



HAL
open science

Caractérisation des variétés de blé tendre libanaises : approches agronomique, biochimique et technologique

Nada Sakr

► **To cite this version:**

Nada Sakr. Caractérisation des variétés de blé tendre libanaises : approches agronomique, biochimique et technologique. Biochimie, Biologie Moléculaire. Université de Picardie Jules Verne, 2021. Français. NNT : 2021AMIE0077 . tel-03953732

HAL Id: tel-03953732

<https://theses.hal.science/tel-03953732v1>

Submitted on 24 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse de Doctorat

Mention Biologie

Spécialité Biochimie

présentée à l'École Doctorale en Sciences, Technologies et Santé (ED 585)

de l'Université de Picardie Jules Verne

NADA SAKR

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

Caractérisation de variétés sélectionnées de blé tendre libanaises : approche agronomique, biochimique et technologique

Soutenue le 6 décembre, après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

M. Fadi KARAM, Professeur, Université Libanaise

M^{me} Hajer AMARA Professeur, INAT, Tunisie

M^{me} Olfa AYED SLAMA Maître de Conférences HDR, INAT, Tunisie

M. Olivier VAN WUYTSWINKEL Professeur, UPJV

M. Thierry AUSSENAC, Enseignant Chercheur HDR, Unilasalle Beauvais

M. Larbi RHAZI, Enseignant Chercheur HDR, Unilasalle Beauvais

Président/Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse



REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé à l'Institut Polytechnique UniLaSalle, sur le site de Beauvais, sous la direction de Messieurs Thierry AUSSENAC et Larbi RHAZI.

En premier lieu, je tiens à remercier mes directeurs, Messieurs Thierry AUSSENAC et Larbi RHAZI pour m'avoir accueillie au sein de leur unité de recherche (Unité Transformations & Agro-Ressources, ULR 7519) et les laboratoires associés, et qui se sont montrés coopérants tout au long de la réalisation de ce travail. Merci de m'avoir fait confiance pour mener ce projet, merci pour le soutien, les conseils judicieux et votre patience.

Je remercie également Monsieur Philippe CHOQUET, Directeur Général d'UniLaSalle, ainsi que l'ensemble des personnels de l'Institut et enfin, Monsieur Fares CHARBEL, enseignant-chercheur.

Un merci est adressé également à l'Institut de Recherche Agronomique du Liban (IRAL) et spécialement à son Directeur Général Monsieur Michel AFRAM ainsi qu'au personnel du département des céréales et des légumes et tout particulièrement à l'Ingénieur Rabih KABALAN.

Mes remerciements sont adressés également à l'Université Picardie Jules Verne (UPJV) et au personnel de l'École Doctorale Sciences, Technologies et Santé (ED 585). Merci également au Pr. Emmanuel PETIT (Professeur au département des plantes et innovation à l'Université de Picardie Jules Verne) et au Pr. Ahmad KOBEISSY (Coordinateur du master en biotechnologie végétale à la Faculté des Sciences à l'Université Libanaise), tous deux membres de mon comité de thèse.

J'adresse mes remerciements aux moulins Crown Mills et tout particulièrement à Monsieur Paul Abi MANSOUR, qui ont subventionné une partie de ces études, et ont donc contribué à l'exécution de ce travail de recherche. De la même manière, j'adresse tous mes remerciements à la boulangerie Chamsine et tout particulièrement à Monsieur Khaled KHALAF, son Directeur Général.

Enfin, j'adresse un très grand merci à toute ma famille et, particulièrement à mon mari, mes enfants, mes parents et mes beaux-parents. Merci pour votre soutien et votre patience.

RÉSUMÉ

Pour soutenir l'introduction de variétés locales de blé tendre, l'État Libanais a dernièrement mis en œuvre, un programme d'amélioration visant la sélection d'un matériel végétal présentant une bonne productivité dans des conditions semi-arides et pouvant donner une production nationale répondant le plus possible aux besoins exprimés par les transformateurs libanais. Dans le cadre de ce projet, les caractéristiques agronomiques, les principaux composants biochimiques ainsi que les comportements rhéologiques ont été étudiés à partir de variétés locales de blé tendre sélectionnées. Durant deux années d'expérimentation agronomique consécutives, la variabilité inter annuelle et la distribution irrégulière des précipitations se sont reflétées en une insatisfaction des besoins en eau des cultures se traduisant par des conditions physiologiques limitantes à la montaison mais également à la floraison affectant respectivement la formation du grain et le poids du grain. De plus, l'élévation des températures au cours du développement du grain a pénalisé le rendement en grain des cultures en impactant les principaux mécanismes de remplissage (i.e. modification des cinétiques d'accumulation des principaux constituants du grain en réduisant ainsi le PMG du grain). Dans le même temps, les niveaux de polymérisation/agrégation des prolamines [i.e. rapport gliadines/gluténines, prolamines polymériques non extractibles (UPP), masse molaire moyenne des gluténines] ont été impactés (augmentation très importante de l'ensemble de ces indicateurs). La réduction du taux d'amidon s'est accompagnée d'un changement significatif du rapport amylopectine/amylose. Des distributions significativement différentes des granules d'amidon ont été enregistrées ; le pourcentage du volume occupé par les granules d'amidon du type A et de type B a subi des variations entre les génotypes pour les deux années de culture. Ces modifications mises en évidence au niveau de la composition des grains de blé se sont traduites par des changements de comportement rhéologique. Ainsi, les farines préparées ont montré des teneurs élevées en gluten humide et sec, de forts indices de Zélény et des indices de gluten faibles. De même, ces farines se sont caractérisées par une extensibilité élevée (alvéographe et extensographe), une forte résistance de la pâte (farinographe), ainsi qu'une forte absorption en eau. Enfin, les farines des différents cultivars n'ont pas exprimé leur potentiel rhéologique optimal malgré leur composition favorable en sous-unités de gluténines.

Mots clés : Blé tendre, contraintes environnementales, prolamines, polysaccharides amylicés, qualité(s) technologique(s).

ABSTRACT

In order to support the introduction of local varieties of common wheat, the Lebanese State has recently implemented an improvement program aimed to select the plant material with good productivity in semi-arid conditions and which can give a national production that meets the best needs expressed by Lebanese processors. In the framework of this project, agronomic criteria, biochemical components and rheological behaviors were characterized on selected local varieties of common wheat. During the two consecutive years of cultivation, the inter-annual variability and the irregular distribution of precipitation induced a non-satisfaction of the water needs of the crops resulting in a limiting growing condition during the vegetative phase and more seriously during the flowering phase. Which affected the formation of the grain and the grain weight respectively. In addition, the rise in temperatures during grain development penalized the grain yield of crops by impacting the main filling mechanisms (i.e. modification of the kinetics of accumulation of the main constituents of the grain thus reducing the PMG of the grain). At the same time, the level of polymerization/aggregation [i.e., gliadin/glutenin ratio, non-extractable protein polymers (UPP), mean molar mass of glutenins] were impacted (very significant increase in all these indicators). The reduction in starch levels was accompanied by a significant change in the amylopectin/amylose ratio. Significantly different distributions of starch granules were noted; the percentage of volume occupied by starch granules of type A and type B varied between genotypes for the two years of cultivation. These changes in the composition of wheat grains induced changes in rheological behavior. Thus, the studied flours showed high levels of wet and dry gluten, strong Zeleny index and low gluten index. Similarly, these flours were characterized by high extensibility (alveograph and extensograph), high dough resistance (farinograph), as well as high water absorption. Finally, the flours of the different cultivars did not express their optimal rheological potential despite their favorable composition in glutenin subunits.

Keywords: Bread wheat, environmental constraints, prolamins, starch polysaccharides, technological quality.

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| REMERCIEMENTS..... | 3 |
| RÉSUMÉ | 4 |
| ABSTRACT..... | 5 |
| SOMMAIRE..... | 6 |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS..... | 11 |
| LISTE DES FIGURES | 13 |
| LISTES DES TABLEAUX | 15 |
| INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE..... | 17 |
| Chapitre I | 23 |
| PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE | 23 |
| I.1. La botanique du blé | 24 |
| I.2. La plante de blé | 24 |
| I.3. Notion générale de la culture du blé..... | 25 |
| I.3.1. Les phases de développement chez le blé | 26 |
| I.3.2. Elaboration du rendement de la culture du blé | 28 |
| I.3.3. Les exigences climatiques de la culture du blé..... | 30 |
| I.3.4. Notion de stress thermique et ses conséquences sur la croissance et le développement du blé | 31 |

| | |
|--|----|
| I.3.5. Notion de stress hydrique et ses conséquences sur la croissance et le développement du blé | 33 |
| I.4. Structure et composition du grain de blé | 35 |
| I.4.1. Les protéines du grain de blé tendre | 37 |
| I.4.1.1. Les protéines fonctionnelles | 38 |
| I.4.1.2. Les protéines de réserve du grain de blé tendre : les prolamines | 39 |
| I.4.1.2.1. Les gliadines : les prolamines monomériques | 40 |
| I.4.1.2.2. Les gluténines : les prolamines polymériques | 40 |
| I.4.1.2.3. Importance des prolamines dans la définition des aptitudes à la transformation du blé tendre (exemple de la panification) | 42 |
| I.4.1.2.4. Effet génotypique et environnemental de la teneur et/ou de la composition des prolamines | 44 |
| I.4.2. L'amidon | 46 |
| I.4.2.1. Importance de l'amidon dans la définition des aptitudes à la transformation du blé tendre (exemple de la panification)..... | 51 |
| I.4.2.2. Effet génotypique et environnemental de la teneur et/ou de structure de l'amidon | 52 |
| I.4.3. Les polysaccharides non-amylacés du grain de blé tendre..... | 54 |
| I.4.4. Autres constituants mineurs du grain de blé tendre..... | 55 |
| I.5. Les enjeux et les acteurs de la recherche régionaux pour le blé tendre..... | 56 |
| Chapitre II..... | 59 |
| CARACTÉRISATION AGRONOMIQUE DE GÉNOTYPES SÉLECTIONNÉS DE BLÉ TENDRE LIBANAIS | 59 |
| II.1. Matériel et méthodes | 60 |
| II.1.1. Le matériel végétal | 60 |

| | |
|--|----|
| II.1.2. Description du site expérimental..... | 61 |
| II.1.3. Préparation du sol et dispositif expérimental | 62 |
| II.1.4. Mesure des différentes composantes du rendement | 63 |
| II.1.4.1. Nombre d'épis par mètre carré (NE)..... | 64 |
| II.1.4.2. Nombre de grains par épi (NGE) | 64 |
| II.1.4.3. Nombre de grains par mètre carré (NGM ²)..... | 64 |
| II.1.4.4. Poids des milles grains (PMG)..... | 64 |
| II.1.4.5. Rendement en grain (RDG)..... | 65 |
| II.1.4.6. Rendement en paille (RDP)..... | 65 |
| II.1.4.7. Indice de récolte (IR)..... | 65 |
| II.1.5. Calcul du cumul des températures moyennes journalières | 65 |
| II.1.6. Analyses statistiques..... | 66 |
| II.2. Résultats et discussions | 66 |
| II.2.1. Variation des températures moyennes mensuelles durant les deux années de culture | 66 |
| II.2.2. Variation du régime pluviométrique mensuel durant les deux années culturales . | 70 |
| II.2.3. Somme des degrés-jour au cours des deux saisons culturales consécutives | 71 |
| II.2.4. Evolution des composantes du rendement | 75 |
| II.3. Conclusion..... | 80 |
| Chapitre III..... | 82 |
| CARACTÉRISATION BIOCHIMIQUE DE GÉNOTYPES SÉLECTIONNÉS DE BLÉ TENDRE LIBANAIS | 82 |
| III.1. Matériel et Méthodes | 83 |

| | |
|---|-----|
| III.1.1. Évaluation de la qualité des grains de blé | 83 |
| III.1.2. Fabrication des farines de blé..... | 84 |
| III.1.3. Quantification des protéines des grains par chromatographie liquide haute performance d'exclusion stérique (SE-HPLC) | 84 |
| III.1.4. Détermination de la distribution des masses moléculaires des protéines de la farine de blé par fractionnement asymétrique en flux force (A4F)..... | 86 |
| III.1.5. Quantification des sous-unités gluténiques de hautes masses moléculaires (SG-HPM) par nano électrophorèse capillaire (Lab-on-a-chip) | 90 |
| III.1.6. Quantification de l'amidon total des grains de blé | 91 |
| III.1.7. Extraction des granules d'amidon des farines de blé et détermination de leur taille..... | 92 |
| III.1.8. Détermination de la distribution des masses moléculaires des polysaccharides amylicés des farines de blé par fractionnement asymétrique en flux force (A4F)..... | 93 |
| III.1.9. Analyses statistiques | 94 |
| III.2. Résultats et discussions..... | 94 |
| III.2.1. Contenu en prolamines des grains des différents génotypes de blé sélectionnés et distribution de leurs masses moléculaires | 94 |
| III.2.2. Composition et contenu en sous-unités gluténiques des grains de blé | 98 |
| III.2.3. Contenu en amidon des grains de blé et distribution des masses moléculaires des polysaccharides amylicés | 100 |
| III.2.4. Distribution granulométrique des granules d'amidon des grains de blé..... | 102 |
| III.3. Conclusion | 104 |

| | |
|--|-----|
| Chapitre IV..... | 106 |
| CARACTÉRISATION RHÉOLOGIQUE DE GÉNOTYPES SÉLECTIONNÉS DE BLÉ TENDRE LIBANAIS | 106 |
| IV.1. Matériel et méthodes | 107 |
| IV.1.1. Détermination des caractéristiques de qualité des farines de blé..... | 107 |
| IV.1.2. Détermination des propriétés rhéologiques des farines et/ou pâtes de blé tendre | 109 |
| IV.1.3. Analyses statistiques | 114 |
| IV.2. Résultats..... | 114 |
| IV.2.1. Qualité des farines de blé tendre..... | 114 |
| IV.2.2. Qualité rhéologique des farines mesurée par analyse alvéographique | 118 |
| IV.2.3. Qualité rhéologique des farines mesurée par analyse farinographique | 120 |
| IV.2.4. Qualité rhéologique des farines mesurée par analyse extensographique..... | 122 |
| IV.3. Discussion..... | 124 |
| IV.4. Conclusion | 133 |
| DISCUSSION GENERALE | 135 |
| RÉFÉRENCES | 149 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

| | |
|------------------|---|
| AACC | American Association Cereal Chemists |
| ACSAD | Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands |
| AOAC | Association of Analytical Communities |
| A4F | Asymetrical Flow Field-Flow Fractionation |
| CGIAR | Consultative Group for International Agricultural Research |
| CIMMYT | International Maize and Wheat Improvement Center |
| DMSO | Dimethyl Sulfoxide |
| DTT | Dithiothréitol |
| G | Gonflement de la pâte mesuré par l'Alvéographe de Chopin (%) |
| HPSEC | High Performance Size Exclusion Chromatography |
| ICARDA | International Center for Agricultural Research in the Dry Areas |
| ICC | International Association for Cereal Science and Technology |
| IR | Indice de récolte |
| IRAL | Institut de Recherche Agronomique au Liban |
| JAF | Jours après floraison |
| JAS | Jours après semis |
| L | Extensibilité de la pâte mesurée par l'Alvéographe de Chopin (mm) |
| MALLS | Multi Angle Laser Light Scattering |
| <i>Mn</i> | Masse moléculaire moyenne en nombre (g.mol ⁻¹) |
| <i>Mw</i> | Masse moléculaire moyenne en masse (g.mol ⁻¹) |
| MS | Matière Sèche (g) |
| NE | Nombre d'épis par mètre carré |
| NGE | Nombre de grains par épi |

| | |
|------------------------|---|
| NGM² | Nombre de grains par mètre carré |
| P | Pression maximale de déformation de la pâte évaluée par l'Alvéographe de Chopin (ténacité) (mm) |
| P/L | Rapport entre la ténacité et l'extensibilité de la pâte évaluée par l'Alvéographe de Chopin |
| RDG | Rendement en grains (T/ha) |
| RDP | Rendement en paille (T/ha) |
| PMG | Poids des milles grains (g) |
| R_h | Rayon hydrodynamique moyen (nm) |
| R_z | Rayon de giration moyen (nm) |
| ΣDJ | Somme des degrés-jour (°C) |
| SDS | Sodium Dodecyl Sulfate |
| SDS-PAGE | SDS-Polyacrylamide Gel Electrophoresis |
| SG-FPM | Sous-unité Gluténique de Faible Poids Moléculaire |
| SG-HPM | Sous-unité Gluténique de Haut Poids Moléculaire |
| SH | Groupement sulfhydryle |
| SS | Groupement disulfure |
| UPP | Unextractable Polymeric Proteins |
| UV | Ultra-Violet |
| W | Travail de déformation de la pâte mesuré par l'Alvéographe de Chopin ($\times 10^{-4}$ Joules) |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1. Carte du Liban | 17 |
| Figure 2. Historique des températures moyennes annuelles et des sommes de pluviométrie au Liban sur la période 1961-2015 | 18 |
| Figure 3. Structure de l'épi et de la fleur du blé | 25 |
| Figure 4. Différentes phases de développement de la culture du blé..... | 27 |
| Figure 5. Cycle de développement du blé selon l'échelle de Zadoks et al. (1974) | 28 |
| Figure 6. Périodes de formation des composantes du rendement du blé | 29 |
| Figure 7. Cinétique de croissance du grain chez le blé tendre..... | 33 |
| Figure 8. Schéma de la structure du grain du blé tendre..... | 35 |
| Figure 9. Structure de l'amylose et de l'amylopectine | 47 |
| Figure 10. Différents niveaux de structure d'un granule d'amidon..... | 48 |
| Figure 11. Modifications de l'amidon durant le chauffage et le refroidissement..... | 50 |
| Figure 12. Localisation du terrain expérimental | 61 |
| Figure 13. Le dispositif expérimental | 63 |
| Figure 14. Comparaison entre la moyenne historique des températures moyennes minimales (A) et maximales (B) mensuelles et celles des deux années d'expérimentation | 68 |
| Figure 15. Comparaison entre la moyenne historique des températures moyennes mensuelles et celles des deux années d'expérimentation | 69 |
| Figure 16. Comparaison de la pluviométrie mensuelle des deux années de culture à la moyenne pluviométrique historique | 71 |
| Figure 17. Cumul de la somme degré-jour (°C) pour les deux saisons de culture du semis jusqu'à la maturité de récolte..... | 72 |

| | |
|--|-----|
| Figure 18. Somme des degrés-jour et la durée de la phase végétative des cultures des quatre génotypes durant les deux saisons expérimentales | 73 |
| Figure 19. Somme des degrés-jour et la durée de la phase reproductive des cultures des quatre génotypes durant les deux saisons expérimentales | 74 |
| Figure 20. Dispositif d'analyse de l'azote total par combustion (LECO FP-528) | 84 |
| Figure 21. Exemple de chromatogramme d'exclusion stérique de protéines du grain de blé . | 86 |
| Figure 22. Principe de séparation par Asymetrical Flow Field Flow Fractionation (A4F) (Fraunhofer, ITWM) | 87 |
| Figure 23. Exemple d'un fractogramme A4F obtenu à partir des protéines totales du grain de blé tendre (prolamines et protéines métaboliques) | 88 |
| Figure 24. Exemple d'une séparation nano électrophorétique des SG-HPM et SG-FPM de grains plusieurs variétés de blé tendre Libanaises | 91 |
| Figure 25. Exemple d'un fractogramme A4F d'une solution d'amidon de grain de blé tendre | 93 |
| Figure 26. Exemple d'un alvéogramme obtenu à partir de farine de blé tendre..... | 109 |
| Figure 27. Exemple d'un farinogramme obtenu à partir de farine de blé tendre..... | 111 |
| Figure 28. Exemple d'un extensogramme obtenu à partir d'une farine de blé tendre..... | 113 |
| Figure 29. Analyse en Composantes Principales (ACP) des propriétés rhéologiques et des compositions biochimiques des farines des différents génotypes de blé tendre étudiés..... | 128 |
| Figure 30. Pain libanais et des préparations libanaises fabriquées à partir des farines « F/G ». | 130 |
| Figure 31. Analyse en Composantes Principales (ACP) des propriétés rhéologiques et des farines des différents génotypes de blé tendre étudiés en comparaison des farines industrielles témoins G et F..... | 132 |

LISTES DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1. Distribution des principaux constituants du grain de blé..... | 36 |
| Tableau 2. Classification des protéines du grain de blé tendre..... | 37 |
| Tableau 3. Pedigrees des quatre génotypes de blé tendre sélectionnés | 60 |
| Tableau 4. Propriétés physico-chimiques des sols cultivés durant les deux saisons de culture | 62 |
| Tableau 5. Valeurs moyennes des composantes du rendement étudiées par génotype pour les deux années d'expérimentation..... | 76 |
| Tableau 6. Relation (Coefficient de corrélation - Pearson) existant entre les différentes composantes du rendement pour les génotypes évalués au cours des deux années d'expérimentation | 78 |
| Tableau 7. Analyse de la variance des composantes de rendement pour les quatre génotypes de blé tendre retenus | 79 |
| Tableau 8. Caractéristiques générales des grains de blé récoltés..... | 95 |
| Tableau 9. Analyse de la variance des principaux constituants des grains de blé à la récolte | 96 |
| Tableau 10. Caractéristiques macromoléculaires des prolamines polymères des grains de blé | 97 |
| Tableau 11. Composition et contenu en sous-unités gluténiques des grains de blé récoltés ... | 99 |
| Tableau 12. Composition et paramètres macromoléculaires de la fraction amyliacée du grain à la récolte et distribution granulométrique des granules d'amidon..... | 101 |
| Tableau 13. Analyse de la variance pour la distribution granulométrique des granules d'amidon des grains de blé à la récolte | 103 |
| Tableau 14. Paramètres de qualité des farines de blé tendre | 115 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 15. Analyse de la variance concernant les critères de qualité des farines de blé..... | 117 |
| Tableau 16. Comportement des pâtes de blé après pétrissage (Alvéographe)..... | 118 |
| Tableau 17. Analyse de la variance concernant les paramètres de l'alvéographe..... | 119 |
| Tableau 18. Comportement des farines de blé au cours du pétrissage (Farinographe) | 120 |
| Tableau 19. Analyse de la variance concernant les paramètres du farinographe | 121 |
| Tableau 20. Comportement des farines de blé au cours du pétrissage (Extensographe)..... | 122 |
| Tableau 21. Analyse de la variance concernant les paramètres de l'extensographe | 123 |

INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Le Liban a une superficie totale estimée à 1 045 200 d'hectares (Figure 1). La superficie cultivable correspond à environ 330 000 hectares, représentant ainsi le tiers de sa superficie totale. De plus, environ 30% (soit 100 000 hectares) de cette surface cultivable est occupée par des cultures irriguées.



Figure 1. Carte du Liban

Le Liban, comme les autres pays de la région fait face à plusieurs défis pour augmenter son rendement agricole et assurer la sécurité alimentaire en réponse à la croissance de sa population et à la demande accrue céréalière qui en résulte. Durant ces dernières années, une forte réduction des rendements agricoles (rendements céréaliers notamment) a été observée ; celle-ci pouvant être attribuée à différents facteurs pris seuls ou en combinaison: (i) une diminution de la fertilité des terres, (ii) un épuisement des ressources naturelles et d'une limitation des ressources agricoles, (iii) la mise en œuvre de techniques agricoles encore trop

traditionnelles (i.e. adoption lente de nouvelles techniques), (iv) l'utilisation de variétés locales à productivité limitée, (v) de la limitation des investissements dans le secteur agricole et l'augmentation du prix de revient, (vi) de l'adoption d'une gestion agricole traditionnelle ainsi que du manque des nouveaux programmes agricoles (IRAL, 2014).

Dans le même temps, les modifications des conditions climatiques qui ont été enregistrées au cours de ces dernières années influent globalement et négativement l'ensemble des activités agricoles du Liban, en contribuant à une diminution du niveau des précipitations distribuées séquentiellement au cours des saisons des cultures résultant en des périodes de sécheresse séquentielles ainsi qu'une augmentation remarquable des températures (Figure 2) (World Bank, 2019).

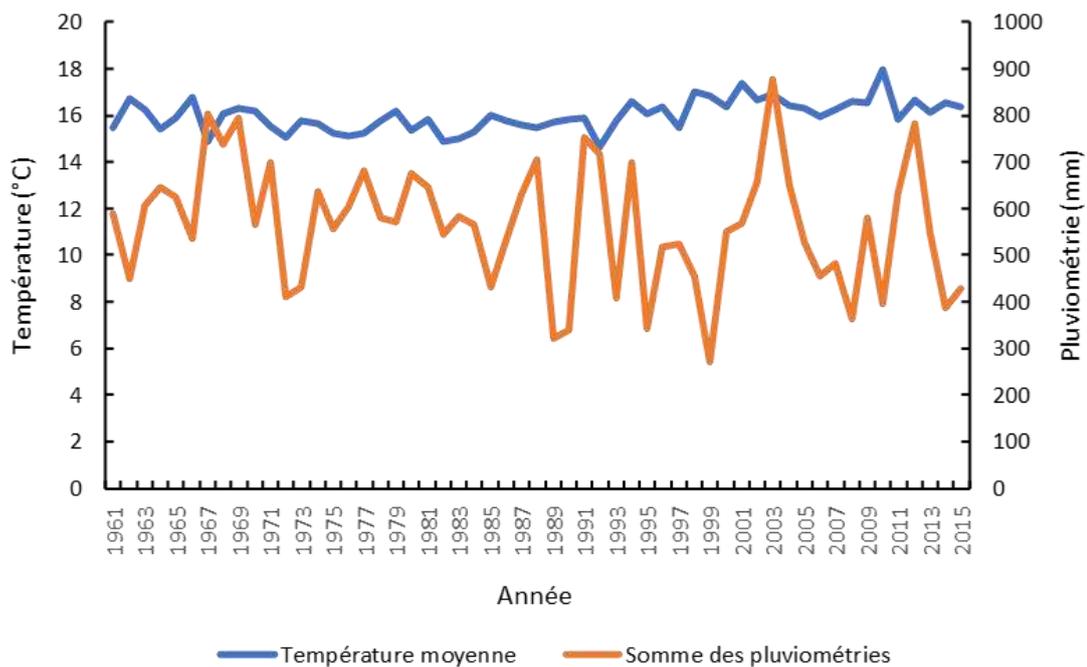


Figure 2. Historique des températures moyennes annuelles et des sommes de pluviométrie au Liban sur la période 1961-2015

D'une manière générale, le blé a toujours occupé une place importante dans l'alimentation humaine. Il est reconnu pour ses qualités nutritionnelles car, notamment, il représente la principale source de glucides et de protéines pour la population mondiale. Au Liban, le blé dur est majoritairement consommé sous forme de bourghoul (blé concassé),

semoule ou encore spaghetti, alors que le blé tendre est essentiellement utilisé pour la fabrication du pain libanais, de biscuits ou encore de gâteaux. Ce blé est cultivé sur une superficie de 15 000 hectares, principalement localisés dans la plaine de la Béqaa, puis dans le Nord et enfin dans le Sud du pays (Figure1). En effet, la région de la Béqaa, considérée comme le « panier » agricole du pays, forme la région la plus fertile avec 102 481 hectares de terres cultivables (IRAL, 2015).

En raison de sa meilleure adaptation aux conditions climatiques (i.e. conditions de stress thermique/hydrique), la culture du blé dur est plus répandue que celle du blé tendre. Ainsi, celui-ci représente environ 75% de la totalité de la production libanaise en matière de blé (IRAL, 2014). Il faut noter que dans le temps, le blé dur servait à la préparation manuelle du pain libanais et donnait un produit de qualité appréciée. Aujourd'hui, en raison de l'avènement de la production industrielle du pain pour couvrir la demande croissante, l'utilisation du blé dur est limitée en raison de son inadéquation avec le procédé mis en place (i.e. nécessité d'une matière première pouvant fournir une pâte « machinable » non collante ayant des caractéristiques technologiques bien définies). Dans le même temps, les exigences des industriels en matière de blé tendre sont complexes. Le rendement élevé en farine panifiable constitue l'élément essentiel de qualité exigée pour la première étape de cette transformation. Cependant, l'aptitude à la transformation du blé tendre (i.e. valeur industrielle) ne se limite pas au rendement meunier mais dépend de plusieurs autres facteurs : facteurs liés aux conditions de culture et de récolte (i.e. composante environnementale), facteurs liés à la nature des variétés de blés utilisées (i.e. composante génétique) et, à leurs interactions respectives.

La production annuelle en 2019 a atteint un niveau de 140 000 tonnes (Indexmundi, 2020) formée majoritairement de blé dur. Le déficit de production en blé tendre pousse l'État Libanais à importer massivement cette céréale de l'étranger. Les importations annuelles en 2019 se sont élevées à 1 575 000 tonnes (Indexmundi, 2020) principalement constituées de blé tendre adapté à la panification. Le cahier des charges de ces importations est particulièrement exigeant en termes d'aptitude à la transformation. Toutefois, une importance particulière doit être attribuée à la sécurité alimentaire du pays, qui est menacée par la provision non ponctuelle en matière de blé ; d'où la nécessité d'une augmentation de la production céréalière locale.

Aujourd'hui, afin de limiter le niveau d'importation, il devient stratégique d'introduire au Liban des variétés de blé tendre mieux adaptées aux conditions climatiques du pays, favorisant le développement d'une production nationale de qualité devant répondre le plus possible aux besoins exprimés par les transformateurs libanais (i.e. minotiers, boulangers).

Ce travail de thèse s'inscrit pleinement dans ce cadre stratégique en se focalisant sur la caractérisation agronomique, biochimique et technologique de la collection de blé tendre (*Triticum aestivum*) « sous essais » gérée par le département de recherche sur les céréales et des légumes au sein de l'Institut de Recherche Agronomique au Liban (IRAL). En effet, cette collection de variétés de blé tendre est aujourd'hui sélectionnée exclusivement sur des performances potentielles vis-à-vis de la sécheresse (i.e. résistance) et/ou des maladies fongiques (i.e. tolérance). Compte tenu des enjeux de la filière de transformation, il est indispensable de disposer des éléments de caractérisation de cette collection en mettant en place une démarche d'acquisition des performances agronomiques, biochimiques et technologiques. Ainsi, aux termes de notre travail de recherche, les variétés les plus adaptées à la transformation technologique seront retenues pour être cultivées à grande échelle afin de réduire significativement l'importation de matière première.

Ce document de thèse comporte cinq chapitres qui se décomposent comme suit :

- Le premier chapitre intitulé « **Partie Bibliographique** » porte dans la première partie sur la culture du blé tendre et sa physiologie générale et particulière (i.e. stress et facteurs d'élaboration du rendement notamment). La deuxième partie de ce chapitre a pour objet principal de présenter les caractéristiques biochimiques et les propriétés techno-fonctionnelles des principaux constituants du grain (i.e. l'amidon et ses polymères constitutifs, les prolamines et ses assemblages moléculaires caractéristiques et les polysaccharides non amylacés).
- Le deuxième chapitre intitulé « **Caractérisation agronomique de géotypes sélectionnés de blé tendre Libanais** » présente les résultats d'une analyse des principales variables agronomiques (i.e. majoritairement associées aux composantes du rendement). Cette analyse a été menée en réponse aux deux principales sources de variabilité facilement identifiables : l'effet environnemental/conditions de culture et

l'effet génotypique. Ainsi, dans le cadre de ce chapitre, et comme cela a été prévisible dans des conditions environnementales semi-arides telles celles rencontrées, la majorité des variables agronomiques retenues pour la caractérisation des comportements végétaux a été placée sous l'effet majeur de cet environnement (i.e. combinaison de contraintes thermiques et hydriques). Toutefois, comme nos résultats le montrent, les différents génotypes sélectionnés pour notre étude ont pu exprimer des niveaux variables de résistance/tolérance à ces conditions physiologiques limitantes en atteignant parfois des niveaux de production « acceptables ».

- Le troisième chapitre intitulé « **Caractérisation biochimique de génotypes sélectionnés de blé tendre Libanais** » présente les résultats de l'étude des propriétés physico-chimiques des constituants majeurs des grains de ces génotypes de blé tendre sélectionnés. Ainsi, dans le cadre de ce chapitre, la séparation et la quantification des différentes fractions protéiques (prolamines) ont été mises en œuvre afin (i) d'identifier les compositions alléliques en matière de sous-unités gluténiques (SG-HPM et SG-FPM) mais également (ii) de déterminer les dimensions moléculaires (i.e. masses moléculaires, rayons hydrodynamiques, conformation en solution) des polymères protéiques formés à la récolte. Dans le même temps, la fraction amylicée de ces mêmes grains a été caractérisée grâce (i) à l'étude de la distribution des différents granules d'amidon présents et, (ii) à la détermination des différents paramètres de la distribution moléculaire des polymères d'amidon formés à la récolte.

Ce chapitre a fait l'objet d'une publication internationale :

Sakr, N., Rhazi, L., Aussenac, T. Bread Wheat Quality under Limiting Environmental Conditions: I - Molecular Properties of Storage Proteins and Starch Constituents in Mature Grains. *Agriculture*, **2021**, 11, 289.

- Le quatrième chapitre intitulé « **Caractérisation rhéologique de génotypes sélectionnés de blé tendre Libanais** » présente les résultats de l'étude des comportements rhéologiques des farines et des pâtes obtenues à partir de ces génotypes de blé tendre sélectionnés. Dans ce cadre, nous avons analysé plus spécifiquement le comportement des farines au cours du pétrissage, le comportement des pâtes obtenues à l'issue du pétrissage mais également, la qualité générale des produits fabriqués en

mettant en œuvre un procédé de transformation traditionnel. Dans le même temps, un rapprochement a été fait entre les caractéristiques physico-chimiques des différents grains et/ou différentes farines disponibles et les résultats de leurs évaluations technologiques afin de fournir aux acteurs de la sélection et de l'amélioration végétale de nouvelles pistes de « screening » du matériel végétal en cours de création et/ou de multiplication.

Ce chapitre a fait l'objet d'une publication internationale :

Sakr, N., Rhazi, L., Aussenac, T. Bread Wheat Quality under Limiting Environmental Conditions: II - Rheological Properties of Lebanese Wheat Genotypes. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, **2021**, 20, 235-242.

- Enfin, aux termes de ce travail, un cinquième chapitre intitulé « **Discussion générale** » clôturera notre document en reprenant les principaux faits marquants de ce travail et propose une analyse synthétique des résultats observés et des perspectives à retenir.

Chapitre I

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Le blé est l'aliment de base de l'humanité. Il constitue, dans la civilisation occidentale et au Moyen Orient, une composante centrale de l'alimentation humaine. Sa culture remonte à 7000 ans avant J.C. (Moule, 1971). Il a été domestiqué du Proche-Orient à partir d'une graminée sauvage. Sa consommation remonte à la plus haute antiquité. Les premières cultures apparaissent au VIII^e millénaire avant J.C., en Mésopotamie et dans le croissant fertile qui englobe l'Iraq, la Turquie, la Syrie, le Liban, la Jordanie et la Palestine (Harlan et Zohary, 1966). Et, depuis lors, l'homme n'a pas cessé de sélectionner les variétés les plus productives et celles ayant une aptitude à la transformation (i.e. majoritairement la fabrication de pain).

Le blé est la deuxième céréale la plus produite au monde ; sa production est utilisée pour l'alimentation humaine, le restant sert comme fourrage, semis et applications non alimentaires. Le blé fait partie des trois grandes céréales avec le maïs et le riz. Sa production mondiale s'est élevée à 771 millions de tonnes en 2017 représentant ainsi 26% en volume de la production mondiale en céréales (FAOSTAT, 2019). Le principal pays producteur est la Chine dont la production s'élève à 14% de la production mondiale, suivie de l'Inde (10%), des États Unis (7%) et de la Russie (6%). Les principaux pays exportateurs sont les États-Unis (27 Mt), le Canada (18Mt), la France (17Mt) et l'Australie (15Mt) (FAOSTAT, 2019).

Au Liban, le blé occupait environ 80% de la superficie cultivée en céréales en 2002, dont la majorité était constituée par le blé dur (75%). La part irriguée représente le quart de la superficie totale cultivée en céréales ; l'irrigation étant prédominante dans la région de la Béquaa où elle concerne le tiers de la superficie totale des céréales (FAO, 2016). La production des semences est réalisée en prestation de service sous la supervision de l'Institut de Recherche Agronomique (IRAL) qui les fait multiplier par des producteurs sous contrat, contrôle leur qualité et les vend à des prix subventionnés.

La culture du blé présente des insuffisances en termes de rendement dues à une densité des semis trop importante, un labour léger du sol, une application arbitraire des engrais, une mécanisation partielle et surtout une irrigation faible et non apportée aux moments opportuns. L'amélioration des rendements reste limitée par les conditions climatiques qui réduisent l'intérêt économique de l'intensification. Cependant, l'amélioration des semis en termes de qualité et d'adaptation au stress hydrique et thermique, ainsi que l'adoption d'une irrigation adéquate dans les zones qui reçoivent peu d'irrigation et la formation des producteurs à travers des programmes de vulgarisation et de démonstration contribueraient à de meilleures performances.

I.1. La botanique du blé

Le blé est l'une des céréales les plus importantes au monde. C'est une plante annuelle appartenant à la famille des *Gramineae* comme l'avoine et l'orge, à la sous-famille des Hordées et au genre *Triticum*. Le grain de blé est un fruit sec indéhiscence, appelé caryopse, constitué d'une graine et des téguments. Les blés sont divisés en deux grandes espèces qui sont (Feillet, 2000) :

- a. Le blé tendre (*Triticum aestivum*) hexaploïde ($2n = 6x = 42$) (génomme AA BB DD, constitué chacun de sept paires de chromosomes homologués numérotés de 1 à 7). Son amande (albumen) relativement friable lui donne une aptitude à être transformé en farine. Cette farine est utilisée en panification, en pâtisserie et en biscuiterie.
- b. Le blé dur (*Triticum durum*) tétraploïde ($2n = 4x = 28$) (génomme AA BB) dont les grains sont utilisés en semoulerie et pour la préparation de pâtes alimentaires, couscous, bourghoul ...

I.2. La plante de blé

Un pied de blé comporte une partie aérienne formée de plusieurs longues tiges herbacées, cylindriques, non ramifiées et renflées au niveau des nœuds. Ces tiges appelées chaumes, sont pleines au niveau des nœuds et creuses dans les entre-nœuds, elles sont souples

et résistantes. Les feuilles sont alternes et comprennent un limbe à nervures parallèles. La partie souterraine est formée par des racines adventives et fasciculées.

Les fleurs sont groupées en inflorescence appelée épi, composé d'épillets. Chaque épillet est formé de plusieurs fleurs et celles-ci sont entourées chacune de deux glumelles. Les glumes, au nombre de deux, entourent l'épillet. La fleur comporte trois étamines, un ovaire globuleux surmonté par des stigmates plumeux (Figure 3) (Feillet, 2000).

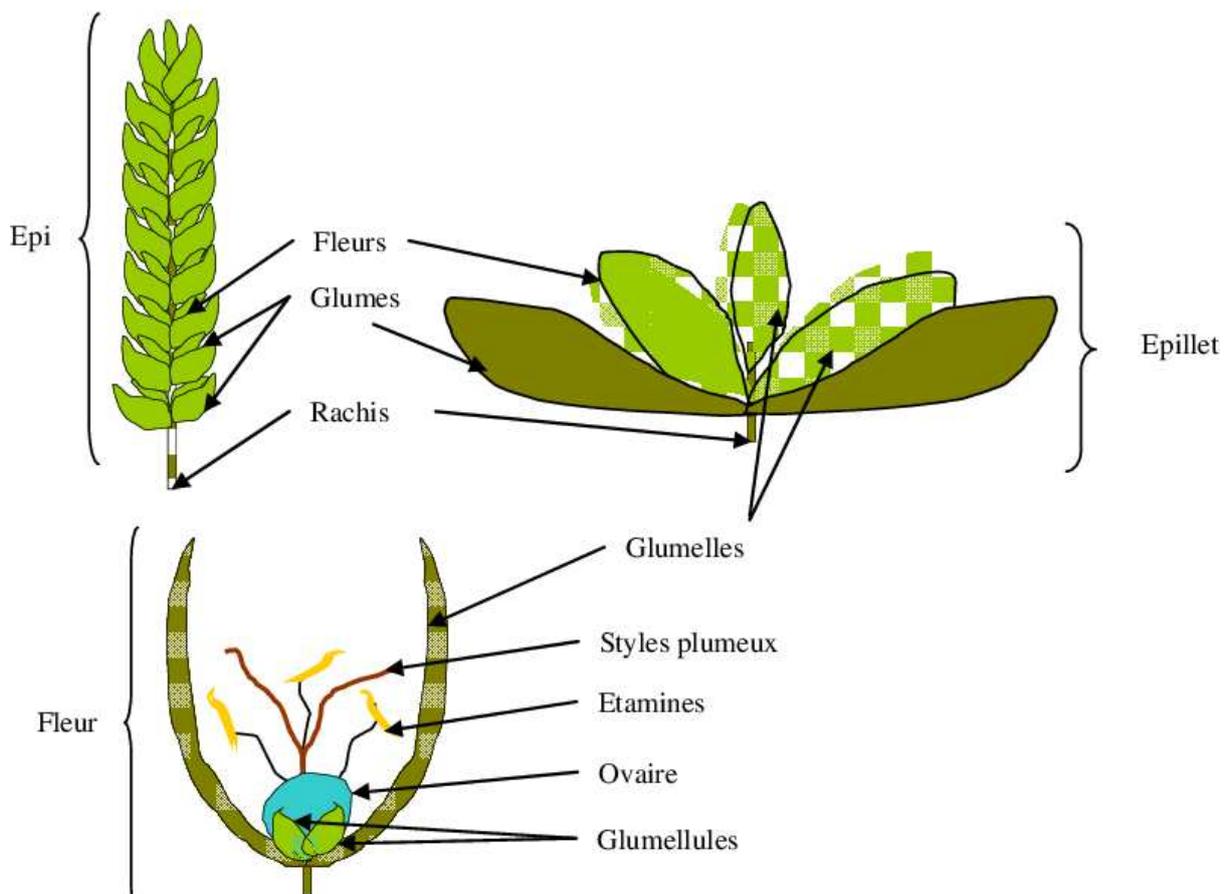


Figure 3. Structure de l'épi et de la fleur du blé

I.3. Notion générale de la culture du blé

Le grain de blé se sème à deux époques de l'année : à l'automne (blé d'hiver) et au printemps (blé de printemps). Pour le blé d'hiver, la formation de son appareil reproducteur

est initiée par une période de vernalisation (i.e. exigence d'une période de froid) ou une photopériode de type « jours courts ». Ce besoin n'existe pas chez les blés de printemps, la transition entre la phase végétative et la phase reproductive est initiée lorsqu'un nombre de feuilles déterminé est mis en place.

I.3.1. Les phases de développement chez le blé

Comme on peut le voir à partir de la figure 4 (Geoffroy, 1950), le développement du blé est caractérisé par plusieurs phases spécifiques qui sont décrites ci-après :

- (i) Phase végétative : cette phase s'étale du début de la germination à l'épiaison en passant par le tallage. Au cours de la germination, le grain gonfle par absorption d'eau puis, à la base du grain (place du germe), il se dégage la première feuille, les premières racines (séminalles) et une tige portant les premières feuilles. Le tallage est l'étape durant laquelle apparaît une ramification de la tige, de nouvelles racines (adventives), de nouvelles feuilles sur chaque tige puis s'effectue la montée des tiges. La montaison aussi appelée gonflement se produit par l'élongation des entre-nœuds (i.e. déboitement des entre-nœuds) qui constituent le chaume. Les talles herbacées entrant en compétition avec les talles montantes pour les facteurs du milieu, régressent et meurent (Geoffroy, 1950).

- (ii) Phase sexuelle ou reproductive : cette phase va de l'épiaison jusqu'à la floraison. Après un certain temps de végétation, un épi se forme au sommet de chaque tige. Après la différenciation des épillets à l'intérieur de celui-ci, les fleurs apparaissent 4 à 5 jours plus tard. Durant la floraison, les fleurs demeurent généralement fermées (fleurs cléistogames) alors que les trois anthères éclatent et libèrent leur pollen (stade de l'anthèse). Cette phase normalement brève peut se prolonger si les températures sont suffisantes. La floraison dure en moyenne entre 3 et 6 jours selon les conditions météorologiques. Après la fécondation, l'ovaire grossit rapidement et un certain nombre de grains se forment sur chaque épillet ; chaque grain étant enveloppé dans des écailles creuses : les glumelles.

(iii) Phase de maturation : cette phase s'étend de la floraison jusqu'à la récolte. Durant cette phase se produit l'élaboration de la dernière composante du rendement et qui est le poids du grain par la remobilisation de l'azote foliaire vers le grain et l'accumulation des composés de substances glucidiques résultant de l'activité photosynthétique post floraison (Gate, 1995). Au cours de la phase de maturation, le grain va passer par trois stades successifs : (i) stade « laiteux » pour lequel le grain est volumineux et encore vert (le grain est en pleine division cellulaire), (ii) le stade « pâteux » pour lequel le grain perd son activité photosynthétique résiduelle (prise de couleur jaune) et qui se caractérise par une phase de grandissement cellulaire intense (accumulation des réserves) et enfin, (iii) le stade « vitreux » qui se caractérise par une perte rapide et naturelle de son contenu en eau (40% à 14-15%) se traduisant par l'acquisition de la forme et la texture définitive du grain.

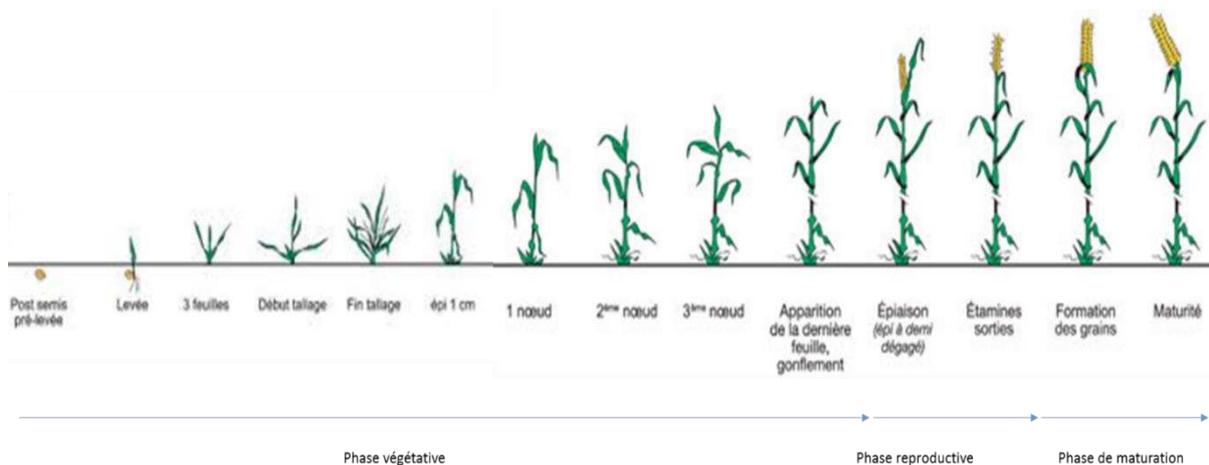


Figure 4. Différentes phases de développement de la culture du blé

Malgré la définition générale de ces phases de développement, différentes échelles ont été établies pour identifier les stades végétatifs clés du cycle de développement de la culture du blé. L'échelle de notation la plus utilisée aujourd'hui est celle de Zadoks et al. (1974) présentée dans la figure 5.

