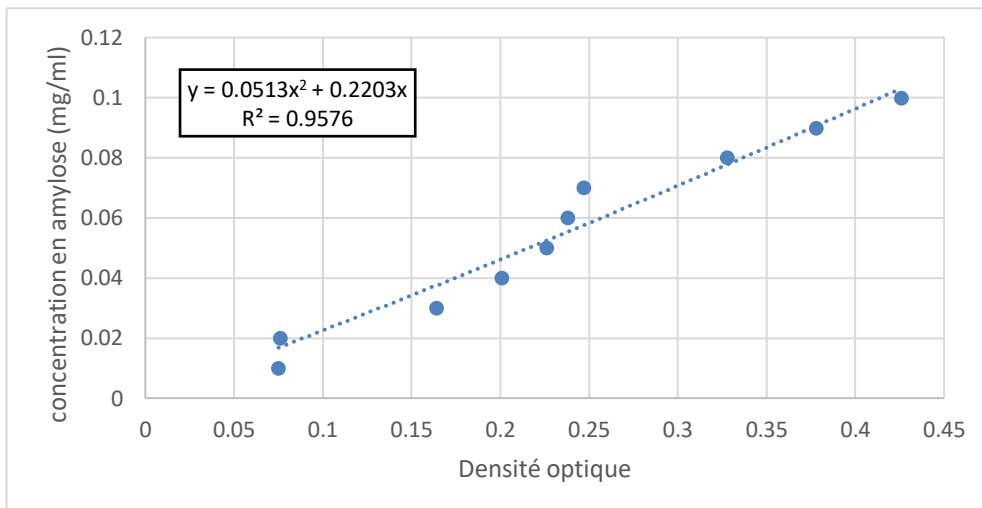


Annexe 02 : Courbes d'étalonnage des différents éléments dosés

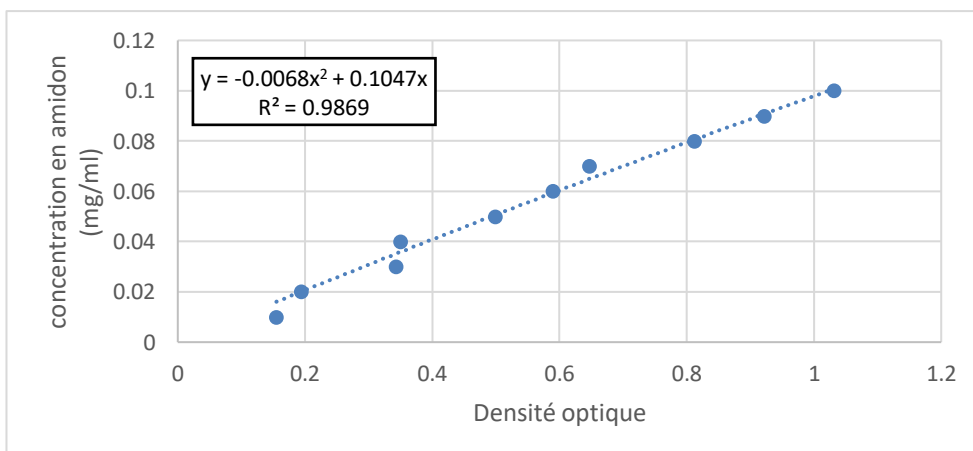
1. Courbe d'étalonnage des sucres solubles



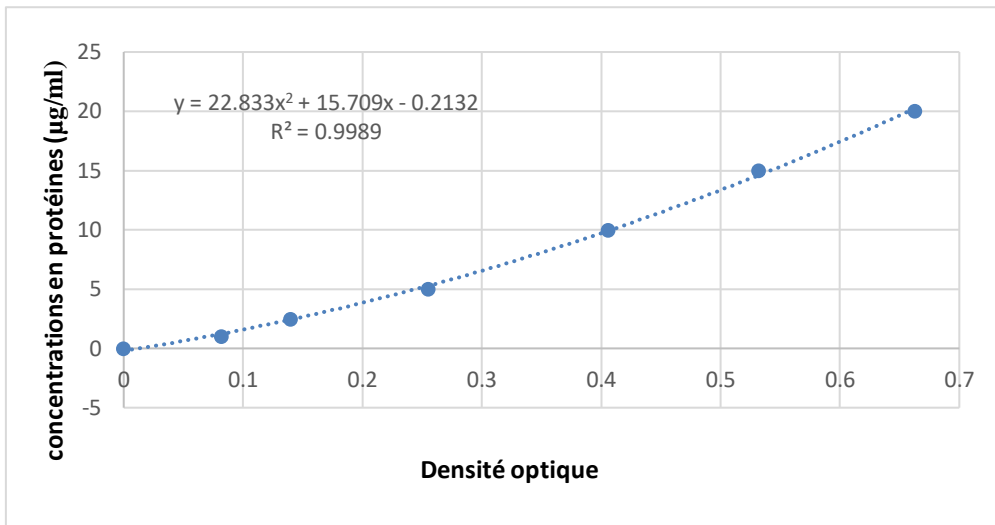
2. Courbe d'étalonnage de l'amylose



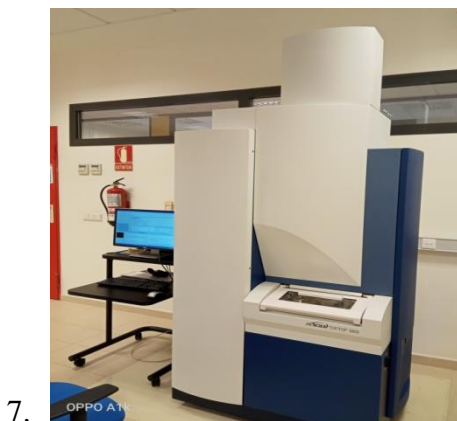
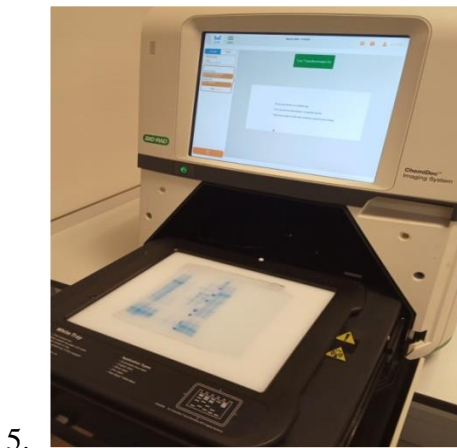
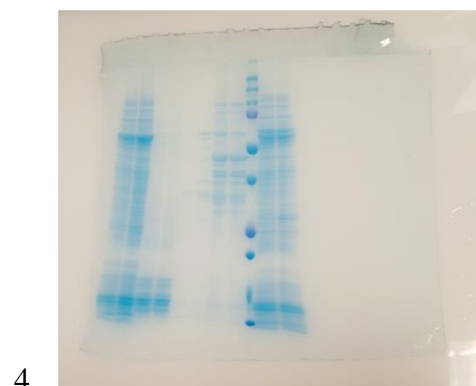
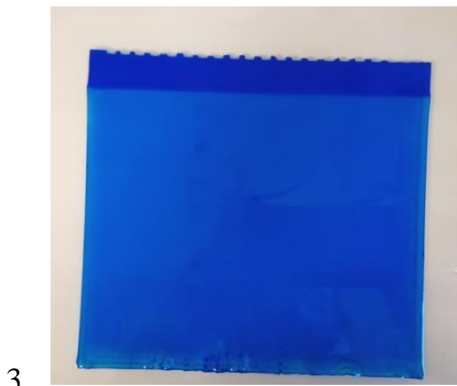
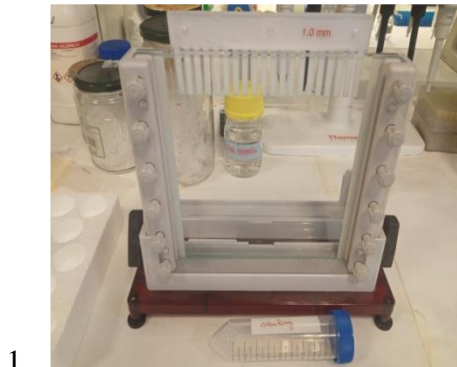
3. Courbe d'étalonnage de l'amidon



4. Courbe d'étalonnage des proteines totaux



Annexe 03 : 1- La preparation du gel protéique, 2- la migration, 3,4- la coloration et la décoloration avec la solution de distinction, 5,6- le système d'imagerie ChemiDoc (Bio-Rad), 7- le découpeur automatique EXQuest Spot (Bio-Rad), 8- spectrométrie de masse MALDI-TOF (Bruker Daltonics)



CONTRIBUTION OF CURRENT PHOTOSYNTHESIS AND RESERVES REMOBILIZATION IN GRAIN FILLING AND ITS COMPOSITION OF DURUM WHEAT UNDER DIFFERENT WATER REGIMES

Assia Bouzid¹, Ali Arous², Oum Cheikh Felouah¹, Othmane Merah^{3,4},
Ahmed Adda¹

¹ Laboratory of Agro-biotechnology and Nutrition in Semi Arid Zones, Department of Nature and Life Sciences, University Ibn Khaldoun of Tiaret, 14000, Algeria

² Laboratory of Research ERP, Department of Biology, University Djilali Bounaama of Khemis Miliana, 44225, Algeria

³ University of Paul Sabatier, IUT A, Department of Biological Engineering, 32000 Auch, France

⁴ Laboratory of Agro Industrial Chemistry, LCA, University of Toulouse, INRA, 31030 Toulouse, France

Link to this article: <https://doi.org/10.11118/actaun202068060937>

Received: 22. 12. 2019, Accepted: 24. 11. 2020

To cite this article: BOUZID ASSIA, AROUS ALI, FELOUAH OUM CHEIKH, MERAH OTHMANE, ADDA AHMED. 2020. Contribution of Current Photosynthesis and Reserves Remobilization in Grain Filling and Its Composition of Durum Wheat Under Different Water Regimes. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 68(6): 937–945.

Abstract

In Algeria, drought affects grain weight and modified its biochemical composition. The present study was conducted to evaluate the effect of two water supplies (100% FC, 30% FC) on grain weight and composition of five genotypes of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). We also examined the effects of shading of peduncle, spike and the entire plant and excision of awns, flag leaves and foliar system on grain weight, starch and amylose/amylopectin ratio. From this study, we found that grain weight was significantly reduced by the application of water deficit. However, this action is greatly related to genotype type. It is admitted that this trait is strongly conditioned by the grain filling process. The morphological characteristics of plants were implicated to grain weight elaboration. Among organs studied, the photosynthetic rate of spike and reserves remobilization from stem announced determinant in grain filling.

We found also that starch content which is associated to amylose/amylopectin ratio is strongly related to grain weight. Finally, grain weight variations were associated to starch content and mainly related to the water supply condition.

Keywords: durum wheat, drought, grain weight, starch, amylose/amylopectin ratio, photosynthetic activity, remobilization

INTRODUCTION

The drought is a major cause of reduced cereals crops productivity and quality worldwide (Merah *et al.*, 2001; Mohammadi *et al.*, 2015; Boudjabi *et al.*, 2017). This is particularly true under Mediterranean zones where plants are subject to low and irregular rainfall.

In Algeria, the cereal growing area is localized in semi-arid bioclimatic zones. These areas are often subject to the effects of high temperature coupled with low rainfall occurring during grain formation, affecting its filling and quality (Samarah and Alqudah, 2011; Dettori *et al.*, 2017).