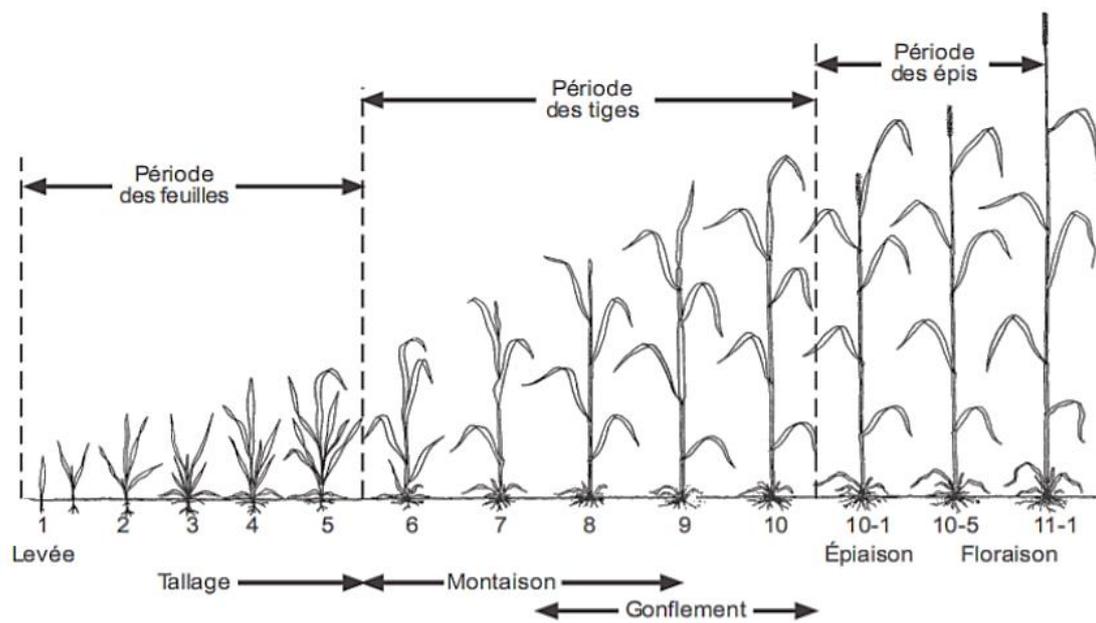


Figure 5. Cycle de développement du blé selon l'échelle de Zadoks et al. (1974)

I.3.2. Elaboration du rendement de la culture du blé

Le rendement en grains d'une culture de blé s'établit tout au long du cycle de développement de la plante. L'état de développement des organes aériens et végétatifs affecte la capacité de la plante à stocker l'azote (stockage dans les parties végétatives pour une remobilisation post-floraison vers le grain) et le carbone nécessaire à la synthèse de l'amidon dans le grain et qui provient en très grande majorité de l'activité photosynthétique post-floraison. L'architecture racinaire détermine, notamment, la capacité de l'absorption de l'azote (Laperche et al., 2006), alors que celle de la surface foliaire détermine la capacité d'assimilation du carbone (Makino, 2011). Les paramètres environnementaux tels que la température, la disponibilité de l'eau et de l'azote agissent sur les potentiels de production de la plante. Ainsi, le rendement en grains du blé est sous la dépendance de plusieurs composantes différentes et complémentaires (Figure 6) (Meynard et David, 1992) :

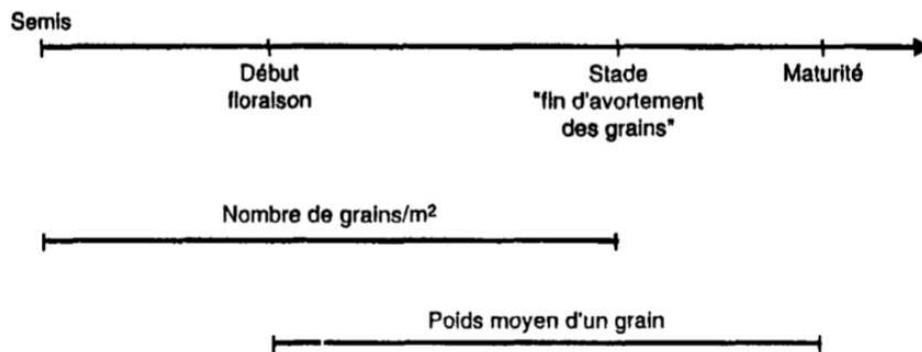


Figure 6. Périodes de formation des composantes du rendement du blé

- La densité du couvert végétal : cette densité dépend de la qualité du semis et des conditions environnementales qui l'ont accompagnée. Cette composante se traduit par le nombre de talles émises par la plante et elle est soumise aux effets climatiques et génétiques (Moeller et al., 2014).
- La surface foliaire et la teneur en azote des feuilles et des tiges soumis aux effets environnementaux, déterminent le potentiel de la plante à capter le rayonnement solaire actif pour la photosynthèse. La biomasse foliaire et la teneur en azote des feuilles affectent la teneur en protéines des grains suite au phénomène de la remobilisation de l'azote (Martre et al., 2003) ; celui-ci, stocké dans les parties végétatives (sources : les feuilles et les tiges) sous forme de protéines, est remobilisé vers les organes en croissance après la floraison (puit : grain), formant 75% des protéines du grain contre 25% résultant d'une absorption racinaire post-floraison (Gate, 2010).
- Le nombre de grains par épi qui s'établit 20 à 30 jours avant la floraison est aussi déterminé au cours de la phase végétative. Il est inversement proportionnel au nombre d'épis par m². Le nombre de grain par mètre carré qui traduit le rendement de la culture peut être obtenu par le produit entre le nombre d'épis par mètre carré et le nombre de graines par épi (Bustos et al., 2013). Il est déterminé par la phase de développement de la plante comprise entre le semis et la fin de l'épiaison.

- Le poids des milles grains résultant du développement du grain. En effet, le développement complet du grain correspond à trois phases successives (la phase de division cellulaire, la phase de grandissement cellulaire et la phase de maturation). Le suivi du développement du grain se fait grâce au calcul des sommes de degré jours (ΣDJ) après floraison (Altenbach et al., 2003). Ainsi, l'étape de division cellulaire intervient en moyenne entre 0 et 250 $^{\circ}CJ$ (Shewry et al., 2012). Elle détermine le potentiel maximum de stockage du grain (nombre maximum de cellules de l'albumen). La phase de remplissage ou grandissement cellulaire correspond à l'accumulation des réserves majeures du grain (i.e. protéines de réserve et amidon). L'accumulation des protéines débute aux alentours de 150 $^{\circ}CJ$ et celle de l'amidon vers 200 $^{\circ}CJ$ (Dupont et al., 2006) après floraison. Ce remplissage du grain est maintenu jusqu'en moyenne 750-800 $^{\circ}CJ$. La température joue un rôle déterminant dans le remplissage du grain. Ainsi, la synthèse de l'amidon est favorisée par des températures moyennes journalières de l'ordre de 14 à 16 $^{\circ}C$, alors que la synthèse protéique est favorisée par des températures moyennes journalières de 20 $^{\circ}C$. Le poids d'un grain (PG) de blé est affecté par les stress hydrique et thermique. Il résulte de la phase de développement de la plante comprise entre la floraison et la maturité.
- Le rendement en grain correspond au produit entre le nombre de grain par épis et le nombre d'épis par m^2 et le poids des milles grains (Vilain, 1987).
- L'indice de récolte est le rapport entre le rendement commercialisable (grains) d'une plante cultivée et la quantité totale de biomasse aérienne (paille + grains) (Chetmi, 2009).

I.3.3. Les exigences climatiques de la culture du blé

Du point de vue exigences climatiques, les deux facteurs les plus importants pour la culture du blé sont représentés par le régime pluviométrique et le régime thermique (Geoffroy, 1950).

En ce qui concerne la température, celle-ci conditionne le rythme de développement des plantes (Eliard, 1974). Ainsi, le zéro de germination du blé correspond à $0^{\circ}C$ alors que le zéro

de développement correspond à 3 - 4°C. Des températures comprises entre 15 °C et 20°C permettent une croissance optimale de la culture (Arnon, 1971), donnant à la plante la faculté de produire un nombre de talles suffisant. Plusieurs auteurs ont souligné l'importance de la température de base pour le développement de la culture de blé et qui est la température minimale dont la culture a besoin pour se développer. En fait, cette température est signalée par plusieurs auteurs comme étant 0 degré Celsius (Malvoisin, 1984; Mekhlouf *et al.*, 2006). Soltner (2003) souligne que les conditions optimales de la culture du blé correspondent à : (i) une somme de température de 150 °C pour la période « semis-levée », (ii) de 500 °C pour la phase « levée-fin tallage » et, (iii) de 850 °C pour la phase « épiaison-maturité ». Ces exigences sont variables selon les géotypes et les conditions climatiques (Araus *et al.*, 2003).

La disponibilité en eau est un des facteurs le plus déterminant de la croissance et de la productivité des plantes en général et du blé en particulier. L'eau absorbée par la plante transporte les nutriments dissous du sol jusqu'aux organes aériens où elle est libérée dans l'atmosphère par phénomène transpiratoire. Les besoins en eau de la culture se situent entre 450 mm (Baldy, 1974) et 702 mm (Ollier et Poiree, 1981). Une quantité de précipitations équivalente à 650 mm permettrait une production comprise entre 2 et 3 T/ha de rendement en grains. Alors qu'une quantité d'eau correspondante à 450 mm assurerait un rendement de 1 à 2 T/ha de rendement en grains (IRAL, 2010). Les besoins en eau relativement faibles en début de cycle végétatif, deviennent plus importants au fur et à mesure que le développement de la plante s'amplifie (de la phase « épi 1cm » jusqu'à la maturation). Ainsi, la période la plus exigeante correspond en règle générale à la phase allant de la montaison au remplissage du grain (Oweis *et al.*, 1999). Les principales périodes critiques s'étalent de 20 jours avant l'épiaison jusqu'à 35 après la floraison (Geoffroy, 1950).

I.3.4. Notion de stress thermique et ses conséquences sur la croissance et le développement du blé

Le stress thermique est l'ensemble des modifications physiologiques que subit une plante lorsque la température s'abaisse ou s'élève au-delà des conditions optimales de culture. Il en résulte, notamment, une fermeture des stomates et une baisse de l'activité photosynthétique

au-delà de 30 °C, suivies par un arrêt quasi-total au-delà de 45 °C. A l'opposé, les températures froides limitent la croissance et le développement de la plante. Des températures comprises entre -5 °C et -15 °C favorisent la formation des cristaux de glace dans les cellules causant leur mort (Graybosch et al., 1995).

Le stress thermique affecte diversement la culture du blé en fonction des phases de son développement. Ainsi, dans une zone semi-aride (i.e. zone caractérisée par des précipitations faibles, mal réparties et insuffisantes pour maintenir les cultures), le semis précoce affecte la fertilité des épis, suite à l'effet des basses températures au cours du stade gonflement. Les variétés précoces sont sensibles aux gelées printanières qui surviennent au stade début-montaison et détruisent l'épi du brin maître (Abbassene et al., 1997). Les basses températures de l'ordre de -4°C entre le stade épi 1 cm et un nœud, pendant plusieurs jours, affectent négativement le nombre de grains par épi (Gate, 1995). La contrainte du gel pénalise le rendement en grains de la culture et atteint des niveaux importants (Baldy, 1974).

En contrepartie, l'effet des hautes températures se traduit par une réduction de la croissance des tiges pendant la phase de montaison. Les fortes températures en fin de cycle (phase reproductive et phase du remplissage du grain) ont pour conséquence la réduction du rendement en grains liée à une diminution du nombre d'épis et du poids moyen du grain (Hanchinal et al., 1994). La phase de remplissage du grain est également très sensible aux fortes températures. Cette phase, qui conditionne le poids moyen du grain (PG), se caractérise par deux variables majeures : la durée (D) et la vitesse de remplissage (V) (Triboi, 1990), de telle sorte que $PG = D \times V$ (Figure 7).

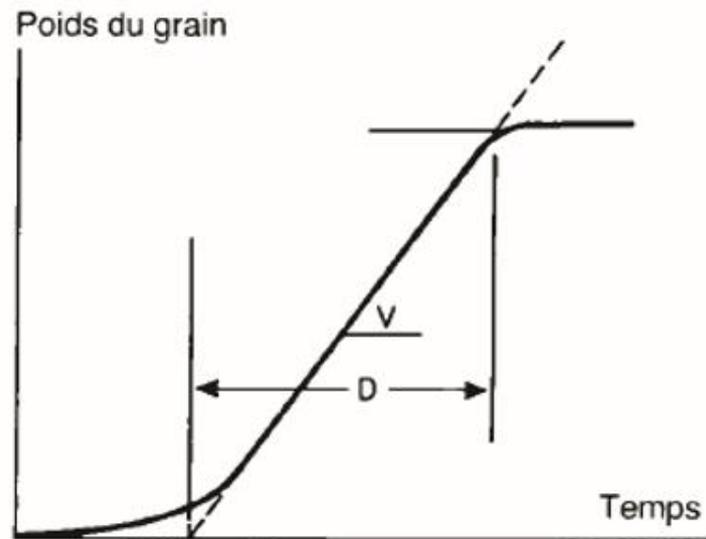


Figure 7. Cinétique de croissance du grain chez le blé tendre

La durée et la vitesse de remplissage du grain de blé, négativement corrélées, peuvent varier considérablement en fonction des conditions thermiques (et hydriques) de culture (Yin et al., 2007). Les températures élevées impactent le rendement en réduisant la durée et le taux de remplissage du grain de blé. L'application de températures élevées avant la fin du remplissage du grain, augmente involontairement la concentration en protéines en limitant l'accumulation de l'amidon diminuant ainsi le poids final du grain (Gooding et al., 2003). Les variétés dont l'épiaison est précoce sont caractérisées par des rendements plus importants que ceux obtenus pour des variétés tardives (Tewolde et al., 2006). Les auteurs considèrent que les génotypes à épiaison précoce auront une post-épiaison plus longue et, par conséquent une période de remplissage du grain plus étalée.

I.3.5. Notion de stress hydrique et ses conséquences sur la croissance et le développement du blé

Le stress hydrique est un stress subi par la végétation lorsqu'elle est placée dans un environnement où l'évapotranspiration est supérieure à la quantité d'eau absorbée par la plante. Cette situation physiologique est donc générée par un déséquilibre de potentiel hydrique rompant le continuum naturel de potentiel hydrique (i.e. $\Psi_{\text{sol}} > \Psi_{\text{plante}} > \Psi_{\text{atmosphérique}}$). Il peut être causé par des périodes de sécheresse, par la salinisation du milieu [i.e. augmentation de la concentration saline de la solution du sol provoquant du fait une

élévation de composante osmotique de la solution du sol (π_{sol}) ou encore par le gel. Le déficit hydrique constitue le stress abiotique le plus sévère qui touche la culture du blé dans les zones arides et semi-arides (Chennafi et al., 2010). L'eau essentielle pour la croissance et le développement de la plante cause par sa rareté une réduction de productivité. Un déficit hydrique précoce affecte négativement le développement des racines, des feuilles et des organes reproducteurs (Debaeke et al., 1996). Ainsi, un stress hydrique apparaissant au cours des premières phases de développement provoque une levée retardée et incomplète se traduisant par un peuplement défectueux et un développement racinaire faible et superficiel (Amigues et al., 2006). Lorsque la sécheresse survient au cours de la période de croissance végétative, elle pénalise surtout le nombre d'épis par unité de surface. La croissance des talles est pénalisée par un déficit hydrique à la montaison ainsi que la croissance en hauteur de la plante et le nombre d'épis par unité de surface (Kimurto et al., 2003). Une sécheresse avant épiaison réduit le rendement en grains d'environ 70% (Naceur et al., 1999). La phase reproductive du blé est très sensible au stress hydrique (Hafid et al., 1998; Kimurto et al., 2003). Un manque d'eau aux stades de floraison et de remplissage du grain résulte en une réduction importante du rendement en grains (Lawlor et al., 1981).

En fait, les conditions environnementales (variation de la température et de la disponibilité en eau) modifient l'ensemble des relations « source-puits ». Les organes « puits » (i.e. feuilles en expansion, racines, fleurs et fruits) puisent les photoassimilats pour leur croissance et la maintenance des organes sources (feuilles), producteurs de ces photoassimilats. La force d'un puit se caractérise par son activité (la vitesse d'intégration des photoassimilats) et sa capacité à stocker ces photoassimilats (Farrar, 1993). La photosynthèse influe fortement l'activité de la source, alors que la température constitue un facteur majeur pour moduler la force du puit. Ainsi, une diminution de la surface photosynthétisante résultante d'un déficit hydrique pendant la phase épiaison-début floraison, entraîne une réduction du nombre de grain et du poids sec des grains à la récolte (Monteny, 1970). L'adaptation de la plante au déficit hydrique se fait par la réduction de la photosynthèse, du nombre de grains et de la production de biomasse, pour ainsi assurer la production de grains moins nombreux mais toutefois viables (Kimurto et al., 2003 ; Amigues et al., 2006). Une sécheresse pendant la période de remplissage des grains, réduit le poids des grains (Lawlor et al., 1981; Mogensen, 1985; Mogensen et Jensen, 1989).

Le stress hydrique est souvent associé au stress thermique (Amigues et al., 2006), non seulement parce que les périodes chaudes sont souvent sèches, mais aussi à cause de l'augmentation de la transpiration qui dépend des conditions environnementales comme le niveau de CO₂ atmosphérique et la demande atmosphérique en eau [i.e. humidité relative encore appelée potentiel hydrique atmosphérique ($\Psi_{\text{atmosphérique}}$)]. La combinaison de ces stress abiotiques affecte négativement la croissance des jeunes organes reproducteurs ainsi que le rendement du végétal concerné en limitant les phénomènes d'accumulation des réserves (Latiri et al., 2010).

I.4. Structure et composition du grain de blé

Le grain de blé comprend trois parties principales : l'albumen, le germe et les couches périphériques (Figure 8) (Surget et Barron, 2005).

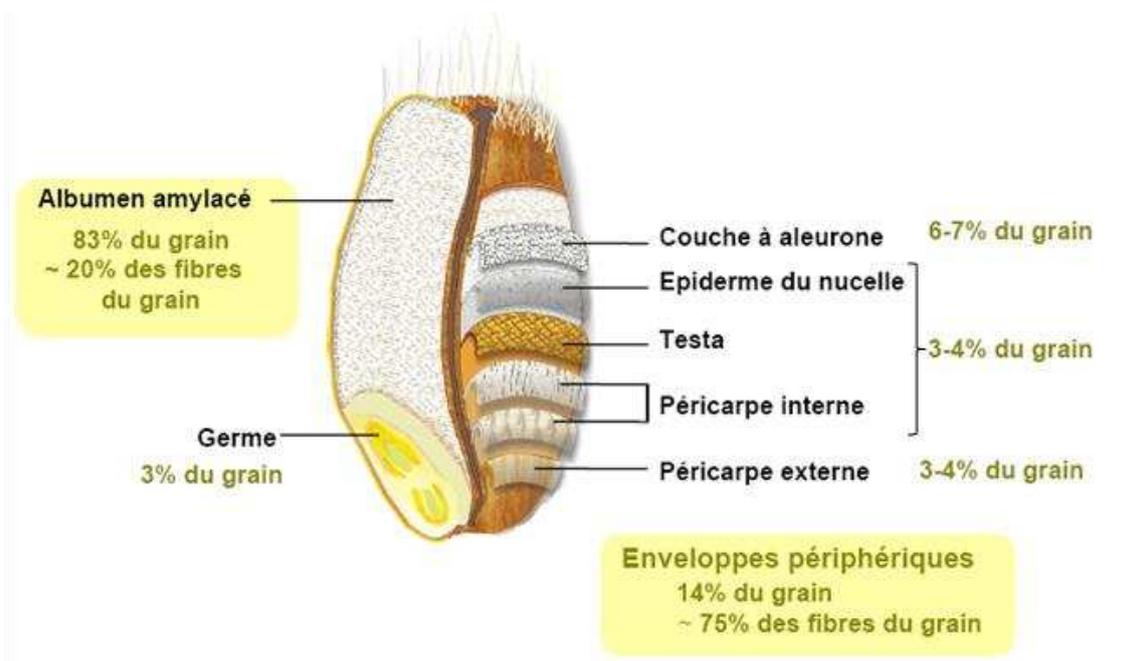


Figure 8. Schéma de la structure du grain du blé tendre

L'albumen : qui représente 80-85% (w/w) du grain, est principalement composé de granules d'amidon noyés dans une matrice protéique (mélange de prolamines). Le glucose est le principal monosaccharide (96%) de l'albumen amylicé qui ne contient que 2% (w/w) des arabinoxylanes (AX).

Les enveloppes ou couches périphériques : qui représentent 13-17% (w/w) du grain, entourent l'albumen ; elles rassemblent (de l'intérieur vers l'extérieur) : la couche d'aleurone, la couche hyaline, le tégument, le péricarpe interne et le péricarpe externe.

Le germe : (soit 3% du grain) est composé de l'embryon et du scutellum ; est riche en lipides, protéines, sucres neutres, ainsi que minéraux, vitamines et stérols.

Comparativement à d'autres céréales, le grain de blé tendre possède un sillon résultant d'une invagination des téguments, sur toute sa longueur et du côté du germe. Les faisceaux nourriciers de la graine au cours de son développement sont localisés au fond de ce sillon.

Le grain est principalement constitué d'amidon, d'eau et de protéines, en plus des polysaccharides non amyliques, des lipides et des minéraux. La composition moyenne du grain de blé tendre est donnée par le tableau suivant (Tableau 1) (Feillet, 2000) :

Tableau 1. Distribution des principaux constituants du grain de blé

| Constituant | Structure histologique | | | | | | | | |
|-------------------|------------------------|-----|------------------------------|-----|--------------|------|--------------|-----|-----------|
| | Grain | | Péricarpe (6) ⁽¹⁾ | | Aleurone (7) | | Albumen (84) | | Germe (3) |
| | % G | % T | % G | % T | % G | % T | % G | % T | % G |
| Protéines | 13,7 | 10 | 4,4 | 30 | 15,3 | 12,0 | 73,5 | 31 | 6,8 |
| Lipides | 2,7 | 0 | 0 | 9 | 23,6 | 2,0 | 62,9 | 12 | 13,5 |
| Amidon | 68,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,2 | 100,0 | 0 | 0,0 |
| Sucres réducteurs | 2,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,8 | 62,7 | 30 | 37,3 |
| Pentosanes | 7,4 | 43 | 35,1 | 46 | 43,8 | 1,6 | 18,3 | 7 | 2,9 |
| Cellulose | 2,8 | 40 | 87,1 | 3 | 7,6 | 0,1 | 3,1 | 2 | 2,2 |
| Minéraux | 1,9 | 7 | 22,6 | 12 | 43,6 | 0,5 | 22,6 | 6 | 9,7 |

% G : % du constituant dans le grain ; % T : % du constituant dans le tissu ; ⁽¹⁾ % du tissu dans le grain.

Les constituants se répartissent de manière inégale au sein des différentes parties du grain. Ainsi, l'amidon se trouve en totalité dans l'albumen amylicé. Les protéines se

localisent dans l'assise protéique (protéines de réserve) de l'albumen mais également dans le germe et les enveloppes (aleurone et péricarpe). Les matières minérales sont majoritairement présentes dans les enveloppes (péricarpe et couche à aleurone). Les lipides principalement localisés dans le germe se repèrent aussi dans l'assise protéique et dans l'albumen. Les pentosanes se retrouvent dans la couche à aleurone et dans le péricarpe. Ce dernier est riche en cellulose.

I.4.1. Les protéines du grain de blé tendre

Les différentes protéines présentes dans le grain de blé tendre peuvent être classées selon plusieurs méthodes. La première classification des protéines est fondée sur la solubilité de celles-ci dans différents solvants (Osborne, 1924) (i.e. solubilité dans l'eau pour l'albumine, solubilité dans les solutions salines pour les globulines, solubilité dans les solutions alcooliques pour les gliadines et solubilité dans les solutions acides ou alcalines pour les gluténines dites solubles). Le résidu protéique insoluble à l'issue de ces différentes étapes d'extraction séquentielle constitue la fraction des gluténines dites insolubles (Feillet, 2000) (Tableau 2). La classification d'Osborne (1907) reste une méthode simple utilisée pour une séparation initiale aboutissant à des fractions de protéines semi-pures (Goesaert et al., 2005).

Tableau 2. Classification des protéines du grain de blé tendre

| Osborne (1907) | | Shewry <i>et al.</i> (1986) | | Singh et Shepherd (1988) | | |
|----------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--|--|
| Groupes | Solubilité | PM (kDa) | Composition | Structure | Localisation des gènes | Fonction |
| Albumines | Eau | 5 à 90 | | | | Protéines de structure et fonctionnelles |
| Globulines | Sels neutres | | | | | |
| Gliadines | Alcools dilués | 25 à 75 | | Monomériques | | Protéines de réserve ou Prolamines |
| - ω | | | Pauvres en S | | <i>Gli-1</i> (1A,1B, 1D) C | |
| - α | | | Riches en S | <i>Gli-2</i> (6A,6B, 6D) C | | |
| - β | | | | <i>Gli-2</i> (6A, 6B, 6D) C | | |
| - γ | | | | <i>Gli-1</i> (1A, 1B, 1D) C | | |
| Gluténines | Acides, bases réducteurs, détergents | 100 à plusieurs milliers | | Agrégées ou polymérisées | <i>Glu-3</i> (1A,1B, 1D) C <i>Glu-1</i> (1A,1B, 1D) L | |

La classification de ces mêmes protéines peut également être faite selon leur fonctionnalité, leur nature biochimique, leurs caractéristiques moléculaires (i.e. capacité de polymérisation et composition en acides aminés) (Shewry et al., 1986). Les protéines de réserves ou prolamines sont classées quant à elles en deux principaux groupes, les gliadines de nature monomérique et les gluténines de nature polymérique. Une deuxième discrimination peut être faite en fonction de la teneur en soufre de ces protéines (Tableau 2) (Schofield, 1994) :

- Les prolamines pauvres en soufre qui représentent 10-20% des prolamines totales. Elles correspondent à des protéines monomériques du type ω -gliadines ayant une masse moléculaire comprise entre 44 et 78 kDa (Shewry et Mifflin, 1985) ;
- Les prolamines riches en soufre qui représentent 70% des prolamines totales et ayant une masse moléculaire comprise entre 20 et 45 kDa. Elles comportent les α -, β - et γ -gliadines, en plus des sous-unités gluténiques de faible poids moléculaire (SG-FPM) ;
- Les sous-unités gluténiques de haut poids moléculaire (SG-HPM), intermédiaires en soufre sont divisés en deux sous-groupes : les sous-unités gluténiques de haut poids moléculaire de type x et de type y, représentant chez le blé tendre 20% de la fraction totale des prolamines (Halford et al., 1992).

I.4.1.1. Les protéines fonctionnelles

Les albumines et les globulines formant 15 à 20% des protéines du grain de blé tendre sont concentrées dans les téguments du grain. Elles sont extraites par des solutions salines neutres (pH=7,0) (Shewry et al., 1995; Shewry et Halford, 2002). Elles se concentrent principalement dans la périphérie du grain. Les albumines et les globulines s'accumulent dans le grain de blé rapidement jusqu'à 21-22 JAF (Carceller, 2000). Leurs propriétés physico-chimiques (composition en acides aminés et poids moléculaire) et fonctions (activités enzymatiques) sont très diverses. Les albumines et les globulines comportent des composants multiples. Elles se caractérisent par leur teneur en acide glutamique (20%) et en proline (7%). Elles contiennent aussi la lysine et l'histidine (7%). Leur masse moléculaire est comprise entre 5 et 90 kDa. L'influence des protéines solubles sur la valeur boulangère d'une

farine reste toujours mal connue (Veraverbeke et Delcour, 2010). Elles ont des propriétés fonctionnelles (activités enzymatiques : α -amylase et β -amylase, protéase, oxydoréductases ; inhibiteurs d'enzymes, pouvoir émulsifiant et moussant).

I.4.1.2. Les protéines de réserve du grain de blé tendre : les prolamines

Les prolamines représentent 80 à 85% des protéines totales du blé tendre et constituent une réserve d'azote lors de la phase de germination et de levée de la jeune plantule (d'où le terme de protéines de réserve) (Shewry et al., 1995 ; Shewry et Halford, 2002). Ces protéines sont localisées dans l'albumen des grains matures formant une matrice continue (matrice protéique) enveloppant les granules d'amidon. Elles sont formées de deux groupes de protéines, les gliadines et les gluténines. Les gliadines sont extraites par des solutions alcooliques [Ethanol à 70% (v/v)] alors que les gluténines ne peuvent être solubilisées qu'en présence d'acide. Malgré ces extractions séquentielles, une partie des prolamines demeure non extractible et est qualifiée de prolamines résiduelles (ou gluténines insolubles). Leur quantité relative varie de manière importante d'une variété de blé tendre à une autre (Schofield, 1994). Les prolamines (gliadines + gluténines) sont les protéines qui se lient en un réseau viscoélastique qu'on appelle le gluten. Le gluten correspond donc à un réseau protéique formé d'un mélange hétérogène de gliadines et gluténines associées par des liaisons covalentes (S-S notamment) et non-covalentes et des interactions hydrophobes (Feillet, 2000).

Les aptitudes à la transformation du grain de blé tendre (aptitude à la panification notamment) sont en grande partie en fonction de sa teneur et de sa composition en protéines de réserve. En effet, ces paramètres conditionnent les propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines et/ou des pâtes fabriquées (Lerner et al., 2006). Le gluten favorise l'absorption d'eau, la cohésion, et conditionne la viscosité et l'élasticité d'une pâte. Les études menées au cours des trente dernières années ont pu démontrer que les gliadines sont responsables des propriétés de viscosité et d'extensibilité des pâtes, alors que, dans le même temps, les gluténines (ou plus précisément les polymères de grande taille) déterminent les propriétés plastiques (Wall, 1979). Ainsi, le rapport massique entre les gliadines et les gluténines modifie fortement les propriétés et les équilibres rhéologiques d'une pâte.

1.4.1.2.1. Les gliadines : les prolamines monomériques

Ces protéines représentent en moyenne 40% (w/w) des protéines de la farine de blé tendre. Ces protéines monomériques sont caractérisées par poids des moléculaires variant entre 30 et 80 kDa. Quatre types de gliadines peuvent être identifiés biochimiquement selon leur différence de mobilité électrophorétique en milieu acide (Feillet, 2000):

- Les α -gliadines qui représentent 25% (w/w) des gliadines totales et qui possèdent des masses moléculaires comprises entre 27 et 38 kDa ;
- Les β -gliadines qui représentent 30% (w/w) des gliadines totales et qui possèdent des masses moléculaires comprises entre 27 et 41 kDa ;
- Les γ -gliadines qui représentent 30% (w/w) des gliadines totales et qui possèdent des masses moléculaires comprises entre 16 et 50 kDa ;
- Les ω -gliadines qui représentent 15% (w/w) des gliadines totales et possèdent des masses moléculaires comprises entre 57 et 80 kDa.

Les gènes codant pour les gliadines sont situés sur le bras court des chromosomes 1 et 2 du blé tendre aux loci Gli-1 et Gli-2 : Gli-A1, Gli-B1 et Gli-D1 pour les ω -gliadines et Gli-A2, Gli-B2 et Gli-D2 pour les β -gliadines (Singh et Shepherd, 1988).

1.4.1.2.2. Les gluténines : les prolamines polymériques

Les gluténines (Tableau 2) représentent en moyenne 40 à 50% (w/w) des protéines de la farine de blé tendre. Ces protéines sont des mélanges hétérogènes de polymères ayant des masses moléculaires variant entre 80 kDa et plusieurs millions de Daltons. Les protéines polymériques sont formées de sous-unités liées entre-elles par des ponts disulfures intermoléculaires (Wrigley et al., 2006) qui peuvent être rompus par des agents chimiques réducteurs comme le β -mercaptoéthanol et/ou le dithiothreitol. Les sous-unités gluténiques sont classifiées selon leurs poids moléculaires : les SG-FPM (sous-unités gluténiques de faible poids moléculaire) et les SG-HPM (sous-unités gluténiques de haut poids moléculaire).

Les sous-unités gluténiques de faible poids moléculaire (SG-FPM) sont solubles en milieu acide et sont biochimiquement proches des gliadines (Dacosta, 1986). Leur masse

moléculaire varie entre 36 et 44 kDa (Feillet, 2000). Elles sont classées en trois grands groupes (Branlard, 2009). Le premier, majoritairement formé par des sous-unités ayant une faible mobilité en SDS-PAGE par rapport aux ω -gliadines. Le second est formé par des gluténines ayant une mobilité sur SDS-PAGE similaire à celle des α , β et γ -gliadines. Enfin, le troisième groupe contient les gluténines ayant une forte mobilité en SDS-PAGE.

Les sous-unités de gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM) sont classées en deux types suivant leur mobilité électrophorétique en SDS-PAGE. Les SG-HPM de type x ont des masses moléculaires comprises entre 83 et 120 kDa, alors que les SG-HPM de type y possèdent des masses moléculaires comprises entre 67 et 74 kDa (Shewry et al., 2003b). Les SG-HPM du type y sont plus riches en groupement SH. Les SG-HPM sont les fractions protéiques les plus étudiées comme ils codent pour la force du gluten et la qualité du pain (Macritchie, 1992). Les gènes codant pour tous les gluténines sont situés sur le même chromosome 1 du blé tendre. Les SG-HPM sont codés par le bras long des chromosomes 1A, 1B et 1D (loci Glu-A1, Glu-B1 et Glu-D1) et les SG-FPM par le bras court des mêmes chromosomes (1A, 1B et 1D) sur les loci Glu-A3, Glu-B3 et Glu-D3 (Carceller, 2000) (Tableau 2).

Chaque variété de blé tendre contient entre 3 et 5 différents SG-HPM et entre 7 et 16 SG-FPM, ce qui explique la différence de composition des gluténines entre les variétés du blé étant donné qu'il existe plus que 20 différents SG-HPM et 40 différents SG-FPM (Gupta et Shepherd, 1990).

Cette composition en sous-unités gluténiques va avoir une influence sur les aptitudes à la transformation technologique des farines de blé tendre en modifiant, notamment, la distribution moléculaire des polymères gluténiques formés lors de la phase de maturation (Branlard et al., 2001). Comme nous l'aborderons plus loin, cette distribution moléculaire affecte les aptitudes rhéologiques des farines et pâtes de blé tendre. A titre d'illustration, certains travaux ont démontré que la présence des SG-HPM 1Dx5 et SG-HPM 1Dy10 induit des propriétés viscoélastiques supérieures à celles des SG-HPM 1Dx2 et SG-HPM 1Dy12 (Marchylo et al., 2001). D'autres ont mentionné que la présence des SG-HPM 1Ax1, 1Ay2*, 1Bx17+1By18 et 1Dx5+1Dy10 est associée à l'obtention d'une pâte tenace qui détermine

une qualité de pain supérieure. Alors qu'à l'inverse, la présence des SG-HPM 1Dx2 et 1Dy12 est associée à une pâte caractérisée par une faible ténacité (Gupta et al., 1996).

Tous ces éléments expliquent l'importance que peut revêtir la composition en sous-unités gluténiques d'un grain de blé tendre lors de la mise place de travaux d'amélioration génétique (Rhazi et al., 2009).

1.4.1.2.3. Importance des prolamines dans la définition des aptitudes à la transformation du blé tendre (exemple de la panification)

Les aptitudes à la panification de grains d'une variété de blé tendre sont majoritairement reliées à la quantité et la qualité de ses protéines de réserves (Finney, 1948). En effet, durant le pétrissage, les protéines sont hydratées et puis organisées en réseau sous l'effet de l'énergie mécanique transmise à la pâte. Les prolamines présentes forment un réseau doué de propriétés viscoélastiques, le gluten (Veraverbeke et al., 1999). Le développement de ce réseau protéique durant la phase de pétrissage de la pâte peut être facilement enregistré grâce aux outils de mesure tels que le farinographe et/ou le mixographe (Walker et Hazelton, 1996).

La qualité du gluten formé dépend du rapport gluténine/gliadine au sein des prolamines mais également de la distribution moléculaire des gluténines sous l'effet de la composition en sous-unités gluténiques (SG-HPM et SG-FPM) et du rapport de celles-ci (SG-HPM/SG-FPM). Ainsi, les SG-HPM sont responsables de la force (résistance à la déformation) et de la ténacité du gluten (Ewart, 1972; Belton, 1999) alors que les gliadines sont responsables quant à elles de l'extensibilité du réseau (Cornec et al., 1994). Seuls les polymères ayant une certaine taille (ayant un rapport SG-HPM/SG-FPM au-delà d'une certaine valeur – masse moléculaire moyenne critique) contribuent à la résistance du réseau du gluten (Macritchie, 1992; Singh et MacRitchie, 2001 ; Aussenac et al., 2020). C'est la raison pour laquelle certains chercheurs ont pu démontrer que seule la fraction de polymères dits « insolubles » ou « inextractibles » au SDS est corrélée à la résistance de la pâte (Goesaert et al., 2005; Lemelin et al., 2005).

La résistance de la pâte, augmente durant cette phase de pétrissage, atteint un maximum et puis décroît rapidement sous l'effet du phénomène de sur-pétrissage résultant d'un

affaiblissement du réseau. Dans le cadre d'une transformation de type panification, un certain équilibre entre l'élasticité et l'extensibilité de la pâte (et donc du gluten) est nécessaire. Le réseau gluténique joue un rôle important dans la fermentation, déterminant le volume du pain et la structure de la mie, dans la mesure où il est responsable de la rétention du CO₂ produit par la levure (Gan et al., 1995). Le volume du pain augmente avec la force de la pâte jusqu'à une certaine limite où le pain ne se développe plus.

Durant la cuisson, le gluten subit des changements dramatiques qui sont déterminées par l'hydrophobicité des surfaces des protéines, les changements sulphydryl et disulfures et la formation de nouvelles liaisons disulfures au niveau des protéines (Weegels et al., 1994; Lavelli et al., 1996).

Durant le rassissement, la rétrogradation de l'amidon joue le rôle principal alors que le rôle du gluten reste moins clair. Malgré tout, certains travaux de recherche ont montré que les interactions amidon-gluten jouent un rôle dans le durcissement du pain (Gray et Bemiller, 2003), alors que d'autres ont trouvé que le rassissement du pain sans gluten était similaire au pain normal (Morgan et al., 2006).

Enfin, aux termes de ces différents paragraphes précédents, il est donc important de noter que les aptitudes générales à la transformation pour la panification d'un ensemble de grains de blé tendre découlent majoritairement du bon agencement de la présence (et abondance) de certaines prolamines mais également du bon agencement entre-elles (i.e. formation du réseau de gluten grâce aux interactions protéines-protéines). Or, comme nous allons le voir plus loin, la présence et/ou l'abondance de certaines prolamines et leur degré d'interaction est sous le double effet génotypique et environnemental bien évidemment pour un type de transformation donné (i.e. protocole technologique fixé) (Drapon et Potus, 1990).

1.4.1.2.4. Effet génotypique et environnemental de la teneur et/ou de la composition des prolamines

Les aptitudes à la transformation du grain de blé sont très dépendantes des prolamines qu'il contient. Manifestement, la composition et la quantité de ces prolamines sont largement influencées par le génotype retenu mais également par les différents facteurs environnementaux (Rharrabti et al., 2003).

La variabilité des protéines de réserve en fonction du génotype a été l'objet de plusieurs travaux de recherche. Le génotype influe significativement les paramètres de qualité puisqu'il est considéré comme une source de variation du taux de protéines (Luo et al., 2000). Ainsi, il a été démontré que le niveau de protéines dans le grain de blé est contrôlé par la nature du génotype lors de plusieurs travaux différents (Fenn et al., 1994; Hazen et al., 1997; Yong et al., 2004 ; Denčić et al., 2012). Dans le même temps, certaines études ont signalé que la qualité des protéines et/ou la nature du gluten formé est corrélée à un effet génétique (Dacosta, 1986). Enfin, d'autres études ont, quant à elles, démontré que non seulement la quantité de prolamines mais également la composition de ces dernières est influencée par le facteur génotypique (Bogard et al., 2011). Ceci explique la variabilité du comportement des variétés dans une même région de culture ; et qui est due à la diversité de la composition allélique en protéines pour chaque variété. Ainsi, le facteur génotypique a un effet sur la variabilité des SG-HPM et des SG-FPM et de leur ratio SG-HPM/SG-FPM. Cette variabilité est essentiellement en relation avec la composition allélique en loci Glu-A1, Glu-B1 et Glu-D1 pour les SG-HPM et du loci Glu-A3, Glu-B3 et Glu-D3 pour les SG-FPM (Brites et Carrillo, 2001). En outre, Graybosch et al. (1995) ont trouvé un effet supérieur du génotype sur le contenu des fractions monomériques (gliadines) et polymériques (gluténines).

En effet, la synthèse des protéines de réserve au cours du développement du grain, est régulée par de nombreux facteurs de transcription et par la disponibilité de l'azote et du soufre (Bonnot et al., 2020). Les protéines synthétisées, s'accumulent dans les corps protéiques, suivent un phénomène de polymérisation via des liaisons disulfures (SS) des sous-unités de gluténines de poids moléculaire élevé et faible (SG-HPM et SG-FPM) et certaines α -, β - et γ - gliadines, avec un nombre de cystéines (Shewry et Tatham, 1997). Les agrégats, principalement composés de polymères gluténiques, contiennent également les

gliadines monomères agrégées par des liaisons hydrogènes et des interactions hydrophobes (Shewry et al., 2003a). Pendant le développement des grains, les polymères formés présentent une phase exponentielle d'accumulation de leur fractions insolubles dans le SDS 2%, qui débute à environ 30 jours après floraison correspondant à la fin de du palier hydrique et au début de la phase de déshydratation des grains (Carceller et Aussenac, 1999). Les corpuscules protéiques disparaissent au cours de cette phase de dessiccation du grain, laissant la place à une matrice protéique continue et dense entourant les granules d'amidon. De plus, le renforcement du caractère d'agrégation dans des protéines polymériques au cours de la dessiccation du grain résulte du renforcement des interactions intermoléculaires entre les différentes sous-unités gluténiques (SG-HPM et SG-FPM) (Rhazi et al., 2003).

Pendant le remplissage du grain, les sous-unités gluténiques et en particulier les SG-FPM, qui ont une grande quantité de groupements SH libres, s'oxydent pendant la dessiccation du grain. Cette oxydation coïncide avec l'augmentation de la distribution des masses moléculaires (MWD) et l'accumulation des polymères inextractibles (HPM). L'amplitude du mécanisme général de la formation de polymères HPM dans le grain, qui correspond à une modification naturelle du statut redox des protéines de réserve de grain au cours de la phase de dessiccation, dépend du potentiel d'interaction moléculaire des sous-unités gluténiques (i.e. le nombre de résidus libres de SH s'engageant dans la formation des liaisons SS intermoléculaires). Pour un génotype de blé donné, toute modification de ce potentiel d'interaction moléculaire peut affecter la formation des HPM et, par conséquent, du MWD de polymères totaux. Parmi les molécules naturelles susceptibles de se comporter comme des « limiteurs d'interaction » potentiels, on peut citer le glutathion, qui assure le maintien du statut redox au niveau cellulaire mais aussi le stockage et le transport du soufre réduit nécessaire à la synthèse des protéines (Rennenberg, 1980). En fait, ce tripeptide peut se produire de manière endogène dans le grain de blé sous forme d'un mélange de protéine-glutathion disulfures (PSSG) (Ferreira et al., 2012). Environ 85% des PSSG dans les grains de blé matures sont représentés par des protéines polymères (PP) conjuguées au glutathion (PPSSG). Les variations subies par le statut redox cellulaire en réponse aux stimuli environnementaux en amont de la phase de dessiccation du grain peut expliquer les fluctuations observées dans les interactions inter-polymères et ainsi l'accumulation des HPM qui contribuent à la qualité boulangère et la tolérance de la pâte.

De ce fait, l'effet de l'environnement sur la qualité des protéines de réserve et leurs équilibres importants (i.e. gliadines/gluténines, SG-HPM/SG-FPM, gluténines insolubles/gluténines solubles...) se traduit par l'influence du climat (i.e. températures et précipitations ainsi que leur distribution durant la saison de culture) (Denčić et al., 2012). La teneur du blé en protéines s'élève quand l'intensité de la température est plus ou moins grande pendant une longue durée (Oury et al., 1999). Des études menées sur le blé ont permis d'obtenir des teneurs en protéines plus élevées dans des régions semi-arides que dans des régions sub-humides (Daaloul Bouacha et al., 2015). Également, il a été montré que l'application des températures élevées durant la phase du remplissage du grain augmente la quantité globale des sous-unités gluténiques (Gooding et al., 2003; Moral et al., 2007). Des travaux récents (Branlard et al., 2020) ont confirmé une augmentation du poids moléculaire des polymères de gluténines suite à l'augmentation des températures enregistrées durant les saisons de culture. D'autres recherches ont signalé une augmentation significative de la synthèse des gliadines sous l'effet du stress hydrique et thermique (Panozzo et al., 2001). Flagella et al. (2010) ont souligné l'augmentation du ratio SG-HPM/SG-FPM sous l'effet du stress environnemental. De plus, des travaux de recherche (Aussenac et al., 2020) ont signalé que la formation des polymères gluténiques, jouant un rôle déterminant en panification, ainsi que leur distribution moléculaire répondaient davantage aux conditions de croissance qu'aux facteurs génétiques.

Enfin, il faut noter que la combinaison des facteurs climatiques et génotypiques influence significativement la qualité du grain de blé en agissant sur les polymères gluténiques (Malik et al., 2013). Cette combinaison affecte aussi la distribution moléculaire en masse des gluténines (Southan et MacRitchie, 1999).

I.4.2. L'amidon

L'amidon, sous forme semi-cristalline, représente le polysaccharide de réserve le plus abondant dans la farine. Sa structure et ses propriétés physico-chimiques ont fait l'objet de nombreuses études (Eliasson, 1996; Buléon et al., 1998; Parker et Ring, 2001).

L'amidon est principalement constitué de l'assemblage de polymères de glucose qui sont l'amylose et l'amylopectine (Figure 9) (Feillet, 2000).

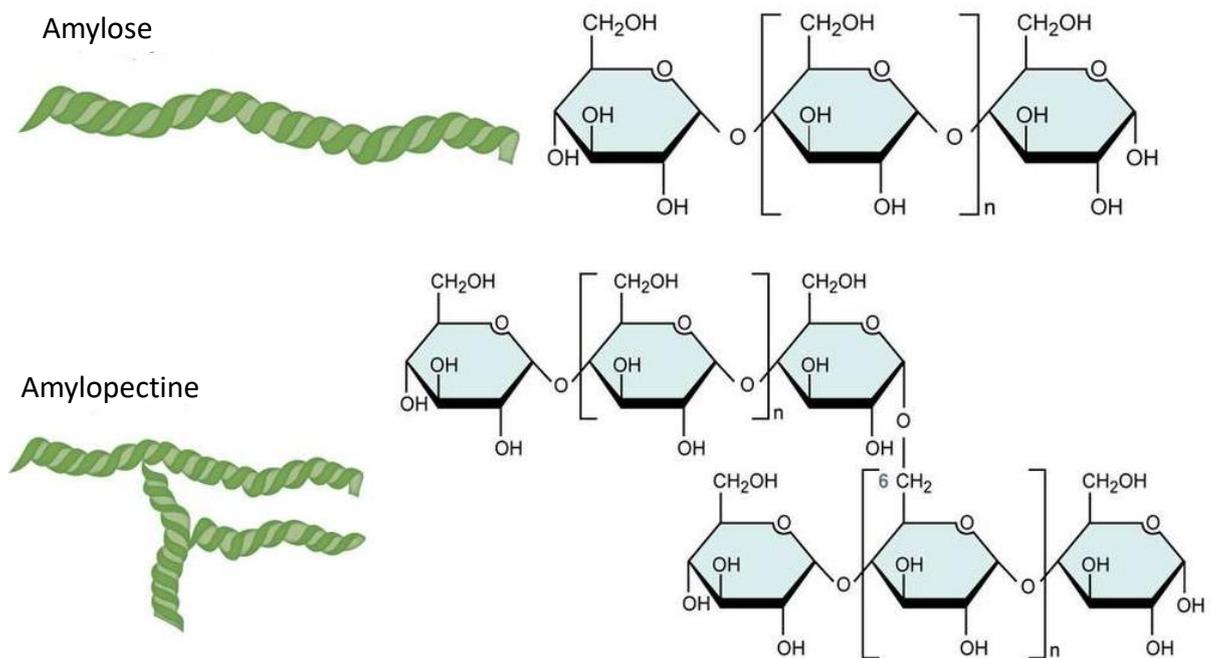


Figure 9. Structure de l'amylose et de l'amylopectine

L'amylose est un homopolymère linéaire formé de liaisons α -(1,4) D-glucopyranose et quelques rares liaisons α -(1,6) (Hizukuri et al., 1981; Shibanuma et al., 1994) (Figure 9) avec un degré de polymérisation correspondant à 500-6000 unités de glucose (Feillet, 2000). L'amylopectine est un homopolymère très ramifié avec un degré de polymérisation variant entre 3×10^5 et 3×10^6 unités de glucose. Il est composé de chaînes liées en α -(1,4) D-glucopyranose et inter-liées avec des liaisons α -(1,6) (Kent-Jones et Amos, 1947; Zobel, 2006). La ramification se crée entre le carbone 6 d'une molécule de glucose et le carbone 1 d'une autre molécule (α -1,6) (Chiron, 1994). Le rapport amylose/amylopectine diffère selon la qualité l'amidon ; les niveaux d'amylose et d'amylopectine sont respectivement de l'ordre de 25 à 28% et 72 à 75% (Colonna et Buleon, 1992).