Most of studies shows that drought tolerance were associated to several morphological, physiological and biochemical characteristics and plants responded to drought through many modifications occurring in all plant organs (El Hafid *et al.*, 1998; Adda *et al.*, 2005; Monneveux *et al.*, 2006; Zerrad *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2010; Megherbi *et al.*, 2012). Among these studies, little is known about effects of drought on grain filling and its quality.

According to Flagella *et al.* (2010), drought influence on grain composition and its technological quality depends on stress level and timing of occurrence. It has been confirmed, that the reproductive stage is the most sensitive for water deficit (Nielsen *et al.*, 2018). During the grain filling period, the source of assimilates is the current photosynthesis except that it is conditioned by the longevity of different organ's involved. Otherwise, re-mobilization of reserves, source of nutriment is considered to be important. Indeed, for durum wheat, grain growth is supported by transient photosynthesis and translocation of stored reserves accumulated in green organs prior to flowering (Maydup *et al.*, 2012; Royo *et al.*, 2018).

Grains weight is closely related to the pattern of seed growth and the deposition of two main compounds, starch and proteins. Studies show that post-anthesis drought affects these process (Muurinen *et al.*, 2009) by decreasing the participation of green parts of plant (Mahpara *et al.*, 2015). Starch accumulation in endosperm it comprises from 65% to 75% of final dry weight (Yang *et al.*, 2004) and it varies markedly among cultivars and water supply (Yi *et al.*, 2014).

Carbon fixed in green leaves is translocated to the sink organs and converted to starch (Nakamura *et al.*, 1989). This insoluble polyglucane is mixture of two glucose polymers, amylose and amylopectine (Dian *et al.*, 2003). Amylopectin constitutes 70–80% of total starch, containing linear chains of various degree of polymerization (Bul on *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2000). Drought stress occurring during early stage of grain development decrease grains sink potential by reducing the number of endosperm cells and amyloplasts formed (Yang and Zhang, 2006).

To date, some works on the dynamics of starch formation and the accumulation of reserves during the development of durum wheat have been published. But the effect of water deficit during the growing stage of wheat plants and the results on seeds composition especially starch, amylose and yields components has remained unclear. According to some studies (Alqudah *et al.*, 2011; Gaju *et al.*, 2014), effects of the environment on grain formation and its quality elaboration remain largely related to the nature of the cultivars studied. An additional problem is the difficulty to control the effect of genotypic variations, drought and organs participations under uncontrolled environmental conditions.

The main objectives of our study, is to elucidate the water deficit effect of the grain final weight and its starch content. The amylose/amylopectin ratio of starch is determined. The present study is also interested in the implication of different plant organs in these processes. Therefore, different genotypes were conducted under different water supply in controlled conditions

MATERIALS AND METHODS

Plant Materials

The study used five durum wheat genotypes (*Triticum durum* Desf.) different by their origin and the degree of tolerance to water deficit, among them, OUED ZENATI, LANGLOIS are landrace and WAHA, ACSAD1361, MEXICALI75, are advanced line (Tab. I).

I: List of the durum wheat genotypes used in this study

Genotypes	Origin	Type
1. ACSAD1361	ACSAD (Syria)	Advanced line
2. LANGLOIS	Algeria	Landrace
3. MEXICALI75	CIMMYT	Advanced line
4. OUED ZENATI	Algeria	Landrace
5. WAHA	ICARDA (Syria)	Advanced line

Experimental Set-up and Plant Treatments

A greenhouse experiment was conducted at Ibn Khaldoun University of Tiaret, Algeria, (34°04'; 35°11'N, 1° 33' and 1°53'E). A randomized complete block design was used with two blocks. In each block, five replicates for each genotype were used and four plants were planted per cylinder. Sterilized seeds were pre-germinated. Then, the seedlings were grown in PVC cylinders, 120 cm high and 16 cm in diameter, filled with a mixture of sand, soil and organic dry matter (8:3:1). Plants were maintained at field capacity. At anthesis, controlled plants were conducted at 100% of field capacity until complete maturity. For other treatment, plants received 30% of field capacity.

After anthesis, six treatments were applied to investigate the influence of some organs of plant on grain weight and its composition (Fig. 1).

Measurements

Measurements of Morphological Characteristics of Five Genotypes Used

At maturity, the data of the following parameters of controlled plants growing under 100% as plant height (m), last internode length (m), peduncle length (m) and width (mm), spike length (m), awns length (mm) and width (mm) were observed.



1: Treatment of excision and shading: 1. Plant control, 2. Plant with excised awns, 3. Plant with excised flag leaf, 4. Plant with whole foliar system excised, 5. Plant with shaded peduncle, 6. Plant with shaded spike, 7. Entire plant shaded

Effect of Water Supply and Treatment on Grain Weight and Its Quality

At maturity, plants of each treatment were harvested. 30 grains were weighted per treatment (organs treatment and water supply condition) so grain weight was determined.

Starch and Amylose content of wheat grains were carried out following the procedure of Thivend *et al.* (1965) reported by Lanouari *et al.* (2015). Approximately 100 mg of grounded durum wheat grains were steeped in 5 ml of 1N KOH. The above solution was neutralized with 5 ml of 1N HCl, and placed in a boiling water bath for 15 min, then centrifuged at 3000 xg for 10 min; the supernatant was incubated with I₂KI reagent to measure starch and amylose content. A blank was prepared in the presence of standard starch and analyzed under the same conditions. The color read with Spectrophotometer (UV-1600PC-VWR) at 580 and 720 nm for starch and amylose respectively. Both starch and amylose were calculated from the standard curve developed by using following the above mentioned method and expressed in g.100g⁻¹ of dry matter. The spectral difference is intended to dose amylopectin. The ratio amylose/amylopectin was determined.

Statistical Analysis

All data were subjected to analysis of variance and correlations using STATISTICA 0.8 with ANOVA. Comparisons between the main morphological

characteristics of the five studied genotypes were based the Duncan test at 5% probability level.

RESULTS

Morphological Characteristics of Genotypes Used

Tab. II summarize results of morphological traits such as plants height, last internodes length, peduncles length and width, spikes length, awns length and width. These selected morphological traits were very distinct among genotypes studied. A significant difference in plant height was noticed between local and advanced lines. Genotypes are divided into two groups. First group assemble those called high straw represented by OUED ZENATI and LANGLOIS with 1.511 m and 1.527 m respectively. Second groups include introduced genotypes where values ranged from 0.892 m (ACSAD1361) to 0.998 m (MEXICALI75). Last internodes length values rang from low value of 0.373 m obtained by WAHA to high value of 0.554 m registered by LANGLOIS. Slight variations were noticed for peduncle length, values of this letter varied between 0.203 m and 0.238 m respectively for ACSAD1361 and MEXICALI75. Peduncle width showed a high difference between the study genotypes, values ranged from 2.03 mm by ACSAD1361 to 2.43 mm by LANGLOIS. For spike length, values ranges from low value of 0.066 m (WAHA) to high value of

II: Means values of the main morphological characteristics of the five studied genotypes. For each trait, means followed by a different letter are significantly different by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$.

Genotype	Plant height (m)	Last internode length (m)	Peduncle length (m)	Peduncle width (mm)	Spike length (m)	Awn length (m)	Awn width (mm)
ACSAD1361	0.892 ^a	0.407 ^{ab}	0.203 ^b	2.03 ^a	0.071 ^a	0.158 ^a	0.40 ^{ab}
LANGLOIS	1.527 ^b	0.554 ^d	0.233 ^a	2.43 ^c	0.084 ^b	0.191 ^c	0.51 ^a
MEXICALI75	0.998 ^a	0.440 ^b	0.238 ^a	2.37 ^{bc}	0.070 ^a	0.147 ^a	0.47 ^{ab}
OUED ZENATI	1.511 ^b	0.491 ^c	0.232 ^{ab}	2.06 ^{ab}	0.070 ^a	0.134 ^{ab}	0.51 ^a
WAHA	0.961 ^a	0.373 ^a	0.212 ^{ab}	2.19 ^{abc}	0.066 ^a	0.109 ^b	0.31 ^b

0.084 m (LANGLOIS). Values of awns length ranged from 0.109 m to 0.191 m for WAHA and LANGLOIS respectively.

Effects of Water Supply and Sink-Source Modification (Shading and Excision) on Grain Weight

The ANOVA revealed significant effects among genotypes, organs treatments and water supply conditions on grain weight (Tab. III). Organs contributions to this trait were made by comparing the grain weight average of plant control and those obtained in the other treatments in each genotype under each water supply condition (Tab. IV). For the control plant (plant witness) grown under 100% of field capacity, values of grain weight were noticed very high, ranging from 1.42 g (WAHA) to 2.01 g (LANGLOIS). At 30% FC, mean values were lower ranging from 1.03 g for MEXICALI75 to 1.69 g for LANGLOIS.

For all genotypes obtained under 100% FC, values of grain weight of plants, witness and treated by shading and excision were significantly higher than plants leaded to 30% FC. Also, photosynthesis and reserve's remobilization lead to different values (Tab. III).

Grain weight means of shaded plants were significantly lower and values are between 0.590 g and 0.275 g for WAHA and MEXICALI75 respectively.

At 30% FC, the highest value was recorded by WAHA with 0.445 g. Spike's shading of local genotype reduces grain weight to 1.148 g for LANGLOIS followed by OUED ZENATI with 0.858 g at 100% FC. For introducing genotypes, values were lower and limited between 0.945 g (MEXICALI75) and 0.988 g (WAHA). This reduction increase due to water deficit and records values between 0.560 g (LANGLOIS) and 0.186 g (MEXICALI75) at 30% FC.

Flag leaf excision lead to values comprised between 1.930 g (LANGLOIS) and 1.181 g (MEXICALI75) respectively. With the increase of water deficit (30% FC), the highest values were recorded by OUED ZENATI (1.437 g).

Awns excision affects significantly this trait. At 100% FC, values rang from 1.915 g and 1.113 g for LANGLOIS and ACSAD1361 respectively. At 30% FC, values were comprised between 1.380 g and 0.783 g for the same genotypes respectively.

Means values of grains weight of plants with shaded peduncle growing at optimal conditions of water supply were limited between 1.738 g (LANGLOIS) and 1.261 g (WAHA). At 30%, values were limited between 1.520 g for LANGLOIS and 0.882 g for MEXICALI75.

Finally, the different foliage stages record reduction values ranging from 1.878 g at 100% FC, to 1.427 g at 30% FC for genotype LANGLOIS.

III: Effects of water supply, genotype, organs treatments and their interactions on the grain weight per spike measured on five genotypes grown under three water treatments (100% FC, 30% FC)

	Genotype	Water supply	Treatments	Genotype × water supply	Genotype × treatment
Grain weight	215.94***	810.44***	499.06***	8.12***	8.90***

***, ** Significant at 0.1% and 1% of probability levels

IV: Mean values of grain weight (g) measured on five genotypes grown under two water supply (100% FC, 30% FC) and the different plants treatment (shading and excision). The standards errors are also displayed.