L'amidon du grain est présent sous forme de granules de tailles différentes. Les granules du type A (80-90% en poids et 15-20% en nombre) sont de grandes tailles (20 μ m) et de formes lenticulaires et, les granules du type B plus petits (10 μ m) sont de formes sphériques (Moon et Giddings, 1993; Karlsson et al., 2006). Enfin, les granules du type C ont une taille inférieure à 10 μ m. Les granules A commencent à se former très vite après la

floraison et ils augmentent en nombre au cours du remplissage des grains, alors que les granules type B sont initiés quelques jours après la floraison et restent considérablement plus petits (Morrison et Gadan, 1987; Macleod et Duffus, 1988). Les granules type C, de petites tailles, sont initiés quant à eux vers la fin de la période de remplissage (25 JAF) (Bechtel et al 1990).

Plusieurs niveaux d'organisation du granule d'amidon ont été décrits (Figure 10) (Goesaert et al., 2005).

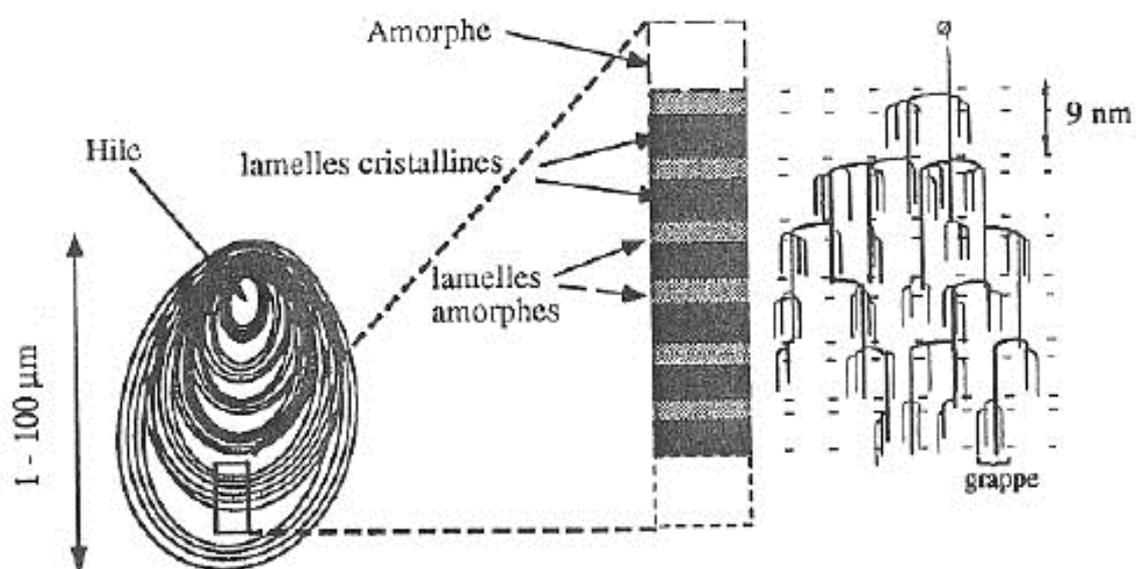


Figure 10. Différents niveaux de structure d'un granule d'amidon

Le granule d'amidon est défini par une alternance de couches circulaires amorphes et semi-cristallines avec une épaisseur comprise entre 120 et 400 nm (French, 1984; Buléon et al., 1998). La couche amorphe est moins dense et contient l'amylose et probablement de l'amylopectine moins ordonné (non-cristalline), alors que la couche semi-cristalline est composée de lamelles cristallines et amorphes alternées ayant une épaisseur de 9-10 nm (Jenkins et al., 2006). Les lamelles cristallines sont formées de doubles hélices d'amylopectine en parallèle, alors que les lamelles amorphes sont des branches d'amylopectine. Ces lamelles sont rangées selon une structure sphérique de diamètre allant de 20 à 500 nm (Gallant et al., 1997). L'amidon natif est partiellement cristallisé à un degré de cristallisation de 20 à 40% avec une prédominance pour l'amylopectine.

Une fraction importante des granules d'amidon peut être endommagée durant la mouture des graines. L'endommagement mécanique des granules d'amidon affecte les qualités de l'amidon (Chiron, 1994). L'amidon endommagé a une grande absorption en eau et une susceptibilité supérieure à l'attaque des enzymes fongiques qui l'hydrolyse (Hoseney, 1994).

Les granules d'amidon absorbent jusqu'à 50% (w/w) de leur poids en eau à température ambiante et se gonflent (French, 1984). Ce processus peut être réversible avant d'atteindre la température de la gélatinisation à partir de laquelle une série de changements détruit l'ordre moléculaire du granule d'amidon (Atwell, 1988). Le chauffage et l'hydratation des zones non- cristallines facilitent la mobilité moléculaire de ces régions et provoquent une transition moléculaire irréversible (Figure 11) (Bertoglio et Martineau, 2017). Ceci inclut la dissociation des doubles hélices d'amidon et la fonte des cristallites (Tester et Debon, 2000; Waigh et al., 2000). En plus de la perte de cristallinité, le processus de gélatinisation est toujours associé au gonflement et à la déformation ainsi qu'à la diminution de la solubilisation de l'amidon, contribuant à une augmentation de la viscosité de la suspension de l'amidon (Kalichevsky et Ring, 1987). Avec des chauffages dépassant les 75 °C, le gonflement des granules continue et une suspension de granules amorphes gonflés et des molécules solubilisées forment l'empois d'amidon (pâte) (Eliasson, 1996; Tester et Debon, 2000).

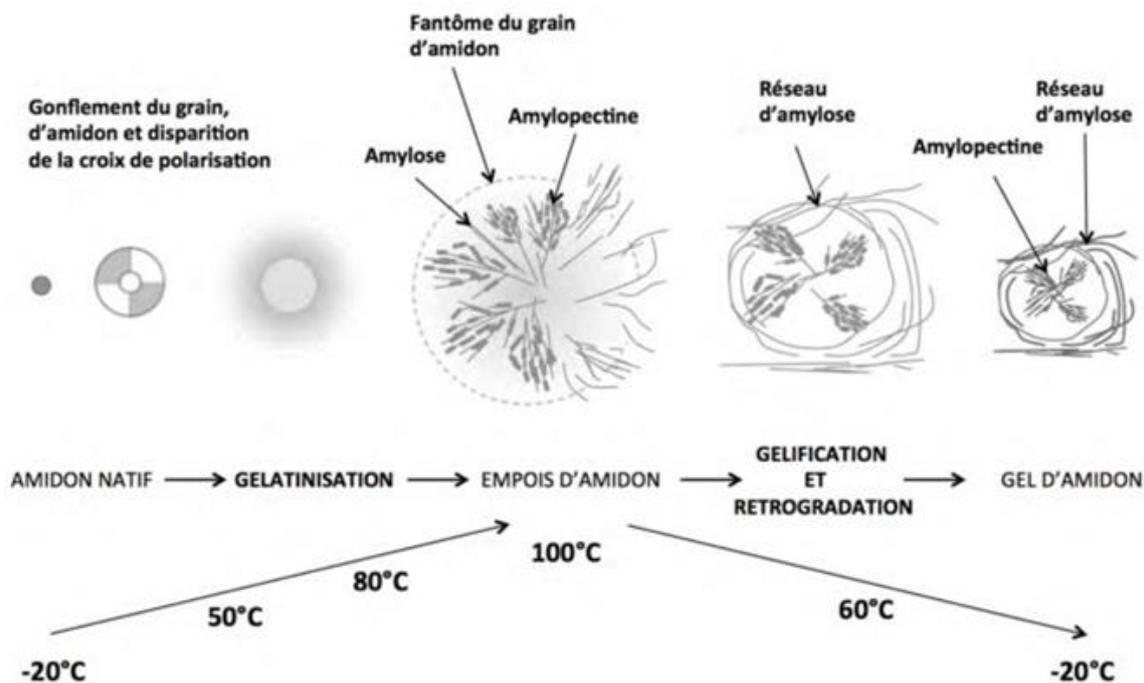


Figure 11. Modifications de l'amidon durant le chauffage et le refroidissement

Lorsque la pâte d'amidon est refroidie, les polysaccharides se réassocient pour former un état cristallin, c'est la rétrogradation (Atwell, 1988). A une concentration d'amidon supérieure à 6% (w/v), un gel se forme. Il est composé d'amylopectine gélatinisé relié à une matrice d'amylose par des hélices doubles (Miles et al., 1985). Après quelques heures, ces hélices forment une structure cristalline stable. La recristallisation des chaînes courtes d'amylopectine est un processus plus lent (plusieurs jours ou semaines) et se déroule dans les granules gélatinisés. Ainsi, la rétrogradation de l'amylose détermine la dureté initiale du gel d'amidon, alors que la rétrogradation de l'amylopectine détermine le développement du gel le plus long ainsi que la cristallinité de l'amidon (Miles et al., 1985). Les cristallites d'amylopectine fondent à 60 °C. La rétrogradation de l'amidon (amylopectine) est influencée par un certain nombre de conditions et de substances tel que le pH et la présence du sel, du sucre et des lipides (Eliasson, 1996).

Une caractéristique importante de l'amylose est sa capacité de former des inclusions en hélices complexes avec un nombre de substances tel que les lipides polaires (le complexe amylose-lipide). La présence des lipides affecte la gélatinisation et la rétrogradation de l'amidon (Eliasson, 1996). Durant le refroidissement, l'amylose solubilisé forme une chaîne

continue où les granules gonflées et déstructurées sont fixées. Grâce à sa rétrogradation rapide, l'amylose est un élément essentiel de la structure du pain et un facteur déterminant de la dureté. Une farine de blé tendre ne contenant pas d'amylose n'est pas convenable pour la panification car celle-ci produit un pain avec une mie présentant de faibles caractéristiques.

Un certain nombre d'agents peuvent modifier l'action de l'amidon au cours de la panification. Il s'agit notamment des enzymes amylolytiques (amylases) capables d'hydrolyser les liaisons α -(1,6) et α -(1,4) du polymère amylicé (MacGregor et al., 2001). En hydrolysant les liaisons α -(1,4) de l'amidon ces α -amylases produisent des molécules d'un poids moléculaire plus bas, les α -dextrines. Les enzymes de débranchement comme les pullulanases et iso-amylases, hydrolysent quant à elles les ponts α -(1,6). Les β -amylases hydrolysent les liaisons α -(1,6). Elles dégradent l'amidon (Hoseney, 1994).

I.4.2.1. Importance de l'amidon dans la définition des aptitudes à la transformation du blé tendre (exemple de la panification)

L'amidon intervient de différentes manières au cours du procédé de transformation que représente la panification. Ces caractéristiques physico-chimiques définies par la cristallinité, la distribution granulométrique des granules, la gélatinisation et la rétrogradation ont un effet sur la qualité du pain fabriqué. Les caractéristiques fonctionnelles de l'amidon correspondent à son pouvoir épaississant et gélifiant au cours de la panification. Ces caractéristiques sont définies par sa structure et sa composition (Joly, 2006).

L'amidon représente une source inépuisable des sucres fermentescibles utilisés par la levure pour sa multiplication et sa croissance. Il contribue à la formation de la pâte grâce à son pouvoir de fixation de l'eau [absorbe 45% (w/v) de l'eau ajoutée à la farine ; pouvoir dépendant de son taux d'endommagement au cours de la mouture des graines de blé] et sa capacité de former des liaisons non-covalentes avec les protéines déterminant ainsi la structuration de la pâte. De faibles interactions entre les protéines et l'amidon conduisent à un pain de volume élevé (Feillet, 2000). De plus, des travaux de recherche ont montré que l'aptitude à la panification du blé dépend de la température de gélatinisation de son amidon (Eliasson et al., 1995). Ceci explique que la prise de volume du pain au four s'arrête au

moment où l'amidon est gélatinisé, ainsi, plus la gélatinisation est tardive et plus le volume du pain présente la faculté de se développer.

Des travaux plus développés ont montré que les caractéristiques de l'amidon en panification dépendent de sa composition et de la taille de ses granules (Joly, 2006). Ainsi, Hug-Iten et al. (1999) ont signalé qu'un rapport amylose/amylopectine équilibré est un facteur important dans la panification. Alors que, Lee et al. (2001) ont relevé que la prédominance de l'amylopectine dans la l'amidon du blé favorise la formation du gaz dans la pâte lors de la fermentation, ce qui contribue à l'augmentation du volume du pain, donnant une mie poreuse. De plus, des travaux ont montré qu'une proportion élevée des granules d'amidon de grandes tailles (type A) peut provoquer la coalescence des cellules de gaz ce qui donne un pain à mie ouverte (Hayman et al., 1998). Alors que, des études ont signalé que les petites granules d'amidon du type B ont un effet sur la qualité technologique du blé comme elles présentent un rapport surface/volume élevé par rapport à celui des granules type A, ce qui influence positivement le taux d'absorption en eau et par la suite la qualité du pain (Hoseney et al., 1971).

I.4.2.2. Effet génotypique et environnemental de la teneur et/ou de structure de l'amidon

La synthèse de l'amylose et de l'amylopectine, composants de l'amidon du blé, est génétiquement contrôlée au travers des systèmes enzymatiques SS (responsable de l'élongation de l'amylopectine) et GBSS (responsable de l'élongation de l'amylose). Les enzymes GBSS sont codées par trois gènes, Wx-7A, Wx-4A et Wx-7D localisés respectivement sur les chromosomes 7A, 4A et 7D du blé tendre (Graybosch, 1998). Des mutations naturelles peuvent avoir lieu modifiant la composition de l'amidon en conduisant à la perte d'un allèle voire de l'enzyme GBSS également. Il en résulte alors une synthèse d'un amidon à faible teneur en amylose. Parfois, il se produit une perte des trois allèles codant pour la GBSS, résultant dans la production d'un amidon sans amylose dit « amidon cireux » (Li et al., 2000; Svihus et al., 2005).

De plus, il a été montré par certains travaux (Rhazi et al., 2021) que les mécanismes génétiques affectent la polymérisation et la structure de l'amidon du blé (i.e. masse

moléculaire, rayon de giration, distribution des granules) ce qui influe par la suite la technologie des grains en question. En effet, l'effet génotypique est réalisé par l'intermédiaire d'un certain nombre d'enzymes très important intervenant dans le métabolisme carboné, plus particulièrement dans les voies de synthèse de l'amidon. De plus, les mécanismes génétiques et enzymatiques sont largement influencés par les facteurs environnementaux qui affectent l'amidon qualitativement et quantitativement. Tout événement environnemental ponctuel et grave pendant les phases de dépôt d'amidon aurait des effets variables, selon les stades de développement du grain de blé, et sur les enzymes liés à la biosynthèse de l'amidon. Ces facteurs environnementaux qui influent la biosynthèse et l'accumulation de l'amidon dans le grain de blé sont surtout la sécheresse et la chaleur (Dupont et Altenbach, 2003).

Ainsi, le stress thermique cause des modifications morphologiques et physico-chimiques de l'amidon du blé. Ces modifications dépendent du stade de développement de la plante où le stress survient. Il a aussi un effet sur la synthèse de l'amidon. En effet, une température supérieure à 35°C durant la phase de remplissage du grain provoque une diminution de la biosynthèse de l'amidon par altérations des enzymes de synthèse (Thitisaksakul et al., 2012). Des études ont montré que des températures élevées appliquées après la floraison réduisent la teneur du grain en amidon (Wang et al., 2012) et modifient sa composition en favorisant le nombre des granules type A aux dépens des granules du type B (Hurkman et al., 2003). D'autres ont signalé que les températures dépassant les 30 °C survenant avant la floraison, causent une diminution du nombre des granules A par rapport aux granules B avec l'apparition de certaines déformations morphologiques (Liu et al., 2011).

Le stress hydrique cause une diminution de la productivité du blé en accélérant l'accumulation de l'amidon dans le grain qui représente 70% du poids du grain. Ainsi, le déficit hydrique qui provoque une altération des activités des enzymes impliquées dans la synthèse de l'amidon et, qui sont notamment l'ADP-glucose pyrophosphorylase (catalyse la transformation du glucose-1-P en ADP-glucose) et l'amidon synthase ainsi que l'enzyme de branchement (responsables de la conversion de ADP-glucose en amylose et amylopectine) (Lalonde et al., 1997; Ahmadi et Baker, 2001). De plus, le stress hydrique modifie certaines caractéristiques de l'amidon telles que les propriétés thermiques et les propriétés de collage. Il cause aussi, une diminution de l'accumulation des petits granules d'amidon (type B) et une augmentation de celle des grosses granules (type A) (Hurkman et al., 2003). Cependant, Liu

et al. (2011) ont montré que la contrainte hydrique est considérée comme un facteur inhibiteur dans la deuxième phase de développement des granules d'amidon qui concerne les granules de type-B, alors que, les granules de type-A qui se développent en premier lieu ne sont pas affectés par ce stress.

Ainsi, le stress hydrique et le stress thermique agissent sur la synthèse de l'amidon et sur sa composition, et la combinaison de ces deux stress influe la distribution des proportions des granules de l'amidon (Tester et Karkalas, 2001; Thitisaksakul et al., 2012).

I.4.3. Les polysaccharides non-amylacés du grain de blé tendre

En marge de l'amidon, le grain de blé tendre contient des polysaccharides non-amylacés constitutifs des parois végétales. Ces composés qui ne représentent que 6 à 8% (w/w) du grain et 2 à 3% (w/w) de la farine sont majoritairement rencontrés dans les assises externes du grain de blé tendre. Les pentosanes, ou hémicelluloses, représentent la majeure partie de ces polysaccharides non amylacés (67%) (JMares et Stone, 1973), les 33% restants étant constitués par les β -glucanes. Malgré leur importance quantitative mineure, ces composés ont des effets majeurs. Ainsi, ils induisent généralement une augmentation de la viscosité des solutions aqueuses et possèdent d'importantes capacités de rétention en eau.

Les pentosanes se divisent en deux groupes selon leur caractère de solubilité dans l'eau : les pentosanes dits « solubles » (30%) et les pentosanes dits « insolubles » (souvent appelés hémicellulose). La différence majeure entre ces deux fractions de pentosanes provient de la différence de leur masse moléculaire ; les pentosanes insolubles ayant une masse moléculaire moyenne plus élevée (la masse moléculaire étant comprise entre 22 kDa et 5000 kDa) (Wang, 2003). Ils sont formés d'arabinoxylanes et d'arabinogalactanes (en fonction de leur squelette composée de D-xylose ou D-galactose) et comportent une faible portion d'acide férulique associé aux arabinoxylanes (Perlin, 1951).

Les pentosanes solubles sont des molécules hydrophiles possédant une forte capacité de rétention d'eau (Feillet, 2000). Ils forment des solutions très visqueuses avec l'eau du fait de la présence des arabinoxylanes (Izydorczyk et Biliaderis, 1995). Par oxydation, l'acide férulique crée des liaisons entre les polysaccharides et les protéines (Vinkx et al., 1991), qui

participent à la viscosité de la pâte, améliorent la rétention gazeuse et par la suite, le volume du pain. Les pentosanes solubles ont un effet bénéfique au cours du procédé de panification. Ils sont capables de fixer de grandes quantités d'eau au sein de la pâte (Biliaderis et al., 1995) mais d'une façon uniforme. Ils agissent comme des régulateurs d'hydratation au cours du pétrissage en mettant à la disposition des protéines du gluten une quantité d'eau nécessaire à la formation du réseau protéique. Cela permet le développement des propriétés viscoélastiques recherchées et, fixe l'excès de l'eau empêchant la pâte de coller. Au cours du développement de la mie, ils contribuent également à la formation d'un environnement aqueux saturé en CO₂ autour des alvéoles limitant ainsi la diffusion du gaz carbonique et participant au meilleur développement du volume du pain (Feillet, 2000).

Les pentosanes insolubles présents dans la farine de blé sont partiellement solubles en milieu alcalin (Feillet, 2000). Les pentosanes insolubles favorisent également l'absorption de l'eau par la farine (Atwell, 1988). Par contre, l'eau absorbée par les particules de dimensions variables est inégalement répartie dans la farine provoquant ainsi un déséquilibre dans la répartition de l'eau dans le milieu et agissant négativement sur la formation du réseau de gluten. Ainsi, les protéines du gluten s'hydratent inégalement et le réseau ne peut se former dans des conditions optimales. De ce fait, le collant de la pâte croît avec l'augmentation des pentosanes insolubles (Goesaert et al., 2005). Ils ont un effet négatif sur le volume du pain, la structure et la couleur de la mie (Chiron, 1994). Par contre, ils retardent le rassissement du pain en formant des liaisons avec l'amylopectine retardant ainsi le phénomène de rétrogradation de l'amidon (Feillet, 2000).

I.4.4. Autres constituants mineurs du grain de blé tendre

Les lipides représentent environ 2% (w/w) de la matière sèche de la farine de blé. Ils sont majoritairement localisés dans le germe (Tableau 1). Dans le même temps, la couche à aleurone est une importante source de thiamine (Vitamine B1), de niacine (Vitamine PP) et de l'acide folique (Vitamine B9). Elle contient également des vitamines liposolubles dont la vitamine E. En outre, la couche à aleurone concentre plus de 40% (w/w) des minéraux du grain.

I.5. Les enjeux et les acteurs de la recherche régionaux pour le blé tendre

Le blé occupe depuis très longtemps une place importante dans la ration alimentaire au Moyen Orient. Il forme la principale céréale produite dans la région et sa production augmente annuellement. Mais il fait face à plusieurs défis qui se sont apparus depuis plusieurs décennies. Le principal enjeu est constitué par le maintien de l'équilibre entre croissance de la demande et les leviers de développement de la production. Or, avec l'explosion démographique, la demande en blé augmente sans que les volumes produits localement ne permettent de satisfaire celle-ci.

Ainsi, les pays du Moyen Orient focalisent leurs perspectives sur des nombreux facteurs conditionnés par l'évolution de l'offre et de la demande dans chacun des pays de la zone. Du côté de la demande, les principaux facteurs se basent sur l'évolution démographique, l'urbanisation et la croissance des revenus. Du côté de l'offre, la maîtrise du progrès technique et sa diffusion forment les points essentiels à gérer. De fait, les importations de céréales augmentent régulièrement dans la zone pour pallier les carences de production du blé de cette zone créant une situation économique et sociale très difficile.

Dans la majorité des zones de production de la région, la très grande majorité des problèmes de productivité et/ou de qualité rencontrés sont liés à l'existence de fortes contraintes environnementales (i.e. manque d'eau conjugué à un régime thermique élevé voire très élevé en fin du cycle de la culture de blé tendre). De fait d'un commun accord, l'ensemble des acteurs de la recherche végétale de cette zone agricole concentrent leurs efforts sur l'amélioration génétique des blés tendres en vue d'une meilleure adaptation de cette plante aux contraintes environnementales locales en menant des programmes de sélection végétale visant à identifier des variétés phénotypiquement « stables » et possédant à la fois un rendement agricole élevé et des aptitudes à la transformation adaptées aux utilisations locales.

Les programmes de recherche sur le blé de la région sont menés en collaboration entre différents centres de recherche comme le Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole International (CGIAR), le Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé (CYMMIT) et le Centre International de Recherche Agricole dans les Zones Sèches (ICARDA). Le

Centre Arabe d'Études des Zones Arides et des Régions Sèches (ACSAD) est aussi un centre de recherche présent dans la région qui se focalise principalement sur le développement agricole et spécialement sur la culture du blé. Le CGIAR, a focalisé son travail de recherche sur la nécessité d'accroître, à la fois, le potentiel de rendement du blé mais également son adaptation aux stress thermique et hydrique. Le réseau exploite les résultats scientifiques du monde entier pour stimuler les gains génétiques chez le blé, en s'appuyant notamment sur le réseau d'amélioration IWIN (International Wheat Improvement Network). Ces efforts ont également mené à la création du Consortium pour l'amélioration du blé et pour la création de variétés tolérantes à la chaleur et la sécheresse (HeDWIC : Heat and Drought Wheat Improvement Consortium).

Le CYMMIT, quant à lui, a développé des lignées de blé à haut rendement, tolérantes aux ravageurs et résistantes aux facteurs climatiques. Il utilise les derniers outils de sélection moléculaire et applique des approches de phénotypage pour mettre au point des variétés de blé génétiquement diversifiées. Ainsi, il peut fournir des variétés de blé diversifiées et à haut potentiel de rendement qui résistent aux sols infertiles, à la sécheresse, aux ravageurs et aux maladies. Il mène également des recherches pour aider les agriculteurs à exploiter le plein potentiel des semences qui ont été améliorées tout en préservant les ressources en sol et en eau.

L'ICARDA a créé des centres de recherche spécialisés dans différentes régions pour mener à bien les travaux de recherche sur le blé en focalisant ses travaux sur : l'étude de la tolérance des variétés du blé au stress thermique (*Heat Tolerance Research* au Soudan), l'étude de l'amélioration du rendement du blé dans des conditions irriguées (*High input agriculture* en Egypte), la sélection des variétés de blé d'hiver pouvant supporter les environnements froids (*Winter Wheat* en Turquie, en Asie Centrale et en Iran) et enfin, l'étude de la tolérance/résistance du blé à la rouille (*Cereal Rusts Research Center* en Turquie).

Enfin, l'ACSAD déploie de grands efforts pour accroître la productivité du blé en développant de nouveaux génotypes à haut potentiel de rendement, susceptibles d'augmenter les volumes de production du blé. En outre, l'ACSAD cherche à mettre au point des ensembles de techniques intégrées pour l'agriculture et la production agricole afin d'atteindre

la capacité de production ultime pour la récolte de blé. Il forme également le personnel technique arabe aux améliorations génétiques du blé. Il développe des variétés de blé résistantes à la maladie et à la sécheresse, très adaptées aux différents environnements agricoles arabes. De plus, les experts de l'ACSAD suivent le développement scientifique et technique et mènent les expériences scientifiques de laboratoire et de terrain dans le pays du siège et d'autres pays arabes afin de développer des variétés à haut rendement.

Notre travail de thèse s'inscrit pleinement dans cette dynamique stratégique en se focalisant sur la caractérisation agronomique, biochimique et technologique de la collection de blé tendre (*Triticum aestivum*) 'sous essais' gérée par le département de recherche sur les céréales et des légumes au sein de l'Institut de Recherche Agronomique au Liban (IRAL). En effet, cette collection de variétés de blé tendre est aujourd'hui sélectionnée exclusivement sur des performances potentielles vis-à-vis de la sécheresse (i.e. tolérance) et/ou des maladies fongiques (i.e. résistance). Compte tenu des enjeux de la filière de transformation, il est indispensable de disposer des éléments de caractérisation de cette collection en mettant en place une démarche d'acquisition des performances agronomiques, biochimiques et technologiques.

Chapitre II

CARACTÉRISATION AGRONOMIQUE DE GÉNOTYPES SÉLECTIONNÉS DE BLÉ TENDRE LIBANAIS

Pour le blé, les impacts du changement climatique sur l'écophysologie et le potentiel de production dépendent essentiellement de la température et de l'eau (Houghton, 2010). Ainsi, dans les zones semi-arides, les moyennes des températures journalières et les moyennes des températures maximales, se révèlent très importantes (Cook et al., 2016). En effet, la fréquence des jours au cours desquels la température dépasse 30 °C est élevée (Rosenzweig et al., 2002). Ce réchauffement raccourcit les cycles de culture, provoque une anticipation importante de la floraison, freine les capacités photosynthétiques provoquant ainsi de forts risques d'échaudage et de faibles rendements (Lehmann et al., 2013). Le problème s'aggrave lorsque s'ajoutent aux grandes chaleurs (stress thermique) le risque de manque d'eau (stress hydrique) ; ce qui affecte les rendements. En effet, dans les zones semi-arides, l'élévation de température est accompagnée d'une augmentation de l'évapotranspiration (Polley et al., 2007) et d'un déficit hydrique conduisant à une baisse de la photosynthèse (Clausen et al., 2011). Ces conditions environnementales peuvent avoir des conséquences importantes si elles se produisent après la floraison durant la division cellulaire et/ou la phase de remplissage des grains de blé.

Dans ce chapitre spécifique, nous allons mesurer le comportement agronomique de plusieurs génotypes de blé tendre Libanais sélectionnés face aux conditions environnementales (sécheresse et fortes températures) durant deux saisons de culture. Les composantes du rendement seront analysées pour déterminer l'effet de ces conditions particulières sur les différents stades physiologiques.

II.1. Matériel et méthodes

Les génotypes de blé tendre sélectionnés par l'IRAL ont été créés et stabilisés génétiquement mais n'ont pas été caractérisés et n'ont pas prouvé leur résistance ou tolérance à la sécheresse. Dans le but d'évaluer leur comportement agronomique et d'analyser leur potentiel de résister ou tolérer les conditions environnementales régionales, les composantes du rendement des quatre génotypes ont été étudiées suite à leur culture pour deux années culturales consécutives.

II.1.1. Le matériel végétal

Quatre génotypes différents de blé tendre, sélectionnés pour leur potentiel tolérance/résistance à la sécheresse et à la rouille (Baum et al., 2015; Fellahi et al., 2017) par deux centres de recherche agricole différents des zones arides et semi-arides, ICARDA et ACSAD, ont été fournis par IRAL comme matériel végétal de cette étude. Les Pedigrees de ces différents génotypes sont représentés dans le tableau 3 :

Tableau 3. Pedigrees des quatre génotypes de blé tendre sélectionnés

| Génotypes | Pedigree |
|-------------|--|
| SHAM 8 | KAUZ=JUP / BJY / URES/ CM67458 (ICARDA, 2015). |
| TAL AMARA 2 | Belikh//Gediz/Bit ACS-D-7284-22 IZ-17-IZ-4 IZ- OIZ (ACSAD, 2015). |
| KATILA | KAUZ / ATTLA / CMSS93Y0066S - 5AP - 2AP - 6AP - 0APS - 0AP (ICARDA, 2015). |
| ACSAD 1133 | Snbs>s>//shi4414/crow>s>/3/Mon>s>/crows>s> / ACS - W -9678 (2001) -23IZ - 2IZ - 0IZ (ACSAD, 2015). |

La variété SHAM 8 est sélectionnée puisqu'elle résiste à la sécheresse et donne des graines de bonne qualité. Elle a été adoptée au Liban en 2001. Alors que TAL AMARA 2 est résistante à la sécheresse et la rouille jaune. Elle est tolérante au *Septoria tritici*, et elle a été adoptée au Liban en 2010. De plus KATILA, présente une résistance modérée à la rouille, alors qu'ACSAD 1133 qui est tolérante à la sécheresse, a une résistance élevée à la rouille.

Ces quatre variétés ont été sélectionnées par les deux centres de recherche ICARDA et ACSAD dans des conditions semi-arides.

II.1.2. Description du site expérimental

Les géotypes de blés libanais ont été cultivés pour deux années culturales consécutives 2015/2016 et 2016/2017 à Tal Amara Liban dans le domaine expérimental de l'IRAL situé à 905 m d'altitude ayant les coordonnées suivantes : 33 ° 28 ' N pour la latitude et 36 ° 30 ' E pour la longitude (Figure 12). Le climat au sein de la Béqaa Centrale est du type semi-aride, la plupart des précipitations se concentre entre les mois de décembre et d'avril. La moyenne annuelle des précipitations à Tal Amara se situe aux alentours de 600 mm (Rapport annuel de l'IRAL, 2010). Ce site a été choisi puisqu'il est situé à la Béqaa où se concentre la majorité de la culture du blé local et où réside le climat semi-aride.

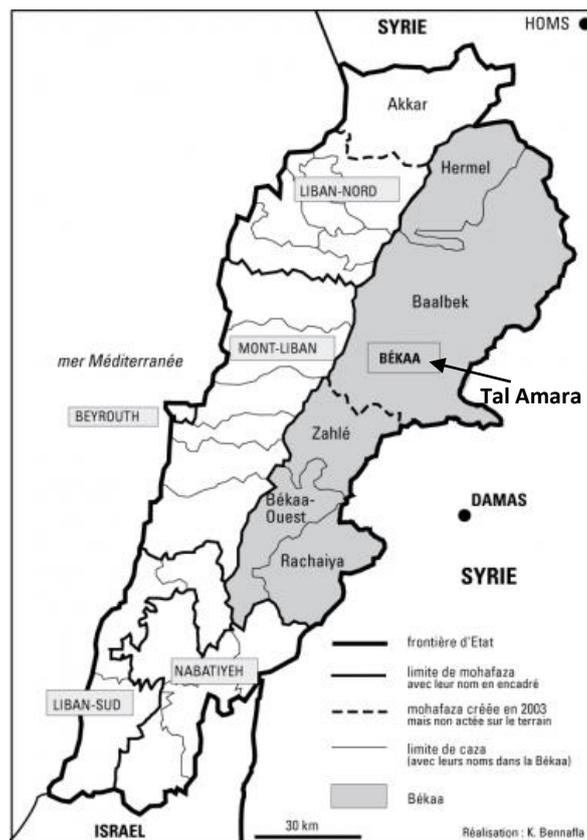


Figure 12. Localisation du terrain expérimental

Les propriétés du sol cultivé durant les deux saisons ont été caractérisées au sein des laboratoires de l'IRAL. Ces différentes informations sont synthétisées dans le tableau ci-dessous (Tableau 4).

Tableau 4. Propriétés physico-chimiques des sols cultivés durant les deux saisons de culture

| Année Culturale | N (Kg/ha) | P ₂ O ₅ (Kg/ha) | K ₂ O (Kg/ha) | Argile (%) | Limon (%) | Sable (%) | pH | EC (mS/cm) | MO (%) | Texture |
|--------------------|--------------|--|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|-----|---------------|-----------|----------------------------|
| 2015/2016 | 156,5 | 81,1 | 338,3 | 29,8 | 8,5 | 61,7 | 7,9 | 0,6 | 0,9 | Sablo-argilo- limoneuse |
| 2016/2017 | 174,8 | 66,8 | 341,0 | 18,9 | 13,6 | 67,5 | 7,4 | 0,1 | 1,9 | Sablo-argilo- limoneuse |

La culture précédente à la première année d'expérimentation était le pois chiche et la seconde les lentilles. Cette rotation légumineuse/céréale a pour but d'enrichir les sols en matière organique surtout en azote organique et de réduire l'incidence des maladies infectieuses des cultures.

II.1.3. Préparation du sol et dispositif expérimental

Le sol labouré a été enrichi avec une fumure de fond (15-15-15) à raison de 200 Kg/ha. Les essais ont été conduits selon la méthode des blocs aléatoires complets (blocs de Fisher) en utilisant 3 répétitions. Le terrain est divisé en 3 blocs dont chacun en 5 parcelles élémentaires de 500 m² (50 m × 10 m) (Figure 13).

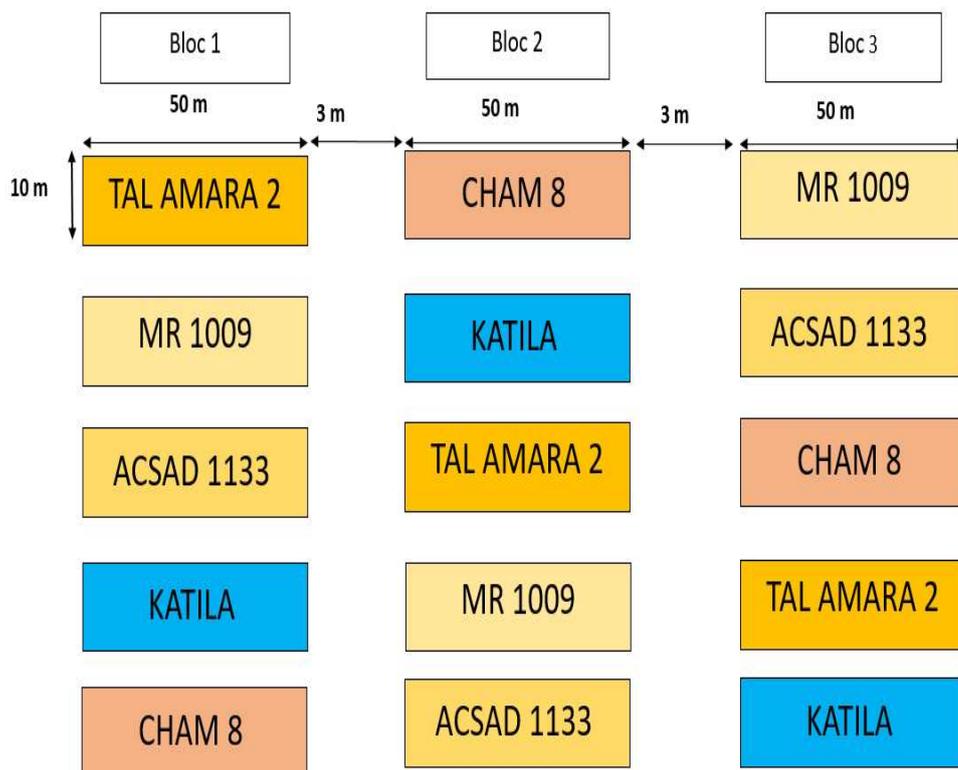


Figure 13. Le dispositif expérimental

Les semis ont été réalisés au début du mois de décembre pour chaque année à raison de 200 Kg/ha en utilisant un semoir expérimental en ligne de 3 m de largeur, avec un écartement entre lignes de 17 cm et une profondeur de semis réglée entre 3 cm et 4 cm.

Deux apports de fertilisants composés de 150 Kg/ha d'urée (46%) et de 50 Kg/ha de sulfate d'ammoniac (21%) ont été appliqués aux différentes parcelles. Les cultures n'ont pas été irriguées afin de tester leur comportement face aux conditions hydriques limitantes (i.e. vérification du caractère résistant/tolérant des génotypes sélectionnés face à la sécheresse). La récolte a été faite à la fin du mois de Juin. Les dates des principaux stades phénologiques des cultures ont été notées lorsque 50% des plantes observées avaient atteint le stade considéré.

II.1.4. Mesure des différentes composantes du rendement

L'ensemble des différents paramètres agronomiques retenus ont été relevés sur des plantes choisies aléatoirement au sein de placettes de 1 m². Pour ce faire, un carré d'1 m² de

superficie (1 m ×1 m) a été construit en fer galvanisé et celui-ci a servi pour délimiter les points de mesure.

II.1.4.1. Nombre d'épis par mètre carré (NE)

La détermination du nombre d'épis par m² (NE) est réalisée par comptage non destructif sur placette de 1 m² selon trois répétitions pour chaque parcelle de culture durant la période de mûrissement.

II.1.4.2. Nombre de grains par épi (NGE)

C'est une caractéristique variétale qui est très influencée par le nombre d'épis par m². La détermination du nombre de grains par épi (NGE) s'est faite sur un échantillon aléatoire de 20 épis choisis sur les mêmes placettes de 1 m² utilisées pour la détermination du nombre d'épis par m², avec arrachage des pieds, et selon trois répétitions pour chaque parcelle de culture avant la récolte. Le battage et la récupération des grains ont été réalisés à l'aide d'une batteuse de laboratoire ; le comptage, a été réalisé grâce à un compteur automatique (Contador- Pfeuffer).

II.1.4.3. Nombre de grains par mètre carré (NGM²)

Cette variable est le produit entre le nombre d'épis par m² (NE) et le nombre de grains par épi (NGE).

$$NGM^2 = NE \times NGE \quad (\text{Equation1})$$

II.1.4.4. Poids des milles grains (PMG)

Le principe s'est basé sur le comptage automatique du nombre de grains entiers contenus dans une prise d'essai de masse connue. Ainsi, le comptage automatique des grains est fait par le compteur automatique (Contador - Pfeuffer). La formule suivante a servi pour les calculs :

$$PMG = (m_0 \times 1000) / N \quad (\text{Equation 2})$$

m_0 : poids en gramme des grains entiers d'un échantillon représentatif après récolte

N : nombre de grains contenus dans m_0

Ainsi, le poids sec de milles grains a été déterminé selon la formule suivante :

$$\text{PMG sec} = [mH \times (100 - H)] / 100 \quad (\text{Equation 3})$$

H est la teneur en eau des grains (en pourcentage). H a été déterminé après passage des grains à l'étuve à 105 °C pendant 2 h.

II.1.4.5. Rendement en grain (RDG)

Le rendement en grain pour chaque génotype a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{RDG} = \text{NGE} \times \text{NE} \times \text{PMG} \quad (\text{Equation 4})$$

II.1.4.6. Rendement en paille (RDP)

Le rendement en paille est fait par arrachage d'une placette de 1 m² avant la récolte pour trois répétitions par parcelle de culture. La matière sèche est obtenue par séchage à l'étuve à 105 °C pour 36 heures.

II.1.4.7. Indice de récolte (IR)

L'indice de récolte (IR) pour chaque génotype est calculé selon la formule suivante :

$$\text{IR} = \text{Poids des grains (g/m}^2\text{)} / \text{Biomasse aérienne de la plante (g/m}^2\text{)} \quad (\text{Equation 5})$$

II.1.5. Calcul du cumul des températures moyennes journalières

La productivité du blé est très influencée par la température qui détermine le développement phénologique (Bauer et al., 1984) et la vitesse de croissance (Grace, 1988).

Le calcul du cumul des températures moyennes journalières est réalisé en base zéro selon la formule suivante (Karimi et Siddique, 1991) :

$$\Sigma DJ (\text{°C}) = [(T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) / 2] - T_b \quad (\text{Equation 6})$$

T_{max} = Température maximale journalière

T_{min} = Température minimale journalière

T_b = Température minimale journalière à partir de laquelle la croissance est permise

II.1.6. Analyses statistiques

Les analyses statistiques des données expérimentales sont effectuées à l'aide du logiciel XLSTAT (Addinsoft TM). Les comparaisons multiples sont réalisées par une analyse de variance de type ANOVA ($\alpha = 5\%$). Les comparaisons multiples sont effectuées à l'aide de test Tukey (HSD) ($\alpha = 5\%$). Les corrélations entre les différents paramètres mesurés sont évaluées selon le test de Pearson.

II.2. Résultats et discussions

II.2.1. Variation des températures moyennes mensuelles durant les deux années de culture

Les températures mensuelles minimales, maximales et moyennes pour une période de 56 ans à la station de Tal Amara sont représentées dans la Figure 13 et la Figure 14. La figure 14 montre que les mois les plus froids sont les mois de Décembre, Janvier et Février où les températures minimales baissent jusqu'à -1 °C et $+2 \text{ °C}$. Par contre, la période la plus chaude s'étale sur 3 mois consécutifs (Juin, Juillet, Août) avec des maximas allant de 28 °C à 32 °C . L'évolution des températures moyennes maximales et minimales durant les deux années de culture s'est traduite par une hausse des températures moyennes maximales et une baisse des

températures minimales. Les températures moyennes ont suivi la même évolution que les températures maximales.

Une comparaison inter-mensuelle des deux années culturales (2015/2016 et 2016/2017) avec la moyenne historique mensuelle révèle une augmentation des températures moyennes minimales au niveau du mois de Septembre et du mois d'Octobre, alors qu'une diminution de ces mêmes températures est observée pour les autres mois de l'année (Figure 14). La température moyenne minimale mensuelle historique est supérieure de 1 à 2 °C de la température moyenne minimale mensuelle en 2016 et 2017 au cours des mois d'Avril et de Mai, qui correspondent à la phase critique de remplissage des grains.

Cependant des températures moyennes minimales très faibles sont observées durant le mois de Décembre pour la saison 2015/2016 et au niveau du mois de Février pour la saison de culture 2016/2017, ce qui a pu provoquer un ralentissement dans le développement des plantules pour cette dernière (Figure 14).

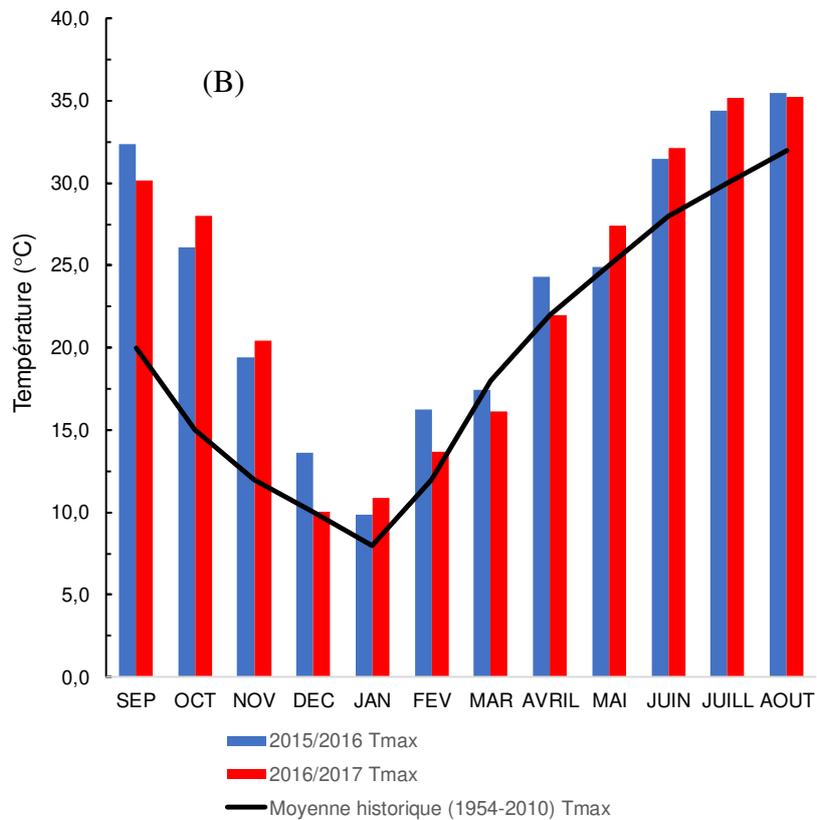
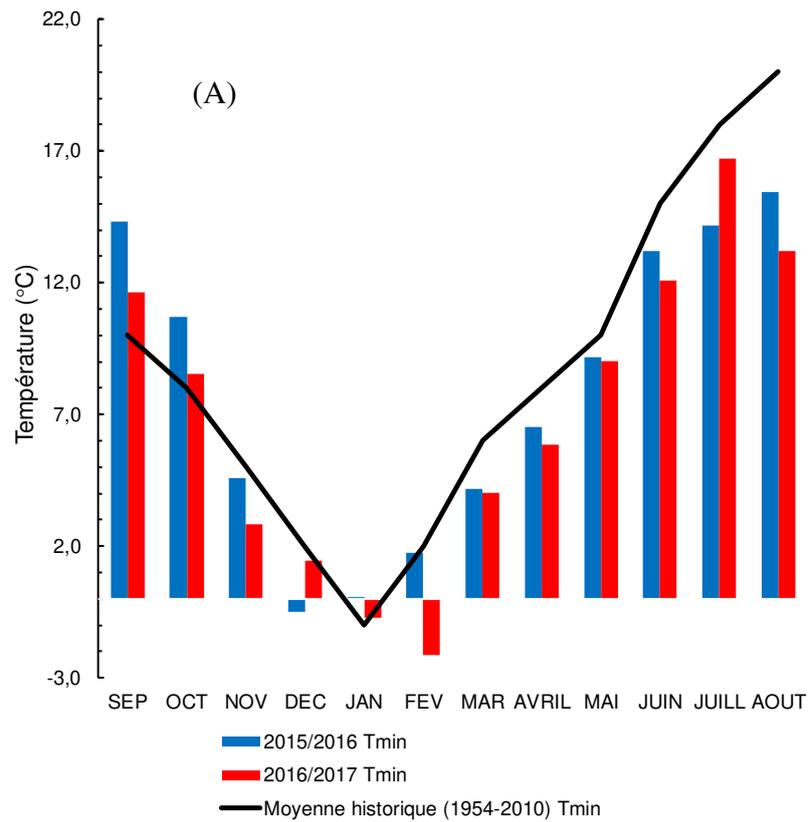


Figure 13. Comparaison entre la moyenne historique des températures moyennes minimales (A) et maximales (B) mensuelles et celles des deux années d'expérimentation

Les valeurs moyennes de la température de l'air de la période 1954-2010 consignées dans la figure 15, permettent de suivre l'évolution moyenne du régime thermique au niveau de Tal Amara.