Treatments	Water supply (% FC)	ACSAD1361	LANGLOIS	MEXICALI75	OUED ZENATI	WAHA
Shaded peduncle	100	1.376 ± 0.028	1.738 ± 0.014	1.432 ± 0.021	1.652 ± 0.014	1.261 ± 0.011
	30	0.942 ± 0.016	1.520 ± 0.009	0.882 ± 0.000	1.186 ± 0.096	0.985 ± 0.095
Shaded plant	100	0.330 ± 0.016	0.571 ± 0.075	0.275 ± 0.005	0.549 ± 0.062	0.590 ± 0.036
	30	0.282 ± 0.013	0.560 ± 0.012	0.186 ± 0.015	0.486 ± 0.029	0.445 ± 0.025
Shaded spike	100	0.959 ± 0.027	1.148 ± 0.055	0.945 ± 0.021	0.858 ± 0.011	0.988 ± 0.032
	30	0.545 ± 0.032	0.603 ± 0.016	0.648 ± 0.054	0.766 ± 0.057	0.773 ± 0.045
Plants witnesses	100	1.511 ± 0.021	2.016 ± 0.014	1.533 ± 0.007	1.675 ± 0.017	1.489 ± 0.023
	30	1.075 ± 0.008	1.625 ± 0.025	1.009 ± 0.037	1.336 ± 0.071	1.213 ± 0.052
Excised awns	100	1.311 ± 0.033	1.915 ± 0.024	1.427 ± 0.035	1.530 ± 0.021	1.313 ± 0.010
	30	0.783 ± 0.061	1.380 ± 0.050	0.785 ± 0.012	0.862 ± 0.030	1.014 ± 0.052
Excised flag leaf	100	1.196 ± 0.043	1.930 ± 0.039	1.181 ± 0.037	1.582 ± 0.039	1.271 ± 0.086
	30	0.984 ± 0.027	1.437 ± 0.044	0.862 ± 0.049	1.017 ± 0.034	1.131 ± 0.033
Excised foliar system	100	1.075 ± 0.005	1.878 ± 0.027	1.116 ± 0.041	1.529 ± 0.074	1.156 ± 0.063
	30	0.815 ± 0.061	1.427 ± 0.062	0.850 ± 0.018	1.005 ± 0.055	1.049 ± 0.011

Effects of Water Supply and Sink-Source Modification on Grain Starch, Amylose/Amylopectin Ratio

Results analysis (Tab. V) shows that the effects of genotypic variability and water treatment applied were highly significant for all measured traits ($p < 0.001$). The interaction of these two factors indicates that genotypes used in this study responded differently following the water supply condition and shading/excision treatments. The mean values of starch content in mature grains expressed on $\text{g}\cdot 100^{-1}$ of DM and Amylose/Amylopectin ratio in different water supply conditions, and among five genotypes with shading/excision treatments were presented in Tab. VI.

For controlled plant and under well watered conditions, genotypes MEXICALI75, OUED ZENATI and LANGLOIS were characterized by a high value of starch, amylose/amylopectin ratio were 0.57, 0.64 and 1.07 respectively. Low value was recorded by ACSAD1361 of $22.9 \text{ g}\cdot 100^{-1}$ of DM. with $r(\text{AM}/\text{AP}) = 0.58$.

At 30% FC, higher values of starch were recorded by OUED ZENATI and MEXICALI75 with 72.50 and $60.26 \text{ g}\cdot 100^{-1}$ of DM respectively with a high fraction of amylopectin.

Among the analyzed samples, some differences in the relative amounts of starch, amylose and amylopectin content were observed among genotype due to shading and excision treatments. The results of this study indicated that great variations could be ascribed to different water supply conditions contributing to total variations of amylose and amylopectin fraction content in starch where the percentages of each fraction changed with water situation applied.

In our study, starch amount of grains were affected by peduncle shading particularly under 30% FC, for both advanced line and landrace. Values of starch were considered low comparing with grains from treatment of 100% FC. At 30% FC, starch was significantly composed for high content of amylopectin. Shading and excision relatively affect the ratio of amylose/amylopectin of starch. In general, for all treatment, the application of water stress at level of 30% FC reduces amylose and increase amylopectin fraction. The exception was noticed for genotype LANGLOIS, for both treatments of plant shading and awns excision.

Otherwise, starch was affected by spike shading. Thus, for advanced line the decrease in starch amount was highly associated with increase in water deficit applied (Tab. VI). The effect of spike shading on amylose content in starch was significant and values were lower than other treatments. Among all cultivars and at 100% FC, shading of plant caused a strong decrease in starch amount and this rate is more accentuated for MEXICALI75. Values of starch in plant without awns were similar to control plant except that highest values of starch were noticed for landrace cultivars under 30% FC for this treatment. Excision of foliage system caused $\frac{1}{2}$ reduction of starch at 100% FC. At 100% FC, advanced lines registered a mean of $25.2 \text{ g}\cdot 100^{-1}$ of DM where landraces give a mean of $47.1 \text{ g}\cdot 100^{-1}$ of DM from all plant leaves, excision of flag leaf affected starch amount significantly, at 100% FC, landrace registered $58.7 \text{ g}\cdot 100^{-1}$ of DM, and this value was reduced to $38.7 \text{ g}\cdot 100^{-1}$ of DM at 30% FC. Flag leaf excision increase the amylose and decrease amylopectin content in starch for both water treatments 100% and 30% FC for genotype ACSAD1361.

DISCUSSION

In this study, we founded that the variation of durum wheat grain weight is significantly correlated to water supply conditions ($r = -0.39^{**}$). Thus, the application of water stress at anthesis negatively affects the values of grain weight (Tab. VII). According to Alqudah *et al.* (2011), this could be due to accelerated days of flowering, shorter duration of grain filling and lower accumulation of dry matter. Troccoli *et al.* (2000), confirmed that abiotic environmental factors are considered to be the main source (71%) of yield reduction.

Our results show that the effect of water deficit on grain weight also depends on the genetic variability and the contribution of vegetative organs by their assimilates after anthesis (Tab. VII). According to some authors, The development of grain weight results from photosynthetic activity of various organs, mainly the flag leaves (Merah, Monneveux, 2015; Ying-Hua *et al.*, 2014; Blandino *et al.*, 2009), peduncles (Li *et al.*, 2010), spikes (Gaju *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2016) and awns (Maydup *et al.*, 2014; Merah, Monneveux, 2015).