Les variations interannuelles de la température de l'air montrent que la température de l'air connaît une hausse pour les deux années de culture. Des valeurs très supérieures à la moyenne ont été enregistrées pour les mois de Septembre, d'Octobre et de Novembre.

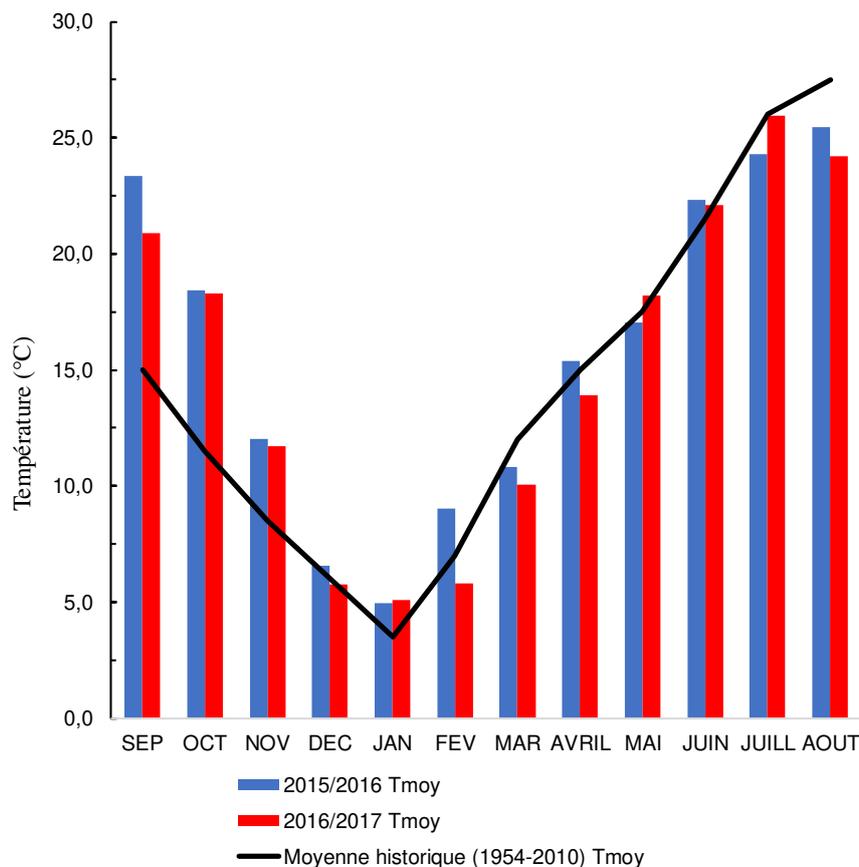


Figure 14. Comparaison entre la moyenne historique des températures moyennes mensuelles et celles des deux années d'expérimentation

Ainsi, les cultures ont subi des températures moyennes minimales inférieures, et températures moyennes maximales supérieures à la moyenne historique ; ce qui a résulté en des conditions culturales limitantes pour les cultures de blé au niveau des deux saisons de culture. Les températures relativement élevées en début et à la fin de la saison de culture provoquent une sérieuse réduction du rendement et de ces composantes (Wiegand et Cuellar,

1981). Aussi, l'élévation des températures à la fin de la saison de culture est pénalisante pour le rendement comme elle affecte la durée du cycle de remplissage du grain (Altenbach et al., 2003), elle inactive les différents systèmes enzymatiques, résultant en une baisse de la transcription des gènes impliqués dans la synthèse de l'amidon (Hurkman et al., 2003).

Enfin, il faut signaler que la température moyenne journalière joue un rôle prépondérant lors du phénomène de remplissage du grain : des moyennes journalières de l'ordre de 14 à 16 °C après la floraison, favorise l'élaboration de l'amidon qui correspond à un métabolisme de synthèse *de novo* à partir de l'activité photosynthétique post floraison. Alors que des températures aux alentours de 20 °C, comme c'est le cas dans cette étude (les températures moyennes journalière au mois de Mai sont aux alentours de 17 et 18 °C), favorisent le métabolisme de l'azote et l'accumulation des protéines (Taulemesse, 2015) qui correspond à un métabolisme de remobilisation à partir de la dégradation des protéines foliaires accumulées majoritairement lors de la phase végétative ; ce qui se traduirait par des taux de protéines élevés chez les variétés de blé étudiées.

II.2.2. Variation du régime pluviométrique mensuel durant les deux années culturales

L'évaluation de la pluviométrie reçue par les cultures, a été faite suite à une comparaison entre la moyenne des précipitations sur 56 années de mesures (période 1954-2010) et les précipitations de nos deux années d'expérimentation. La répartition mensuelle moyenne des pluies sur une période de 56 ans montre que le mois le plus pluvieux est le mois de Janvier avec une moyenne de 140 mm (Figure 16). Il est suivi par les mois de Décembre et de Février où la pluviométrie est en moyenne respective correspond à 110 mm et 100 mm. En revanche, l'été est une saison sèche avec des précipitations nulles du mois de Juin jusqu'au mois de Septembre.

La comparaison inter-mensuelle des deux années de culture (2015/2016 et 2016/2017) avec la moyenne historique mensuelle révèle des déficits hydriques forts au niveau du mois de Novembre, Février, Avril et Mai pour les deux saisons et au niveau de Décembre pour la saison 2015/2016. Ce qui s'est traduit en une non satisfaction des besoins impérieux en eau (i.e. déficit hydrique) des cultures provoquant des conditions de cultures limitantes à la montaison (période Février) et qui deviennent plus marquées à la floraison (période

Avril/Mai) affectant la formation des grains (i.e. NGE et PMG). Plusieurs auteurs ont déjà montré qu'un déficit hydrique survenant durant la phase végétative pénalise le nombre d'épis par unité de surface alors que ce même phénomène intervenant au cours de la phase de remplissage affecte négativement le poids des grains (Lawlor et al., 1981; Mogensen, 1985; Mogensen et Jensen, 1989).

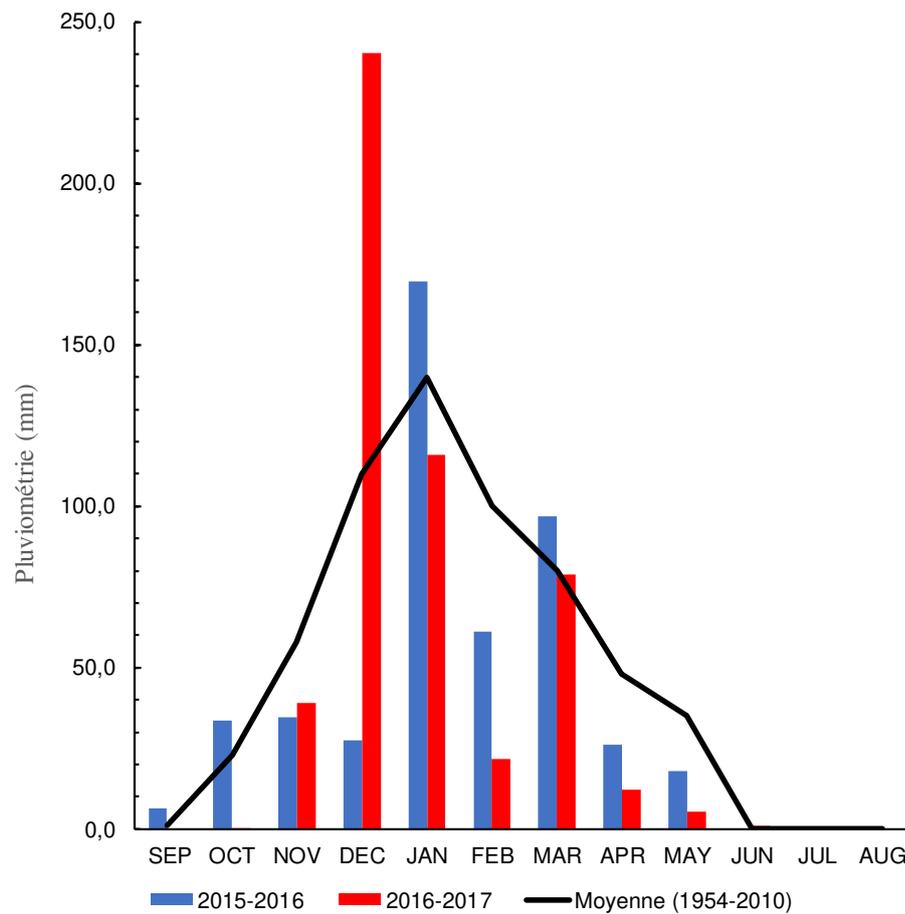


Figure 16. Comparaison de la pluviométrie mensuelle des deux années de culture à la moyenne pluviométrique historique

II.2.3. Somme des degrés-jour au cours des deux saisons culturales consécutives

La somme des températures cumulées depuis le semis représente la durée des différentes phases de développement du blé. Cette représentation permet de caractériser les variétés par leur besoin en température pour atteindre la floraison et les différents stades de maturation. Le cumul des températures représente la variable majeure pour l'évolution du

PMG (Picard, 1991), mais ne peut à lui seul traduire la durée et la vitesse de remplissage du grain.

Le cumul des températures pour les deux années de culture depuis le semis (jour 0) jusqu'à la maturation de récolte a suivi la même allure de courbe avec des valeurs légèrement supérieures pour la saison 2015-2016 (Figure 17) qui s'est montrée un peu plus chaude, accélérant ainsi la vitesse de croissance des cultures.

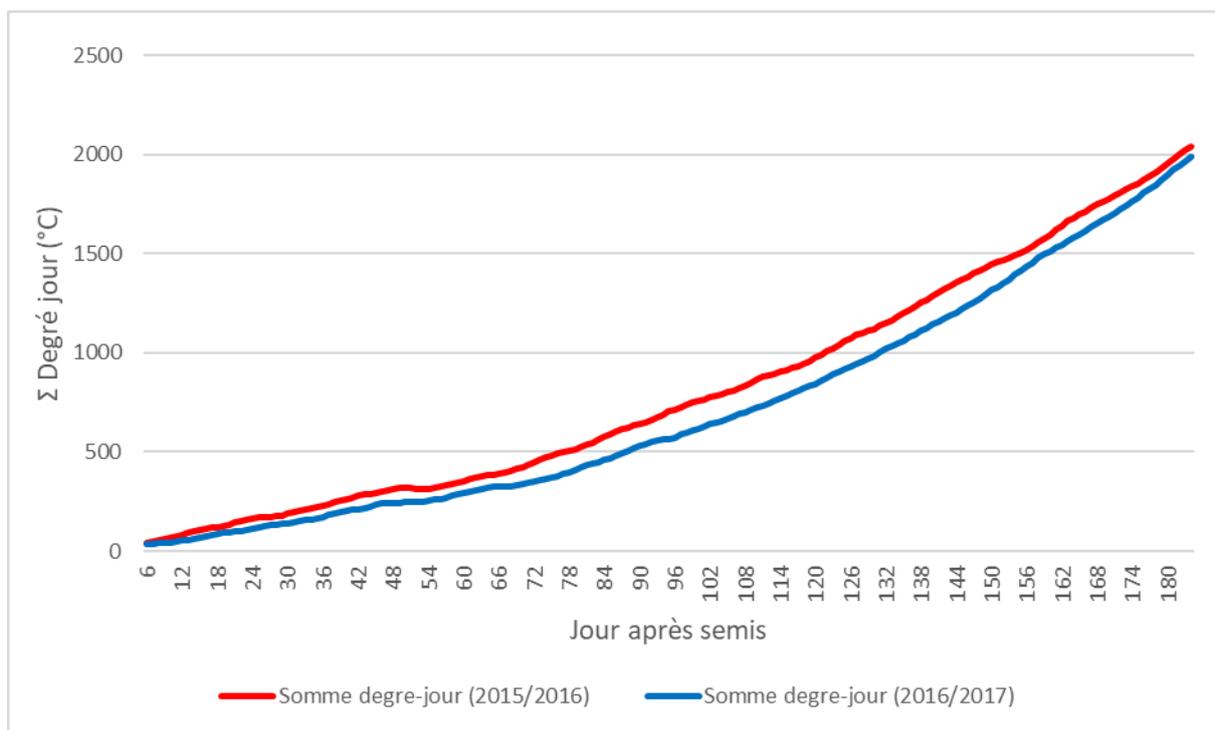


Figure 15. Cumul de la somme degré-jour (°C) pour les deux saisons de culture du semis jusqu'à la maturité de récolte

La somme des degrés-jour allant du semis à la maturation de récolte pour la saison de culture 2015/2016 s'est élevée à 2037 °C (183 jours) (Figure 18) contre 1847 °C (177 jours) pour la saison 2016/2017. Et par la suite dans les deux cas cette somme était bien inférieure à celle obtenue dans la région semi-aride (Jordanie) lors d'une étude sur 15 géotypes récupérés de la région méditerranéenne du centre ICARDA où cette somme s'est située entre 2302 et 2425 °C (Al-Karaki, 2012) ; ce qui affecterait négativement le développement des plantes et le rendement des cultures pour les deux saisons.

D'une part, la période végétative des différents génotypes de blé étudiés peut être caractérisée par la somme des degrés-jours (ΣDJ) enregistrés pendant deux saisons de culture (2016 et 2017) depuis le semis jusqu'à la floraison. La figure 18 montre les données enregistrées en termes de (i) somme des degrés-jours (ΣDJ) mais également en termes de (ii) durée de la phase végétative pour les quatre génotypes de blé différents étudiés. Les sommes des degrés-jours observées sont supérieures pour la première saison avec une moyenne de 1344 DJ contre une moyenne enregistrée pour la seconde année de 1168 DJ, ce qui a contribué en un développement végétatif plus rapide des cultures de cette saison. SHAM 8 et TAL AMARA 2 sont deux génotypes caractérisés par une précocité végétative et ceci quelle que soit l'année de la culture concernée. Par contre, la durée végétative observée pour les mêmes génotypes de blé était similaire pour les deux saisons et a varié entre 143 JAS (valeur moyenne pour 2017) et 142 JAS (valeur moyenne pour 2016), quel que soit le génotype du blé étudié. Ces valeurs correspondent à celles observées par Al-Karaki (2012) ; de plus, les pluviométries enregistrées au cours de cette phase ont été acceptables, ce qui confirme que les cultures n'ont pas eu de limitation pour leur phase végétative.

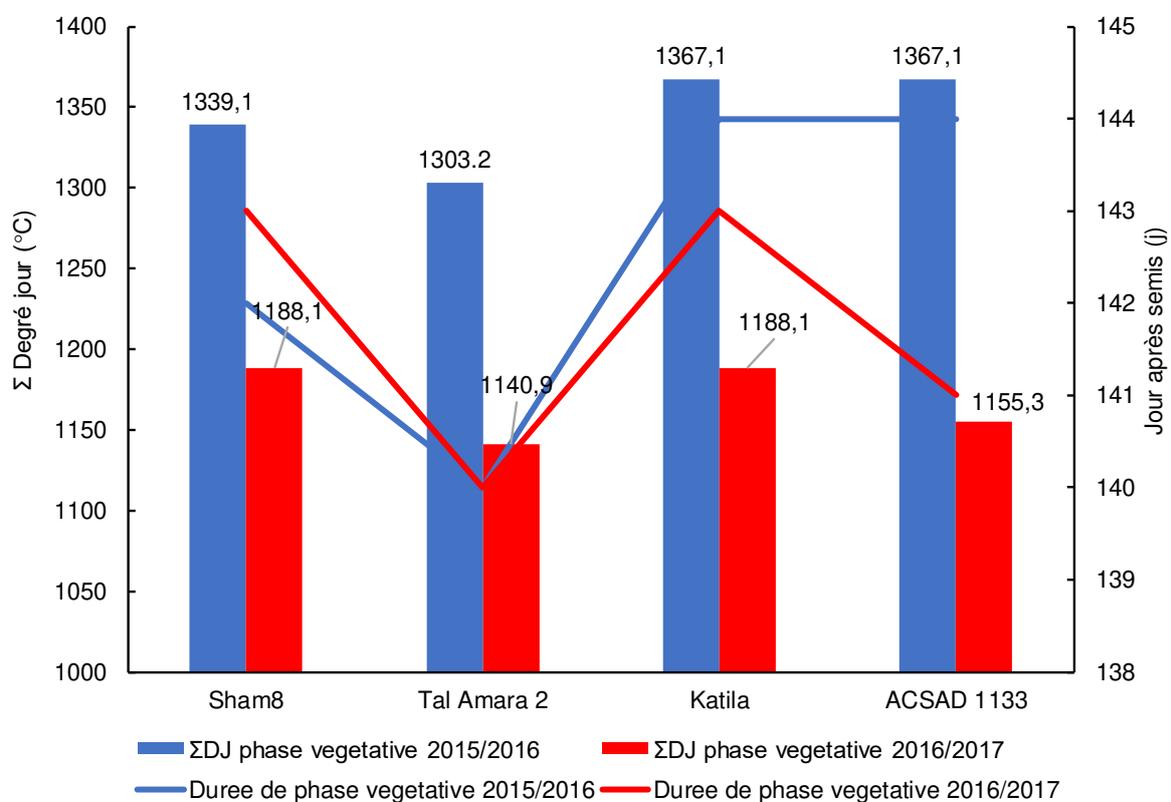


Figure 16. Somme des degrés-jour et la durée de la phase végétative des cultures des quatre génotypes durant les deux saisons expérimentales

D'autre part, la période de remplissage des grains des différents génotypes de blé étudiés peut être caractérisée par la somme des degrés-jours (Σ DJ) enregistrés pendant les deux saisons de culture (2016 et 2017) depuis la floraison jusqu'à la maturité de récolte des grains. La figure 19 montre les données enregistrées en termes de (i) somme des degrés-jours (Σ DJ) mais également en termes de (ii) durée de la période de remplissage des grains pour les quatre génotypes de blé étudiés. Les sommes des degrés-jours observées sont assez homogènes ; elles varient entre 677 DJ (valeur moyenne pour 2016) et 679 DJ (valeur moyenne pour 2017). KATILA et ACSAD 1133 sont deux génotypes caractérisés par une précocité plus élevée et ceci quelle que soit l'année de culture concernée. Parallèlement, la durée de la période de remplissage des grains observée pour les mêmes génotypes de blé varie entre 34 JAF (valeur moyenne pour 2017) et 39 JAF (valeur moyenne pour 2016). Quel que soit le génotype du blé étudié, ces valeurs correspondent à une limitation sévère de la durée d'accumulation des réserves de céréales (protéines de stockage et amidon) observées classiquement (i.e. plus de dix ou vingt jours de limitation) (Carceller et Aussenac, 1999).

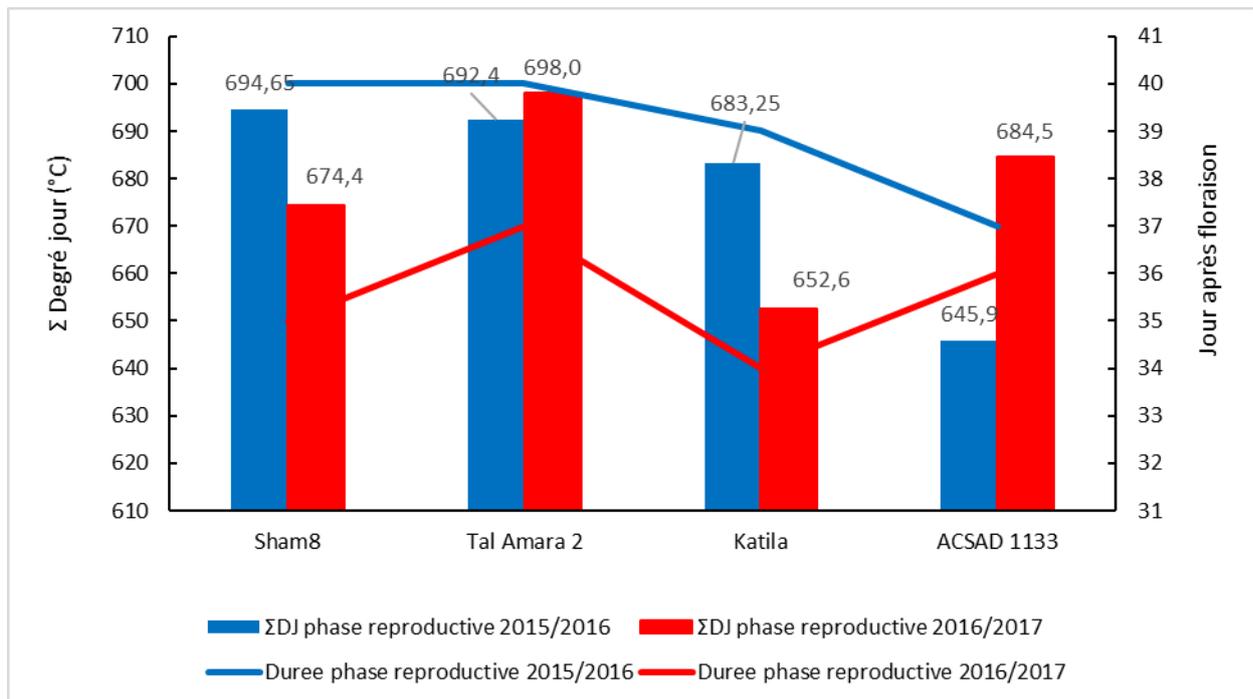


Figure 19. Somme des degrés-jour et la durée de la phase reproductive des cultures des quatre génotypes durant les deux saisons expérimentales

Ainsi, plus la température journalière est élevée, plus le nombre de jours d'accumulation diminue. Enfin, pour les deux saisons de culture, les précipitations enregistrées au cours de la même période ont été négligeables.

Ces premières observations physiologiques semblent confirmer que les différents génotypes de blé tendre utilisés au cours de notre étude ont été soumis à des conditions environnementales qui peuvent être qualifiées de conditions climatiques « limitantes » au cours de la phase de remplissage. Ces conditions environnementales ont conduit à une limitation naturelle de la durée de la période de remplissage qui, a eu, comme nous le verrons plus tard, un impact significatif sur l'intensité de l'accumulation de matière sèche totale dans les grains selon la littérature (Goytino et Gay, 1991)

II.2.4. Evolution des composantes du rendement

Les composantes du rendement ont été étudiées en cherchant à préparer des décisions de l'agriculteur par l'analyse du comportement du peuple végétal. Compte tenu des facteurs du milieu, qui avant la floraison affectent le nombre de grain, alors qu'après la floraison, ils influencent le poids du grain et sa composition (Dupont et Altenbach, 2003).

En ce qui concerne les composantes du rendement, des différences significatives ont été relevées entre les génotypes pour les différents paramètres étudiés. Ainsi, les valeurs moyennes du NGE varient entre 46,93 (KATILA) et 53,71 (SHAM 8) (Tableau 5). Ces valeurs sont acceptables à comparer avec le NGE moyen (46) obtenu par ASCAD selon une étude menée en 2007-2008 sur le blé tendre dans la région (Alawda, 2009). Alors que pour le NE, les quatre génotypes se sont repartis en deux groupes. SHAM 8 (271,33) et KATILA (307,11) se sont distingués des deux autres cultivars avec des NE plus élevés. Cette même répartition des génotypes est aussi observée pour le NGM². Ainsi, SHAM 8 (14455,72) et KATILA (13955,60) avaient donné des valeurs plus élevées, montrant un meilleur rendement de production avec un taux supérieur en nombre de grains. Cependant, SHAM 8 s'est différencié des trois autres génotypes en donnant un PMG (21,42 g) plus faible que la moyenne des quatre génotypes (24,52 g) pourtant qu'il avait enregistré le NGE le plus important (53,71). Ces constatations qui résultent d'une corrélation négative entre le PMG et le NGE, sont en accord avec l'observation de Picard (1991). Les valeurs des PMG sont

restées bien inférieures à la valeur moyenne obtenue par l'étude de l'ACSAD (Alawda, 2009) (44,7g) sur des génotypes similaires cultivés dans des conditions environnementales classiques. Ces résultats reflètent une forte limitation de l'accumulation de matière sèche dans les grains pour tous les génotypes étudiés.

Tableau 5. Valeurs moyennes des composantes du rendement étudiées par génotype pour les deux années d'expérimentation

| Génotype | Composantes du rendement | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|----------|------------------|---------|------------|------------|--------|
| | NGE | NE | NGM ² | PMG (g) | RDG (T/ha) | RDP (T/ha) | IR |
| SHAM 8 | 53,71 b ⁽¹⁾ | 271,33 b | 14455,72 b | 21,42 a | 3,15 bc | 10,51 b | 0,23 a |
| TAL AMARA 2 | 50,26 ab | 208,67 a | 10441,38 a | 25,85 b | 2,67 ab | 8,97 ab | 0,23 a |
| KATILA | 46,93 a | 307,11 b | 13955,60 b | 24,85 b | 3,40 c | 8,11 a | 0,29 b |
| ACSAD 1133 | 47,10 ab | 171,11 a | 8080,08 a | 25,96 b | 2,07 a | 6,86a | 0,23 a |
| Moyenne ⁽²⁾ | 49,50 | 239,56 | 11733,20 | 24,52 | 2,82 | 8,61 | 0,25 |
| CV (%) | 6,46 | 25,52 | 25,74 | 8,67 | 20,72 | 17,82 | 12,42 |
| Récolte 2016 | 50,71 a | 208,00 a | 10646,23 a | 25,69 b | 2,67a | 9,70 b | 0,21 a |
| Récolte 2017 | 48,29 a | 271,11 b | 12820,17 b | 23,35 a | 2,98 a | 7,52 a | 0,28 b |

⁽¹⁾ Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

⁽²⁾ Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques.

Le cultivar qui a donné le RDG le plus important est KATILA avec 3,40 T/ha. Ainsi, ce génotype a presque atteint le rendement moyen obtenu dans les essais de l'IRAL mené sur plusieurs années de culture, qui est de 3,5 T/ha. SHAM8 a donné un RDG de 3,15 T/ha qui est resté bien inférieur au RDG obtenu en conditions irriguées (6,9 T/ha). TAL AMARA 2 a donné un RDG de 2,67 T/ha inférieur à la moyenne du rendement relevé par l'IRAL (4,0 T/ha). Enfin, le génotype ACSAD 1133 a enregistré le RDG le plus faible avec 2,1 T/ha.

En ce qui concerne le RDP, SHAM 8 a donné la valeur la plus importante avec 10,51 T/ha, suivi par TAL AMARA 2 (8,96 T/ha). Le RDP le plus faible est relevé chez ACSAD 1133 avec 6,86 T/ha. Il faut signaler aussi que l'IR le plus élevé est noté chez KATILA avec 0,29, traduisant le meilleur rendement économique.

Pour ce qui est de l'année de culture, des différences significatives ont été observées au niveau des deux années de culture pour l'ensemble des composantes étudiées à l'exception, toutefois, du NGE et de RDG. Ainsi, l'année 2016 a présenté les PMG moyens et les RDP moyens les plus élevés avec respectivement 25,69 g et 9,70 T/ha. Ceci peut être dû au cumul de températures supérieures enregistrées pour cette année de culture qui a favorisé le développement des cultures ; alors que, c'est l'année de culture 2017 qui a présenté le NE (2271,11), le NGM² (12820,17) et l'IR (0,27) les plus élevés, notamment influencés par le supérieur de précipitation.

Les conditions limitantes de culture n'ont pas eu une grande influence sur la croissance végétative du blé ; le NGE et le RDP étaient comparables à ceux obtenus dans des conditions classiques de culture. Par contre, l'effet de ces conditions limitantes de cultures était trop marqué sur le PMG et par la suite sur le RDG, du fait qu'elles sont survenues durant la phase reproductive de la culture (Avril et Mai) ; ce qui montre que les conditions environnementales ont influencé les phases importantes du développement du grain et de sa maturation. Ainsi, les contraintes thermiques et hydriques post-floraison caractéristiques des environnements semi-arides ont modifié considérablement l'accumulation des principaux constituants du grain en limitant principalement le temps de remplissage du grain. Les grains de blé ainsi formés sont caractérisés par une réduction du PMG qui résulte d'un déficit d'accumulation de la matière sèche.

Ces résultats corroborent les premières observations de Monteny, (1970) obtenues à partir de culture du blé en région semi-aride, mais également les résultats obtenus par de nombreux autres auteurs (Lawlor et al., 1981; Fischer, 1985; Mogensen, 1985; Mogensen et Jensen, 1989). Ces résultats, qui mettent en lumière un effet prédominant de l'environnement sur le poids du grain ou le RDG, confirment les observations de Graybosch et al. (2003) et de Peterson et al. (1992) respectivement. Malgré les contraintes environnementales subies par

les cultures, les quatre génotypes étudiés ont pu donner un RDG acceptable (une moyenne de 2,82 T/ha) prouvant leur potentiel de tolérance aux conditions limitantes de culture régissantes au niveau de la phase de remplissage et d'accumulation des réserves.

Tableau 6. Relation (Coefficient de corrélation - Pearson) existant entre les différentes composantes du rendement pour les génotypes évalués au cours des deux années d'expérimentation

| Composantes du rendement | Composantes du rendement | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | NE | NGM ² | PMG | RDG | RDP | IR |
| NGE | -0,17 | 0,09 | -0,44* | -0,01 | 0,53** | -0,40 |
| NE | | 0,96** | -0,38 | 0,96** | 0,34 | 0,79*** |
| NGM ² | | | -0,49* | 0,97*** | 0,51* | 0,68*** |
| PMG | | | | -0,27 | -0,12 | -0,21 |
| RDG | | | | | 0,53** | 0,70*** |
| RDP | | | | | | -0,22 |

(*) Effet statistique significatif au seuil ($p < 0,05$).

(**) Effet statistique hautement significatif au seuil ($p < 0,01$).

(***) Effet statistique très hautement significatif au seuil ($p < 0,001$).

L'étude de la corrélation entre les différentes composantes du rendement (Tableau 6) des quatre génotypes est évaluée au niveau des deux années de culture. Ces composantes sont largement influencées par les conditions de cultures. En effet, la forte corrélation entre le rendement et ses composantes est reportée par O'Toole et Stockle (1987). Nos résultats ont montré une corrélation positive entre le NGM² et le NE. Une corrélation significative mais négative est détectée entre d'une part le PMG et le NGE, et d'autre part entre le PMG et le NGM², révélant ainsi l'influence négative du nombre de grain de la plante sur le poids du grain. Le RDG s'est montré corrélé significativement au NE et au NGM², alors que le RDP est positivement corrélé aux NGE, NGM² et RDG. Sayed et Gadallah (1983) ont signalé qu'une longue phase de remplissage du grain augmente la disponibilité des photoassimilats

résultant en un rendement en grain supérieur. Ils ont noté aussi, que les températures élevées durant cette même phase imposent des limitations pour le poids du grain et le rendement.

Enfin, les résultats obtenus dans notre étude ont montré que l'IR est un critère important pour le rendement en grain, similairement aux constatations de Sharma et Singh (1991) et contrairement à ceux trouvés par Monpara (2011).

Tableau 7. Analyse de la variance des composantes de rendement pour les quatre géotypes de blé tendre retenus

| Source de variation | Composantes du rendement | | | | | | |
|--|--------------------------|----------|------------------|----------|----------|---------|----------|
| | NGE | NE | NGM ² | PMG | RDG | RDP | IR |
| Valeur de F | 2,22 | 40,35 | 19,18 | 8,89 | 16,83 | 6,80 | 28,36 |
| Effet Année de culture (A) | 2,08 | 35,24*** | 10,03** | 17,21** | 4,03 | 15,51** | 89,10*** |
| Effet Génotype (G) | 3,64* | 33,06*** | 19,36*** | 14,21*** | 13,47*** | 7,64** | 17,36*** |
| Effet Année × Génotype (A×G) | 0,84 | 49,33*** | 22,06*** | 0,81 | 24,46*** | 3,05 | 19,10*** |
| Rapport des variances (σ^2_A/σ^2_G) | 0,57 | 1,07 | 0,52 | 1,21 | 0,30 | 2,03 | 5,13 |
| Rapport des variances ($\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G}$) | 2,48 | 0,71 | 0,45 | 21,35 | 0,16 | 5,09 | 4,66 |

(*) Effet statistique significatif au seuil ($p < 0,05$).

(**) Effet statistique hautement significatif au seuil ($p < 0,01$).

(***) Effet statistique très hautement significatif au seuil ($p < 0,001$).

L'analyse de la variance (ANOVA) effectuée à partir de nos différents résultats a permis de mettre en évidence un effet « conditions de culture » hautement significatif pour les composantes du rendement NE, NGM², PMG, RDP et IR (Tableau 7). Dans le même temps, les calculs de rapport de variance ont montré que l'effet environnemental (σ^2_A) est

supérieur à celui de l'effet génotypique (σ^2_G) pour les composantes NE, PMG, RDP et IR ($\sigma^2_A/\sigma^2_G > 1$), alors que c'est le contraire pour les composantes NGE, NGM^2 et RDG ($\sigma^2_A/\sigma^2_G < 1$) pour lesquelles l'effet génotypique est prédominant. Ceci montre que les conditions de culture ont eu un effet supérieur sur le rendement en paille de la plante ainsi que le poids du grain ; alors que, le RDG a été influencé par l'effet génotypique. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Graybosch et al. (2003) et Peterson et al. (1992) pour le poids du grain et le RDG respectivement.

II.3. Conclusion

Dans le cadre d'une première caractérisation agronomique des variétés de blé tendre sélectionnées par l'IRAL pour leur potentiel de tolérance/résistance aux conditions semi-arides et retenus pour notre travail de thèse, une analyse des principales variables agronomiques (majoritairement associées aux composantes du rendement) a été menée en réponse aux deux principales sources de variation facilement identifiables : l'effet environnemental/conditions de culture (i.e. cumul d'effet thermique et hydrique) et l'effet génotypique.

L'effet environnemental (conditions de culture) a été prédominant sur le NE, le PMG et le RDP. En effet, les conditions limitantes de culture surgissant au niveau de la phase de remplissage du grain ont modifié considérablement le poids du grain.

Au-delà de cet effet environnemental, on peut dégager un effet génotypique des variables agronomiques plus marqué sur le NGE, NGM^2 et de RDG ; ce qui semble cohérent avec la sélection de ces variétés pour leur caractère résistant/tolérant à la sécheresse.

En tout état de cause, les principaux phénomènes observables se focalisent essentiellement sur la période importante de la croissance du grain durant le printemps où le manque de pluviométrie accompagné par les fortes températures a influencé négativement la phase de remplissage du grain et ainsi l'accumulation de la matière sèche.

Cette période critique pour les aspects de rendement agronomique (accumulation des constituants majeurs) est également importante en ce qui concerne la définition potentielle d'une qualité d'usage (action potentielle sur la composition et équilibre des différents constituants). Pour cela, la composition biochimique des grains récoltés est détaillée dans le chapitre qui suit.

Chapitre III

CARACTÉRISATION BIOCHIMIQUE DE GÉNOTYPES SÉLECTIONNÉS DE BLÉ TENDRE LIBANAIS

Dans le cadre de la première partie de notre étude (Chapitre II), nous avons démontré que les cultures de blé tendre réalisées au cours des années culturales consécutives 2015/2016 et 2016/2017 ont été réalisées en conditions environnementales limitantes se traduisant par des modifications significatives des principales variables agronomiques au cours des phases de division et de grandissement cellulaire des grains. Au cours du chapitre III, nous allons étudier l'effet de ces modifications physiologiques sur la composition biochimique des grains des différents génotypes retenus.

En effet, il a été démontré que, dans la plupart du temps, les conditions environnementales (i.e. régime thermique et/ou régime hydrique) observées pendant la phase de remplissage des grains (i.e. phase de grandissement cellulaire entre 10 à 35 JAF) (Bailey, 1925; Triboi, 1990) ont une incidence importante sur la productivité (i.e. PMG) mais également sur la qualité d'usage des grains de blé (i.e. teneur et/ou composition des prolamines et des polysaccharides amylacés) (Dupont et Altenbach, 2003).

Dans ce chapitre III, les principaux composants biochimiques des grains classiquement associés à leurs aptitudes technologiques (i.e. aptitudes à la panification majoritairement) ont été quantifiés et qualifiés. Ainsi, les protéines de réserve (i.e. gliadines et gluténines) responsables de la majorité des propriétés rhéologiques des farines et pâtes ont été caractérisées. Une attention toute particulière a été portée au niveau de la fraction des prolamines polymériques (i.e. polymères gluténiques) dans la mesure où une relation forte a été d'ores et déjà établie entre la majorité des aptitudes technologiques (i.e. extensibilité, volume du pain...) et la distribution des masses moléculaires (MWD) de ces assemblages protéiques (Gupta et al., 1992; Singh et MacRitchie, 2001; Goesart et al., 2005; Lemelin et al., 2005).

Dans une deuxième partie de ce même chapitre, nous avons également étudiés les modifications engendrées au niveau de la fraction des polysaccharides amylicés. Ainsi, nous nous sommes attachés à caractériser les variations quantitatives et/ou qualitatives observées au niveau de l'amidon (i.e. distribution granulométrique des granules) et de ses constituants (amylose et amylopectine). En effet, plusieurs auteurs ont déjà souligné l'influence des caractéristiques majeures de l'amidon [i.e. ratio amylose/amylopectine (Hug-Iten et al., 1999), distribution de tailles de granules d'amidon (Hayman et al., 1998; Massaux et al., 2006), rapport surface-volume du grain (Hoseney et al., 1971) sur la modulation des aptitudes à la transformation du grain de blé tendre.

III.1. Matériel et Méthodes

III.1.1. Évaluation de la qualité des grains de blé

Les caractères étudiés pour les échantillons homogènes de grains de blé ont été basés sur la détermination du poids de mille grains (TKW), de la teneur totale en protéines ($N \times 5,7$) par la méthode Dumas (AACC 46.30.01) sur LECO (FP-528, Perkin Elmer) (**Error! Reference source not found.**20) et de la teneur en amidon (AACC 76.13.01).

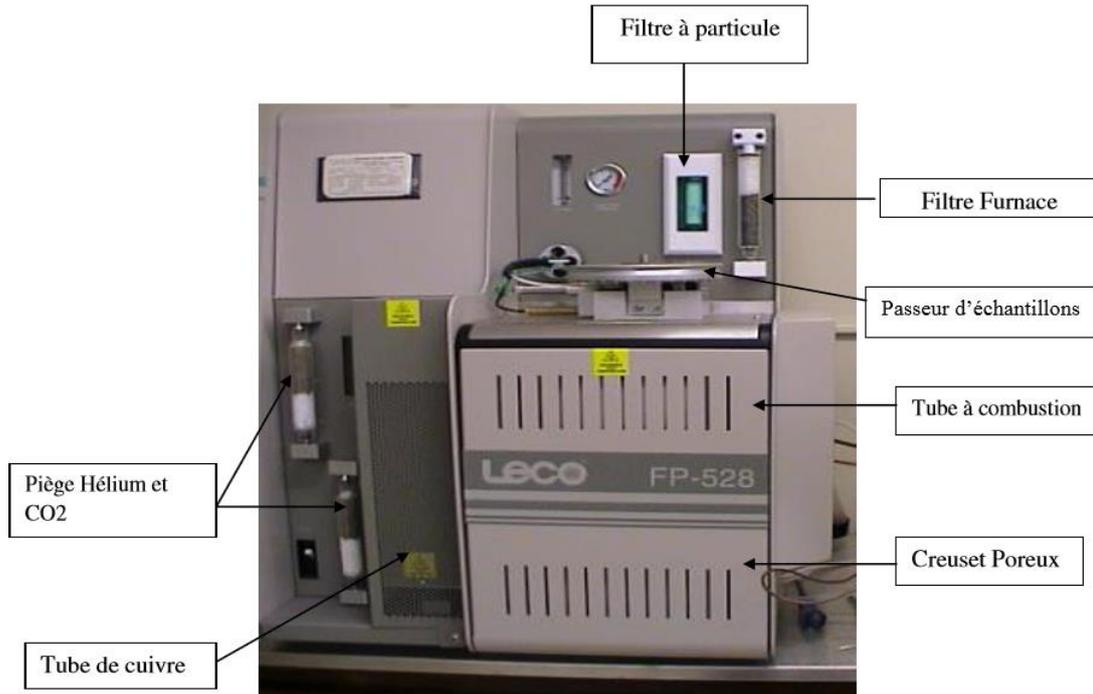


Figure 20. Dispositif d'analyse de l'azote total par combustion (LECO FP-528)

III.1.2. Fabrication des farines de blé

Les grains de blé ont été humidifiés à 16% (w/w) de teneur en eau totale et stabilisés pendant 24 h avant d'être broyés sur un moulin expérimental Bühler (type MLU-202) selon la méthode AACC 26-21.02. La farine blanche résultante, ayant un taux d'extraction moyen de 65% et une teneur moyenne en cendres de 0,68% (w/w), a été soumise à différentes analyses avec trois répétitions de chaque échantillon.

III.1.3. Quantification des protéines des grains par chromatographie liquide haute performance d'exclusion stérique (SE-HPLC)

Pour l'extraction des protéines extractibles au SDS, 10 mg d'échantillons de farine blanche ont été mélangés avec une solution tampon phosphate de sodium [1 ml, pH 6,90, 0,05 M, SDS (2%, w/v)]. Après 2 h d'incubation à 60 °C sous agitation continue, les mélanges ont été centrifugés à 12 500 × g pendant 30 min à 20 °C. Les surnageants contenant

les protéines solubles dans le SDS ont été filtrés à travers un filtre seringue de cellulose régénérée (porosité = 0,45 μm) et 20 μl ont ensuite été injectés dans le dispositif SE-HPLC retenu.

Les culots obtenus à l'issue de l'étape de centrifugation ont été remis en suspension dans la même solution de phosphate de sodium [1 ml, pH 6,90, 0,05 M, SDS (2%, w/v)] et soumis à un traitement ultrasonore pendant 20 secondes à l'aide d'une sonde à micropointe de 3 mm (Sonics Materials™, Thermo Fisher Scientific, modèle 75038) et centrifugé pendant 30 min (12 500 \times g à 20 °C). Les surnageants contenant les protéines non extractibles au SDS ont été filtrés à travers un filtre seringue de cellulose régénérée (porosité 0,45 μm) et ont été ensuite injectés à raison de 20 μl dans le système de séparation (SE-HPLC).

Pour l'extraction des protéines totales, 10 mg de farine blanche ont été incubés à 60 °C pendant 2 h sous agitation continue en présence d'une solution de tampon phosphate de sodium [1 ml, pH 6,90, 0,05 M, SDS (2%, w/v)]. Le traitement ultrasonore a ensuite été effectué pendant 20 secondes en utilisant une sonde à micropointe de 3 mm (Sonics Materials™, Thermo Fisher Scientific, modèle 75038). Après cela, les échantillons ont été centrifugés à 12 500 \times g pendant 30 min à 20 °C. A l'identique de la procédure décrite plus haut, les surnageants obtenus ont été filtrés à travers un filtre seringue de cellulose régénérée (porosité 0,45 μm) et ont ensuite été injectés à raison de 20 μl dans le système de séparation (SE-HPLC).

L'analyse des différentes fractions protéiques a été réalisée en utilisant un système séparatif Spectra SYSTEM LC (Thermo Fisher Scientific, Les Ulis, France). La colonne utilisée pour l'analyse chromatographique d'exclusion stérique correspond à une colonne de type TSK G 400 SW (300 \times 7,5 mm, 450 \AA) précédée d'une pré-colonne (6 \times 40 mm TSK gel SWXL). L'éluant retenu pour ces séparations correspond à une solution tampon de phosphate de sodium [0,05 M, pH 6,90, SDS (0,1%, w/v)]. L'élution est réalisée à un débit constant (0,7 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$). Afin d'éviter la précipitation du SDS lors de la séparation des protéines, l'ensemble des dispositifs séparatifs ont été thermostatés à 25 °C. En accord avec les travaux de Meleard (2000), trois fractions protéiques ont été quantifiées : la fraction I (F1+F2 : fraction correspondant aux gluténines), la fraction II (F3+F4 : fraction correspondant aux gliadines) et la fraction III (F5 : fraction correspondant aux albumines/globulines) (**Error!**

Reference source not found.) Les quantités des différentes fractions protéiques ont été déterminées en tant compte des proportions relatives de celles-ci par rapport à la surface totale du chromatogramme [compte tenu du fait que les coefficients de distinction moléculaire à la longueur d'onde retenue (214 nm) étaient identiques]. Les protéines polymériques non extractibles (UPP) ont été quantifiées comme suit : $UPP (\%) = [\text{gluténine non extractible} / \text{gluténine totale}] \times 100$.

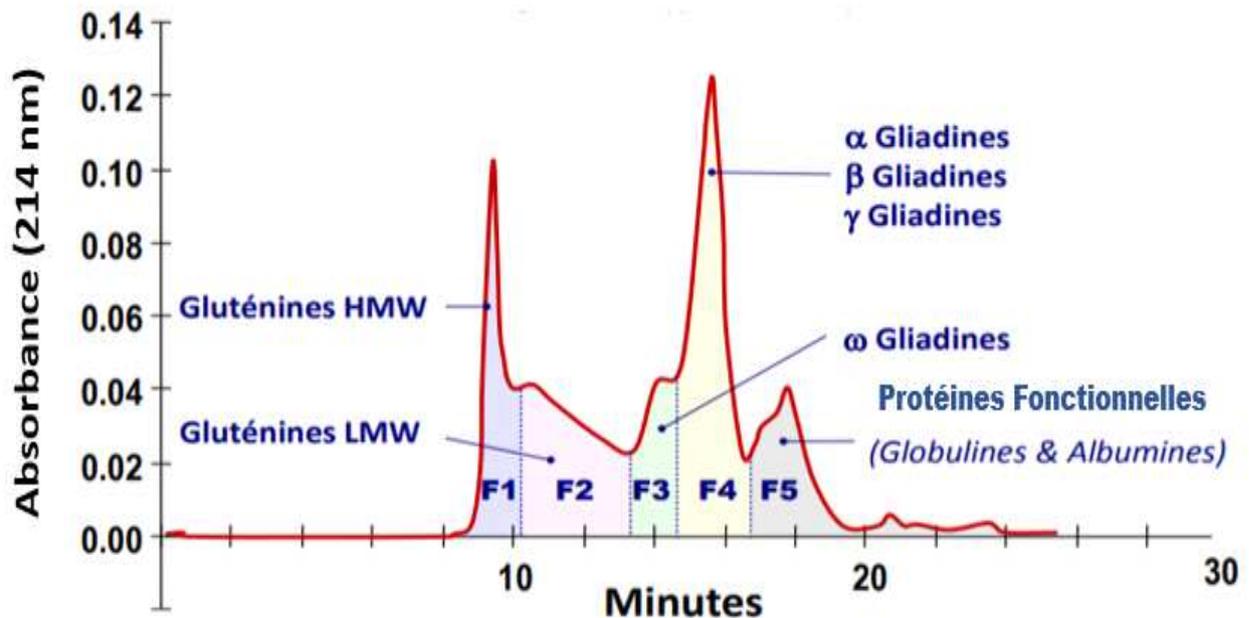


Figure 21. Exemple de chromatogramme d'exclusion stérique de protéines du grain de blé

III.1.4. Détermination de la distribution des masses moléculaires des protéines de la farine de blé par fractionnement asymétrique en flux force (A4F)

La détermination de la distribution des masses moléculaires des protéines du grain de blé a été effectuée comme indiqué précédemment (Lemelin et al., 2005). Un échantillon de farine (30 mg) a été mélangé avec une solution aqueuse de phosphate de sodium [1 ml, pH 6,90, 0,05 M, SDS (2%, w/v)] et incubé pendant 2 h à 60 °C avec une agitation rapide toutes les 10 min. Les échantillons ont ensuite été soumis à un traitement ultrasonore (20 secondes à un réglage de puissance $\approx 30\%$) grâce à une sonde type micropointe de 3 mm avant d'être centrifugés ($12\ 500 \times g$) pendant 15 min à 25 °C et filtrés à travers un filtre seringue de cellulose régénérée (porosité 0,45 μm). Ces échantillons filtrés sont ensuite injectés (30 μl)

dans le système analytique A4F/MALLS retenu ici. Le dispositif A4F utilisé est constitué d'un système Eclipse3 F (Wyatt Technology, Santa Barbara, CA, USA) combiné à un détecteur de diffusion de lumière multi-angle (MALLS) (Dawn® multi-angle Heleos TM, Wyatt Technology, Santa Barbara, CA, USA) et un détecteur réfractométrique différentiel Optilab® T-rEX™ (Wyatt Technology, Santa Barbara, CA, USA). De plus, une chaîne chromatographique liquide de type Agilent HPLC 1200 (Agilent Technologies, Allemagne) a été utilisée avec le système A4F (Figure 17).

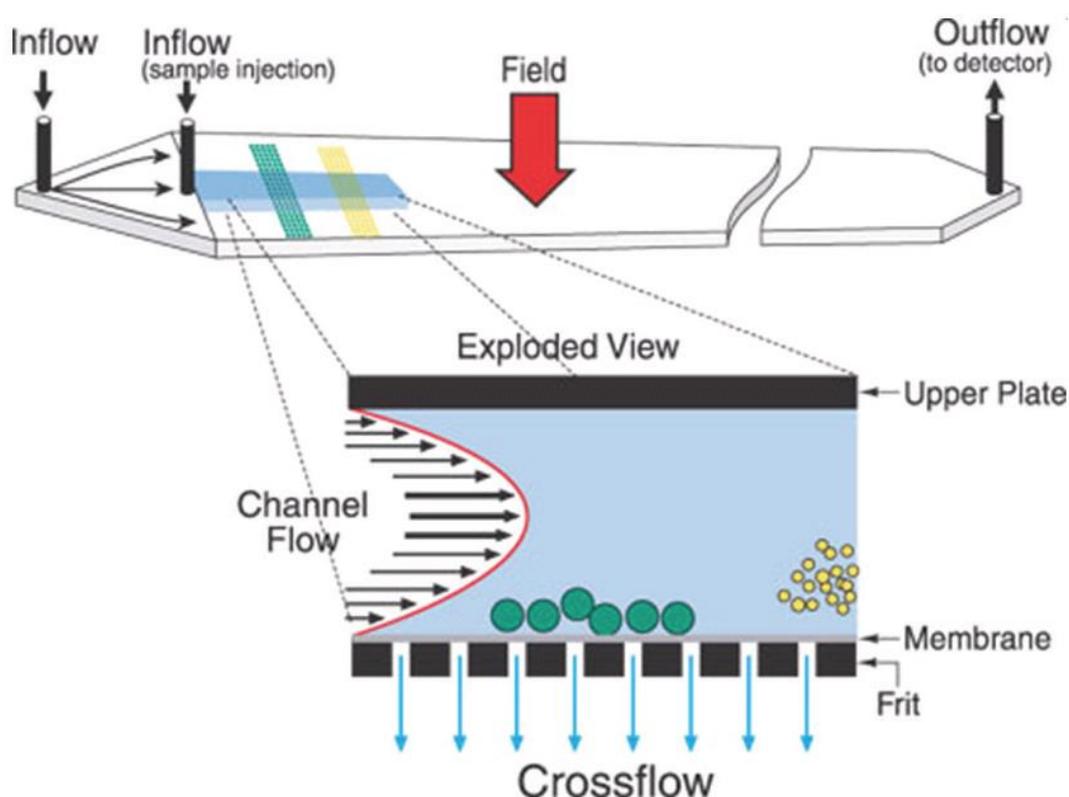


Figure 17. Principe de séparation par Asymetrical Flow Field Flow Fractionation (A4F) (Fraunhofer, ITWM)

Le canal trapézoïdal a une longueur de 286 mm et l'espaceur utilisé correspond à 350 μm . La paroi d'ultrafiltration est constituée d'une membrane de cellulose régénérée avec un seuil de coupure de 10 kDa. La phase mobile est constituée d'une solution tampon phosphate de sodium [pH 6,90, 0,05 M, SDS (0,1%, w/v)] qui traverse en continu un filtre en cellulose régénérée de 0,1 μm (Gelman Sciences, France). L'absorbance a été enregistrée à 214 nm (Figure 23). Le flux croisé utilisé pour le fractionnement est focalisé à 0,5 min pour un débit constant de 2 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$. L'étape d'injection est réalisée pendant 1,0 min à un débit de 0,2

ml.min⁻¹ et, une phase de relaxation a été ajustée à 0,5 min. Ces étapes sont suivies d'une élution vers le détecteur avec un débit de 1,0 ml.min⁻¹ et d'un débit croisé diminuant progressivement de 3,0 à 0,0 ml.min⁻¹. Après 14 min d'élution, le débit croisé a été maintenu à 0,0 ml.min⁻¹ pendant 9 min.

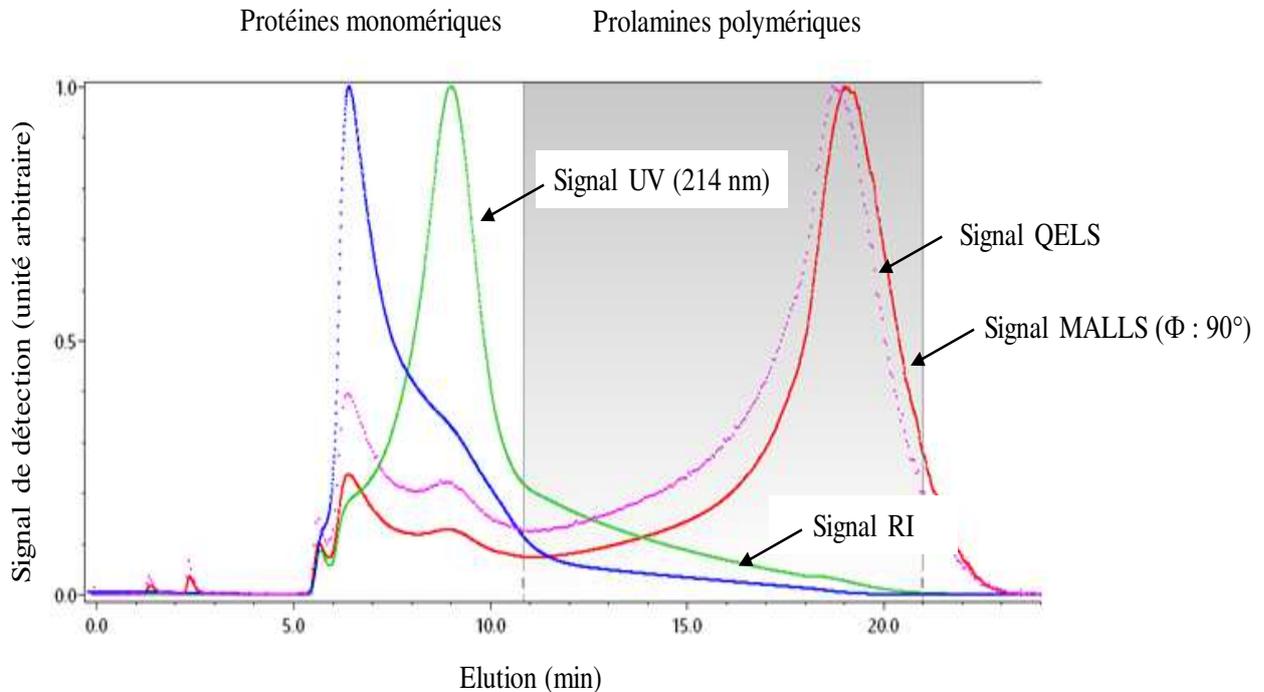


Figure 18. Exemple d'un fractogramme A4F obtenu à partir des protéines totales du grain de blé tendre (prolamines et protéines métaboliques)

La détermination de la masse molaire moyenne en nombre (M_n), de la masse molaire moyenne en poids (M_w), du rayon de giration (R_z) et du rayon de giration hydrodynamique (R_h) a été effectuée à l'aide du logiciel ASTRA 7.1.2. M_w et le R_z ont été obtenus en ajustant les données MALLS à l'aide de la méthode de Berry, en effectuant un ajustement du second ordre sur les données collectées aux détecteurs de diffusion 5-17.

M_w et le R_z peuvent être obtenus par MALLS combinés à des mesures de concentration en appliquant l'approximation de Rayleigh-Gans-Debye (Wyatt, 1991) (Équation 7) :

$$\frac{K^* c_i}{R_\theta} = \frac{1}{M_i P(\theta)} + 2A_2 c, \quad (\text{Equation 7})$$

Où R_θ correspond à l'excès de diffusion Rayleigh par rapport à celui du solvant dû à un soluté de concentration c_i pour la tranche i de l'échantillon fractionné. K^* est une constante instrumentale dépendant de la longueur d'onde et de l'incrément d'indice de réfraction (dn/dc) du soluté dans le solvant particulier. M_i est la masse molaire moyenne en poids du soluté. $P(\theta)$ est la fonction de diffusion qui décrit la dépendance angulaire de l'intensité lumineuse diffusée à partir de laquelle le rayon carré moyen $\langle r^2 \rangle$ est dérivé. A_2 est le deuxième coefficient de viriel et capture la non-idéalité due aux interactions solvant-soluté ; on s'attend à ce qu'il soit extrêmement faible dans un échantillon fractionné dilué.

$$(M_w = \frac{\sum c_i M_i}{\sum c_i}), \quad (\text{Equation 8})$$

$$(M_n = \frac{\sum c_i}{\sum c_i / M_i}), \quad (\text{Equation 9})$$

$$(M_z = \frac{\sum c_i M_i^2}{\sum c_i M_i}), \quad (\text{Equation 10})$$

$$(R_w = \frac{\sum (c_i \langle r^2 \rangle_i)}{\sum c_i}), \quad (\text{Equation 11})$$

$$(R_n = \frac{\sum (\frac{c_i \langle r^2 \rangle_i}{M_i})}{\sum (\frac{c_i}{M_i})}), \quad (\text{Equation 12})$$

$$(R_z = \frac{\sum (c_i M_i \langle r^2 \rangle_i)}{\sum (c_i M_i)}), \quad (\text{Equation 13})$$

La masse molaire moyenne en poids (Équation 8) est dérivée en mesurant R_θ à plusieurs angles pour chaque tranche i de l'échantillon fractionné. La concentration de chaque tranche, c_i , est mesurée par détecteur UV. La masse molaire moyenne en nombre est définie par l'équation 9. La masse molaire moyenne z est définie par l'équation 10. Le PI est calculé comme suit : $PI = M_w/M_n$. Le rayon carré moyen en poids est calculé comme l'équation 11. Le rayon carré moyen en nombre est déterminé comme l'équation 12. Enfin, la racine carrée moyenne du rayon en z , R_z est dérivée des rayons carrés moyens (Equation 13).

III.1.5. Quantification des sous-unités gluténiques de hautes masses moléculaires (SG-HPM) par nano électrophorèse capillaire (Lab-on-a-chip)

L'extraction et la quantification des sous-unités gluténiques ont été réalisées conformément aux travaux réalisés par (Rhazi et al., 2009). Les échantillons de farine de blé (30 mg) ont été mis en suspension pendant 20 min à 22 °C dans une solution tampon [1 ml, Tris-HCL 0,08 M, pH 7,50, propanol-1 (50%, w/v)]. Les échantillons ont été ensuite centrifugés pendant 15 min (15 900 × g). Les protéines monomériques (c'est-à-dire les gliadines, les albumines et les globulines) contenues dans le surnageant ont été éliminées. Les culots de centrifugation contenant des protéines polymériques ont été mélangés avec 0,6 ml d'une solution de Tris-HCl contenant du SDS (2%, w/v) et du DTT (1%, w/v). Ces solutions ont été soumises à un traitement ultrasonore pendant 20 secondes (30%) grâce à une sonde à micropointe de 3 mm. Les échantillons ont été ensuite incubés pendant 30 min à 60 °C avant d'être centrifugés pendant 15 min (12 500 × g à 22 °C).

La séparation des sous-unités gluténiques a été effectuée sur un appareil de nano électrophorèse capillaire (LabChip GXII Touch HT Protein Characterization System) (Figure 19), où le canal de la puce a été amorcé avec une solution de polymère de polydiméthylméthacrylate de haut poids moléculaire (pDMA) dans une solution de Tris-Tricine contenant du SDS et une coloration non covalente de 0,27% (w/v).

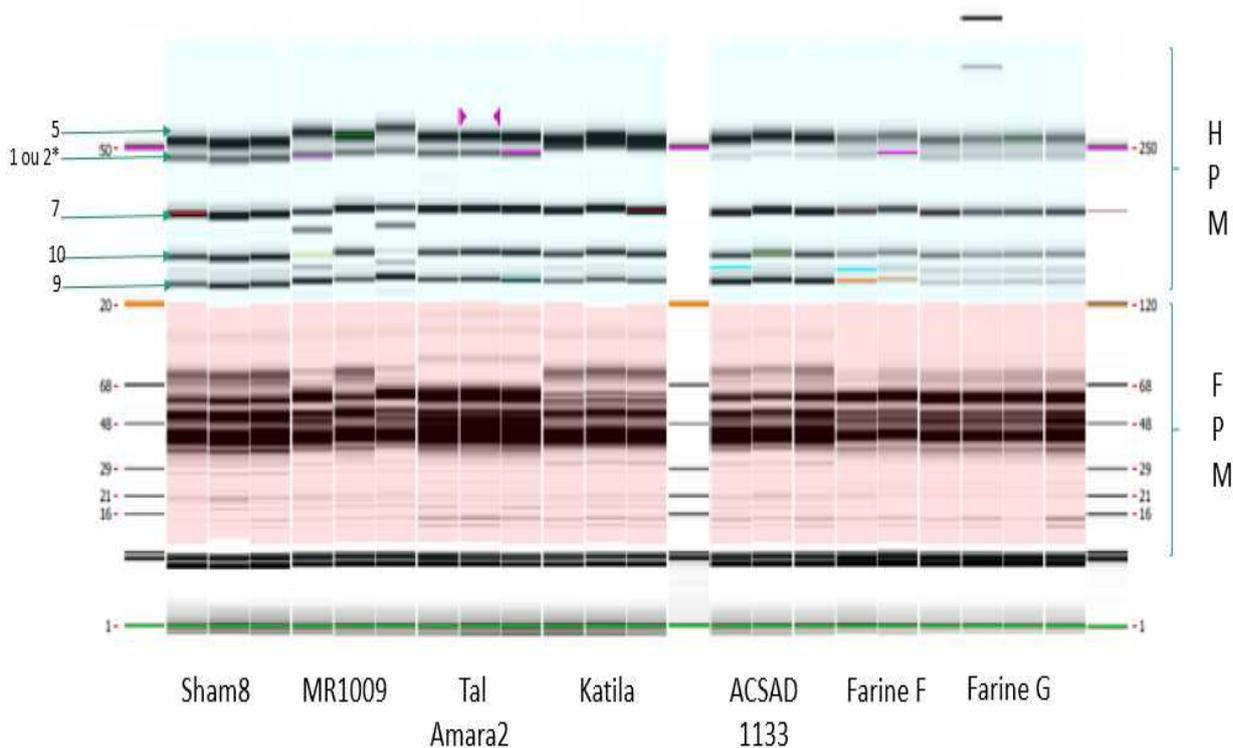


Figure 19. Exemple d'une séparation nano électrophorétique des SG-HPM et SG-FPM de grains plusieurs variétés de blé tendre Libanaises

III.1.6. Quantification de l'amidon total des grains de blé

La quantification de l'amidon au sein des échantillons de farine de blé est basée sur la méthode d'AOAC : 996.11 et d'AACC : 76.13.01. Ainsi, 10 mg de farine sont introduits dans des tubes en verre de 20 ml auxquels sont additionnés 200 μ l d'éthanol 80% (v/v). Après agitation des solutions, 2 ml d'hydroxyde de potassium sont rajoutés avant incubation durant 20 minutes dans un bain de glace. 8 ml de la solution de sodium acétate à 1,2 M sont ensuite rajoutés puis les solutions sont soumises à une hydrolyse par l'ajout de 100 μ l d'alpha amylase et de 100 μ l d'amyloglucosidase et incubées durant 30 minutes à 50 °C. L'amidon dissout est dilué par transfert du contenu dans une fiole jaugée de 10 ml. Après ajustement du volume et homogénéisation, un aliquote de 1 ml de chaque échantillon est prélevé et centrifugé à température ambiante (1800 \times g) durant 10 minutes. Un triplicata de chaque échantillon est réalisé. 3 ml de la solution GOPOD (Glucose oxydase/peroxydase) (Megazyme : Total Starch Assay Kit K-TSTA-100A) sont rajoutés à chaque tube qui sont ensuite placés à 50 °C pendant 20 minutes. Enfin, l'absorbance de chaque échantillon

(standard et blanc inclus) est lue au spectrophotomètre à 510 nm. Le D-Glucose est utilisé ici comme standard d'étalonnage.

III.1.7. Extraction des granules d'amidon des farines de blé et détermination de leur taille

L'extraction des granules d'amidon est basée sur le protocole INRA développé par Bancel et al. (2010). Un échantillon de 500 mg de farine est ajouté à 10 ml d'eau ultra pure, mélangé et filtré (100 µm) puis centrifugé à 4 000 × g pendant 5 min à 22 °C. Le matériau précipité est traité deux fois de la même manière. Ensuite, 5 ml de tampon Tris-HCL [55 mM, pH 6,80, SDS 2,3% (w/v), glycérol 10% (v/v) et DTT 1% (w/v)] ont été ajoutés au précipité et agités vigoureusement pendant 30 minutes. Les échantillons ont ensuite été soumis à un traitement ultrasonore (20 secondes, 30% à puissance max) (sonde à micropointe de 3 mm) et centrifugés (4 000 × g) pendant 5 à 10 min à 20 °C. Les culots de centrifugation ont été lavés trois fois consécutives à l'aide d'eau ultra pure (10 ml) puis, lavés deux fois à l'acétone (10 ml). Une centrifugation pendant 5 à 10 min (4 000 × g, 20 °C) a été effectuée après chaque étape de lavage. L'amidon séché a été maintenu à 4 °C.

La distribution granulométrique des granules d'amidon de la farine a été réalisée par diffraction laser à l'aide d'un appareil Malvern de type Mastersizer 2000. La distribution des granules d'amidon est exprimée par le pourcentage du volume occupé par les granules en raison de leur taille. Il s'agit d'un analyseur granulométrique qui mesure les particules d'amidon à travers une unité de dispersion humide. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une unité d'hydrodispersion MU. L'énergie d'agitation assure l'homogénéisation de la suspension d'échantillon. Le choix de la vitesse de la pompe était de 2500 tr/min afin d'obtenir une homogénéisation maximale de la suspension dans le bécher par élimination des bulles d'air. Un détecteur particulier enregistre l'intensité de la lumière laser dans la cellule optique qui est convertie en distribution granulométrique.

III.1.8. Détermination de la distribution des masses moléculaires des polysaccharides amylicés des farines de blé par fractionnement asymétrique en flux force (A4F)

La distribution des masses molaires des polysaccharides amylicés a été réalisée selon la procédure analytique rapportée par Chiaramonte et al. (2012). L'amidon purifié (10 mg) a été dissous dans du diméthylsulfoxyde (1 ml, DMSO 95% (w/v)] à 100 °C pendant une heure puis, précipité dans 5 ml d'éthanol et centrifugé (20 000 × g) pendant 20 min à 20 °C. Le précipité est ensuite ajouté à 4 ml de NaOH (20 mM) et solubilisé pendant 8 min à 135 °C au micro-onde (Discover CEM, Saclay, France). Après filtration sur filtre seringue de 0,45 m (Gelman Sciences, France) les échantillons sont injectés (100 µl) dans le système A4F/MALLS retenu. Le système analytique A4F utilisé correspond à l'Eclipse3 F System (Wyatt Technology, Toulouse, France), qui a été décrit plus haut dans le paragraphe III.1.4. Toutefois, le canal de séparation utilisé ici est le plus court (195 mm de longueur) et l'espaceur utilisé correspond à 350 µm. Le système a été normalisé et étalonné avec une gamme de pullulane de masses moléculaires croissantes (de 110 kDa à 800 kDa). La détection des molécules est réalisée par un détecteur réfractométrique différentiel (RI) et par un détecteur à diffusion de lumière multi angulaire (MALLS) (Figure 20).

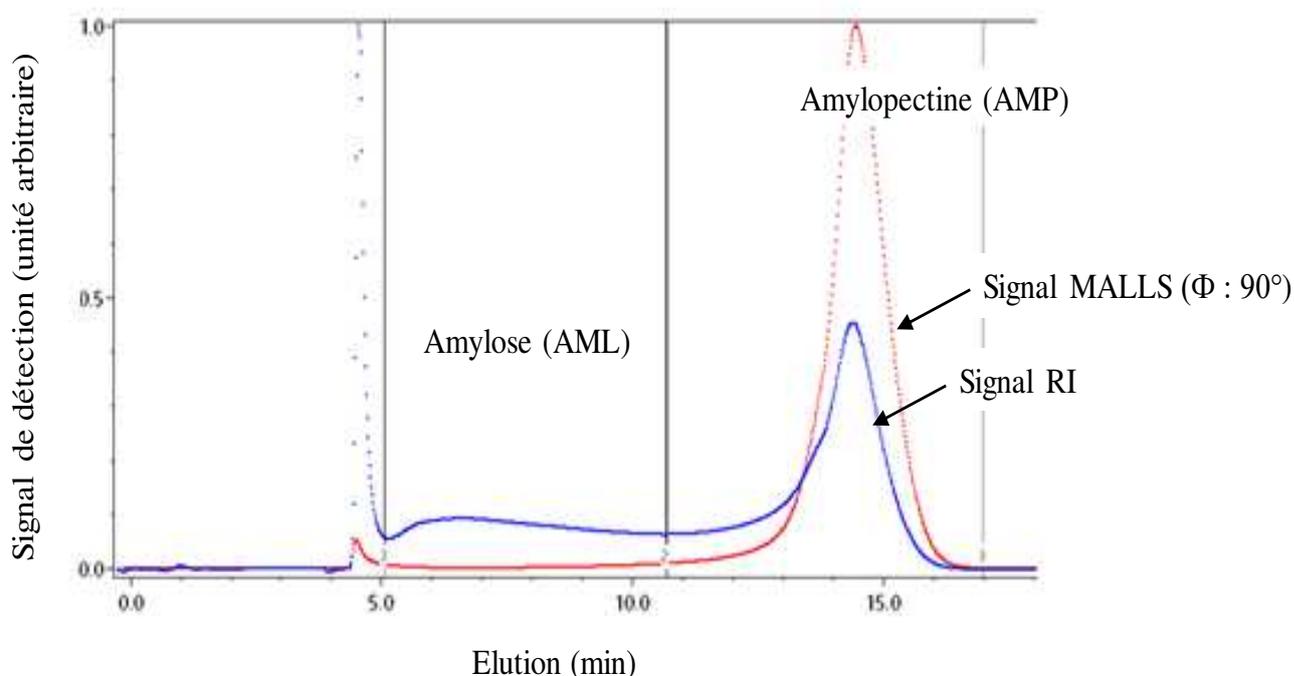


Figure 20. Exemple d'un fractogramme A4F d'une solution d'amidon de grain de blé tendre

III.1.9. Analyses statistiques

Les analyses statistiques des données ont été effectuées à l'aide de logiciel XLSTAT (Addinsoft TM). La comparaison multiple des moyennes par ANOVA multifactorielle a été effectuée par analyse de variance de type ANOVA ($p = 0,05$). Des comparaisons de moyennes multiples ont été réalisées à l'aide du test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

III.2. Résultats et discussions

III.2.1. Contenu en prolamines des grains des différents génotypes de blé sélectionnés et distribution de leurs masses moléculaires

L'ensemble des différents résultats portant sur ces caractérisations sont rassemblés dans le Tableau 8. Bien qu'il existe de différences significatives entre les quatre génotypes étudiés (i.e. entre TAL AMARA 2 et les autres génotypes de blé), les teneurs en prolamines polymériques sont très proches (de 29,92% à 36,51% pour KATILA et TAL AMARA 2 respectivement). Parallèlement, la teneur en gliadines (prolamines monomériques) représente entre 50,20% et 55,47% de la teneur totale en protéines des grains de blé avec une valeur moyenne pluriannuelle correspondant à 54,06%.

A la vue de ces résultats, il apparaît que les quatre génotypes sélectionnés dans le cadre de notre étude sont caractérisés par des teneurs en gliadines relativement élevées. En effet, cette fraction de prolamines représente ici plus de 54% de la teneur totale en protéines, soit environ +10 à +15% de plus que la teneur en protéines couramment rencontrée pour les variétés de blé tendre (Aussenac et Rhazi, 2018). Les gliadines sont généralement synthétisées et accumulées le plus rapidement à partir de la phase de floraison (i.e. entre 10 JAF et 25 JAF). Au contraire, les sous-unités gluténiques (i.e. SG-FPM et particulièrement SG-HPM) s'accumulent plus lentement mais plus longtemps lors du remplissage des grains (de 15 JAF jusqu'à 35 JAF).

Comme il a été démontré plus haut (chapitre II), les conditions environnementales qui ont été enregistrées lors de notre étude ont conduit à une réduction significative du temps de remplissage des grains. En conséquence, ces conditions environnementales limitantes ont

provoqué une réduction significative de la synthèse et de l'accumulation de prolamines polymériques au profit des prolamines monomériques.

Tableau 8. Caractéristiques générales des grains de blé récoltés

| Variété de blé | PMG (g) | Qté Protéines (3) | Qté Amidon (3) | Qté de Prolamines | | | Qté UPP (4) |
|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|------------------|--------------------------|-------------------|
| | | | | Qté | Qté | Gliadines/ Gluténines | |
| | | | | Gluténines (3) | Gliadines (3) | | |
| SHAM 8 | 21,42 a ⁽¹⁾ | 16,96 a | 57,86 b | 30,69 a | 55,18 b | 1,82 a | 46,70 a |
| TAL AMARA 2 | 25,85 b | 17,58 b | 54,34 a | 36,51 b | 50,19 a | 1,38 b | 41,35 b |
| KATILA | 24,85 b | 17,46 b | 54,31 a | 29,92 a | 55,42 b | 1,89 a | 44,74 a |
| ACSAD 1133 | 25,96 b | 18,14 c | 54,13 a | 31,25 a | 55,47 b | 1,79 a | 46,40 a |
| Moyenne ⁽²⁾ | 24,52 | 17,53 | 55,16 | 32,09 | 54,06 | 1,72 | 45,00 |
| CV (%) | 8,67 | 2,76 | 3,27 | 9,33 | 4,79 | 13,46 | 5,48 |
| Récolte 2016 | 25,69 | 20,29 | 53,37 | 32,54 | 53,73 | 1,70 | 46,50 |
| Récolte 2017 | 23,35 | 14,78 | 56,75 | 31,64 | 54,40 | 1,73 | 43,10 |

¹ Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

² Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques.

³ Contenu en protéines et en amidon exprimé en g/100g MS.

⁴ UPP (%) = (gluténines inextractibles au SDS 2% / gluténines totales) x 100.

Depuis les années 2000, les scientifiques s'accordent pour dire que la distribution des masses moléculaires (MWD) des protéines de réserves est le principal facteur influençant les aptitudes à la transformation technologique des farines (Southan et MacRitchie, 1999). Cependant, les variations de MWD qui peuvent exister entre les géotypes de blé peuvent théoriquement résulter d'une modification du rapport entre les protéines monomériques et les protéines polymériques (i.e. rapport gliadines/gluténines ou l'inverse) mais aussi d'une modification de la distribution de taille des protéines polymériques seules (MacRitchie et Lafiandra, 1997) déterminée par la quantification des protéines polymériques non extractibles au SDS 2% (UPP) et/ou par analyse de la fraction gluténique à l'aide d'A4F.

Les résultats obtenus à l'issue de l'analyse de variance sur le contenu des deux constituants majeurs des grains (Tableau 9) montrent clairement un effet significatif de l'année de culture (i.e. 2015/2016 et 2016/2017) sur le contenu total en protéines mais également sur le contenu en amidon.

Tableau 9. Analyse de la variance des principaux constituants des grains de blé à la récolte

| Source de variation | Contenu en protéines totales (g/100g MS) | Contenu en amidon (g/100g MS) |
|--|--|-------------------------------|
| F | 101.53 | 12.67 |
| Effet Année de culture (A) | 682,30*** | 40,83*** |
| Effet Génotype (G) | 5,27** | 13,11*** |
| Effet Année × Génotype (A×G) | 4,19** | 2,84* |
| Rapport des variances (σ^2_A/σ^2_G) | 129,53 | 3,11 |
| Rapport des variances ($\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G}$) | 162,75 | 14,40 |

(*) Effet significatif au seuil $p < 0,05$.

(**) Effet hautement significatif au seuil $p < 0,01$.

(***) Effet très hautement significatif au seuil $p < 0,001$.

Le facteur génétique (génotype) a eu un effet très hautement significatif sur le contenu en amidon et hautement significatif sur le contenu en protéines totales. L'interaction entre les deux facteurs (A×G) a également significative ($p < 0,05$) sur les contenus des deux constituants majeurs des grains. Cependant, comme le montrent parfaitement les rapports des variances calculées, l'effet des conditions culturales est très largement supérieur à celui du génotype et de l'interaction des deux facteurs ($\sigma^2_A/\sigma^2_G > 129$ et $\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G} > 160$; $\sigma^2_A/\sigma^2_G > 3$ et $\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G} > 14$ pour le contenu en protéines et en amidon respectivement). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par d'autres auteurs (Peterson et al., 1992 ; Williams et al., 2008 et Surma et al., 2012). Toutefois, dans certaines conditions expérimentales, l'effet génotypique peut être plus important que l'effet environnemental sur le niveau

d'accumulation des protéines dans les grains (Fenn et al., 1994; Hazen et al., 1997; Yong et al., 2004 et Denčić et al., 2012).

Dans le cadre de notre étude, quel que soit le génotype de blé étudié, le rapport gliadines/gluténines (encore appelé indice de polymérisation des prolamines) est ici caractérisé par des valeurs élevées (i.e. > 1,2–1,3) (Tableau 8). En effet, ce rapport varie entre 1,38 et 1,89 pour TAL AMARA 2 et KATILA, respectivement, avec une valeur moyenne générale de 1,72. TAL AMARA 2 est le seul génotype de blé qui se différencie statistiquement ($p = 0,05$) avec une valeur moyenne égale à 1,38. Dans le même temps, les teneurs en UPP sont assez comparables entre les génotypes, avec des valeurs comprises entre 41,35% et 46,70% pour TAL AMARA 2 et SHAM 8, respectivement. En moyenne (c'est-à-dire 45,00%), ces valeurs élevées correspondaient à des teneurs en gluténines fortement agrégées/polymérisées.

Le tableau 10 présente les caractéristiques macromoléculaires (Mn , Mw , Rz et Rh) des prolamines polymériques des grains de blé. Comme le montre le calcul de l'indice de polydispersité ($Ip = Mw/Mn$), toutes les fractions polymériques présentes dans les différents grains de blé sont caractérisées par une forte hétérogénéité (i.e., $Ip > 5,0$). En effet, les valeurs recueillies varient respectivement entre 6,96 et 9,41 pour TAL AMARA 2 et SHAM 8. Les génotypes étudiés diffèrent significativement ($p = 0,05$) en deux groupes statistiquement distincts.

Tableau 10. Caractéristiques macromoléculaires des prolamines polymères des grains de blé

| Variété de blé | Mn ($\times 10^6$ g/mol) (1) | Mw ($\times 10^6$ g/mol) (1) | Ip (1) | Rz (nm) (2) | Rh (nm) (2) |
|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------|------------------|------------------|
| SHAM 8 | 0,55 c ⁽³⁾ | 5,13 a | 9,41 a | 94,16 a | 8,06 a |
| TAL AMARA 2 | 0,58 b | 3,92 c | 6,96 b | 87,74 b | 8,21 a |
| KATILA | 0,61 a | 4,47 b | 7,40 b | 88,18 b | 8,23 a |
| ACSAD 1133 | 0,56 bc | 4,17 bc | 7,30 b | 85,70 b | 8,01 a |
| Moyenne ⁽⁴⁾ | 0,58 | 4,42 | 7,77 | 92,95 | 8,13 |
| CV (%) | 4,60 | 11,81 | 14,27 | 4,09 | 1,32 |

¹ M_n : Masse moléculaire moyenne en nombre, M_w : Masse moléculaire moyenne en masse, I_p : indice de polydispersité (M_w/M_n).

² R_z : Rayon de giration et R_h : Rayon hydrodynamique.

³ Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

⁴ Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques.

La masse molaire moyenne en nombre (M_n) et la masse molaire moyenne en masse (M_w) varient respectivement de $0,55 \times 10^6$ g/mol à $0,61 \times 10^6$ g/mol, et de $3,92 \times 10^6$ g/mol à $5,13 \times 10^6$ g/mol. Ces deux caractéristiques macromoléculaires nous permettent de discriminer certains génotypes étudiés (principalement SHAM8 et TAL AMARA 2), les masses moléculaires moyennes calculées étant caractéristiques des prolamines hautement polymérisées/agrégées, confirmant ainsi les résultats obtenus précédemment en quantifiant la fraction UPP. De la même manière, le rayon de giration R_z et le rayon hydrodynamique R_h varient respectivement de 85,70 nm à 94.16 nm et de 8.01 nm à 8.23 nm.

III.2.2. Composition et contenu en sous-unités gluténiques des grains de blé

Le Tableau 11 présente, pour la première fois à notre connaissance, la composition en SG-HPM des prolamines polymériques de chacun des génotypes sélectionnés. Comme on peut le voir à partir de ses résultats originaux, la majorité des échantillons de protéines (c'est-à-dire SHAM 8, TAL AMARA 2 et ACSAD 1133) ont la même composition en SG-HPM, à savoir la combinaison allélique Glu-A1 : 2*, Glu-B1 : 7+9, Glu-D1 : 5+10 avec des concentrations relatives assez proches sauf pour les SG-HPM 9 et 2* dont les proportions varient significativement pour SHAM 8 et TAL AMARA 2 vs. ACSAD 1133 (13,77% et 13,71% vs. 18,67% pour la SG-HPM 9 et 12,41% contre 4,59% pour la SG-HPM 2*).

Tableau 11. Composition et contenu en sous-unités gluténiques des grains de blé récoltés

| Variété de blé | HPM | SG-HPM (%) ⁽¹⁾ | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---------------------------|----------|---------|-------|---------|---------|
| | / FPM | 9 | 10 | 7 | 1 | 2* | 5 |
| SHAM 8 | 0,25 a ⁽²⁾ | 13,77 a | 16,95 ab | 29,24 a | - | 12,41 b | 27,63 a |
| TAL AMARA 2 | 0,23 a | 13,71 a | 17,30 ab | 29,38 a | - | 12,41 b | 27,03 a |
| KATILA | 0,25 a | 11,92 a | 18,87 b | 31,25 a | 13,62 | - | 24,33 a |
| ACSAD 1133 | 0,26 a | 18,67 b | 15,84 a | 31,05 a | - | 4,59 a | 27,54 a |
| Moyenne ⁽³⁾ | 0,25 | 14,52 | 17,24 | 30,23 | - | 9,86 | 26,63 |
| CV (%) | 4,11 | 19,95 | 7,27 | 3,53 | - | 46,31 | 5,85 |

¹ Quantité de sous-unités gluténiques : pourcentage relative exprimé par rapport à la quantité totale des SG-HPM.

² Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

³ Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques.

Le seul génotype caractérisé par une composition SG-HPM différente correspond à KATILA avec la combinaison allélique Glu-A1:1, Glu-B1:7+9, Glu-D1:5+10. De plus, les prolamines polymériques des différents génotypes de blé sont caractérisées par leurs rapports SG-HPM/SG-FPM. Bien que ces ratios soient assez proches statistiquement ($p = 0,05$), certains génotypes ont des ratios assez différents malgré le fait qu'ils aient la même combinaison allélique. Ainsi, TAL AMARA 2 et ACSAD 1133 qui possèdent la combinaison allélique (Glu-A1 : 2*, Glu-B1 : 7+9, Glu-D1 : 5+10) sont caractérisés par des ratios SG-HPM/SG-FPM égal à 0,23 et à 0,26 respectivement.

Les interactions qui peuvent exister entre les protéines polymériques sont fortement liées à la nature de la SG-HPM (en particulier la paire SG-HPM 5+10 vs la paire SG-HPM 2+12 codée par Glu-D1) et le rapport SG-HPM/SG-FPM (Southan et MacRitchie, 1999). Ainsi, toute modification de la composition SG-HPM au sein des prolamines polymériques entraînera une modification de la distribution des masses moléculaires de ces polymères. Comme on le voit dans SHAM et TAL AMARA 2, pour la même combinaison allélique de SG-HPM, toute amélioration du rapport SG-HPM/SG-FPM (Tableau 11) entraîne une augmentation de la masse moléculaire moyenne en masse (M_w) (Tableau 10) et vice versa.

III.2.3. Contenu en amidon des grains de blé et distribution des masses moléculaires des polysaccharides amylicés

L'amidon se compose de deux polymères structurellement différents : (i) l'amylose (AML) est un polymère linéaire d'unités de glucose à liaison (1,4) et (ii) l'amylopectine (AMP) est une structure hautement ramifiée d'unités de glucose avec (1,6) et (1,4) liaisons α (Stone et Morell, 2009). L'amylopectine et l'amylose sont présents dans un rapport d'environ 3:1 dans la plupart des amidons végétaux et l'analyse des grains mûrs dans notre étude montre une valeur proche de 34,22% d'amylose (Tableau 12). Nos résultats peuvent être considérés comme élevés; cependant, cette quantification est très dépendante de la méthodologie utilisée. Comme cela a déjà été démontré (Chiaramonte et al., 2012), la séparation et la quantification des polymères d'amidon par A4F permettent d'obtenir des résultats plus fiables et reproductibles. En tout état de cause, ce contenu semble très stable (i.e. pas de différences significatives entre les différents génotypes au cours des deux années de culture).

Les deux polymères constitutifs de l'amidon (AML et AMP) peuvent être caractérisés par des paramètres macromoléculaires différents (M_n , M_w et R_z). Comme le montrent les résultats de ces mesures (Tableau 12), les polymères d'amylopectine (AMP), qui sont les principaux polymères en termes d'abondance, sont caractérisés par des masses moléculaires très élevés : $16,1 \times 10^6$ g/mol et $58,8 \times 10^6$ g/mol pour la M_n et la M_w respectivement.

Tableau 12. Composition et paramètres macromoléculaires de la fraction amyliacée du grain à la récolte et distribution granulométrique des granules d'amidon

| Variété de blé | Amylopectine (AMP) | | | | Amylose (AML) | | | | Granules d'amidon | | | |
|------------------------|----------------------|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|------------|------------|------------|
| | $M_n^{(1)}$ | $M_w^{(1)}$ | $R_z^{(1)}$ | $V^{(1)}$ | Qté AMP (%) | $M_n^{(1)}$ | $M_w^{(1)}$ | $R_z^{(1)}$ | Qté AML (%) | type A (%) | type B (%) | type C (%) |
| SHAM 8 | 12,7a ⁽²⁾ | 55,3a | 134,4a | 0,33b | 66,0a | 0,61a | 0,33b | 69,3b | 34,2a | 72,8a | 22,8c | 3,9b |
| TAL AMARA 2 | 24,0b | 66,2b | 139,3a | 0,29a | 66,6a | 0,80b | 0,37c | 72,7b | 33,4a | 76,5b | 17,3a | 4,7c |
| KATILA | 14,8a | 59,5a | 140,3a | 0,32ab | 65,0a | 0,61a | 0,31ab | 70,5b | 34,5a | 79,2c | 16,8a | 3,3a |
| ACSAD 1133 | 13,0a | 54,3a | 140,6a | 0,33b | 65,3a | 0,60a | 0,29a | 58,9a | 34,7a | 76,7b | 18,4b | 4,2b |
| Moyenne ⁽³⁾ | 16,1 | 58,8 | 138,6 | 0,32 | 65,7 | 0,66 | 0,33 | 67,8 | 34,2 | 76,3 | 18,8 | 4,0 |
| CV (%) | 33,0 | 9,2 | 2,1 | 6,7 | 1,1 | 14,4 | 10,4 | 9,0 | 1,6 | 3,5 | 14,6 | 13,9 |

¹ M_n = Masse moléculaire moyenne en nombre ($\times 10^6$ g/mol), M_w = Masse moléculaire moyenne en masse ($\times 10^6$ g/mol), R_z = Rayon de giration (nm), V = pente de la relation log-log entre R_z vs. M_w (i.e. conformation en solution).

² Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

³ Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques.

Pour la même teneur en AMP, TAL AMARA 2 est le seul génotype qui s'est différencié en ayant des masses moléculaires significativement plus élevées que les trois autres génotypes étudiés (i.e. $24,0 \times 10^6$ g/mol et $66,2 \times 10^6$ g/mol pour M_n et M_w respectivement). Parallèlement, les polymères d'amylose (AML) se caractérisent par des masses moléculaires plus limitées : $0,66 \times 10^6$ g/mol et $0,33 \times 10^6$ g/mol pour M_n et M_w respectivement. Comme dans le cas précédent, pour une même teneur en AML, TAL AMARA 2 est le seul génotype à se différencier par des masses moléculaires significativement plus élevées que les trois autres génotypes étudiés (soit $0,80 \times 10^6$ g/mol et $0,37 \times 10^6$ g/mol pour M_n et M_w respectivement).

Pour les assemblages macromoléculaires tels que les polymères d'amidon, la forme ou le taux de ramification est déterminé de manière fiable à partir de la pente V de la relation

log-log de Rz fonction de Mw . Les valeurs calculées de V pour les polymères AMP ($\approx 0,32$) correspondent à des assemblages macromoléculaires ramifiés. Comme le montrent les résultats présentés dans le Tableau 12, même si les données calculées pour V sont proches, TAL AMARA 2 se différencie significativement ($p = 0,05$) des autres génotypes de blé retenus avec une valeur de $V = 0,29$. Ainsi, dans les conditions de notre étude, pour une quantité d'AMP stable et comparable à celle des autres génotypes (i.e. pas de différence statistique en AMP %), TAL AMARA 2 présente des polymères d'AMP dont le taux de ramification est plus élevé (i.e. diminution significative de V).

III.2.4. Distribution granulométrique des granules d'amidon des grains de blé

L'amidon se présente sous forme de granules dans l'endosperme du grain de blé. Ces granules ont des distributions granulométriques trimodales (Bechtel et al., 1990). La biosynthèse des granules d'amidon de type A (généralement de diamètre > 10 nm) commence dans les premiers jours de la formation de l'endosperme. La formation de granules d'amidon de type B (de diamètre < 10 nm) démarre à partir d'environ 10 JAF. Enfin, la synthèse de granules d'amidon de type C (inférieurs à 5 nm) s'amorce à partir d'environ 21 JAF (Shi et al., 1994).

Le Tableau 12 montre la répartition des granules d'amidon dans les grains des quatre génotypes de blé étudiés. Comme le montrent nos résultats, les types A sont présents en très grande majorité (76,3%), les types B et C représentant respectivement 18,8% et 4,0%. Nos observations sont en accord total avec les résultats antérieurs obtenus à partir de la majorité des génotypes de blé tendre. Dans les conditions physiologiques de notre étude (i.e. conditions physiologiques « limites », Chapitre II), certains génotypes diffèrent statistiquement ($p = 0,05$). Ainsi, SHAM 8 se caractérise par une population de granules plus pauvre en granules d'amidon de type A (72,8% vs. 76,3% en moyenne) et plus riche en granules d'amidon de type B (22,8% vs. 18,8% en moyenne). A l'inverse, KATILA se caractérise par une distribution de granules d'amidon avec une grande majorité de granules d'amidon de type A (79,2% vs. 76,3% en moyenne) et une proportion plus faible de granules d'amidon de type B (16,8% vs. 18,8% en moyenne).

Tableau 13. Analyse de la variance pour la distribution granulométrique des granules d'amidon des grains de blé à la récolte

| Source de variation | Granules A | Granules B | Granules C |
|--|------------|------------|------------|
| F | 46.10 | 65.89 | 27.98 |
| Effet Année de culture (A) | 20.46*** | 35.55*** | 0.45ns |
| Effet Génotype (G) | 69.18*** | 92.55*** | 45.86*** |
| Effet Année × Génotype (A×G) | 31.56*** | 49.34*** | 19.28*** |
| Rapport des variances (σ^2_A/σ^2_G) | 0.30 | 0.38 | 0.01 |
| Rapport des variances ($\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G}$) | 0.65 | 0.72 | 0.02 |

(*) Effet significatif au seuil $p < 0,05$.

(**) Effet hautement significatif au seuil $p < 0,01$.

(***) Effet très hautement significatif au seuil $p < 0,001$.

L'analyse de la variance réalisée à partir des résultats de distribution granulométrique des granules d'amidon montre un effet dominant du facteur génétique (G) par rapport au facteur « année de culture » (A) et ce quel que soit le type de granule considéré (Tableau 13). Les rapports des variances (σ^2_A/σ^2_G) sont très largement inférieurs à 1,0 dans tous les cas. De la même façon, l'effet de l'interaction est également très significatif au niveau statistique et sous l'effet prédominant du facteur génétique comme le montrent les valeurs de rapport de variance ($\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G}$). Nos résultats très hautement significatifs sont toutefois en désaccord avec plusieurs travaux de recherche (Tester et Karkalas, 2001; Thitisaksakul et al., 2012) où la distribution des proportions des granules de l'amidon a été beaucoup plus influencée par l'environnement.

Comme nous venons de la voir, les modifications de la taille et/ou du nombre des différents types de granules d'amidon dans les grains peuvent être une caractéristique du génotype de blé étudié, mais elles peuvent également être provoquées par la modification des conditions environnementales (notamment la température de croissance) pendant la période de remplissage des grains. Le pourcentage en volume des granules d'amidon de type A et de

type B peut être modifié lorsque la température de croissance augmente d'environ 15 °C à 40 °C pendant la période d'accumulation des grains (Park et al., 2005). Ces effets environnementaux pourraient induire des changements dans le mode de remplissage des grains d'amidon (granules A et B en particulier). Des granules de type A se forment dans l'amyloplaste à partir d'environ 5 JAF et continuent de croître jusqu'à atteindre un diamètre maximal à maturité physiologique (Shi et al., 1994).