V: Effects of water supply, genotype, organs treatments and their interactions on the starch, amylose and amylopectin contents in mature grain measured on five genotypes grown under three water treatments (100% FC, 30% FC)

	Genotype	Water supply	Treatments	Genotype \times water supply	Genotype \times treatment
Starch content	170.97***	18.46***	78.93***	90.65***	37.53***
Amylose content	117.89***	10.56***	23.56***	44.92***	26.88***
Amylopectine content	74.69***	8.86***	61.93***	62.79***	20.11***

*** Significant at 0.1% of probability level

VI: Mean values of starch content and amylose/amylopectin ratio in mature grain measured on five genotypes grown under two water treatments (100% FC, 30% FC). Treatment of shading and excision were applied at anthesis and powders from mature grain were analyzed.

Starch (g.100g ⁻¹ of DM)	Water supply (%FC)		Control		SP		SPL		SS		EA		EFL		EFS	
	Mean	Ratio	Mean	Ratio	Mean	Ratio	Mean	Ratio	Mean	Ratio	Mean	Ratio	Mean	Ratio	Mean	Ratio
ACSAD1361	100	22,933 ± 1,543	0.58	14,400 ± 0,980	1.50	33,200 ± 1,617	0.42	6,400 ± 0,231	1.51	31,000 ± 1,337	0.76	24,356 ± 1,420	0.85	35,200 ± 1,592	0.51	0.51
	30	25,600 ± 0,854	0.40	62,400 ± 0,533	0.69	14,867 ± 0,900	0.65	15,200 ± 1,903	0.57	11,200 ± 1,579	0.24	97,600 ± 0,654	0.46	50,933 ± 0,399	0.34	0.34
LANGLOIS	100	67,022 ± 2,294	1.07	84,600 ± 2,580	0.51	38,400 ± 2,847	0.45	49,600 ± 0,654	1.05	29,200 ± 1,388	0.63	54,400 ± 1,619	0.46	48,800 ± 0,854	1.03	1.03
	30	17,067 ± 1,037	0.80	87,200 ± 3,266	0.74	32,200 ± 0,600	0.24	73,045 ± 2,832	1.89	88,800 ± 0,952	0.76	17,307 ± 0,741	1.51	86,538 ± 2,554	1.00	1.00
MEXICALI75	100	72,711 ± 2,616	0.57	51,467 ± 2,778	0.60	14,400 ± 0,653	1.11	21,600 ± 1,699	1.22	50,200 ± 1,133	0.69	28,400 ± 0,400	0.68	22,933 ± 1,135	0.91	0.91
	30	60,267 ± 2,620	0.70	79,200 ± 2,040	0.57	66,133 ± 1,147	0.88	26,666 ± 0,857	0.91	50,400 ± 0,925	0.35	64,600 ± 3,800	0.22	46,800 ± 3,926	0.35	0.35
OUED ZENATI	100	92,711 ± 1,997	0.64	80,978 ± 1,708	0.48	29,867 ± 1,676	0.25	15,667 ± 1,224	0.83	85,200 ± 1,449	0.40	62,967 ± 0,702	0.83	45,333 ± 1,815	0.54	0.54
	30	72,504 ± 1,229	0.82	45,400 ± 1,305	0.80	76,800 ± 0,494	0.41	54,667 ± 3,491	0.73	56,000 ± 0,825	1.08	64,000 ± 1,394	0.69	71,315 ± 1,103	0.88	0.88
WAHA	100	51,200 ± 1,633	0.30	93,500 ± 1,900	0.45	69,600 ± 1,942	0.57	53,200 ± 2,078	0.61	44,000 ± 1,307	0.97	33,867 ± 1,148	1.36	17,400 ± 1,400	2.42	2.42
	30	21,333 ± 0,074	0.47	37,530 ± 0,550	0.61	28,600 ± 1,925	1.34	15,200 ± 0,327	0.78	33,600 ± 1,932	0.69	29,600 ± 0,771	0.12	23,400 ± 1,793	0.29	0.29

SP: shaded peduncle, SS: shaded spike, SPL: shaded plant, EA: excised awns, EFL: excised flag leaf, EFS: excised foliar system

VII: Relationship between water deficit, genotype and treatment with the measured traits

Factors of variation	Water supply	Genotype	Treatments	Grain weight	Starch content
Genotype	0.00				
Treatments	0.00	0.00			
Grain weight	-0.39**	-0.02	0.34**		
Starch content	0.07	0.12	-0.01	0.25*	
Amylose/amylopectin ratio	-0.11	0.01	-0.06	0.03	-0.19*

VIII: Relationship between water deficit, genotype and treatment with the measured traits

Factors of variation	Water supply	Genotype	Treatments	Grain weight	Starch content
Genotype	0.00				
Treatments	0.00	0.00			
Grain weight	-0.39**	-0.02	0.34**		
Starch content	0.07	0.12	-0.01	0.25*	
Amylose/amylopectin ratio	-0.11	0.01	-0.06	0.03	-0.19*

In our study, the difference observed between watered and dry condition. In fact, under limited water conditions, the contribution of spikes by their current photosynthesis provides the largest reserves to grains. This is confirmed by the work of Maydup *et al.* (2014), which shows the importance of the components of spikes in grain development. The influence of awns excision on grain weight under these conditions also appears significant. Many works (Bort *et al.*, 1994; Maydup *et al.*, 2014) have reported the importance of awns in grain formation in cereals and confirmed by the decline in grain weight in our experiment due to awns excision (Tab. III). Participation of assimilates provides from flag leaves and leaves system to final grain weight were limited, we can explain this results by the limitation in organs longevity specially those under the last internodes when leaves photosynthesis decline during grains filling. These results were similar to those found by Merah and Monneveux (2015).

Under water deficit, the photosynthetic activity is limited by longevity of implicated organs. Consequently, in this work, the reserve's

remobilization constitutes the important source of grain filling and its quality elaboration (Ying-Hua *et al.*, 2014; Merah and Monneveux, 2015). Our results indicated the complexity of the effect of drought stress on grains composition, and how different plant organ may's conditioned the starch structure.

After shading and excision treatment, the variation in starch follows the same tendency of grain weight among genotypes. We notice significant changes in amylose/amylopectin ratio. As expected, changes in starch amount and amylose/amylopectin content are related to the ability of genotypes to maintain a high accumulation of starch under limited water supply conditions. In fact, our results showed that starch content is related to the grain weight ($r = 0.25^*$), and because this last is highly composed of amylopectin with a low fraction of amylose, a negative correlation was found between amylose/amylopectin ratio and this trait for all used genotype ($r = -0.19^*$). These correlations confirmed that grain weight reduction is associated with changes in grain composition.

CONCLUSION

Durum wheat grain weight was significantly influenced by drought stress. Starch accumulation under optimal condition was significantly important but drought stresses alters this process and results some changes in amylose/amylopectin ratio. Shading and excision treatments affect all measured traits. The major decrease in grain yield was due to shading of entire plant followed by spike and peduncle shading. We retain average effects of awns and foliar system excision on measured traits. Flag leaf contribution was noticed different from genotype to another. Variations in grains weight were associated to starch content and mainly related to the water supply condition.

REFERENCES

- ADDA, A., SAHNOUNE, M., KAID-HARCH, M. and MERAH, O. 2005. Impact of water deficit intensity on durum wheat seminal roots. *Comptes Rendus - Biologies*, 328(10–11): 918–927.
- ALQUDAH, A. M., SAMARAH, N. H. and MULLEN, R. E. 2011. Drought Stress Effect on Crop Pollination, Seed Set, Yield and Quality. In: LICHTFOUSE, E. (Ed.). *Alternative Farming Systems, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilisation*. Sustainable Agriculture Reviews. Springer, pp. 193–213.
- BLANDINO, M., PILATI, A. and REYNERI, A. 2009. Effect of foliar treatments to durum wheat on flag leaf senescence, grain yield, quality and deoxynivalenol contamination in North Italy. *Field Crops Research*, 114(2): 214–222.
- BORT, J., FEBRERO, A., AMARO, T. and ARAUS, J. 1994. Role of awns in ear water-use efficiency and grain weight in barley. *Agronomie*, 14(2): 133–139.
- BOUDJABI, S., KRIBAA, M. and CHENCHOUNI, H. 2017. Sewage sludge fertilization alleviates drought stress and improves physiological adaptation and yield performances in Durum Wheat (*Triticum durum*): A double-edged sword. *Journal of King Saud University – Science*, 31(3): 336–344.
- BULÉON, A., COLONNA, P., PLANCHOT, V. and BALL, S. 1998. Starch granules: Structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23(2): 85–112.
- DENYER, K. A. Y., JOHNSON, P., ZEEMAN, S. and SMITH, A. M. 2001. The control of amylose synthesis. *Journal of Plant Physiology*, 158(4): 479–487.
- DETTORI, M., CESARACCIO, C. and DUCE, P. 2017. Simulation of climate change impacts on production and phenology of durum wheat in Mediterranean environments using CERES-Wheat model. *Field Crops Research*, 206: 43–53.
- DIAN, W., JIANG, H., CHEN, Q., LIU, F. and WU, P. 2003. Cloning and characterization of the granule-bound starch synthase II gene in rice: Gene expression is regulated by the nitrogen level, sugar and circadian rhythm. *Planta*, 218(2): 261–268.