Cependant, le nombre final d'amyloplastides A est atteint à environ 7 JAF, coïncidant avec l'arrêt de la division cellulaire. En revanche, les granules de type B sont initiées vers 11 JAF et continuent d'augmenter jusqu'à 21 JAF, et jusqu'à un diamètre maximum à maturité (35 JAF). Par conséquent, compte tenu du comportement des granules de type A et de type B, toute augmentation de température pendant la phase de grossissement cellulaire pourrait induire une diminution de l'activité de l'amidon synthase mais également une diminution de la phase de remplissage des grains (confère Chapitre II), entraînant des changements significatifs dans la taille et le nombre de différents types de granules d'amidon dans l'endosperme. Tous ces éléments doivent être pris en compte car, du fait de leurs différences importantes en termes de composition, de structure moléculaire, de gonflement des granules, de propriétés de gélatinisation et, de comportement d'encollage/rhéologie, de proportion des différents types de granules d'amidon (type A et B notamment) dans la farine, ont un impact sur les propriétés des produits traditionnels à base de blé (Park et al., 2005).

III.3. Conclusion

Dans le cadre général de la mise en œuvre d'un programme d'amélioration de la production de blé tendre local par l'Etat Libanais, nous avons caractérisé le matériel végétal sélectionné pour son adaptation aux conditions environnementales (i.e. bonne productivité en conditions semi-arides) en retenant dans un premier temps toutes les composants biochimiques des grains capables de garantir les performances de transformation souhaitées (c'est-à-dire principalement les performances de panification).

Malgré la sélection du matériel végétal utilisé dans cette étude, nos résultats démontrent que les conditions environnementales induisent des limitations dans son fonctionnement physiologique pendant les phases importantes de développement et de maturation du grain. Ainsi, les contraintes thermiques post-floraison caractéristiques des milieux semi-arides modifient significativement la cinétique d'accumulation des constituants majeurs du grain en limitant principalement le temps de remplissage du grain. Les grains de blé ainsi formés sont caractérisés par un poids des milles grains (PMG) réduit résultant d'un déficit d'accumulation d'amidon.

Dans le même temps, les prolamines synthétisées et accumulées peuvent être caractérisées par leurs distributions moléculaires particulières. Quel que soit le matériel végétal choisi, le niveau de polymérisation/agrégation des prolamines polymères est très élevé. La diminution des quantités de polysaccharides amylicés synthétisés et accumulés s'accompagne d'une modification significative du rapport amylopectine/amylose [teneur en amylose supérieure à la normale (c'est-à-dire > 34%)]. Enfin, les différents génotypes étudiés sont caractérisés par des distributions significativement différentes des granules d'amidon ; le pourcentage du volume occupé par les granules d'amidon de type A et de type B variant entre les génotypes pour les deux années de culture. Là encore, nous confirmons avec nos résultats que le régime thermique spécifique lors des phases de synthèse et d'accumulation des prolamines et de l'amidon peut expliquer les changements de polymérisation/agrégation des prolamines mais aussi les modifications de la distribution des granules d'amidon (type A vs. type B).

Toutes ces observations (i.e. distribution moléculaire des prolamines et de l'amidon, distribution des granules d'amidon) doivent être considérées en raison de leur rôle déterminant pour la définition des aptitudes à la transformation technologique des farines générées. Ces relations entre la composition et les propriétés rhéologiques seront discutées dans le cadre du prochain chapitre (Chapitre IV) de ce document.

Chapitre IV

CARACTÉRISATION RHÉOLOGIQUE DE GÉNOTYPES SÉLECTIONNÉS DE BLÉ TENDRE LIBANAIS

Dans le cadre de ce travail de recherche nous avons démontré dans un premier lieu que les cultures de blés ont subies des conditions environnementales limitantes au niveau de la phase du remplissage du grain ce qui a eu une incidence sur le poids du grain (PMG). Dans un second temps, nous avons montré que les conditions environnementales ont engendré des limitations dans le fonctionnement physiologique au cours du développement du grain ce qui a modifié, notamment, la vitesse de synthèse et/ou d'accumulation des protéines et de l'amidon dans le grain par réduction du temps de remplissage (phase de grandissement cellulaire). Les grains de blé ainsi formés ont présenté un déficit d'accumulation d'amidon (résultant d'une limitation de la photosynthèse post-floraison) et une modification des équilibres chez les protéines de réserve (prolamines) en provoquant une polymérisation/agrégation très élevée des gluténines et une sur l'accumulation des gliadines (i.e. diminution du rapport gluténines/gliadines). Les polysaccharides amylacés sont caractérisés par un contenu en amylose plus important que la normale ce qui a modifié significativement le ratio amylose/amylopectine. De plus, l'amidon accumulé présente une richesse en granules A au dépend du volume occupé par les granules B. Ces observations confirment que le régime thermique spécifique durant la synthèse et l'accumulation des principaux constituants du grain peut expliquer la modification de la polymérisation/agrégation des prolamines et aussi les modifications dans la distribution des granules d'amidon (type A vs. type B) (Park et al., 2009).

Toutes ces constatations qui, pour la première fois à notre connaissance, permettent de caractériser les métabolismes d'accumulation des prolamines et de l'amidon dans les grains des variétés locales (libanaises) de blés sélectionnés et sont essentielles dans la mesure où elles conditionnent largement les aptitudes à la transformation technologique des farines

correspondantes. En effet, comme le montre la littérature, les différents équilibres protéiques (c'est-à-dire les gliadines/gluténines, la teneur en UPP, la distribution des masses moléculaires des gluténines) (Huebner et Bietz, 1985; Singh et al., 1990; Weegels et al., 1996; Southan et MacRitchie, 1999 ; Aussenac et Rhazi, 2018) et/ou les propriétés de l'amidon (i.e. amylose/amylopectine, distribution des masses moléculaires, distribution granulométrique des granules d'amidon) (Shinde et al., 2003 ; Park et al., 2005) sont responsables de la majorité des propriétés physiques, physico-chimiques et rhéologiques essentielles pendant les étapes de transformation du grain en farine, puis en pâte et enfin en pain.

Ainsi, ce nouveau chapitre est consacré à une caractérisation des propriétés rhéologiques des farines et des pâtes correspondantes obtenues à partir des grains récoltés. Les relations existantes entre les propriétés moléculaires et rhéologiques pour les différents génotypes de blé seront mises en évidence et analysées.

IV.1. Matériel et méthodes

IV.1.1. Détermination des caractéristiques de qualité des farines de blé

Pour chaque année culturale les grains tamisés de chacun des trois blocs statistiques (confère Chapitre II) ont été divisés en échantillons homogènes. Ensuite, les échantillons ont été broyés selon la méthode AACC (AACC 26-21.02) à l'aide d'un broyeur de laboratoire Bühler (MLU-202, Allemagne). Les farines blanches ont été caractérisées par différentes méthodes d'analyse avec au moins trois répétitions.

La teneur en cendres a été déterminée selon la méthode standard ICC (104/1), par incinération de 5 g de farine pendant 1 heure à 900 °C.

Le test de sédimentation Zélény a été réalisé selon la méthode standard ICC (116/1). Un échantillon de 3,2 g de farine est placé dans une éprouvette graduée de 100 ml et additionné de 50 ml de réactif bleu de bromophénol (0,04% w/v), puis agité durant 5 minutes à l'aide d'un agitateur automatique (agitateur Zélény de Brabender). Le mélange obtenu est additionné de 25 ml d'acide lactique (0,5 N) avant de subir une seconde agitation durant 5

minutes. La lecture de la hauteur du précipité se fait après avoir placé l'éprouvette sur une surface plane pendant 5 minutes. Ce test mesure l'aptitude des protéines à gonfler lorsque celles-ci sont placées dans un milieu lactique ; le gonflement étant relié à la force boulangère et témoigne donc d'une bonne qualité protéique (Kleijer, 2002).

Le test de l'indice de gluten a été effectué selon la méthode normalisée ICC (137/1) en utilisant l'équipement Glutomatic de Perten (GM 2200 ; Suède). Un échantillon de 10 g de farine, est introduit dans chacun des deux béchers et additionné de 4,8 ml d'eau salée à 2% (NaCl 2% w/v) puis mélangé et malaxé sous un filet d'eau salée à 2%. Les 2 pâtons recueillis comportant le gluten humide en fin de mélange sont centrifugés (6000 r.p.m.) sur un tamis de 600 µm pour séparer le gluten fort du gluten faible et déterminer l'index de gluten. Le gluten humide est séché dans un Glutork à 130°C pendant 4 minutes pour l'obtention du gluten sec. Ainsi, le gluten humide, le gluten sec et l'index de gluten sont calculés en utilisant les équations suivantes :

$$\% \text{ Gluten humide} = (\text{moyenne de la masse des 2 pâtons humides} \times 100) / 10$$

(Equation 14)

$$\% \text{ Gluten humide (corrigé à 14\% humidité)} = [\% \text{ non corrigé (100-14)}] / (100 - \% \text{ humidité de l'échantillon})$$

(Equation 15)

$$\% \text{ Gluten sec} = (\text{moyenne des masses pâtons secs} \times 100) / 10$$

(Equation 16)

$$\% \text{ Gluten sec corrigé à 14\% humidité} = [\% \text{ non corrigé (100 - 14)}] / (100 - \% \text{ humidité de l'échantillon})$$

(Equation 17)

$$\text{Index gluténique} = [(\text{masse pâton humide} - \text{masse gluten faible}) \times 100] / \text{masse pâton humide}$$

(Equation 18)

Enfin, la détermination de l'indice de chute de Hagberg a été effectuée en appliquant la méthode approuvée par l'ICC (107/1). Cette méthode a pour but de déterminer l'activité amylasique des échantillons de farine de blé. L' α -amylase, enzyme présente dans la farine, est responsable de libération de sucres fermentescibles et des dextrines à partir de l'hydrolyse

de l'amidon. Si cette activité amylasique est élevée, elle perturbe la vitesse de fermentation panair et agit également sur les caractéristiques du produit fini : pains peu développés, mie collante, croûte rouge, coups de lame mal jetés.

IV.1.2. Détermination des propriétés rhéologiques des farines et/ou pâtes de blé tendre

Le test alvéographique a été appliqué selon la méthode AACC (54-30.1999) et a été réalisé à partir d'un Alveolab de Chopin (Alveolab 2/2, France). Ce test mesure la force boulangère d'une pâte à hydratation constante. Cette force est représentée par un travail (W) nécessaire à la déformation d'une bulle de pâte jusqu'à sa rupture sous la pression de l'air (Chiron, 1994) (Figure 21). Le dispositif utilisé enregistre le comportement, sous l'action de la pression, d'un disque de pâte préparé dans des conditions standardisées. La pâte se gonfle et prend la forme d'une bulle qui grossit jusqu'à son éclatement. Un manomètre enregistre les variations de pression dans la bulle et fournit une courbe, dite alvéogramme (Godon et Loisel, 1984; Dacosta, 1986).

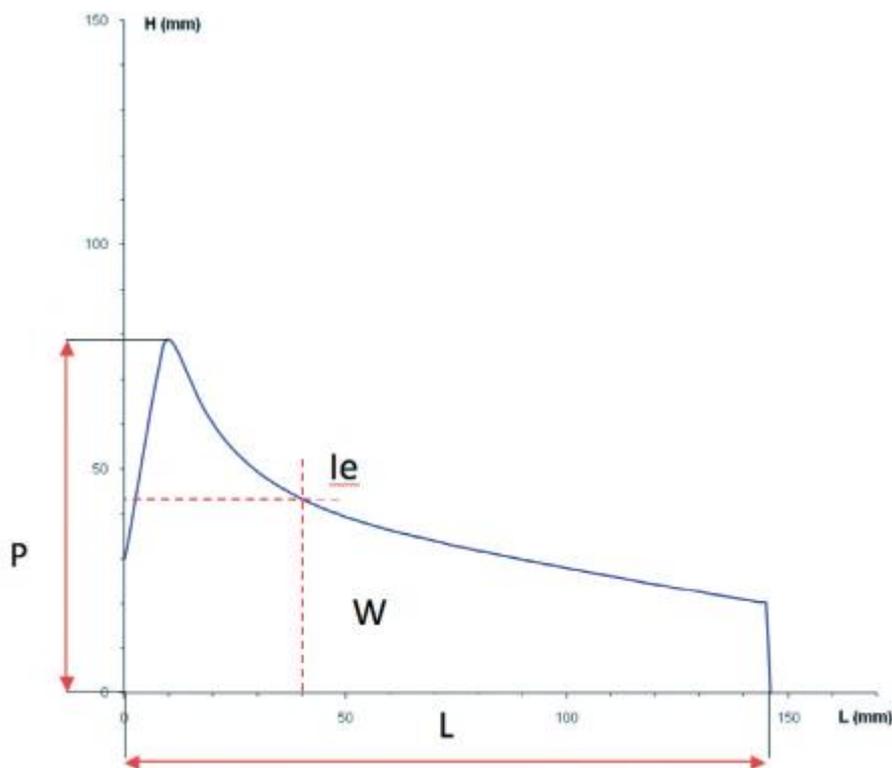


Figure 21. Exemple d'un alvéogramme obtenu à partir de farine de blé tendre

Pour notre test, nous avons utilisé 250 g de farine qui ont été pétris (à 60 tours par minute) avec de l'eau salée à humidité constante (50%) pendant 8 minutes. Ensuite, la pâte est laminée et découpée en 5 petits pâtons circulaires. Un temps de repos de 20 minutes (à 25°C) est exigé avant de procéder à l'éclatement de la bulle par insufflation d'air. Le diagramme de déformation se dessine sur un enregistreur (Figure 21). A partir de l'obtention de cette courbe alvéographique, un certain nombre de paramètres sont calculés :

- **La pression P**, exprimée en millimètres d'eau, est la moyenne des ordonnées maximales. Elle traduit la ténacité de la pâte, qualité liée à la résistance à l'extension et à l'élasticité (ou résistance élastique). Ces caractéristiques sont liées à la quantité des protéines, à la qualité de son réseau et à la capacité de fixation des différents constituants (protéines, amidon, pentosanes) ;
- **La longueur L**, mesurée en millimètres, donnée par la rupture du pâton et le gonflement G, qui se déduit par le calcul à partir de L ($G=2,22 \times \sqrt{L}$) ; c'est la moyenne des gonflements correspondant aux abscisses de rupture, lue sur l'abaque de gonflement. Ces indices expriment l'extensibilité de la pâte qui représente un critère important de la qualité de la farine. G est une expression de la viscosité de la pâte, qui mesurée à l'alvéographe, résulte de la capacité d'extension des fibres de protéines ;
- **Le rapport P/L**, dit rapport de configuration, est un indicateur de l'équilibre entre ténacité et extensibilité de la pâte ;
- **La valeur W** est la caractéristique la plus courante, elle concrétise la force de la farine.

Les mesures au farinographe ont été réalisées en respectant la méthode normalisée AACC (54-21.02). Pour se faire, les mesures ont été faites à partir d'un Farinographe-E de Brabender (Allemagne). Inventé par un chercheur hongrois en 1927, le farinographe Brabender est un pétrin enregistreur thermostaté (température généralement fixée à 30 °C) équipé d'un dynamomètre qui mesure la résistance de la pâte au cisaillement et enregistre ces variations au cours du temps.

Le dispositif est muni de deux bras en forme sigmoïde tournant en sens inverse, à des vitesses différentes. Les mesures sont réalisées dans des conditions telles que la consistance maximale obtenue au cours de l'essai soit égale à 500 UB (unités Brabender). La quantité d'eau nécessaire (taux d'absorption d'eau) pour atteindre la consistance recherchée est déterminée empiriquement en ajoutant des quantités variables d'eau (Williams et al., 1988 ; Feillet, 2000).

Dans le cadre de notre étude, le test a été réalisé à partir d'un Farinographe-E de Brabender (Allemagne). Ainsi, 300 g de farine (14% humidité) sont pétris à la consistance de 500 UB. A partir de ce profil enregistré (Figure 27) un certain nombre de paramètres sont calculés :

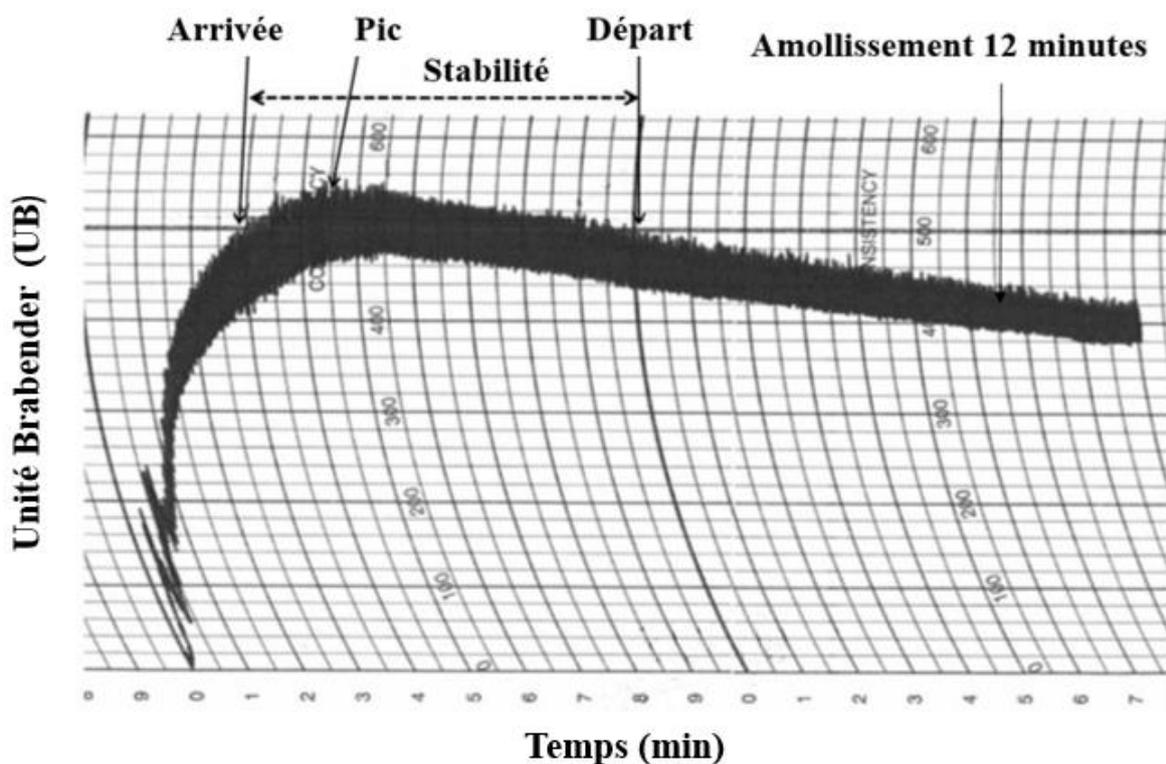


Figure 22. Exemple d'un farinogramme obtenu à partir de farine de blé tendre

- **Le taux d'hydratation de la pâte (%)** à une consistance standard de 500 Unités Brabender (UB), mesurée par l'ordonnée de la courbe ;

- **Le temps de développement de la pâte** (minutes) jusqu'au moment où elle atteint 500 UB. Ce temps est en rapport avec la durée optimale de pétrissage en boulangerie ;
- **La stabilité de la pâte** (minutes), c'est-à-dire la durée pendant laquelle elle garde la même consistance. Plus cette période est grande, plus la tolérance au pétrissage serait importante ;
- **L'affaiblissement de la pâte** (UB), qui représente la perte de consistance 12 min après que la valeur maximale ait été atteinte. Il est en rapport avec le relâchement des pâtes au cours du travail du boulanger (Roussel et al., 2002).

Enfin, les évaluations d'extensographe ont été réalisées en appliquant la méthode AACC (54-10.01), à l'aide d'un Extensographe-E de Brabender (Allemagne). Ce test consiste à mesurer la résistance d'une pâte à l'étirement et permet d'observer sa ténacité et son extensibilité (Kleijer, 2002). Il mesure à partir d'une éprouvette cylindrique de pâte confectionnée à consistance constante, la force des farines et leurs caractéristiques : ténacité et extensibilité (Chiron, 1994). L'extensogramme (Figure 23) permet d'évaluer les différentes caractéristiques des pâtes analysées, au nombre desquelles figurent l'extensibilité (longueur de la courbe en mm), la résistance maximale, l'énergie assimilée à la surface sous la courbe et le ratio entre la résistance à 5 cm et l'extensibilité.

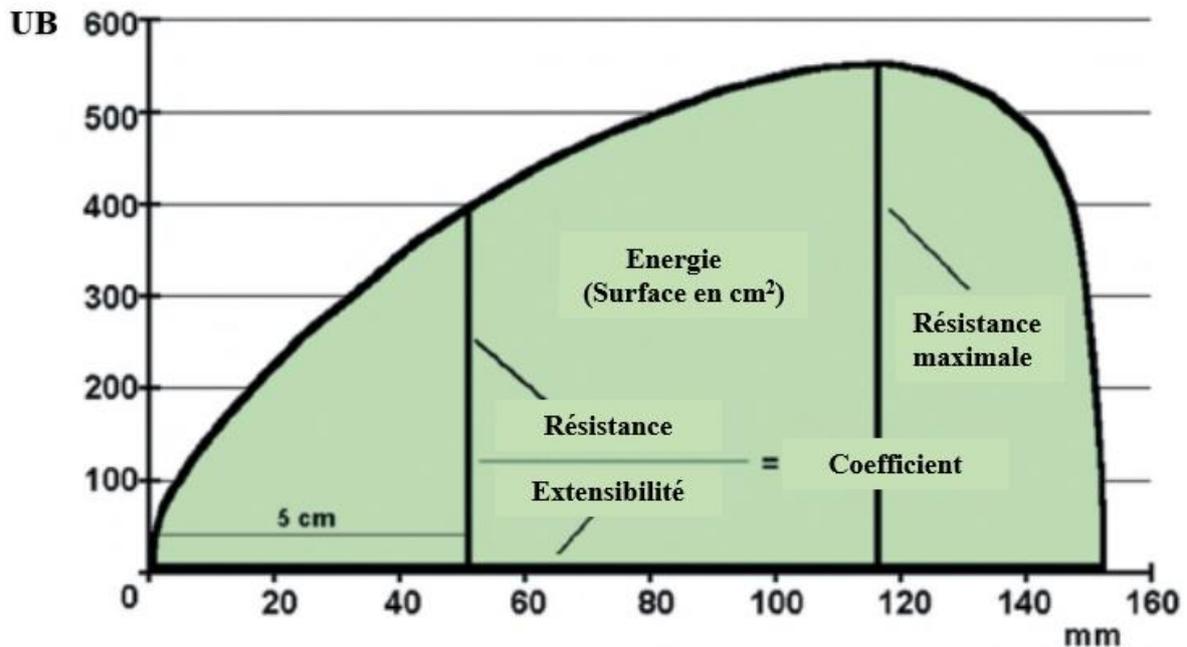


Figure 23. Exemple d'un extensogramme obtenu à partir d'une farine de blé tendre

Dans le cadre de notre étude, 300g de farine sont pétris à 30°C avec une quantité déterminée d'eau (fonction du taux d'absorption) et 6g de sel durant une minute suivie par un repos de 5 minutes. Ensuite, un pétrissage à 500 UB de consistance est réalisé ; la durée de celui-ci est déterminée par le temps de développement de la pâte. La pâte obtenue est divisée en 2 pâtons de 150 g chacun, boulés et allongés puis mis au repos à 30 °C pendant 45 minutes. Ensuite, les pâtons sont soumis à un étirement alors que la courbe de déformation est enregistrée. Le boulage des pâtons, leur repos de 45 minutes et leur étirement sont répétés 2 fois de plus. A partir des données enregistrées, plusieurs paramètres sont calculés :

- **Résistance à l'extensibilité (UB)** : calculée à 5cm du début de l'étirement final ;
- **Résistance maximale (UB)** : c'est la résistance maximale de la pâte à l'étirement ;
- **Extensibilité (mm)** : distance parcourue par l'enregistreur entre le début de l'étirement de la pâte jusqu'à la déformation ;

- **Coefficient** : c'est le rapport entre la résistance à l'extensibilité et l'extensibilité ;
- **Energie** (cm²) : c'est la surface de la courbe obtenue, définie par le travail effectué par l'étirement de la pâte.

IV.1.3. Analyses statistiques

Le logiciel XLSTAT (Addinsoft TM) a été utilisé pour réaliser l'analyse statistique des données. L'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour les comparaisons des variances ($p = 0,05$). Les comparaisons des moyennes ont été effectuées par le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

En raison du très grand nombre de descripteurs utilisés pour caractériser les propriétés rhéologiques (21) mais aussi biochimiques (24) des farines étudiées, une analyse en composantes principales a été réalisée afin de comparer l'ensemble de ces propriétés pour les différents cultivars de blé étudiés. Au cours de cette analyse, seuls les chiffres [c'est-à-dire combinaison de deux composantes principales (axes)] représentant plus de 70% de la variabilité totale exprimée ont été retenus pour l'analyse des résultats (i.e. axes F1 et F2).

IV.2. Résultats

IV.2.1. Qualité des farines de blé tendre

Des différences significatives ont été observées entre les cultivars concernant les taux d'extraction, la teneur en cendres, le gluten humide, l'indice de gluten, le test de sédimentation (Zélény) et le temps de chute de Hagberg, tandis que les génotypes présentaient une teneur similaire en gluten sec (Tableau 14).

Tableau 14. Paramètres de qualité des farines de blé tendre

| Variété de blé | Taux Extraction (%) | Cendres (%) (MS) | Gluten humide (%) | Gluten sec (%) | Indice de gluten (%) | Zélény (ml) | Hagberg (secondes) |
|------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|----------------|-----------------------|
| SHAM 8 | 67,3 b ⁽¹⁾ | 0,72 c | 42,78 c | 13,56 a | 55,00 a | 41,08 a | 429,17 b |
| TAL AMARA 2 | 60,1 a | 0,61 a | 40,69 b | 13,92 a | 68,00 c | 56,92 b | 421,25 b |
| KATILA | 67,6 b | 0,73 c | 38,98 a | 13,30 a | 60,33 b | 41,92 a | 462,42 c |
| ACSAD 1133 | 67,1 b | 0,65 b | 43,98 c | 13,71 a | 54,00 a | 43,75 a | 394,08 a |
| Récolte 2016 | 66,5 b | 0,73 b | 49,50 b | 15,74 b | 52,38 b | 50,13 b | 460,88 b |
| Récolte 2017 | 64,5 a | 0,63 a | 33,71 a | 11,50 a | 66,30 a | 41,71 a | 392,58 a |
| Moyenne ⁽²⁾ | 65,5 | 0,68 | 41,64 | 13,62 | 59,33 | 45,92 | 426,73 |
| CV _G (%) | 5,51 | 8,73 | 5,33 | 1,92 | 10,81 | 16,15 | 6,59 |
| CV _E (%) | 2,20 | 10,48 | 26,82 | 22,01 | 16,59 | 12,96 | 11,32 |

⁽¹⁾ Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

⁽²⁾ Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques. Coefficient de variation de la composante génétique (CV_G) et coefficient de variation de la composante environnementale (CV_E).

En ce qui concerne les taux d'extraction obtenus, les valeurs varient entre 60,1% et 67,6%, tandis que la teneur en cendres varie entre 0,61% et 0,72%. Étant donné que les taux d'extraction et la teneur en cendres sont corrélés positivement (Moradi et al., 2016), les cultivars dont les taux d'extraction sont les plus faibles présentent la teneur la plus réduite en cendres et *vice versa*. Les faibles teneurs en cendres obtenues sont appréciées par les meuniers et répondent également à la législation libanaise pour la fabrication du pain libanais, où le niveau de cendres recommandé pour la fabrication de farine destinée à la fabrication du pain libanais est inférieur à 0,85%. Malgré les contraintes environnementales qui ont limité la période de remplissage des grains, entraînant une diminution à la fois de l'accumulation d'amidon et du poids spécifique des grains, le taux d'extraction et la teneur en cendres sont très similaires à ceux retrouvés dans la littérature (Al-Saleh et Brennan, 2012; Laker, 2015).

Pour le gluten humide, des différences significatives sont observables entre les génotypes étudiés, les valeurs varient de 39,2% à 43,9%. Alors que pour le gluten sec, les

valeurs ne varient pas significativement entre les cultivars étudiés restant entre 13,3% et 13,9%. Ces valeurs sont supérieures à celles évoquées dans la littérature par certains auteurs (Surma et al., 2012) mais toutefois, sont en accord avec d'autres (Mutwali, 2011). Dans cette dernière étude, l'auteur signale des teneurs en gluten humide allant de 26,63% à 46,94% après avoir étudié 20 cultivars de blé panifiable soudanais.

Des variations significatives entre les génotypes de blé sélectionnés sont observables en ce qui concerne l'indice de gluten. Les valeurs varient de 55% à 68% pour SHAM 8 et TAL AMARA 2, respectivement, avec une moyenne de 59%. Pour des valeurs comprises entre 30% et 80%, on peut considérer la qualité du gluten comme étant normale (Cubadda et al., 1992). Ces observations sont cohérentes avec les résultats obtenus par Barutcular et al. (2016), qui a étudié le comportement de 16 génotypes différents de blé panifiable dans des conditions environnementales limitantes (i.e. température élevée et faibles précipitations pendant le remplissage des grains) en Turquie. Les valeurs de l'indice de gluten sont plus faibles dans des conditions chaudes et plus élevées dans un régime de forte pluviométrie, tandis que le gluten sec est plus élevé dans des conditions chaudes que dans un régime pluvieux.

Pour le test de Zélény (sédimentation des protéines), les valeurs varient de 41,0 ml à 56,9 ml, avec une moyenne de 45,9 ml. TAL AMARA 2 diffère statistiquement des autres génotypes de blés sélectionnés, en présentant la valeur la plus élevée (56,9 ml). Cela peut s'expliquer par le fait que ce génotype présente également la plus forte teneur en gluténines. Les temps de chute de Hagberg diffèrent significativement entre les cultivars et varient de 394,08 à 462,42 secondes. Ceux-ci témoignent d'une activité alpha-amylase significativement faible (> 400 s) (Madeira et al., 2015). Ces valeurs supérieures à 250 ou 300 secondes, montrent que nos génotypes peuvent être classés comme des grains de haute qualité (Mares et Mrva, 2008).

Tableau 15. Analyse de la variance concernant les critères de qualité des farines de blé

| Source de variation | Taux Extraction (%) | Taux de cendres (% MS) | Gluten humide (%) | Gluten Sec (%) | Indice de Gluten (%) | Zélény (ml) | Hagberg (secondes) |
|--|---------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| F | 13,05 | 65,24 | 271,31 | 171,23 | 152,07 | 146,66 | 153,64 |
| Année (A) | 8,98 ^{***} | 195,25 ^{***} | 1791,16 ^{***} | 1116,22 ^{***} | 591,81 ^{***} | 230,53 ^{***} | 592,32 ^{***} |
| Génotype (G) | 30,50 ^{***} | 67,80 ^{***} | 35,3 ^{***} | 4,25 ^{**} | 125,62 ^{***} | 179,04 ^{***} | 100,56 ^{***} |
| Année × Génotype (A × G) | 0,95 ^{ns} | 19,34 ^{***} | 0,68 ^{ns} | 23,22 ^{**} | 31,94 ^{***} | 86,32 ^{***} | 60,50 ^{***} |
| Rapport de variance (σ^2_A/σ^2_G) | 0,32 | 2,88 | 50,71 | 262,67 | 4,71 | 1,29 | 5,89 |
| Rapport de variance ($\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G}$) | 13,59 | 10,09 | 2622,25 | 48,07 | 18,53 | 2,67 | 9,79 |

(*) Effet significatif au seuil $p < 0,05$.

(**) Effet hautement significatif au seuil $p < 0,01$.

(***) Effet très hautement significatif au seuil $p < 0,001$.

De plus, pour tous les paramètres, la source de variation est principalement sous l'effet environnemental, plutôt que sous l'effet génotypique ($\sigma^2_A/\sigma^2_G > 1$), à l'exception toutefois du taux d'extraction (Tableau 15). En fait, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Surma et al. (2012), révélant un effet environnemental plus important sur le taux de sédimentation de Zélény et le gluten humide pour 24 génotypes de blé d'hiver, bien que ces caractéristiques soient malgré tout influencées par la nature du génotype. D'autres études ont également démontré l'effet prédominant de l'environnement sur la valeur de sédimentation de Zélény (Mikhaylenko et al., 2000) et sur l'indice de gluten (Oikonomou et al., 2015).

IV.2.2. Qualité rhéologique des farines mesurée par analyse alvéographique

Les quatre génotypes se différencient clairement en ce qui concerne les paramètres alvéographiques (Tableau 16). En fait, la force de la pâte varie de 178,25 à 262,67 $\times 10^{-4}$ J, et la variété SHAM 8 semble représenter la valeur la plus faible (178,25 $\times 10^{-4}$ J) et, à l'inverse, la variété KATILA est caractérisée par la plus forte force (262,67 $\times 10^{-4}$ J). La ténacité des différentes pâtes (P) varie de 55,00 (TAL AMARA 2) à 93,50 mm (KATILA), alors que dans le même temps les valeurs d'extensibilité (L) sont comprises entre 68,67 (SHAM 8) et 138,25 mm (TAL AMARA 2). L'indice d'extensibilité est compris entre 42,55% et 55,33% et enfin, l'indice de gonflement (G) présente des valeurs comprises entre 19,37% et 26,75%.

Tableau 16. Comportement des pâtes de blé après pétrissage (Alvéographe)

| Variété de blé | W $\times 10^{-4}$ Joules | P (mm) | L (mm) | P/L | Ie (%) | G (%) |
|------------------------|------------------------------|-----------|-----------|--------|-----------|----------|
| SHAM 8 | 178,25 a ⁽¹⁾ | 84,50 c | 68,67 a | 1,23 d | 42,55 a | 19,37 a |
| TAL AMARA 2 | 230,25 b | 55,00 a | 138,25 d | 0,41 a | 55,33 c | 26,75 c |
| KATILA | 262,67 c | 93,50 d | 88,25 b | 1,05 c | 49,58 b | 21,18 b |
| ACSAD 1133 | 222,75 b | 75,92 b | 99,75 c | 0,77 b | 51,72 b | 21,82 b |
| Récolte 2016 | 239,58 b | 78,71 b | 101,21b | 0,79 a | 50,90 b | 22,90 b |
| Récolte 2017 | 207,38 a | 75,75 a | 96,25 a | 0,77 a | 48,69 a | 21,66 a |
| Moyenne ⁽²⁾ | 223,48 | 77,23 | 98,73 | 0,86 | 49,79 | 22,28 |
| CV _G (%) | 12,37 | 21,32 | 29,68 | 41,83 | 10,81 | 14,17 |
| CV _E (%) | 10,19 | 2,71 | 3,55 | 11,46 | 3,14 | 3,94 |

⁽¹⁾ Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

⁽²⁾ Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques. Coefficient de variation de la composante génétique (CV_G) et coefficient de variation de la composante environnementale (CV_E).

Dans le même temps, le rapport ténacité/extensibilité (P/L) qui définit un équilibre rhéologique caractéristique pour chaque pâte, varie entre 0,41 (TAL AMARA 2) et 1,23 (SHAM 8), avec un rapport moyen de 0,86. Comme le démontrent nos résultats (Tableau 17),

le facteur génétique est la source principale de variation pour l'ensemble de ces différents paramètres alvéographiques ($\sigma^2_A/\sigma^2_G < 1$); ceci illustre parfaitement l'importance prédominante de l'effet variétal pour ce test rhéologique.

Tableau 17. Analyse de la variance concernant les paramètres de l'alvéographe

| Source de variation | W × 10 ⁻⁴ Joules | P (mm) | L (mm) | P/L | Ie (%) | G (%) |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| F | 42,72 | 218,22 | 218,50 | 232,65 | 37,87 | 41,86 |
| Année (A) | 56,23*** | 15,99*** | 13,64*** | 68,19ns | 12,83*** | 13,96*** |
| Génotype (G) | 65,55*** | 495,43*** | 476,46*** | 456,91*** | 75,92*** | 90,22*** |
| Année × Génotype (A×G) | 15,40*** | 8,43*** | 28,83*** | 63,21*** | 8,17*** | 2,80*** |
| Rapport de variance (σ^2_A/σ^2_G) | 0,86 | 0,03 | 0,03 | 0,15 | 0,17 | 0,15 |
| Rapport de variance ($\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G}$) | 3,65 | 1,90 | 0,47 | 0,08 | 1,57 | 4,98 |

(*) Effet significatif au seuil $p < 0,05$.

(**) Effet hautement significatif au seuil $p < 0,01$.

(***) Effet très hautement significatif au seuil $p < 0,001$.

C'est la raison pour laquelle ces variables rhéologiques peuvent être utilisées dans l'élaboration des programmes de sélection, offrant ainsi la possibilité de prédire la valeur d'un lot de grains à partir de sa seule constitution génétique. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Rousset et al. (1985) ; cependant, ils sont opposés à ceux de Surma et al., (2012), qui ont démontré que la réponse des génotypes à différents environnements est imprévisible.

IV.2.3. Qualité rhéologique des farines mesurée par analyse farinographique

Les différents génotypes de blé tendre diffèrent en ce qui concerne tous les paramètres caractéristiques du farinographe (Tableau 18). Ainsi, les valeurs d'absorption varient de 58,18% à 65,26%, pour TAL AMARA 2 et SHAM 8, respectivement, et sont presque dans la fourchette de celles obtenues sur les cultivars syriens et turcs (Al-Saleh et Brennan, 2012; Sahin et al., 2019). Les quatre génotypes utilisés ont une valeur moyenne de temps de développement de 11,40 min ; la variété TAL AMARA 2 présente quant à elle le niveau le plus élevé (13,03 min). Ce niveau dépasse les valeurs rapportées dans la littérature pour le blé tendre cultivé dans des conditions pédoclimatiques semblables (Al-Saleh et Brennan, 2012; Sahin et al., 2019).

Tableau 18. Comportement des farines de blé au cours du pétrissage (Farinographe)

| Variété de blé | Taux absorption (%) | Temps de développement (min) | Stabilité de la pâte (min) | Affaiblissement de la pâte 12' (UB) |
|------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| SHAM 8 | 65,26 c ⁽¹⁾ | 10,77 a | 9,00 a | 98,25 d |
| TAL AMARA 2 | 58,17 a | 13,03 b | 15,39 c | 56,50 b |
| KATILA | 65,07 c | 11,10 a | 15,00 c | 42,50 a |
| ACSAD 1133 | 62,70 b | 10,70 a | 9,70 b | 85,00 c |
| Récolte 2016 | 66,05 b | 13,66 b | 12,96 b | 76,63 b |
| Récolte 2017 | 59,54 a | 9,13 a | 11,59 a | 64,50 a |
| Moyenne ⁽²⁾ | 62,80 | 11,40 | 12,27 | 70,56 |
| CV _G (%) | 5,25 | 9,94 | 27,63 | 36,23 |
| CV _E (%) | 7,33 | 28,12 | 7,89 | 12,15 |

⁽¹⁾ Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

⁽²⁾ Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques. Coefficient de variation de la composante génétique (CV_G) et coefficient de variation de la composante environnementale (CV_E).

La stabilité et la faiblesse de la pâte (12') varient respectivement de 9,00 à 15,39 minutes chez SHAM 8 et TAL AMARA 2 et de 42,50 à 98,25 BU chez KATILA et SHAM 8. Seule la variété SHAM 8 (5,85-8,41 min) possède des valeurs de stabilité qui sont comparables avec les résultats obtenus par Sahin et al. (2019). Les autres géotypes étudiés sont caractérisés par des valeurs plus élevées.

Dans le même temps, les géotypes TAL AMARA 2 et KATILA sont caractérisés par des valeurs de résistance de la pâte élevées. Comme le montrent nos résultats (Tableau 19), les variations des paramètres taux d'absorption et temps de développement sont principalement liés au facteur environnement ($\sigma^2_A/\sigma^2_G > 1$), alors que la stabilité et l'amollissement sont beaucoup plus influencés par le géotype ($\sigma^2_A/\sigma^2_G < 1$).

Tableau 19. Analyse de la variance concernant les paramètres du farinographe

| Source de variation | Taux Absorption (%) | Temps Développement (min) | Stabilité (min) | Affaiblissement 12' (UB) |
|---|---------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| F | 175,96 | 151,97 | 509,04 | 403,60 |
| Année (A) | 676,58*** | 252,61*** | 119,24*** | 179,50*** |
| Géotype (G) | 173,66*** | 14,86*** | 729,62** | 797,83*** |
| Année × Géotype (A×G) | 11,38*** | 255,54*** | 418,39*** | 84,06*** |
| Rapport de variance (σ^2_A/σ^2_G) | 3,90 | 17,00 | 0,16 | 0,22 |
| Rapport de variance ($\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G}$) | 59,45 | 0,99 | 0,28 | 2,14 |

(*) Effet significatif au seuil $p < 0,05$.

(**) Effet hautement significatif au seuil $p < 0,01$.

(***) Effet très hautement significatif au seuil $p < 0,001$.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Panozzo et Eagles (2000). Ces auteurs ont, grâce à leurs dispositifs expérimentaux, démontré un effet dominant de

l'environnement sur le temps de développement. Dans le même temps, Solomon et al. (2012) ont démontré un effet environnemental majeur sur les paramètres du farinographe de 23 géotypes cultivés dans 12 environnements contrastés. Enfin, Denčić et al. (2012) ont pu mettre en évidence un effet dominant du géotype sur les paramètres du farinographe de 140 cultivars originaires de 28 pays différents.

IV.2.4. Qualité rhéologique des farines mesurée par analyse extensographique

Les farines des géotypes de blé retenus ont des comportements extensographiques différents (Tableau 20). Ainsi, les niveaux de résistance maximale varient entre 203,75 et 405,25 BU pour SHAM 8 et KATILA, respectivement, tandis que la résistance à l'extension varie de 185,25 (SHAM 8) à 324,75 BU (KATILA). De fait, la variété SHAM 8 semble présenter la pâte la plus faible et la variété KATILA, la pâte la plus forte.

Tableau 20. Comportement des farines de blé au cours du pétrissage (Extensographe)

| Variété de blé | Résistance maximale (UB) | Résistance à l'extension (UB) | Extensibilité (mm) | Coefficient | Energie (cm ²) |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------|----------------------------|
| SHAM 8 | 203,75 a ⁽¹⁾ | 185,25 a | 146,50 a | 1,28 a | 44,00 a |
| TAL AMARA 2 | 322,75 b | 222,00 b | 200,17 c | 1,13 a | 90,75 c |
| KATILA | 405,25 d | 324,75 d | 147,42 a | 2,23 c | 90,25 c |
| ACSAD 1133 | 375,50 c | 284,50 c | 165,42 b | 1,68 b | 81,83 b |
| Récolte 2016 | 345,38 b | 267,75 b | 167,17 b | 1,66 b | 86,25 b |
| Récolte 2017 | 308,25 a | 240,50 a | 162,58 a | 1,49 a | 67,17 a |
| Moyenne ⁽²⁾ | 326,81 | 254,13 | 164,88 | 1,57 | 76,71 |
| CV _G (%) | 27,19 | 24,56 | 15,22 | 31,21 | 28,92 |
| CV _E (%) | 8,03 | 7,58 | 1,97 | 7,85 | 17,59 |

⁽¹⁾ Comparaison multiple des moyennes réalisée avec le test de Tukey (HSD) ($p = 0,05$).

⁽²⁾ Valeurs moyennes de deux années de culture consécutives et de trois blocs statistiques. Coefficient de variation de la composante génétique (CV_G) et coefficient de variation de la composante environnementale (CV_E).

Dans le même temps, la variété TAL AMARA 2 est caractérisée par une extensibilité élevée (200,17 mm), alors que d'autres cultivars sont caractérisés par des valeurs faibles (146,50–165,42 mm). Les valeurs des coefficients sont comprises entre 1,13 et 2,23, mais les valeurs correspondant à l'énergie varient de 44,00 (SHAM 8) à 90,75 cm² (TAL AMARA 2). Tout ceci confirme la faiblesse de la pâte de la variété SHAM 8. Dans des conditions climatiques sèches, le blé tendre panifiable a tendance à exprimer à la fois une résistance de pâte plus faible à l'extension (160-246 BU) et un niveau d'énergie plus limité, comme c'est le cas pour la variété SHAM 8 (44,00 cm²) (Makawi et al., 2013).

Tableau 21. Analyse de la variance concernant les paramètres de l'extensographe

| Source de variation | Résistance maximale (UB) | Résistance à l'extensibilité (UB) | Extensibilité (mm) | Coefficient | Energie (cm ²) |
|--|--------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|----------------------------|
| F | 215,42 | 283,93 | 224,67 | 294,17 | 201,10 |
| Année (A) | 68,28*** | 91,48*** | 14,61*** | 58,80** | 257,70*** |
| Génotype (G) | 391,09*** | 479,90*** | 437,85*** | 464,00*** | 348,30*** |
| Année × Génotype (A×G) | 88,80*** | 152,12*** | 81,52*** | 202,80** | 35,042*** |
| Rapport de variance (σ^2_A/σ^2_G) | 0,17 | 0,19 | 0,03 | 0,13 | 0,74 |
| Rapport de variance ($\sigma^2_A/\sigma^2_{A \times G}$) | 0,77 | 0,60 | 0,18 | 0,29 | 7,35 |

(*) Effet significatif au seuil $p < 0,05$.

(**) Effet hautement significatif au seuil $p < 0,01$.

(***) Effet très hautement significatif au seuil $p < 0,001$.

Ainsi, les génotypes de blé retenus lors de cette étude peuvent s'adapter globalement à un procédé de panification, à l'exception toutefois de la variété SHAM 8 qui semble exprimer une vraie faiblesse. De plus, les variations enregistrées chez tous les paramètres extensographiques mesurés sont principalement attribuables à l'effet génotypique ($\sigma^2_A/\sigma^2_G < 1$)

(Tableau 21). Ces résultats qui sont en parfait accord avec ceux de Solomon et al. (2012) démontrent, encore une fois, l'influence de l'hérédité des traits extensographiques chez ces différentes variétés ; cette hérédité serait particulièrement importante de prendre en compte lors du développement de futurs programmes de sélection variétale.

IV.3. Discussion

Les principaux constituants d'un grain de blé, les prolamines et dans une moindre mesure les polysaccharides amylicés, sont responsables de la plupart des propriétés physiques, physico-chimiques et rhéologiques lors de la transformation du grain. Il est donc important de comprendre et de discuter les effets des conditions environnementales sur ces constituants, qui affectent l'ensemble des aptitudes technologiques (aptitude à la panification notamment). Les deux campagnes agricoles qui ont été mises à profit lors de notre étude pour produire les lignées sélectionnées ont été caractérisées par une absence drastique de précipitations et des températures élevées, notamment pendant les phases de remplissage des grains. Bien que les lignées retenues soient particulièrement adaptées à ces milieux, les conséquences de ces conditions environnementales particulièrement sévères se sont traduites par un raccourcissement important des phases d'accumulation des réserves du grain entraînant une forte limitation du poids spécifique des grains. Pour tous les génotypes, le poids des milles grains (PMG) a été significativement affecté, reflétant une réduction plus particulière de l'accumulation des polysaccharides amylicés produits de la photosynthèse post-floraison. Ainsi, les conditions environnementales prévalant pendant les deux saisons de culture de notre étude (i.e. température élevée et précipitations limitées) au cours du développement des grains ont réduit la longueur de la phase de remplissage (phase de grandissement cellulaire) et ont conduit à une modification de la composition biochimique des cellules de l'albumen de ces mêmes grains. En effet, nous avons pu observer des niveaux élevés de protéines accompagnés de faible teneur en amidon dans les grains à la récolte. Dans le même temps, les prolamines accumulées présentent à la fois une richesse importante en gliadines (plus de 54% de la teneur totale en prolamines), et un très haut niveau de polymérisation/agrégation des sous-unités gluténiques. Les faibles contenus en amidon sont accompagnés de teneurs plus élevées en amylose (i.e. > 34%) et d'un changement significatif du rapport des polymères constitutifs de l'amidon (amylopectine/amylose). Enfin, nous avons pu également observer

une modification significative de la distribution des granules d'amidon présents (type A vs. type B).