- EL HAFID, R., SMITH, D. H., KARROU, M. and SAMIR, K. 1998. Morphological attributes associated with early-season drought tolerance in spring durum wheat in a mediterranean environment. *Euphytica*, 101(3): 273–282.
- ERCOLI, L., LULLI, L., MARIOTTI, M., MASONI, A. and ARDUINI, I. 2008. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. *European Journal of Agronomy*, 28(2): 138–147.
- FLAGELLA, Z., GIULIANI, M. M., GIUZIO, L., VOLPI, C. and MASCI, S. 2010. Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. *European Journal of Agronomy*, 33(3): 197–207.
- GAJU, O., REYNOLDS, M. P., SPARKES, D. L., MAYES, S., RIBAS-VARGAS, G., CROSSA, J. and FOULKES, M. J. 2014. Relationships between physiological traits, grain number and yield potential in a wheat DH population of large spike phenotype. *Field Crops Research*, 164(1): 126–135.
- LANOUARI, S., NASSER, B., EL HADDOURY, J. and BENKCHARI, B. 2015. Physico-chemical characterization of the seeds of bread wheat (*Triticum aestivum*) under herbicide treatment with 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid [in French: Caractérisation physico-chimique des graines de blé tendre (*Triticum aestivum*) sous traitement herbicide par l'acide 2, 4-dichlorophénoxyacétique]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 10(2): 604–620.
- LI, H., JIANG, D., WOLLENWEBER, B., DAI, T. and CAO, W. 2010. Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 33(4): 267–275.
- LI, Z., MOUILLE, G., KOSAR-HASHEMI, B., RAHMAN, S., CLARKE, B., GALE, K. R., APPELS, R. and MORELL, M. K. 2000. The Structure and Expression of the Wheat Starch Synthase III Gene. Motifs in the Expressed Gene Define the Lineage of the Starch Synthase III Gene Family. *Plant Physiology*, 123(2): 613–624.
- MAHPARA, S., HUSSAIN, S. T. and FAROOQ, J. 2015. Drought Tolerance Studies in Wheat (*Triticum Aestivum* L.). *Cercetari Agronomice in Moldova*, 47(4): 133–140.
- MAYDUP, M. L., ANTONIETTA, M., GRACIANO, C., GUIAMET, J. J. and TAMBUSI, E. A. 2014. The contribution of the awns of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) to grain filling: Responses to water deficit and the effects of awns on ear temperature and hydraulic conductance. *Field Crops Research*, 167: 102–111.
- MAYDUP, M. L., ANTONIETTA, M., GUIAMET, J. J. and TAMBUSI, E. A. 2012. The contribution of green parts of the ear to grain filling in old and modern cultivars of bread wheat (*Triticum aestivum* L.): Evidence for genetic gains over the past century. *Field Crops Research*, 134: 208–215.
- MAYDUP, M. L., ANTONIETTA, M., GUIAMET, J. J., GRACIANO, C., LÓPEZ, J. R. and TAMBUSI, E. A. 2010. The contribution of ear photosynthesis to grain filling in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research*, 119(1): 48–58.
- MEGHERBI, A., MEHDADI, Z., TOUMI, F., MOUEDDENE, K. and BOUADJRA, S. E. B. 2012. Drought tolerance of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) and identification of morpho-physiological adaptation parameters in the Sidi Bel-Abbès region (Western Algeria) [in French: Tolérance à la sécheresse du blé dur (*Triticum durum* Desf.) et identification des paramètres morpho-physiologiques d'adaptation dans la région de Sidi Bel-Abbès (Algérie occidentale)]. *Acta Botanica Gallica*, 159(1): 137–143.
- MERAH, O. and MONNEVEUX, P. 2015. Contribution of Different Organs to Grain Filling in Durum Wheat under Mediterranean Conditions I. Contribution of Post-Anthesis Photosynthesis and Remobilization. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(5): 344–352.
- MERAH, O., DELEENS, É., TEULAT, B. and MONNEVEUX, P. 2001. Productivity and carbon isotope discrimination in durum wheat organs under a Mediterranean climate. *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Serie III*, 324(1): 51–57.
- MOHAMMADI, R., SADEGHZADEH, B. and AHMADI, H. 2015. Evaluation of durum wheat landraces for prevailing abiotic and biotic stresses in highland rainfed regions of Iran. *Science Direct Field, Cj*, 3(5): 423–433.
- MONNEVEUX, P., REKIKI, D., ACEVEDO, E. and MERAH, O. 2006. Effect of drought on leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, transpiration efficiency and productivity in field grown durum wheat genotypes. *Plant Science*, 170(4): 867–872.
- MUURINEN, S., PELTONEN-SAINIO, P., RAJALA, A., HAKALA, K. and MA, P. 2009. Spring wheat response to timing of water deficit through sink and grain filling capacity. *Field Crops Research*, 114: 263–271.
- NAKAMURA, Y., YUKI, K., PARK, S. and OHYA, T. 1989. Carbohydrate Metabolism in the Developing Endosperm of Rice Grains. *Plant and Cell Physiology*, 30(6): 833–839.
- NIELSEN, D. C., VIGIL, M. F. and HENRY, W. B. 2018. Field Crops Research Skip row planting configuration shifts grain sorghum water use under dry conditions. *Field Crops Research*, 223: 66–74.

- ROYO, C., AMMAR, K., ALFARO, C., DREISIGACKER, S., FERNANDO, L. and VILLEGAS, D. 2018. Field Crops Research Effect of Ppd-1 photoperiod sensitivity genes on dry matter production and allocation in durum wheat. *Field Crops Research*, 221: 358–367.
- SAMARAH, N. and ALQUDAH, A. 2011. Effects of Late-Terminal Drought Stress on Seed Germination and Vigor of Barley (*Hordeum Vulgare* L.). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(1): 27–32.
- THIVEND, P., MERCIER, C. and GUILBOT, A. 1965. Measure of starch in complex media [in French: Dosage de l'amidon dans les milieux complexes]. *Ann Biol Anim Bioch Biophys*, 5(4): 513–526.
- TROCCOLI, A., BORRELLI, G. M., DE VITA, P., FARES, C. and DI FONZO, N. 2000. Durum Wheat Quality: A Multidisciplinary Concept. *Journal of Cereal Science*, 32(2): 99–113.
- XU, C.-L., TAO, H.-B., WANG, P. and WANG, Z.-L. 2016. Slight shading after anthesis increases photosynthetic productivity and grain yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) due to the delaying of leaf senescence. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(1): 63–75.
- YANG, J. and ZHANG, J. 2006. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*, 169(2): 223–236.
- YANG, J., ZHANG, J., WANG, Z., XU, G. and ZHU, Q. 2004. Activities of Key Enzymes in Sucrose-to-Starch Conversion in Wheat Grains Subjected to Water Deficit during Grain Filling. *Plant Physiology*, 135: 1621–1629.
- YI, B., ZHOU, Y. F., GAO, M. Y., ZHANG, Z., HAN, Y., YANG, G. D., XU, W. and HUANG, R. D. 2014. Effect of drought stress during flowering stage on starch accumulation and starch synthesis enzymes in sorghum grains. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(11): 2399–2406.
- YING-HUA, Z., NA-NA, S. U. N., JIA-PEI, H., QI, Z., CHAO, W. and QING-WU, X. U. E. 2014. Effect of Source-Sink Manipulation on Photosynthetic Characteristics of Flag Leaf and the Remobilization of Dry Mass and Nitrogen in Vegetative Organs of Wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(8): 1680–1690.
- ZERRAD, W., MAATAOUI, B. S., HILALI, S., DE BIOCHIMIE, L., DE MOHAMMEDIA, T. and DE SETTAT, T. 2008. Comparative Study of Biochemical Stress Resistance Mechanisms [in French: Etude Comparative des Mécanismes Biochimiques De Resistance au Stress]. *Lebanese Science Journal*, 9(2): 27–36.

Contact information

Assia Bouzid: assia1bouzid@gmail.com
Ali Arous: arousalibio@gmail.com
Oum Cheikh Felouah: felouah.felouah@gmail.com
Othmane Merah: othmane.merah@ensiacet.fr
Ahmed Adda: adda2ahmed@yahoo.fr



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 \(CC BY-NC-ND 4.0\) International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)