Il est bien connu que la température, les précipitations et leur répartition pendant la saison de croissance du grain ont un impact significatif sur la quantité et la répartition des protéines. Denčić et al. (2012) ont noté que l'impact de l'environnement sur la qualité et la quantité des protéines est déterminé par les facteurs climatiques. Ainsi, la teneur en protéines du blé augmente en milieu semi-aride lorsque l'intensité de la température est plus ou moins élevée pendant longtemps. De plus, la combinaison de la rareté de l'eau et des températures élevées pendant la phase de remplissage des grains entraîne une augmentation de la teneur en protéines. Dans le même temps, une température élevée pendant la phase de remplissage des grains (i.e. phase de grandissement cellulaire) augmente la quantité globale de sous-unités gluténiques, alors qu'un déficit en eau augmente le rapport SG-HPM/SG-FPM (Flagella et al., 2010). La synthèse des gliadines est également affectée, puisqu'il a été montré que les stress thermique et hydrique provoquent une forte accumulation de cette fraction protéique monomérique.

De plus, des facteurs environnementaux influent la biosynthèse et l'accumulation d'amidon dans le grain de blé. Ainsi, le stress hydrique réduit la productivité du blé en accélérant l'accumulation d'amidon dans le grain. De même, le déficit en eau provoque une altération des activités des enzymes impliquées dans la synthèse de l'amidon, qui comprennent l'ADP-glucose pyrophosphorylase (catalyse la transformation du glucose-1-P en ADP-glucose) et l'amidon synthase ainsi que l'enzyme de ramification (responsable de la conversion de l'ADP-glucose en amylose et amylopectine) (Ahmadi et Baker, 2001). Le stress hydrique altère également certaines caractéristiques de l'amidon, telles que les propriétés thermiques, les propriétés de liaisons et le nombre de granules produits. Elle provoque une diminution de l'accumulation de petits granules d'amidon (type B) et une augmentation des gros granules (type A). Le stress hydrique est considéré comme un facteur pénalisant lorsqu'il survient dans la deuxième phase du développement des granules d'amidon, qui affecte les granules de type B ; cependant, les granules de type A, qui se développent dans la première phase, ne sont pas affectés par ce stress (Liu et al., 2011). Aussi, le stress thermique provoque des modifications morphologiques et physico-chimiques de l'amidon de blé, selon le stade de développement de la plante au moment où il se produit.

Il a également un effet sur la synthèse de l'amidon lui-même. Une température supérieure à 35 °C pendant la phase de remplissage du grain provoque une diminution de la biosynthèse de l'amidon en raison d'altérations des enzymes de synthèse (Thitisaksakul et al., 2012). Des études ont montré que des températures élevées appliquées après la floraison réduisent la teneur en amidon du grain et modifient sa composition en favorisant la formation de granules de type A et en réduisant le nombre de granules de type B. D'autres auteurs ont rapporté que des températures supérieures à 30 °C survenant avant la floraison provoquent une diminution du nombre de granules A par rapport aux granules B avec l'apparition de certaines déformations morphologiques (Liu et al., 2011). Ainsi, le stress hydrique et thermique affecte à la fois l'accumulation et la composition des protéines et de l'amidon dans les grains de blé.

Afin de comprendre et d'interpréter toutes ces propriétés rhéologiques, qui sont le résultat de la composition des grains de blé affectée par les contraintes environnementales pendant les deux saisons de culture, une comparaison des génotypes par analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée en tenant compte de leurs propriétés rhéologiques et de leur compositions biochimiques (Figure 24).

Cette comparaison montre de grandes différences entre les génotypes de blé étudiés. En fait, la farine résultant des grains obtenus présente (i) une teneur élevée en gluten humide et sec et une sédimentation Zélény élevée, (ii) un faible indice de gluten, (iii) une grande extensibilité à l'alvéographe et à l'extensographe et, (iv) une résistance élevée de la pâte. TAL AMARA 2 s'est caractérisée par une large extensibilité qui peut être due aux faibles poids moléculaire et indice de polymérisation (UPP). Ce faible indice de polymérisation traduit l'existence de faibles interactions protéines-protéines. Ces propriétés physico-chimiques seraient dues au rapport SG-HPM/SG-FPM le plus faible enregistré parmi les variétés étudiées. Une quantité élevée de sous-unités gluténiques de faible poids moléculaire (SG-FPM) peut être responsable de petits polymères agrégés, conduisant à une modification sérieuse des propriétés du gluten, principalement celles contrôlant les caractéristiques rhéologiques des grains de blé.

Concernant l'indice de sédimentation de Zélény, qui est connu pour être positivement corrélée avec la teneur en protéines (Denčić et al., 2012) ; la variété TAL AMARA 2 est caractérisée par une teneur en protéines relativement élevée, mais toujours bien inférieure aux

autres géotypes. Cependant, sa valeur Zélény est la plus élevée. Il se peut que la faible teneur en protéines soit compensée par sa teneur élevée en gluténines. Par conséquent, la combinaison d'une faible teneur en protéines totales avec une forte proportion de gluténines peut entraîner une valeur de sédimentation élevée.

Diagonalement opposées, les variétés KATILA et ACSAD ont des caractéristiques biochimiques qui peuvent leur permettre d'avoir une très grande extensibilité et une valeur Zélény très élevée car elles ont accumulé beaucoup de protéines, notamment des gliadines. Tout ceci se traduisant par des rapports gliadines/gluténines très élevées.

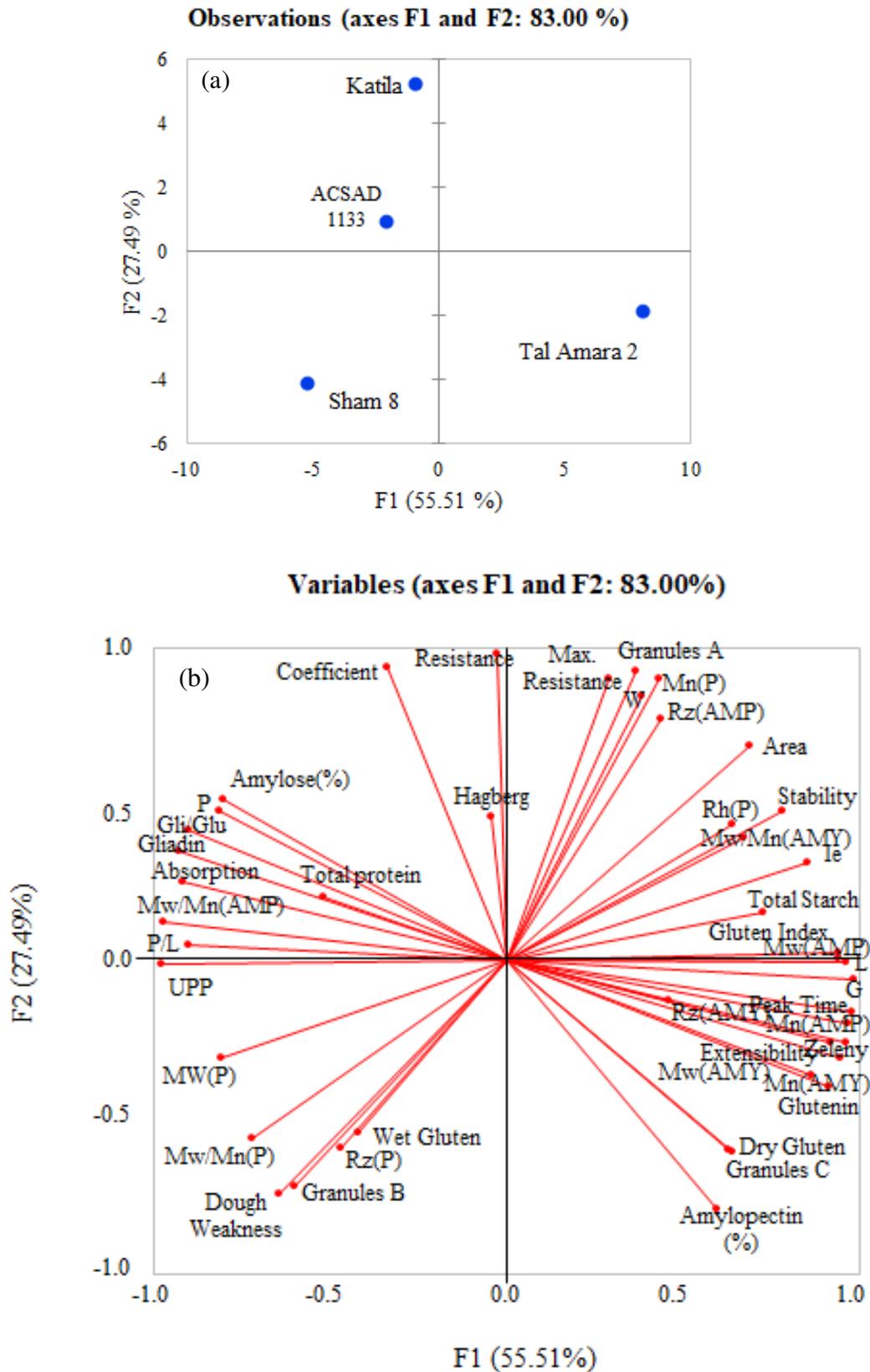


Figure 24. Analyse en Composantes Principales (ACP) des propriétés rhéologiques et des compositions biochimiques des farines des différents génotypes de blé tendre étudiés

Cependant, leurs caractéristiques rhéologiques sont les plus faibles. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces paramètres seraient influencés par la présence d'une forte agrégation de gluténines représentée par des valeurs d'UPP (%) élevés et que la masse molaire des agrégats polymériques est très élevée par rapport à celles de la variété TAL AMARA 2. Par conséquent, la quantité des gluténines inextractibles au SDS (UPP) et la distribution moléculaire des agrégats polymériques sont responsables de la correction de certains défauts rhéologiques. Dans le cadre de cette analyse PCA (Figure 29), les variétés ACSAD 1133 et KATILA ont été classées en fonction de l'absorption, de la résistance de la pâte, du P, du P/L et du temps de chute de Hagberg. Ces résultats, en particulier les données alvéographiques, peuvent logiquement s'expliquer par le poids moléculaire élevé des agrégats de polymères (Singh et MacRitchie, 2001). De plus, ces caractéristiques rhéologiques sont dûes à leur teneur plus élevée en protéines et en gliadines mais également à leur rapport Gli/Glu plus élevé, comme peuvent le confirmer les observations de Iqbal et al. (2015). Par conséquent, la composition de ces génotypes peut favoriser l'extensibilité de la pâte contrebalancée par des polymères de masse molaire élevée et un indice de polymérisation élevé, entraînant des niveaux élevés de polymères non extractibles.

Dans le même temps, la variété SHAM 8 a révélé une plus grande faiblesse de la pâte et une teneur en gluten humide plus élevée. Sa teneur en gluten humide peut être attribuée non seulement à sa richesse en UPP mais aussi à la masse molaire plus élevée de ses gluténines très dispersées. La masse molaire des agrégats de polymère est la plus élevée parmi les variétés étudiées, alors que sa faiblesse de pâte pourrait s'expliquer par la teneur en protéines plus faible par rapport aux autres cultivars, ce qui est soutenu par Branlard et Dardevet (1985), révélant une corrélation positive entre la résistance de la pâte et la teneur en protéines. De plus, cette faiblesse peut être attribuée à une masse moléculaire très élevée de ses agrégats polymères.

La distribution granulométrique des granules de l'amidon et la distribution moléculaire de l'amylose et de l'amylopectine peuvent être impliquées dans l'explication de certains comportements rhéologiques, puisque certains paramètres moléculaires de l'amidon ont été fortement impliqués dans la description des génotypes lors de l'analyse PCA. Ainsi, les granules B sont associés à la faiblesse de la pâte, tandis que les granules C sont liés au gluten

sec ainsi qu'à la teneur en amylopectine. La masse molaire de l'amylopectine montre des associations avec l'indice de gluten, l'extensibilité, L et G.

Les résultats observés se traduisent par un effet drastique des conditions climatiques sur la synthèse, l'accumulation et la polymérisation et l'agrégation des protéines de réserve des grains de blé. Cela modifie la composition biochimique des grains et, par voie de conséquence, les comportements rhéologiques des pâtes fabriquées et ce, malgré le bon potentiel des variétés étudiées (i.e. aptitudes à la transformation technologique) puisqu'elles contiennent, notamment, des couples alléliques SG-HPM 5 + 10 et SG-HPM 7 + 9 très intéressants.

En marge de cette approche génotypique, l'analyse en composantes principales (ACP) a été également utilisée pour comparer le comportement rhéologique des farines de nos quatre génotypes de blé retenus par rapport à celui des deux farines industrielles témoins (farines F et G). Ces deux farines témoins ont été fournies par une minoterie libanaise et sont conformes à la Norme Libanaise (NL 212.2008). La farine « G » appelée aussi « Zéro » ou farine unifiée sert à la préparation du pain libanais, alors que la farine « F », un peu plus tenace, est utilisée pour d'autres préparations libanaises (Figure). Les deux farines sont du type 85, obtenues à 78% d'extraction et proviennent d'un mélange de variétés de blé tendre importées.



Figure 30. Pain libanais et des préparations libanaises fabriquées à partir des farines « F/G »

La figure 31a présente une projection des différentes observations (i.e. farines étudiées) dans un plan défini par deux composantes (F1 et F2) qui explique à lui seul 85,94% de la variabilité totale observée. Ce plan (F1/F2) qui permet de parfaitement discriminer les différentes farines est construit à partir d'un nombre de variables rhéologiques limitées (Figure 30b). Ainsi, la composante F1 est majoritairement définie par les propriétés de résistance (maximale et à l'extensibilité) alors que la composante F2 est définie, quant à elle, par les propriétés opposées d'extensibilité *vs.* ténacité (L *vs.* P). Dans le cadre de ce référentiel rhéologique, seul le génotype KATILA (et ASCAD 1133 dans une moindre mesure) présente des aptitudes rhéologiques proches du mélange standard (Farine G) mis en œuvre en panification libanaise. Par contre, si l'on considère les autres préparations libanaises (cf. Figure 30), il est clair qu'aucune des farines des blés tendres sélectionnés ne permettent d'approcher les aptitudes exprimées par la farine F. Les farines des blés sélectionnés présentent en effet une carence significative en termes de ténacité (P) comme le montre parfaitement la figure 31a.

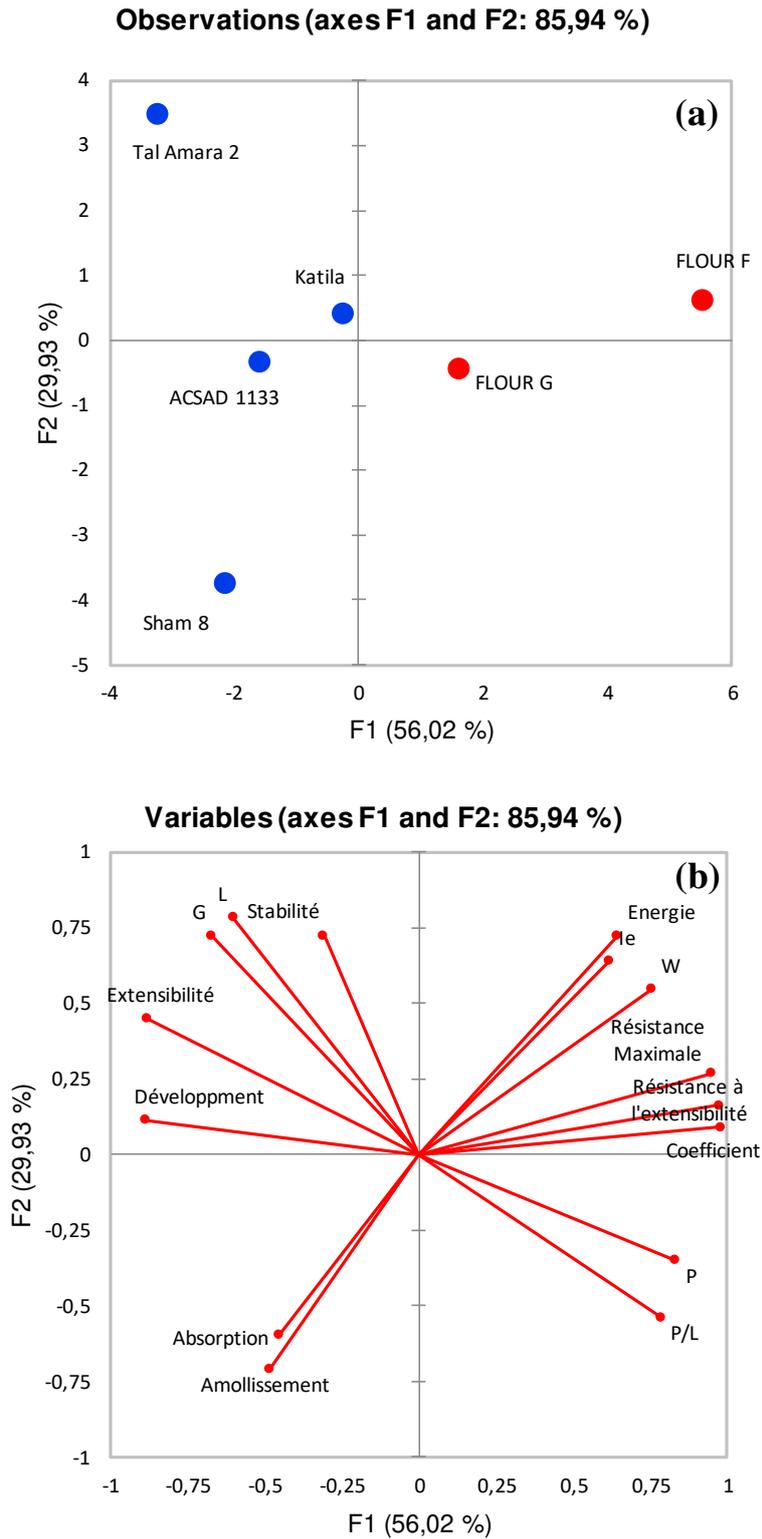


Figure 31. Analyse en Composantes Principales (ACP) des propriétés rhéologiques et des farines des différents génotypes de blé tendre étudiés en comparaison des farines industrielles témoins G et F

IV.4. Conclusion

Dans le cadre de l'introduction de nouvelles variétés de blé tendre par l'Etat Libanais afin de réduire les importations et produire localement des grains adaptés répondant aux exigences technologiques de préparation du pain libanais, nous avons caractérisé les propriétés rhéologiques du matériel végétal sélectionné pour son adaptation aux conditions semi-arides.

Nos résultats démontrent que, malgré une composition allélique idéale en termes de sous-unités gluténiques de haut poids moléculaire [i.e. SG-HPM (5 + 10)], les grains du matériel végétal sélectionné n'expriment pas leur potentiel rhéologique optimal en raison des conditions de culture limitantes qui ont affecté l'accumulation de leurs constituants majeurs (i.e. prolamines et amidon). Ces conditions physiologiques limitantes se sont traduites par une réduction significative de la durée de la phase de remplissage du grain (majoritairement phase de grandissement cellulaire). En conséquence, les farines fabriquées à partir des grains obtenus présentent une teneur élevée en gluten humide et sec, des valeurs élevées d'indice de Zélény, un faible indice de gluten, une grande extensibilité mesurée à l'alvéographe et à l'extensographe et enfin, une résistance élevée de la pâte mesurée au farinographe.

Ces modifications du comportement rhéologique des farines fabriquées peuvent s'expliquer par leur composition biochimique particulière : richesse en protéines et pauvreté en amidon. En fait, les niveaux élevés en protéines rencontrés et qui sont associés à des teneurs élevées en gliadines (et des rapports Gli/Glu élevés par voie de conséquence) sont responsables des accroissements d'extensibilité révélés chez les pâtes correspondantes. Dans le même temps, les prolamines présentes sont caractérisées par des contenus en polymères/agrégats gluténiques de masses moléculaires élevées et de grandes quantités d'UPP se traduisant par l'obtention des pâtes présentant une grande résistance au farinographe. De plus, les comportements rhéologiques peuvent également s'expliquer par une faible accumulation d'amidon dans ces grains qui est associée à des niveaux élevés d'amylose et à un rapport amylopectine/amylose réduit. En effet, la distribution granulométrique des granules (concentration plus élevée de granules de type A par rapport aux granules de type B) mais également la distribution des masses moléculaires des polymères amylicés a subi des modifications très significatives.

Au-delà de ces éléments, nous avons mis à profit les résultats obtenus afin de mieux cerner les comportements rhéologiques variétaux en faisant appel à une analyse en composantes principales intégrant dans un premier temps la comparaison des farines des variétés sélectionnées et, dans un deuxième temps, les farines utilisées par le marché local pour la préparation du pain libanais (farine G) et des préparations libanaises (farine F). Ainsi, les farines F et G se sont surtout distinguées des autres farines par leur résistance à l'extensographe, leur extensibilité et leur force boulangère. La farine F caractérisée par un W de 230×10^{-4} Joules et un P/L de 1,0, est à l'origine de pâtes plus fortes et moins extensibles que celle de la farine G qui est caractérisée quant à elle par un W de 295×10^{-4} Joules et un P/L de 1,5. Cependant, la résistance maximale de la farine F (890 UB) dépasse de loin celle de la farine G (492 UB).

Dans le cadre du référentiel rhéologique défini par cette ACP, seul le génotype KATILA (et ASCAD 1133 dans une moindre mesure) présente des aptitudes rhéologiques proches du mélange standard (farine G) mis en œuvre en panification libanaise. Par contre, si l'on considère les autres préparations libanaises, il est clair qu'aucune des farines des blés tendres sélectionnés, utilisée seule (i.e. pas de mélange) ne permet pas d'approcher les aptitudes exprimées par la farine F. En effet, les farines de blés sélectionnés présentent une carence significative en termes de ténacité (P).

DISCUSSION GENERALE

Un habitant consomme en moyenne 129 grammes de pain par jour au Liban, légèrement plus élevé qu'en France et largement plus faible que la moyenne mondiale. Le pain plat traditionnel, ou pain arabe, a longtemps dominé le marché local. Le pain, un élément de base dans le régime alimentaire libanais, est généralement préparé manuellement à base de blé dur. La culture de ce dernier, grâce à sa meilleure adaptation aux conditions climatiques (i.e. conditions de stress thermique/hydrique), est plus répandue que celle du blé tendre. Le blé dur ne pouvant être utilisé pour la fabrication mécanique industrielle du pain libanais, donnant une pâte collante et non machinable, cède sa place au blé tendre. Le pain libanais de meilleure qualité est principalement préparé à partir du blé tendre. Ce dernier est donc destiné à une utilisation majoritairement industrielle. Toutefois, le pays n'est actuellement pas en mesure de répondre à cette demande car il ne produit pas suffisamment du blé tendre. L'Etat Libanais est donc obligé d'importer du blé panifiable en grandes quantités afin de répondre au cahier des charges qui est très exigeant. Le Liban, comme les autres pays du Proche-Orient et du Nord d'Afrique (Egypte, Tunisie, Algérie et Maroc), compte tenu de leurs conditions agronomiques et climatiques fluctuantes ainsi que de leur croissance démographique, restera structurellement importateur.

Le Liban table sur une production locale pour couvrir une partie de ses besoins en blé tendre et ainsi limiter le niveau d'importation afin de diminuer les charges globales. De fait, le Liban a mis en place une stratégie visant à introduire des variétés de blé tendre adaptées à ses conditions climatiques, favorisant le développement d'une production nationale répondant aux exigences des transformateurs libanais. Dans ce contexte général, l'objectif principal de ce présent travail de thèse s'est focalisé sur la caractérisation (i) agronomique, (ii) biochimique et (iii) technologique d'une collection de variétés de blé tendre (*Triticum aestivum*) gérée par l'Institut de Recherche Agronomique au Liban (IRAL) et sélectionnée selon un potentiel de performances vis-à-vis de la sécheresse et/ou des maladies fongiques. Pour ceci, une démarche d'acquisition des performances agronomiques, biochimiques et

technologiques a été mise en place dans le but d'évaluer ces variétés. Au cours de ce travail, différents résultats ont été acquis et discutés.

Sur un plan agronomique : les conditions climatiques influencent les paramètres agronomiques notamment le poids moyen du grain.

D'après notre étude agronomique, nous avons pu démontrer que les conditions climatiques au Liban (i.e. pluviométrie réduite et temporellement mal distribuée, augmentation ponctuelle de la température et une température moyenne mensuelle élevée) ont provoqué une accélération du cycle de croissance et développement de la plante surtout pendant les mois d'Avril et de Mai et au stade de la formation et de la maturation du grain de blé. Alors qu'au niveau de la phase végétative, les cultures n'ont pas eu de limitations physiologiques puisque les températures et les pluviométries enregistrées ont été acceptables. Cette phase a duré entre 142 et 143 jours, correspondant aux valeurs observées par Al-Karaki (2012).

En effet, les principales contraintes limitant la production du blé dans la région ont été définies par la variabilité interannuelle et la distribution irrégulière des précipitations, aussi bien que l'augmentation des températures affectant la productivité du blé. Ces stress hydriques et thermiques combinés causent une augmentation de la transpiration, qui dépend des conditions environnementales comme le niveau de CO₂ atmosphérique et la demande atmosphérique en eau, et aussi une élévation de composante osmotique de la solution du sol. En fait, la limitation en eau pendant la période du remplissage du grain ainsi que le régime thermique notamment élevé durant les deux mois d'Avril et de Mai se sont répercutés négativement sur les composantes du rendement notamment le poids moyen du grain. Ainsi, dans les zones semi-arides où les contraintes thermiques et hydriques surgissent pendant la phase de post-floraison, influent la cinétique d'accumulation des principaux constituants du grain en réduisant significativement le temps de remplissage du grain. Les grains de blé ainsi formés ayant un déficit d'accumulation de la matière sèche sont caractérisés par une réduction du poids du grain (Lawlor et al., 1981; Fischer, 1985; Mogensen, 1985; Mogensen et Jensen, 1989).

Au Liban, les températures moyennes du jour et les températures moyennes maximales sont élevées. La fréquence des températures dépassant les 30 °C augmente de plus en plus. Elles surgissent subitement, et ponctuellement au printemps. Toutefois, elles persistent à partir du mois de Juin. Ainsi, les températures élevées causent une évapotranspiration plus élevée et par la suite, l'apparition d'un déficit hydrique ayant pour résultat la réduction de l'activité photosynthétique. Dans ces conditions, la plante cherche à réduire sa transpiration par la fermeture des stomates, par la réduction de la surface foliaire et par la diminution de la conductance stomatique ; ce qui se traduit par un ralentissement de l'activité photosynthétique (Amigues et al., 2006). Ainsi, le développement végétatif de la plante est affecté ; il se révèle par une diminution importante de la taille de la plante, de la longueur des entre-nœuds, du nombre de feuilles voire de la surface foliaire. Au niveau des organes reproducteurs, la croissance des jeunes organes reproducteurs (ovules, fleurs puis grains) connaît un certain ralentissement et, le nombre de ces organes peut subir une réduction drastique (Hanchinal et al., 1994). Ceci influence les rendements ainsi que la composition biochimique des grains. Comme dans notre cas, ces conditions environnementales ont des conséquences importantes lorsqu'elles se produisent après la floraison pendant les phases de division cellulaire et/ou l'élargissement cellulaire dans les grains de blé.

Dans notre étude la durée de la phase de remplissage du grain a varié entre 34 et 39 jours ; et par la suite la durée de la phase de l'accumulation des réserves dans le grain a été réduite de 10 à 20 jours comparée à celle classiquement observée chez les blés (Carceller et Aussenac, 1999) . Ceci est principalement dû aux fortes températures observées durant la culture, au printemps (i.e. Mars et Avril), après la floraison, et particulièrement, durant la phase de remplissage du grain. De plus, le taux des précipitations durant cette phase a été négligeable. En effet, le stress hydrique (causé par le manque de précipitation et accentué par les fortes chaleurs) et thermique ont eu un impact négatif direct sur l'accumulation de la matière sèche dans le grain. Les observations physiologiques mentionnées confirment que les différents blés tendres analysés au cours de notre étude ont été soumis à des conditions environnementales limitantes (i.e. température élevée et pluviométrie faible), et qui ont conduit à une diminution naturelle de la longueur de la phase de remplissage du grain, bien que ces lignées soient sélectionnées pour leur adaptation à ces environnements. La réduction de la

durée de cette phase a eu un impact sur la quantité de la matière sèche accumulée dans les grains (Triboi, 1990).

Ainsi, les valeurs du PMG obtenues pour nos génotypes varient entre 21,42 et 25,96 g. Ces valeurs sont significativement et largement faibles comparées à celles obtenues dans des conditions environnementales classiques en Egypte sur des génotypes apparentés (El-Kareem et El-Saidy, 2011). Ces résultats, qui révèlent une forte réduction de l'accumulation de matière sèche dans les grains pour les génotypes étudiés, peuvent être liés à un dysfonctionnement significatif du métabolisme du carbone post-floral. Les grains des génotypes étudiés ont été caractérisés par des taux très élevés en protéines (teneur moyenne en protéines de 17,43 g/100 g de matière sèche) et de faibles teneurs en amidon (teneur moyenne en amidon de 55,16 g/100 de matière sèche). Contrairement au métabolisme de l'accumulation de protéines, qui résulte principalement d'une remobilisation de l'azote foliaire vers les grains, le métabolisme d'accumulation d'amidon correspond essentiellement à un métabolisme de synthèse *de novo* dans les organes de réserve. En fait, toute réduction de la photosynthèse entraîne un déficit de biosynthèse et d'accumulation d'amidon dans le grain et, par conséquent, un manque de dilution de la teneur en protéines accumulées entraînant une réduction du PMG (Branlard et al., 2015). En effet, l'amidon est synthétisé dans les feuilles et s'accumule dans les chloroplastes, ensuite, il est dégradé en saccharose qui est par la suite transporté au niveau des organes de réserves (grains) et intégré par la voie métabolique de la biosynthèse de l'amidon dans les cellules non photosynthétiques. En effet, les facteurs environnementaux (i.e. stress thermique et ou hydrique) impactent la biosynthèse et l'accumulation de l'amidon dans le grain de blé (Dupont et Altenbach, 2003) par la dénaturation des enzymes de synthèse (Thitisaksakul et al., 2012) qui sont notamment l'ADP-glucose pyrophosphorylase (catalyse la transformation du glucose-1-P en ADP-glucose) et l'amidon synthase ainsi que l'enzyme de branchement (responsables de la conversion de l'ADP-glucose en amylose et amylopectine) (Lalonde et al., 1997; Ahmadi et Baker, 2001). L'accumulation de l'amidon pourrait être tout simplement réduite en réponse à un faible transfert de saccharose. De plus, les facteurs climatiques agissent sur le taux des protéines. Ce dernier augmente quand l'intensité de la température est plus ou moins grande pendant une longue durée (Oury et al., 1999). Tout semble indiquer un fort effet de l'environnement sur l'effet génotypique de la voie de biosynthèse de l'amidon dans le grain.

L'accumulation privilégiée des protéines sur celle de l'amidon dans des conditions limitantes de culture a été aussi signalée dans les travaux de Simoes (2011) sur le blé dur. En général l'accumulation des réserves chez les plantes à graines baisse suite aux contraintes climatiques observées en fin du cycle, résultant en une réduction dans le poids du grain en question. Ainsi, ce phénomène a été aussi observé sur le pois fourrage au Maroc par Benbrahim et Gaboun (2008) et le maïs au Zimbabwe par Makadho (1996).

Le poids du grain est une caractéristique variétale qui peut être affecté par les conditions environnementales notamment au cours de la phase du remplissage des graines. Il est hautement influencé par l'alimentation hydrique au cours du remplissage des graines et par la température maximale moyenne au cours de la maturité des graines. La plante, dans les conditions limitantes, accélère sa vitesse de cycle de croissance pour contrebalancer le déficit hydrique de fin de cycle et réduire ainsi son incidence sur la production. En effet, pendant la phase de cellularisation qui correspond à la phase de mise en place de l'albumen, la teneur en eau du grain augmente fortement avec une faible accumulation de réserves. Quand la quantité d'eau dans le grain atteint son maximum (45%), le grain entre dans la phase du « palier hydrique ». A ce moment, l'arrivée de l'eau dans le grain est sensiblement égale aux pertes par évapotranspiration, qui dépendent des alimentations en eau (précipitations) et des températures journalières. Alors, l'accumulation de matière s'arrête et le grain rentre en phase de dessiccation. La masse d'eau retenue par le grain au cours du palier hydrique conditionne la masse sèche finale du grain. Lorsque le régime de température élevée est appliqué pendant la phase de remplissage, la teneur en eau du grain se réduit ainsi que le poids sec final du grain.

Sur un plan biochimique : les contraintes environnementales modifient le contenu des principaux constituants du grain, des fractions de prolamines et des fractions amylacées

A l'issu de l'étude biochimique, nous avons pu montrer que les conditions environnementales ont causé des réductions dans le fonctionnement physiologique pendant la phase du développement du grain. De plus, la réduction de l'activité photosynthétique a entraîné un déficit de la synthèse et de l'accumulation d'amidon dans les grains et, par conséquent, un manque de dilution de la teneur en protéines (Peterson et al., 1992; Graybosch

et al., 2003; Williams et al., 2008). Dans le même temps, les contraintes climatiques ont favorisé l'accumulation des gliadines en raison de l'accumulation asynchrone des protéines de réserve dans le grain (Carceller, 2000).

En fait, au cours du développement du grain, la synthèse des protéines de réserve est régulée par de nombreux facteurs de transcription et par la disponibilité de l'azote et du soufre (Ciaffi et al., 1994). Les protéines sont accumulées dans les corps protéiques, comprenant un procédé de polymérisation *via* la formation de liaisons disulfures (SS) chez les sous-unités de gluténines (SG-HPM et SG-FPM) et chez certaines α -, β - et γ - gliadines, avec un nombre de cystéines (Carceller et Aussenac, 2001). Les polymères gluténiques, contiennent également les gliadines monomères agrégées par la liaison hydrogène et les interactions hydrophobes (Aussenac et al., 2020). Pendant le développement des grains, les polymères formés présentent une phase exponentielle d'accumulation de leurs fractions insolubles dans le SDS 2%. Ceci se révèle environ 30 jours après la floraison à la fin du palier hydrique, correspondant à l'initiation de la déshydratation des grains (Rhazi et al., 2003). Les protéines de réserve s'entourent par les granules d'amidon sous la forme d'une matrice protéique assez dense pendant la déshydratation ou de la maturation du grain. De plus, l'abondance des polymères est corrélée à la concentration en protéines du grain. La forte influence de la température sur les caractéristiques des polymères peut résulter d'une augmentation des activités des molécules oxydantes catalysant la formation de SS.

L'analyse quantitative des fractions protéiques a montré que les quatre génotypes de notre étude se sont caractérisés par des teneurs en gliadines relativement élevées. En effet, quel que soit le génotype de blé étudié, le rapport gliadines/gluténines a été caractérisé par des valeurs élevées (c.-à-d., >1,2 à 1,3). Ceci montre l'impact très important des conditions environnementales sur l'accumulation de ces fractions protéiques. En fait, cette fraction de prolamines a représenté ici plus de 54% de la teneur totale en protéines, soit environ 10 à 15% de plus que la teneur en protéines couramment rencontrée chez le blé tendre (Stone et Morell, 2009). Les gliadines sont généralement synthétisées et accumulées rapidement entre 10 et 35 JAF. Alors que les sous-unités de gluténines (SG-HPM et SG-FPM) sont accumulées plus lentement mais pour une période plus longue pendant le remplissage du grain (jusqu'à 50 JAF). Comme nous l'avons démontré, les conditions environnementales qui sont enregistrées au cours de notre travail se sont traduites par une réduction significative du temps de remplissage des grains. Par conséquent, ces conditions environnementales ont

entraîné une réduction significative de l'accumulation de prolamines polymériques en faveur des prolamines monomériques, par la réduction du temps de l'accumulation des protéines polymères. En fait, même si l'ensemble des protéines apparaissent au même moment (i.e. 5-6 JAF) dans le grain, elles s'y accumulent suivant des cinétiques différentes (d'où le terme d'accumulation asynchrone). Toutefois, le dépôt des gliadines au niveau du grain est plus précoce à celui des gluténines. Ce qui a résulté en une concentration plus élevée de nos génotypes en gliadines tandis que la synthèse des gluténines, du fait de la réduction de la durée de la phase de remplissage, a été largement affectée.

En outre, les teneurs en UPP relativement fortes (c.-à-d. en moyenne 45%), correspondent à des teneurs en gluténines fortement agrégées/polymérisées. Ce qui a été confirmé par la masse moléculaire moyenne en nombre (M_n) et la masse moléculaire moyenne en masse (M_w) des gluténines notamment élevées. Ces caractéristiques des polymères sont influencées par la température pendant la maturation des grains, qui est fortement associée à l'augmentation des masses moléculaires des polymères (Aussenac et al., 2020).

Nos résultats sont en parfait accord avec les travaux de Simoes (2011) qui a obtenu une augmentation de 40% de la fraction protéique insoluble chez les blés durs suite aux conditions limitantes (i.e. fortes températures et précipitations réduites) au cours de développement du grain. Alors que, Flagella et al. (2010) ont observé une augmentation du taux des UPP et une agrégation supérieure des gluténines chez le blé dur cultivé en Italie dans des conditions limitantes de culture.

En effet, pendant le remplissage du grain, les sous-unités gluténiques, en particulier les SG-FPM qui ont des groupements SH libres, s'oxydent pendant la dessiccation du grain. Cette oxydation provoque l'augmentation de la distribution des masses moléculaires (masse moléculaire en nombre M_n et masse moléculaire en Masse M_w) et la perte de solubilité avec la formation des polymères inextractibles (UPP). L'amplitude du mécanisme général de la formation de polymères HPM dans le grain, dépend du nombre de résidus libres de SH qui s'engagent dans la formation des liaisons SS intermoléculaires. Par conséquent, toute modification de ce potentiel d'interaction moléculaire, pour un génotype de blé donné peut affecter la formation des polymères HPM, et donc, la distribution moléculaire de polymères totaux. De plus, le glutathion est une molécule naturelle susceptible de se comporter comme

des « limiteurs d'interaction » potentiels. Il assure le maintien du statut redox au niveau cellulaire mais aussi le stockage et le transport du soufre réduit, nécessaire à la synthèse des protéines (Rennenberg, 1980). En fait, il se produit de manière endogène dans le grain de blé sous forme d'un mélange de protéine-glutathion disulfures (PSSG) (Ferreira et al., 2012), dont 85% dans les grains de blé matures sont représentés par des protéines polymères (PP) conjuguées au glutathion (PPSSG). En vertu de l'influence des conditions de croissance, au niveau cellulaire, le statut redox du thiol libre non protéique, comme le glutathion, est modifié et conduit à la formation des polymères de protéines conjuguées avec le glutathion (PPSSG). Le contenu des polymères de haut poids moléculaire qui peuvent être considérés comme des polymères très importants pour la rhéologie de la pâte, pour leur contribution majeure à la qualité boulangère et la tolérance de la pâte, est principalement contrôlé par des facteurs environnementaux (Aussenac et al., 2020). Ainsi, les stimuli environnementaux (i.e. fortes températures) en amont de la phase de dessiccation du grain causent des variations dans le statut redox cellulaire, ce qui peut expliquer les fluctuations observées dans les interactions inter-polymères et ainsi l'accumulation des HPM.

Nos résultats ont évoqué aussi un taux d'amylose de 34,22% dans les grains matures. Alors que l'amylopectine et l'amylose sont présents dans un rapport d'environ 3:1 dans la plupart des amidons végétaux. En effet, la synthèse et l'accumulation de l'amidon sont synchronisées durant la phase de remplissage du grain. Elles commencent durant les premiers jours après la floraison (4-10 JAF) qui correspondent à la phase de division cellulaire (Altenbach et al., 2003). Le dépôt de l'amidon augmente graduellement durant la phase de remplissage et cesse durant la phase de dessiccation (Toyota et al., 2006). La synthèse de l'amylose et de l'amylopectine de l'amidon est génétiquement contrôlée à travers l'enzyme de synthèse de l'amylopectine (SS) et celle de l'amylose (GBSS) ; cette dernière est codée par trois gènes, Wx-7A, Wx-4A et Wx-7D localisés respectivement sur les chromosomes 7A, 4A et 7D du blé tendre (Graybosch, 1998).

De plus, des travaux (Rhazi et al., 2021) ont montré que la polymérisation et la structure de l'amidon du blé sont affectées par le facteur génotype (i.e. masse moléculaire, rayon de giration, distribution des granules) et influencent ainsi la technologie des grains en question. Cet effet génotypique est réalisé par l'intermédiaire d'un certain nombre d'enzymes très important responsable du métabolisme carboné, plus particulièrement la synthèse de

l'amidon. Les facteurs environnementaux affectent ces mécanismes enzymatiques et par la suite, la qualité et la quantité de l'amidon. Ainsi, toute variation environnementale pendant les phases de dépôt d'amidon impacterait, selon les stades de développement du grain de blé, la synthèse de l'amidon. Ces facteurs environnementaux qui influent la biosynthèse et l'accumulation de l'amidon dans le grain de blé sont surtout la sécheresse et la chaleur (Dupont et Altenbach, 2003). Des modifications de la composition de l'amidon peuvent avoir lieu suite à des événements environnementales sévères et graves, qui affecteraient l'activité de l'enzyme GBSS ; ceci résulte en une synthèse d'un amidon à faible teneur en amylose (Li et al., 2000). L'enzyme GBSS est très sensible à la sécheresse qui peut altérer son activité et causer une modification de la teneur en amylose, du ratio amylose/amylopectine, de la distribution des granules et des masses moléculaires de l'amylose. L'enzyme SS est sensible à la sécheresse et aux fortes températures. Des températures supérieures à 30 °C réduisent son activité et affectent la synthèse de l'amylopectine. En outre, des travaux (Rhazi et al., 2021) ont montré l'effet hautement significatif de l'environnement sur les masses moléculaires (M_n et M_w) de l'amylose et l'amylopectine, ainsi que leur distribution moléculaire (M_w/M_n).

De plus, l'amidon se présente sous forme de granules dans l'endosperme du grain de blé, divisées en trois types selon leur taille (Bechtel et al., 1990). La biosynthèse des granules d'amidon du type A (d'un diamètre > 10 nm) commence dès les premiers jours de la formation de l'endosperme. Celle des granules du type B (d'un diamètre < 10 nm) commence à partir de 10 JAF. Enfin, la synthèse de granules d'amidon de type C (moins de 5 nm) est initiée d'environ 21 JAF (Shi et al., 1994). Comme l'ont montré nos résultats, le type A est présent dans une très grande majorité (76,3%), et les types B et C ont représenté respectivement 18,8% et 4,0%. Nos observations sont en accord total avec les résultats antérieurs obtenus chez la majorité des blés tendres. Les modifications de la taille et/ou du nombre des différents types de granules d'amidon dans les grains peuvent être une caractéristique du génotype du blé étudié, ou bien, elles peuvent être causées par la variation des conditions environnementales (en particulier la température de croissance) au cours de la période de remplissage du grain (Rhazi et al., 2021). Le pourcentage des granules d'amidon de type A et de type B peut être modifié lorsque la température de croissance augmente de 15 à 40 °C (température optimale de croissance 20-25 °C) pendant la période d'accumulation de réserves dans le grain (Park et al., 2005). Ces effets environnementaux induisent des changements dans le modèle de remplissage des granules d'amidon (granules de type A et B

spécifiquement). Les granules du type A sont formés à partir de 5 JAF et continuent à croître jusqu'à atteindre un diamètre maximal à maturité physiologique (Stone et Morell, 2009). Cependant, le nombre final des granules type A est atteint à environ 7 JAF, coïncidant avec l'arrêt de la division cellulaire. D'autre part, les granules de type B sont initiés à environ 11 JAF et continuent à augmenter jusqu'à 21 JAF, et atteignent un diamètre maximal à maturité (35 JAF). Compte tenu du comportement des granules de type A et de type B, nous soutenons que toute augmentation de la température pendant la phase d'élargissement cellulaire induit une réduction de l'activité enzymatique de la synthèse de l'amidon mais aussi une réduction de la phase de remplissage des grains entraînant des changements importants dans la taille et le nombre des différents types de granules d'amidon dans l'endosperme.

Sur un plan technologique : La composition modifiée du grain a influencé ses propriétés rhéologiques

L'étude rhéologique des différents génotypes a montré une modification des critères rhéologiques principalement contrôlés par la composition des grains qui a varié sous l'effet des contraintes climatiques.

Toutefois, malgré les contraintes environnementales qui ont réduit la période de remplissage du grain et diminué l'accumulation d'amidon, le poids du grain, le taux d'extraction et la teneur en cendres obtenus ont été comparables à ceux trouvés dans la littérature (Al-Saleh et Brennan, 2012; Laker, 2015). Alors que pour le gluten humide et gluten sec, nos cultivars ont présenté des teneurs élevées qui ont résulté en une pâte ayant un excès de force. Ces teneurs élevées de gluten humide et gluten sec sont en rapport avec les taux élevés en protéines. Tandis que les indices de gluten ont été notamment faibles, dus aux conditions de culture chaudes qui ont agi sur la qualité du gluten (Barutcular et al., 2016). De plus, les faibles niveaux d'indice de gluten pourraient être le résultat de la richesse du gluten en gliadines, et au rapport élevé de Gli/Glu enregistré pour les cultivars étudiés (Wieser et Kieffer, 2001). En ce qui concerne l'indice de sédimentation Zélény, les valeurs obtenues étaient élevées, dûes aux fortes teneurs de gluten. Ces teneurs en gluten et en Zélény sont largement influencées par le taux de protéines, le rapport Gli/Glu, la quantité des UPP et aussi l'agrégation des polymères de gluténines présentant des fortes masses moléculaires. Elles pourraient également être dûes aux sous-unités de gluténines SG-HPM 5-10 et 7-9, qui

présentent une grande importance dans la panification, et la distribution de masse molaire des agrégats de polymères (Wang et al., 2006). De plus, des valeurs élevées de temps de chute observées sont principalement dûes aux fortes chaleurs qui seraient responsables de la baisse de l'activité de l'alpha-amylase dans le grain (Makawi et al., 2013).

Au niveau du comportement alvéographique, nos cultivars ont présenté des résultats qui pourraient correspondre à des critères de qualité de la pâte selon le travail de Bordes et al. (2008). Cependant une large extensibilité a été observée chez les différents génotypes et qui pourraient être en relation avec leur forte teneur en gliadines. En fait, les monomères et polymères protéiques de faible poids moléculaire sont prédominants dans leur capacité à expliquer l'extensibilité de la pâte. D'autre part, la teneur en polymères protéiques de haut poids moléculaire (c.-à-d. les molécules ayant une masse moléculaire supérieure à 2×10^6 g.mol⁻¹) est devenue prédominante dans la capacité à expliquer la ténacité de la pâte (Aussenac et al., 2020).

A partir des mesures réalisées au farinographe, les variétés ont montré de fortes résistances au déchirement ainsi que des taux d'absorption en eau forts ; ce qui pourrait être expliqué par les teneurs élevées en protéines et en UPP, soutenues par Iqbal et al. (2015) et Yamamoto et al. (1996). En outre, ces résultats peuvent s'expliquer d'avantage par la masse moléculaire élevée des agrégats de polymères (Singh et MacRitchie, 2001). De plus, les températures journalières élevées pendant la période de remplissage du grain donnent lieu à une augmentation de la masse moléculaire des polymères des gluténines. Ceci se traduit par une augmentation de la résistance de la pâte (Branlard et al., 2001). Et enfin, sur l'extensographe, nos cultivars ont montré une résistance moyenne et une large extensibilité dépendante de la teneur élevée en gliadines. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus dans les zones semi-arides (Makawi et al., 2013).

Les comportements rhéologiques des farines des génotypes étudiées peuvent aussi être expliqués par la distribution des granules de l'amidon et la distribution moléculaire de l'amylose et de l'amylopectine. Ainsi, selon l'étude en ACP effectuée pour la description des génotypes, une association est montrée entre la faiblesse de la pâte et les granules B, tandis que le gluten sec s'est révélé associé aux granules C ainsi qu'à la teneur en amylopectine. Dans le même temps, une association entre les granules A et la résistance de la pâte et entre

le taux d'absorption des farines et la distribution moléculaire de l'amylopectine (M_w/M_n) ainsi que la teneur en amylose, a été décelée.

La comparaison entre la composition et les caractéristiques rhéologiques menée dans cette étude nous a permis de déduire que les niveaux élevés en protéines, en gliadines ainsi que les rapports Gli/Glu sont responsables de l'extensibilité observée. Les polymères gluténiques de forte masse moléculaire et du haut niveau d'agrégation, ainsi que les fortes concentrations en UPP sont responsables de la forte résistance de la pâte. Le faible taux d'accumulation d'amidon, riche en amylose, et ayant une amylopectine de plus forte masse moléculaire et une concentration plus importante en type A vs type B, serait responsable du comportement rhéologique de la pâte.

Ainsi, les résultats observés révèlent un effet drastique de l'environnement sur la synthèse, l'accumulation, la polymérisation et l'agrégation des réserves de grain de blé. Cela a modifié la composition biochimique du grain et, par conséquent, le comportement rhéologique de la pâte qui résulte de ces graines, malgré le potentiel des variétés étudiées à donner un produit de haute qualité technologique, puisqu'elles contiennent des SG-HPM 5 + 10 et SG-HPM 7 + 9 (Wang et al., 2006).

Ajoutons aussi qu'une comparaison menée entre la farine des variétés étudiées et cultivées pendant deux années de culture successives de sécheresse a révélé des caractéristiques rhéologiques non comparables entre les génotypes étudiés. Enfin, la comparaison des critères rhéologiques entre la farine des variétés étudiées et celle des farines commerciales utilisées en panification sur le marché local a montré, dans ces conditions, a révélé que ces génotypes ne correspondent pas à l'exigence du marché national pour la fabrication du pain.

Enfin, mentionnons que dans les régions à climat variable la notion d'adaptation génotypique est de plus en plus recherchée dans les programmes de sélection. On cherche une certaine architecture des plantes typiques par adjonction des caractères pouvant favoriser l'expression de la tolérance aux différents stress (Richards et al., 1997).

De plus, l'amélioration de la productivité du blé cultivé dans la région serait donc dans l'application d'une irrigation de secours durant les phases sèches printanières qui semblent être critiques pour le développement du blé. Enfin, les rendements acceptables des différents génotypes, malgré les contraintes environnementales subies durant leur culture nous ont conduits à confirmer leur tolérance aux conditions semi-arides régnantes dans la région.

A la lumière des résultats obtenus, d'autres pistes de travail peuvent être évoquées pour l'avenir :

- Compte tenu des conditions climatiques présentes dans la région, et qui affectent la composition du grain et par la suite les caractéristiques rhéologiques des blés cultivés, il serait recommandé de mener une nouvelle étude sur les mêmes cultivars traités dans ce travail. Celle-ci doit viser une nouvelle caractérisation agronomique, biochimique et rhéologique de ces génotypes après avoir appliqué une irrigation programmée et ponctuelle au niveau de la période chaude et sèche de la saison de culture qui se situe après la floraison et qui coïncide avec la phase du remplissage du grain au printemps. Ceci pourra permettre aux différents génotypes d'exprimer leur potentiel optimal technologique, qui dépend principalement de la composition du grain, pour favoriser ainsi une meilleure comparaison des critères rhéologiques avec ceux des farines commerciales locales utilisées en panification. Ce qui contribuera à une meilleure sélection des variétés et permettra de retenir celles qui pourront remplacer les variétés importées et destinées à la panification locale.
- Dans le même temps, d'autres études similaires peuvent être menées sur de nouvelles variétés de blé tendre, introduites au pays et ayant des tolérances/résistances aux conditions climatiques de la région, tout en tenant compte des conditions environnementales qui deviennent limitantes surtout à la fin du cycle cultural, correspondant à la phase de développement du grain.
- Quel que soit le génotype étudié, des modifications dans la composition du grain, impactant la rhéologie, ont été observées suite aux fortes températures et aux

limitations en eau notées au printemps durant la phase de remplissage du grain. Toutefois, ces génotypes cultivés dans les conditions limitantes de culture peuvent être utilisés à un certain pourcentage (à déterminer) dans les mélanges de blé tendre que l'on prépare dans les meuneries en vue d'élaborer une formule de blé adéquate en termes de qualité de farine pouvant satisfaire les besoins des transformateurs (spécifications) pour la préparation du pain. Ceci peut contribuer à remplacer une partie des blés tendres importés pour ces préparations et pourra ainsi réduire partiellement le niveau des importations.

RÉFÉRENCES

- Abbassene, F., Bouzerzour, H., Hachemi, L., 1997. Phenologie et production du ble dur (T. durum Desf.) en zone semi-aride d'altitude. Ann. Inst. Natl. Agron. El Harrach 18, 24–36.
- ACSAD, 2015. اصناف اكساد المعتمدة والسلالات المبشرة من القمح والشعير في الدول العربية. المركز العربي لدراسة المناطق الجافة والاراضي القاحلة. اكساد
- Ahmadi, A., Baker, D., 2001. The effect of water stress on grain filling processes in wheat. J. Agric. Sci. 136, 257–269.
- Alawda, A., 2009. Study the Variation in Response of Some Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) for Salinity Stress in Lysimeters. The Arab Journal for Arid Environments 2 (3): 4-17.
- Al-Karaki, G.N., 2012. Phenological development-yield relationships in durum wheat cultivars under late-season high-temperature stress in a semiarid environment. ISRN Agron. 2012.
- Al-Saleh, A., Brennan, C.S., 2012. Bread Wheat Quality: Some Physical, Chemical and Rheological Characteristics of Syrian and English Bread Wheat Samples. Foods 1, 3–17. <https://doi.org/10.3390/foods1010003>
- Altenbach, S.B., DuPont, F.M., Kothari, K.M., Chan, R., Johnson, E.L., Lieu, D., 2003. Temperature, Water and Fertilizer Influence the Timing of Key Events During Grain Development in a US Spring Wheat. J. Cereal Sci. 37, 9–20. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0483>
- Amigues, J.-P., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., Thomas, A., 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expert. Sci. Collect. Synth. Rapp. INRA.
- Araus, J.L., Villegas, D., Aparicio, N., Ferrio, J.P., Royo, C., 2003. Environmental Factors Determining Carbon Isotope Discrimination and Yield in Durum Wheat under Mediterranean Conditions. CROP Sci. 43, 11.
- Arnon, I., 1971. Crop production In dry regions. Volume 1: Background and principles. Crop Prod. Dry Reg. Vol. 1 Backgr. Princ.

- Atwell, W., 1988. The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World* 33, 306–311.
- Aussenac, T., Rhazi, L., 2018. Storage Proteins Accumulation and Aggregation in Developing Wheat Grains. In *Global Wheat Production*; Fahad, S., Basir, A., Adnan, M., Eds.; IntechOpen: London, UK, 2018; pp. 134–163.
- Aussenac, T., Rhazi, L., Branlard, G., 2020. Molecular Weight Distribution of Polymeric Proteins in Wheat Grains: The Rheologically Active Polymers. *Foods* 9, 1675. <https://doi.org/10.3390/foods9111675>
- Bailey, C.H., 1925. The chemistry of wheat flour. The Chemical Catalogue Co. Inc N. Y. P - 32 F 192.
- Baldy, C., 1974. Contributions à l'étude fréquentielle des conditions climatiques, leurs influences sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. I.N.R.A. dép. de bioclimatologie.
- Bancel, E., Rogniaux, H., Debiton, C., Chambon, C., Branlard, G., 2010. Extraction and Proteome Analysis of Starch Granule-Associated Proteins in Mature Wheat Kernel (*Triticum aestivum* L.). *J. Proteome Res.* 9, 3299–3310. <https://doi.org/10.1021/pr9010525>
- Barutcular, C., Yıldırım, M., Koc, M., Akıncı, C., Tanrikulu, A., El Sabagh, A., Saneoka, H., Ueda, A., Islam, M.S., Toptas, I., 2016. Quality traits performance of bread wheat genotypes under drought and heat stress conditions. *Fresen Env. Bull* 25, 6159–6165.
- Bauer, A., Fanning, C., Enz, J.W., Eberlein, C.V., 1984. Use of growing-degree days to determine spring wheat growth stages. *Ext. Bull. - N. D. State Univ. Agric. Appl. Sci. Coop. Ext. Serv. USA*.
- Baum, M., Tadesse, W., Nachit, M., Abdalla, O., Rajaram, S., Singh, R., Payne, T., Ammar, K., Morgounov, A., Braun, H., 2015. Global Crop Improvement Networks to Bridge Technology Gaps, in: Ogihara, Y., Takumi, S., Handa, H. (Eds.), *Advances in Wheat Genetics: From Genome to Field*. Springer Japan, pp. 387–399.
- Bechtel, D.B., Zayas, I., Kaleikau, L., Pomeranz, Y., 1990. Size-distribution of wheat starch granules during endosperm development. *Cereal Chem.* 67, 59–63.
- Belton, P.S., 1999. Mini Review: On the Elasticity of Wheat Gluten. *J. Cereal Sci.* 29, 103–107. <https://doi.org/10.1006/jcfs.1998.0227>
- Benbrahim, N., Gaboun, F., 2008. Amélioration et stabilisation des rendements du pois en graines et fourrage en zone semi-aride du Maroc. *Fourrag. Versailles* 65–78.

- Bertoglio, J., Martineau, C., 2017. Regard nouveau sur les glucides pour la pratique en Diabétologie. *Médecine Mal. Métaboliques* 11, 564–565. [https://doi.org/10.1016/S1957-2557\(17\)30129-3](https://doi.org/10.1016/S1957-2557(17)30129-3)
- Biliaderis, C.G., Izydorczyk, M.S., Rattan, O., 1995. Effect of arabinoxylans on bread-making quality of wheat flours. *Food Chem.* 53, 165–171. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)90783-4](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)90783-4)
- Bogard, M., Jourdan, M., Allard, V., Martre, P., Perretant, M.R., Ravel, C., Heumez, E., Orford, S., Snape, J., Griffiths, S., Gaju, O., Foulkes, J., Le Gouis, J., 2011. Anthesis date mainly explained correlations between post-anthesis leaf senescence, grain yield, and grain protein concentration in a winter wheat population segregating for flowering time QTLs. *J. Exp. Bot.* 62, 3621–3636. <https://doi.org/10.1093/jxb/err061>
- Bonnot, T., Martre, P., Hatte, V., Dardevet, M., Leroy, P., Bénard, C., Falagán, N., Martin-Magniette, M.L., Deborde, C., Moing, A. and Gibon, Y., 2020. Omics data reveal putative regulators of einkorn grain protein composition under sulfur deficiency. *Plant physiology*, 183(2), pp.501-516.
- Bordes, J., Branlard, G., Oury, F.X., Charmet, G., Balfourier, F., 2008. Agronomic characteristics, grain quality and flour rheology of 372 bread wheats in a worldwide core collection. *J. Cereal Sci.* 48, 569–579. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.05.005>
- Branlard, G., 2009. Les bases génétiques et l'utilisation des marqueurs associés à l'amélioration de la qualité des blés. *Cah. Agric.* 18, 506-511 (1). <https://doi.org/10.1684/agr.2009.0344>
- Branlard, G., Dardevet, M., 1985. Diversity of grain proteins and bread wheat quality: I. Correlation between Gliadin Bands and Flour quality characteristics. *J. Cereal Sci.* 3, 329–343. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(85\)80006-0](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(85)80006-0)
- Branlard, G., Dardevet, M., Saccomano, R., Lagoutte, F., Gourdon, J., 2001. Genetic Diversity of Wheat Storage Proteins and Bread Wheat Quality. *Wheat Glob. Environ.* 157–169. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3674-9_18
- Branlard, G., Faye, A., Rhazi, L., Tahir, A., Lesage, V., Aussenac, T., 2020. Genetic and Environmental Factors Associated to Glutenin Polymer Characteristics of Wheat. *Foods* 9, 683. <https://doi.org/10.3390/foods9050683>
- Branlard, G., Lesage, V.S., Bancel, E., Martre, P., Méleard, B., Rhazi, L., 2015. Coping with Wheat Quality in a Changing Environment: Proteomics Evidence for Stress Caused

- by Environmental Changes, in: Ogihara, Y., Takumi, S., Handa, H. (Eds.), *Advances in Wheat Genetics: From Genome to Field*. Springer Japan, pp. 255–264.
- Brites, C., Carrillo, J.M., 2001. Influence of High Molecular Weight (HMW) and Low Molecular Weight (LMW) Glutenin Subunits Controlled by *Glu-1* and *Glu-3* Loci on Durum Wheat Quality. *Cereal Chem. J.* 78, 59–63. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.1.59>
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., Ball, S., 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. *Int. J. Biol. Macromol.* 23, 85–112. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(98\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(98)00040-3)
- Bustos, D.V., Hasan, A.K., Reynolds, M.P., Calderini, D.F., 2013. Combining high grain number and weight through a DH-population to improve grain yield potential of wheat in high-yielding environments. *Field Crops Res.* 145, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.015>
- Carceller, J.L., 2000. Formation, accumulation, et caractérisation des polymères gluténiques du grain de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) (Thèse doctorale, Toulouse, INPT).
- Carceller, J.L., Aussenac, T., 1999. Accumulation and changes in molecular size distribution of polymeric proteins in developing grains of hexaploid wheats: role of the desiccation phase. *Funct. Plant Biol.* 26, 301–310. <https://doi.org/10.1071/pp99010>
- Carceller, J.-L.; Aussenac, T., 2001. SDS-insoluble glutenin polymer formation in developing grains of hexaploid wheat: Role of the HMW-GS/LMW-GS ratio and the drying rate during ripening. *Aust. J. Plant Physiol.* 28, 193–201.
- Chennafi, H., Makhoulf, M. and Ayadi, A.L., 2010. Réponse des variétés contrastées de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à la date d'implantation sous semis direct en milieu semi-aride. Actes des quatrièmes rencontres méditerranéennes du semis direct. Revue INRAA, NO. Spécial, pp.31-38.
- Chetmi, D., 2009. Etude comparative de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf) et analyse diallèle de leurs hybrides F1 (Thèse doctorale, 2009).
- Chiaramonte, E., Rhazi, L., Aussenac, T., White, D.R., 2012. Amylose and amylopectin in starch by asymmetric flow field-flow fractionation with multi-angle light scattering and refractive index detection (AF4-MALS-RI). *J. Cereal Sci.* 56, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.04.006>
- Chiron, H., 1994. La panification française: historique de la panification (R. Guinet and B. Godon, eds.). Tec Doc Lavoisier Paris 5–44.

- Ciaffi, M.; Tozzi, T.; Borghi, B.; Corbellini, M.; Lafiandra, D., 1994. Effect of heat shock during grain filling on the gluten protein composition of bread wheat. *J. Cereal Sci.* 24, 91–100.
- Clausen, S.K., Frenck, G., Linden, L.G., Mikkelsen, T.N., Lunde, C., Jørgensen, R.B., 2011. Effects of Single and Multifactor Treatments with Elevated Temperature, CO₂ and Ozone on Oilseed Rape and Barley. *J. Agron. Crop Sci.* 197, 442–453. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00478.x>
- Colonna, P. (Institut N. de la R.A.), Buleon, A., 1992. New insights on starch structure and properties. Presented at the 9. International cereal and bread congress., Paris (France)., 1-5 Jun 1992, INRA.
- Cook, B.I., Anchukaitis, K.J., Touchan, R., Meko, D.M., Cook, E.R., 2016. Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 121, 2060–2074. <https://doi.org/10.1002/2015JD023929>
- Cornec, M., Popineau, Y., Lefebvre, J., 1994. Characterisation of Gluten Subfractions by SE-HPLC and Dynamic Rheological Analysis in Shear. *J. Cereal Sci.* 19, 131–139. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1994.1018>
- Cubadda, R., Carcea, M., Pasqui, L.A., 1992. Suitability of the gluten index method for assessing gluten strength in durum wheat and semolina. *Cereal Foods World USA*.
- Daaloul Bouacha, O., Rhazi, L., Aussenac, T., Rezgui, S., Nouaigui, S., 2015. Molecular characterization of storage proteins for selected durum wheat varieties grown in different environments. *J. Cereal Sci.* 61, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.09.005>
- Dacosta, Y., 1986. Wheat gluten and applications. APRIA
- Debaeke, P., Cabelguenne, M., Casals, M.L., Puech, J., 1996. Élaboration du rendement du blé d’hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d’un modèle de simulation de la culture de blé d’hiver en conditions d’alimentation hydrique et azotée variées : Epiephase-Blé. *Agronomie* 16, 25–46. <https://doi.org/10.1051/agro:19960102>
- Denčić, S., Mladenov, N., Kobiljski, B., 2012. Effects of genotype and environment on breadmaking quality in wheat. *Int. J. Plant Prod.* 5, 71–82. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.721>
- Drapon, R., Potus, J., 1990. De la qualité dans la filière blé, farine, pain. II: Les composantes biophysicochimiques de la qualité: la filière blé, farine. *Ind. Cérééal.* 9–13.

- Dupont, F.M., Altenbach, S.B., 2003. Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *J. Cereal Sci.* 38, 133–146. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00030-4)
- Dupont, F.M., Hurkman, W.J., Vensel, W.H., Tanaka, C., Kothari, K.M., Chung, O.K., Altenbach, S.B., 2006. Protein accumulation and composition in wheat grains: Effects of mineral nutrients and high temperature. *Eur. J. Agron., Modelling Quality Traits and Their Genetic Variability for Wheat* 25, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.003>
- Eliard, J.-L., 1974. *Manuel d'agriculture générale: bases de la production végétale*. J.-B. Ballière, Paris.
- Eliasson, A.C., 1996. *Carbohydrates in food* (Vol. 159). CRC press.
- Eliasson, A.-C., Gudmundsson, M., Svensson, G., 1995. Thermal behaviour of wheat starch in flour — Relation to flour quality. *LWT - Food Sci. Technol.* 28, 227–235. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)91580-X](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)91580-X)
- El-Kareem, T., El-Saidy, A.E., 2011. Evaluation of yield and grain quality of some bread wheat genotypes under normal irrigation and drought stress conditions in calcareous soils. *J. Biol. Sci.* 11, 156–164.
- Ewart, J. a. D., 1972. A modified hypothesis for the structure and rheology of glutelins. *J. Sci. Food Agric.* 23, 687–699. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740230604>
- FAO, F., 2016. *Biannual report on global food markets*. Rome FAO June.
- FAOSTAT, 2019. URL <http://www.fao.org/faostat/fr/#compare>
- Farrar, J.F., 1993. Carbon partitioning, in: Hall, D.O., Scurlock, J.M.O., Bolhàr-Nordenkampf, H.R., Leegood, R.C., Long, S.P. (Eds.), *Photosynthesis and Production in a Changing Environment: A Field and Laboratory Manual*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 232–246. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1566-7_15
- Feillet, P., 2000. *Le grain de blé: Composition et utilisation*. Editions Quae.
- Fellahi, Z., Hannachi, A., Ferras, K., Oulmi, A., Boutalbi, W., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., 2017. Analysis of the phenotypic variability of twenty f 3 biparental populations of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) evaluated under semi-arid environment. *J. Fundam. Appl. Sci.* 9, 102-118–118. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i1.8>

- Fenn, D., Lukow, O.M., Bushuk, W., DePauw, R.M., 1994. Milling and baking quality of 1BL/1RS translocation wheats. I. Effects of genotype and environment. *Cereal Chem. USA*.
- Ferreira, M.S.L., Samson, M.-F., Bonicel, J., Morel, M.-H., 2012. Relationship between endosperm cells redox homeostasis and glutenin polymers assembly in developing durum wheat grain. *Plant Physiol. Biochem.* 61, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.08.015>
- Finney, K.F., 1948. Loaf volume and protein content of hard winter and spring wheat. *Cereal Chem* 25, 291–312.
- Fischer, R.A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci. Camb.* 105, 447–461. <https://doi.org/10.1017/S0021859600056495>
- Flagella, Z., Giuliani, M.M., Giuzio, L., Volpi, C., Masci, S., 2010. Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. *Eur. J. Agron.* 33, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.05.006>
- French, D., 1984. Organization of starch granules, in: *Starch: Chemistry and Technology*. Elsevier, pp. 183–247.
- Gallant, D.J., Bouchet, B., Baldwin, P.M., 1997. Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization. *Carbohydr. Polym.* 32, 177–191. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(97\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(97)00008-8)
- Gan, Z., Ellis, P.R., Schofield, J.D., 1995. Gas Cell Stabilisation and Gas Retention in Wheat Bread Dough. *J. Cereal Sci.* 21, 215–230. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1995.0025>
- Gate, P., 2010. L'élaboration de la teneur en protéines du grain: une remobilisation de l'azote dans le grain. *Perspect. Agric.* 62–63.
- Gate, P., 1995. *Ecophysiologie du blé*. Technique et Doc.-Lavoisier, Paris, France.
- Geoffroy, R., 1950. *Le blé, la farine, le pain*.
- Godon, B., Loisel, W., 1984. *Guide pratique d'analyses dans les industries des céréas*. Technique & Documentation, Lavoisier. APRIA.
- Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W.S., Courtin, C.M., Gebruers, K., Delcour, J.A., 2005. Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends Food Sci. Technol.*, Second International Symposium on Sourdough - From Fundamentals to Applications 16, 12–30. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.011>

- Gooding, M.J., Ellis, R.H., Shewry, P.R., Schofield, J.D., 2003. Effects of Restricted Water Availability and Increased Temperature on the Grain Filling, Drying and Quality of Winter Wheat. *J. Cereal Sci.* 37, 295–309. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0501>
- Goytino, B., Gay, J.P., 1991. *Physiologie et production du maïs*, INRA, Paris, France, pp. 207-214. <https://www.feedipedia.org/node/21583>
- Grace, J., 1988. Temperature as a determinant of plant productivity. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 42, 91–107.
- Gray, J.A., Bemiller, J.N., 2003. Bread Staling: Molecular Basis and Control. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2, 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00011.x>
- Graybosch, R.A., 1998. Waxy wheats: Origin, properties, and prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 9(4), pp.135-142. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00034-X)
- Graybosch, R.A., Peterson, C.J., Baenziger, P.S., Shelton, D.R., 1995. Environmental modification of hard red winter wheat flour protein composition. *J. Cereal Sci.* 22, 45–51. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(05\)80006-2](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(05)80006-2)
- Graybosch, R.A., Souza, E., Berzonsky, W., Baenziger, P.S., Chung, O., 2003. Functional properties of waxy wheat flours: genotypic and environmental effects. *J. Cereal Sci.* 38, 69–76. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(02\)00139-X](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(02)00139-X)
- Gupta, R.B., Batey, I.L., MacRitchie, F., 1992. Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours. *Cereal Chem. USA*.
- Gupta, R.B., Masci, S., Lafiandra, D., Bariana, H.S., MacRitchie, F., 1996. Accumulation of protein subunits and their polymers in developing grains of hexaploid wheats. *J. Exp. Bot.* 47, 1377–1385. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.9.1377>
- Gupta, R.B., Shepherd, K.W., 1990. Two-step one-dimensional SDS-PAGE analysis of LMW subunits of glutelin. *Theor. Appl. Genet.* 80, 65–74. <https://doi.org/10.1007/BF00224017>
- Hafid, R.E., Smith, D.H., Karrou, M., Samir, K., 1998. Physiological attributes associated with early-season drought resistance in spring durum wheat cultivars. *Can. J. Plant Sci.* 78, 227–237. <https://doi.org/10.4141/P97-070>
- Halford, N., Field, J., Blair, H., Urwin, P., Moore, K., Robert, L., Thompson, R., Flavell, R., Tatham, A., Shewry, P., 1992. Analysis of HMW glutenin subunits encoded by chromosome 1A of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) indicates quantitative effects on grain quality. *Theor. Appl. Genet.* 83, 373–378.

- Hanchinal, R., Tandon, J., Salimath, P., 1994. Variation and adaptation of wheat varieties for heat tolerance in Peninsular India. Presented at the Wheat in Heat Stressed Environments: Irrigated, Dry Areas and Rice Farming Systems. Proceedings of the International Conference, Wheat in Hot, Dry, Irrigated Environments, pp. 175–183.
- Harlan, J.R., Zohary, D., 1966. Distribution of Wild Wheats and Barley. *Science* 153, 1074–1080. <https://doi.org/10.1126/science.153.3740.1074>
- Hayman, D., Hosene, R.C., Faubion, J.M., 1998. Bread Crumb Grain Development During Baking. *Cereal Chem.* 75, 577–580. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.5.577>
- Hazen, S.P., Ng, P.K.W., Ward, R.W., 1997. Variation in Grain Functional Quality for Soft Winter Wheat. *Crop Sci.* 37, 1086–1093. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700040009x>
- Hizukuri, S., Takeda, Y., Yasuda, M., Suzuki, A., 1981. Multi-branched nature of amylose and the action of debranching enzymes. *Carbohydr. Res.* 94, 205–213. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)80718-1](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)80718-1)
- Hosene, R.C., 1994. Principles of cereal science and technology. *Princ. Cereal Sci. Technol.*
- Hosene, R.C., Finney, K.F., Pomeranz, Y., Shogren, M.D., 1971. Functional (breadmaking) and biochemical properties of wheat flour components. VIII. Starch. *Cereal Chem.*
- Houghton, R.A., 2010. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change? *Tellus B* 62, 337–351. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00473.x>
- Huebner, F.R., Bietz, J.A., 1985. Detection of quality differences among wheats by high-performance liquid chromatography. *J. Chromatogr. A, Fourth International Symposium on High-Performance Liquid Chromatography of Proteins, Peptides and Polynucleotides* 327, 333–342. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)81662-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)81662-9)
- Hug-Iten, S., Handschin, S., Conde-Petit, B., Escher, F., 1999. Changes in Starch Microstructure on Baking and Staling of Wheat Bread. *LWT - Food Sci. Technol.* 32, 255–260. <https://doi.org/10.1006/fstl.1999.0544>
- Hurkman, W.J., McCue, K.F., Altenbach, S.B., Korn, A., Tanaka, C.K., Kothari, K.M., Johnson, E.L., Bechtel, D.B., Wilson, J.D., Anderson, O.D., DuPont, F.M., 2003. Effect of temperature on expression of genes encoding enzymes for starch biosynthesis in developing wheat endosperm. *Plant Sci.* 164, 873–881. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00076-1)

- Indexmundi, 2020. Lebanon Wheat Production by Year (1000 MT). <https://www.indexmundi.com/agriculture/?country=lb&commodity=wheat&graph> (accessed 3.10.20).
- Iqbal, Z., Pasha, I., Abrar, M., Masih, S., Hanif, M.S., 2015. Physico-chemical, functional and rheological properties of wheat varieties. *J Agric Res* 16.
- IRAL, 2015. Rapport annuel.
- IRAL, 2014. Rapport annuel.
- IRAL, 2010. Rapport annuel.
- Izydorczyk, M.S., Biliaderis, C.G., 1995. Cereal arabinoxylans: advances in structure and physicochemical properties. *Carbohydr. Polym., Frontiers in Carbohydrate Research*- 4 28, 33–48. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0144-8617(95)00077-1)
- Jenkins, P.J., Cameron, R.E., Donald, A.M., 2006. A Universal Feature in the Structure of Starch Granules from Different Botanical Sources. *Starch - Stärke* 45, 417–420. <https://doi.org/10.1002/star.19930451202>
- JMares, D., Stone, B.A., 1973. Studies on Wheat Endosperm I. Chemical Composition and Ultrastructure of the Cell Walls. *Aust. J. Biol. Sci.* 26, 793–812. <https://doi.org/10.1071/bi9730793>
- Joly, M., 2006. L'amidon natif du grain de blé : un composé naturel à valoriser par la connaissance de ses propriétés techno-fonctionnelles? Livre Blanc "Céréales" F.U.S.A. et CRA-W Gembloux.
- Kalichevsky, M.T., Ring, S.G., 1987. Incompatibility of amylose and amylopectin in aqueous solution. *Carbohydr. Res.* 162, 323–328. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(87\)80229-X](https://doi.org/10.1016/0008-6215(87)80229-X)
- Karimi, M., Siddique, K., 1991. Crop growth and relative growth rates of old and modern wheat cultivars. *Aust. J. Agric. Res.* 42, 13. <https://doi.org/10.1071/AR9910013>
- Karlsson, R., Olered, R., Eliasson, A.-C., 2006. Changes in Starch Granule Size Distribution and Starch Gelatinization Properties During Development and Maturation of Wheat, Barley and Rye. *Starch - Stärke* 35, 335–340. <https://doi.org/10.1002/star.19830351002>
- Kent-Jones, D.W., Amos, A.J., 1947. *Modern cereal chemistry*.
- Kimurto, P.K., Kinyua, M.G., Njoroge, J.M., 2003. Response of bread wheat genotypes to drought simulation under a mobile rain shelter in Kenya. *Afr. Crop Sci. J.* 11, 225–234. <https://doi.org/10.4314/acsj.v11i3.27572>

- Kleijer, G., 2002. Sélection des variétés de blé pour la qualité boulangère. *Rev. Suisse Agric* 34, 253–259.
- Laker, K., 2015. Fractionnement, caractérisation électrophorétique et quantification des albumines-globulines, des gliadines et des gluténines solubles de farines de blés tendres Algériens, relation entre la composition protéique et les caractéristiques technologiques. (Thèse doctorale). ENSA.
- Lalonde, S., Morse, D., Saini, H.S., 1997. Expression of a wheat ADP-glucose pyrophosphorylase gene during development of normal and water-stress-affected anthers. *Plant Mol. Biol.* 34, 445–453. <https://doi.org/10.1023/A:1005882118506>
- Laperche, A., Devienne-Barret, F., Maury, O., Gouis, J.L., Ney, B., 2006. A simplified conceptual model of carbon/nitrogen functioning for QTL analysis of winter wheat adaptation to nitrogen deficiency. *Theor. Appl. Genet.* 113, 1131–1146. <https://doi.org/10.1007/s00122-006-0373-4>
- Latiri, K., Lhomme, J.P., Annabi, M., Setter, T.L., 2010. Wheat production in Tunisia: Progress, inter-annual variability and relation to rainfall. *Eur. J. Agron.* 33, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.02.004>
- Lavelli, V., Guerrieri, N., Cerletti, P., 1996. Controlled reduction study of modifications induced by gradual heating in gluten proteins. *J. Agric. Food Chem.* 44, 2549–2555.
- Lawlor, D.W., Day, W., Johnston, A.E., Legg, B.J., Parkinson, K.J., 1981. Growth of spring barley under drought: crop development, photosynthesis, dry-matter accumulation and nutrient content. *J. Agric. Sci.* 96, 167–186. <https://doi.org/10.1017/S002185960003197X>
- Lee, M.-R., Swanson, B.G., Baik, B.-K., 2001. Influence of Amylose Content on Properties of Wheat Starch and Breadmaking Quality of Starch and Gluten Blends. *Cereal Chem.* 78, 701–706. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.6.701>
- Lehmann, N., Finger, R., Klein, T., Calanca, P., Walter, A., 2013. Adapting crop management practices to climate change: Modeling optimal solutions at the field scale. *Agric. Syst.* 117, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.12.011>
- Lemelin, E., Branlard, G., Salvo, L., Lein, V., Aussenac, T., Daydé, J., 2005. Breadmaking stability of wheat flours: Relation between mixing properties and molecular weight distribution of polymeric glutenins. *J. Cereal Sci.* 42, 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.03.009>

- Lerner, S.E., Seghezzo, M.L., Molfese, E.R., Ponzio, N.R., Cogliatti, M., Rogers, W.J., 2006. N- and S-fertiliser effects on grain composition, industrial quality and end-use in durum wheat. *J. Cereal Sci.* 44, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.12.006>
- Li, Z., Mouille, G., Kosar-Hashemi, B., Rahman, S., Clarke, B., Gale, K.R., Appels, R., 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 Physiol.* 123, 613–624. <https://doi.org/10.1104/pp.123.2.613>
- Liu, P., Guo, W., Jiang, Z., Pu, H., Feng, C., Zhu, X., Peng, Y., Kuang, A., Little, C.R., 2011. Effects of high temperature after anthesis on starch granules in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agric. Sci.* <https://doi.org/10.1017/S0021859610001024>
- Luo, C., Branlard, G., Griffin, W., McNeil, D., 2000. The Effect of Nitrogen and Sulphur Fertilisation and their Interaction with Genotype on Wheat Glutenins and Quality Parameters. *J. Cereal Sci.* 31, 185–194. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1999.0298>
- MacGregor, E.A., Janeček, Š., Svensson, B., 2001. Relationship of sequence and structure to specificity in the α -amylase family of enzymes. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Protein Struct. Mol. Enzymol.* 1546, 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0167-4838\(00\)00302-2](https://doi.org/10.1016/S0167-4838(00)00302-2)
- Macleod, L.C., Duffus, C.M., 1988. Temperature effects on starch granules in developing barley grains. *J. Cereal Sci.* 8, 29–37. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(88\)80046-8](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(88)80046-8)
- Macritchie, F., 1992. Physicochemical Properties of Wheat Proteins in Relation to Functionality, in: Kinsella, J.E. (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press, pp. 1–87. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(08\)60104-7](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(08)60104-7)
- MacRitchie, F., Lafiandra, D., 1997. Structure-function relationships of wheat proteins.
- Madeira, R.A.V., Fernandes, A.F., Reis, W.P., Carvalho, C.W.P. de, Pereira, J., 2015. Technological characterization and classification of wheat lineages cultivated in the Cerrado Mineiro. *Ciênc. E Agrotecnologia* 39, 283–290. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542015000300010>
- Makadho, J.M., 1996. Potential effects of climate change on corn production in Zimbabwe. *Clim. Res.* 6, 147–151.
- Makawi, A.B., Mahmood, M.I., Hassan, H.A.R., Ahmed, I.A.M., 2013. Grains Quality Characteristics of Local Wheat (*Triticum aestivum*) Cultivars Grown at Khartoum State, Sudan. *Int. J. Life Sci.* 7, 12–16. <https://doi.org/10.3126/ijls.v7i1.8061>

- Makino, A., 2011. Focus Issue on Enhancing Photosynthesis: Photosynthesis, Grain Yield, and Nitrogen Utilization in Rice and Wheat. *Plant Physiol.* 155, 125. <https://doi.org/10.1104/pp.110.165076>
- Malik, A.H., Kuktaite, R., Johansson, E., 2013. Combined effect of genetic and environmental factors on the accumulation of proteins in the wheat grain and their relationship to bread-making quality. *J. Cereal Sci., EuroCereal 2011* 57, 170–174. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.09.017>
- Malvoisin, P., 1984. Organogenèse et croissance du maître-brin du blé tendre (*Triticum aestivum*) du semis à la floraison. II. - Contrôle des relations entre la croissance et la vascularisation de la tige et des feuilles. Essai de modélisation. *Agronomie* 4, 587–596. <https://doi.org/10.1051/agro:19840701>
- Marchylo, B.A., Dexter, J.E., Clarke, F.R., Clarke, J.M., Preston, K.R., 2001. Relationships among bread-making quality, gluten strength, physical dough properties, and pasta cooking quality for some Canadian durum wheat genotypes. *Can. J. Plant Sci.* 81, 611–620. <https://doi.org/10.4141/P00-133>
- Mares, D., Mrva, K., 2008. Genetic variation for quality traits in synthetic wheat germplasm. *Aust. J. Agric. Res.* 59, 406. <https://doi.org/10.1071/AR07224>
- Martre, P., Porter, J.R., Jamieson, P.D., Triboï, E., 2003. Modeling Grain Nitrogen Accumulation and Protein Composition to Understand the Sink/Source Regulations of Nitrogen Remobilization for Wheat. *Plant Physiol.* 133, 1959. <https://doi.org/10.1104/pp.103.030585>
- Massaux, C., Bodson, B., Lenartz, J., Sindic, M., Sinnaeve, G., Dardenne, P., Falisse, A., 2006. L'amidon natif du grain de blé : un composé naturel à valoriser par la connaissance de ses propriétés techno-fonctionnelles ? 7.
- Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Sahraoui, A.H., Harkati, N., 2006. Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride. *Sci. Chang. Planétaires Sécher.* 17, 507–513. <https://doi.org/10.1684/sec.2006.0054>
- Meleard, B., 2000. Le rôle des protéines en panification 14.
- Meynard, J.-M., David, G., 1992. Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures. *Cah. Agric.* 1, 9-19 (1).
- Mikhaylenko, G.G., Czuchajowska, Z., Baik, B.-K., Kidwell, K.K., 2000. Environmental Influences on Flour Composition, Dough Rheology, and Baking Quality of Spring Wheat. *Cereal Chem.* 77, 507–511. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.4.507>

- Miles, M.J., Morris, V.J., Orford, P.D., Ring, S.G., 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohydr. Res.* 135, 271–281. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)90778-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)90778-X)
- Moeller, C., Evers, J.B., Rebetzke, G., 2014. Canopy architectural and physiological characterization of near-isogenic wheat lines differing in the tiller inhibition gene *tin*. *Front. Plant Sci.* 5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00617>
- Mogensen, V.O., 1985. Growth Rate of Grains and Grain Yield of Wheat in Relation to Drought. *Acta Agric. Scand.* 35, 353–360. <https://doi.org/10.1080/00015128509442046>
- Mogensen, V.O., Jensen, H.E., 1989. The concept of stress days in modelling crop yield response to water stress. *Agric. Manag. Water Resour. Cash Altern. Prod. Syst. Luxem-Bourg Comm. Eur. Communiti-Es* 12–22.
- Monpara, B.A., 2011. Grain filling period as a measure of yield improvement in bread wheat. *Crop Improv.*
- Monteny, B., 1970. Bilans hydriques et énergétiques d'une culture de blé en région semi-aride : problèmes d'irrigation et de productivité 37.
- Moon, M.H., Giddings, J.C., 1993. Rapid Separation and Measurement of Particle Size Distribution of Starch Granules by Sedimentation/Steric Field - Flow Fractionation. *J. Food Sci.* 58, 1166–1171. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb06139.x>
- Moradi, V., Khaneghah, A.M., Fallah, A., Akbarirad, H., 2016. Rheological properties of wheat flour with different extraction rate. *Int. Food Res. J.* 23, 1056.
- Moral, L.F.G. del, Rharrabti, Y., Martos, V., Royo, C., 2007. Environmentally Induced Changes in Amino Acid Composition in the Grain of Durum Wheat Grown under Different Water and Temperature Regimes in a Mediterranean Environment. <https://doi.org/10.1021/jf063094q>
- Morgan, K.R., Hutt, L., Gerrard, J., Every, D., Ross, M., Gilpin, M., 2006. Staling in Starch Breads: The Effect of Antistaling α - Amylase. *Starch - Stärke* 49, 54–59. <https://doi.org/10.1002/star.19970490204>
- Morrison, W.R., Gadan, H., 1987. The amylose and lipid contents of starch granules in developing wheat endosperm. *J. Cereal Sci.* 5, 263–275. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(87\)80027-9](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(87)80027-9)
- Moule, C., 1971. *Céréales. La Maison rustique.*

- Mutwali, N., 2011. Quality of wheat cultivars grown in different locations of Sudan for bread making.
- Naceur, B., Nailly, M., Selmi, M., 1999. Effet d'un déficit hydrique survenant à différents stades de développement du blé sur l'humidité du sol, la physiologie de la plante et sur la composante du rendement. *Méditerranée* 2, 53–60.
- Oikonomou, N.A., Bakalis, S., Rahman, M.S., Krokida, M.K., 2015. Gluten Index for Wheat Products: Main Variables in Affecting the Value and Nonlinear Regression Model. *Int. J. Food Prop.* 18, 1–11. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.772198>
- Ollier, C., Poiree, M., 1981. Irrigation. Les reseaux d'irrigation. Théorie, technique et économie des arrosages. Eyrolles, Paris.
- Osborne, T.B., 1907. The Proteins of the Wheat Kernel. The Carnegie Institution of Washington. *Science* 26 (677), 865-865.
- Osborne, T.B., 1924. The vegetable proteins. 154p. London: Longmans Green and Company.
- O'Toole, J.C., Stockle, C.O., 1987. The role of conceptual and simulation modelling in plant breeding, in: *Int. Symp. on Improving Winter Cereals under Temperature and Soil Salinity Stresses*. pp. 26–29.
- Oury, F.-X., Chiron, H., Pichon, M., Giraud, A., Bérard, P., Faye, A., Brancourt-Hulmel, M., Rousset, M., Kosutic, M., Dupuy, R., Gourdon, J., Lagoutte, F., 1999. Reliability of indirect selection in determining the quality of bread wheat for French bread-baking. *Agronomie* 19, 621–634. <https://doi.org/10.1051/agro:19990706>
- Oweis, T., Pala, M., Ryan, J., 1999. Management alternatives for improved durum wheat production under supplemental irrigation in Syria. *Eur. J. Agron.* 11, 255–266. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(99\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00036-2)
- Panozzo, J.F., Eagles, H.A., 2000. Cultivar and environmental effects on quality characters in wheat. II. Protein. *Aust. J. Agric. Res.* 51, 629–636. <https://doi.org/10.1071/ar99137>
- Panozzo, J.F., Eagles, H.A., Wootton, M., 2001. Changes in protein composition during grain development in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 52, 485–493. <https://doi.org/10.1071/ar00101>
- Park, S.-H., Chung, O.K., Seib, P.A., 2005. Effects of Varying Weight Ratios of Large and Small Wheat Starch Granules on Experimental Straight-Dough Bread. *Cereal Chem. J.* 82, 166–172. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0166>

- Park, S.-H., Wilson, J.D., Seabourn, B.W., 2009. Starch granule size distribution of hard red winter and hard red spring wheat: Its effects on mixing and breadmaking quality. *J. Cereal Sci.* 49, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.07.011>
- Parker, R., Ring, S.G., 2001. Aspects of the Physical Chemistry of Starch. *J. Cereal Sci.* 34, 1–17. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2000.0402>
- Perlin, A.S., 1951. Perlin, A.S., 1951. Structure of the soluble pentosans of wheat flours. *Cereal Chemistry*, 28(5), 382-39. <https://eurekamag.com/research/025/534/025534098.php>
- Peterson, C.J., Graybosch, R.A., Baenziger, P.S., Grombacher, A.W., 1992. Genotype and Environment Effects on Quality Characteristics of Hard Red Winter Wheat. *Crop Sci.* 32, 98–103. <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200010022x>
- Picard, D., 1991. Physiologie et production du maïs. *La vie du maïs: Pau (France)*, 13-15 novembre 1990. Editions Quae.
- Polley, H.W., Johnson, H.B., Fay, P.A., Sanabria, J., 2007. Initial response of evapotranspiration from tallgrass prairie vegetation to CO₂ at subambient to elevated concentrations. *Funct. Ecol.* 0. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01351.x>
- Rennenberg, H., 1980. Glutathione metabolism and possible biological roles in higher plants. *Phytochemistry, An International Journal of Plant Biochemistry* 21, 2771–2781. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(80\)85045-X](https://doi.org/10.1016/0031-9422(80)85045-X)
- Rharrabti, Y., Villegas, D., Royo, C., Martos-Núñez, V., García del Moral, L.F., 2003. Durum wheat quality in Mediterranean environments: II. Influence of climatic variables and relationships between quality parameters. *Field Crops Res.* 80, 133–140. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00177-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00177-6)
- Rhazi, L., Bodard, A.-L., Fathollahi, B., Aussenac, T., 2009. High throughput microchip-based separation and quantitation of high-molecular-weight glutenin subunits. *J. Cereal Sci.* 49, 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.11.004>
- Rhazi, L., Cazalis, R., Aussenac, T., 2003. Sulfhydryl-disulfide changes in storage proteins of developing wheat grain: influence on the SDS-unextractable glutenin polymer formation. *J. Cereal Sci.* 38, 3–13. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00019-5)
- Rhazi, L., Méléard, B., Daaloul, O., Grignon, G., Branlard, G., Aussenac, T., 2021. Genetic and Environmental Variation in Starch Content, Starch Granule Distribution and Starch Polymer Molecular Characteristics of French Bread Wheat. *Foods* 10, 205. <https://doi.org/10.3390/foods10020205>

- Richards, R., Rebetzke, G., Van Herwaarden, A.F., Duggan, B., Condon, A., 1997. Improving yields in rainfed environments through physiological plant breeding. *Ann. Arid Zone* 36.
- Rosenzweig, C., Tubiello, F.N., Goldberg, R., Mills, E., Bloomfield, J., 2002. Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change. *Glob. Environ. Change* 12, 197–202. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(02\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00008-0)
- Roussel, P., Chiron, H., Paillard, G., 2002. Les pains français: évolution, qualité, production. Maé-Erti.
- Rousset, M., Triboi, E., Branlard, G., Godon, B., 1985. Influence du génotype et du milieu sur les tests d'appréciation de la valeur d'utilisation du blé tendre (*Triticum aestivum* em. Thell.) dans les industries de cuisson. *Agronomie* 5, 653–663. <https://doi.org/10.1051/agro:19850712>
- Sahin, M., Akcacik, A.G., Aydogan, S., Hamzaoglu, S., Demir, B., 2019. Evaluation of grain yield, some quality traits and farinograph parameters in bread wheat genotypes grown in irrigated and rainfed. *Journal of global innovation in agricultural and social sciences* 7, 119–123.
- Sayed, H.I., Gadallah, A.M., 1983. Variation in dry matter and grain filling characteristics in wheat cultivars. *Field Crops Res.* 7, 61–71. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(83\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0378-4290(83)90007-2)
- Schofield, J.D., 1994. Wheat proteins: structure and functionality in milling and breadmaking. *Wheat* 73–106. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2672-8_7
- Sharma, S.C., Singh, I., 1991. Path coefficient analysis of harvest index and its related traits in bread wheat. *Haryana J Agron* 7, 49–55.
- Shewry, P.R., Halford, N.G., 2002. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *J. Exp. Bot.* 53, 947–958. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.947>
- Shewry, P.R., Halford, N.G., Lafiandra, D., 2003a. Genetics of Wheat Gluten Proteins, in: Hall, J.C., Dunlap, J.C., Friedmann, T. (Eds.), *Advances in Genetics*. Academic Press, pp. 111–184. [https://doi.org/10.1016/S0065-2660\(03\)01003-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2660(03)01003-4)
- Shewry, P.R., Halford, N.G., Tatham, A.S., Popineau, Y., Lafiandra, D., Belton, P.S., 2003b. The high molecular weight subunits of wheat glutenin and their role in determining wheat processing properties, in: *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press, pp. 219–302. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(03\)45006-7](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(03)45006-7)

- Shewry, P.R., Mifflin, B.J., 1985. Seed storage proteins of economically important cereals. *Adv. Cereal Sci. Technol. USA*.
- Shewry, P.R., Mitchell, R.A.C., Tosi, P., Wan, Y., Underwood, C., Lovegrove, A., Freeman, J., Toole, G.A., Mills, E.N.C., Ward, J.L., 2012. An integrated study of grain development of wheat (cv. Hereward). *J. Cereal Sci., Cereal Grain Development: Molecular Mechanisms and Impacts on Grain Composition and Functionality* 56, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.11.007>
- Shewry, P.R., Napier, J.A., Tatham, A.S., 1995. Seed storage proteins: structures and biosynthesis. *Plant Cell* 7, 945. <https://doi.org/10.1105/tpc.7.7.945>
- Shewry, P.R., Tatham, A.S., 1997. Disulphide Bonds in Wheat Gluten Proteins. *J. Cereal Sci.* 25, 207–227. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0100>
- Shewry, P.R., Tatham, A.S., Forde, J., Kreis, M., Mifflin, B.J., 1986. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: A reassessment. *J. Cereal Sci.* 4, 97–106. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(86\)80012-1](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(86)80012-1)
- Shi, Y.-C., Seib, P.A., Bernardin, J.E., 1994. Effects of temperature during grain-filling on starches from six wheat cultivars. *Cereal Chem.* 71, 369–383.
- Shibanuma, K., Takeda, Y., Hizukuri, S., Shibata, S., 1994. Molecular structures of some wheat starches. *Carbohydr. Polym.* 25, 111–116. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(94\)90146-5](https://doi.org/10.1016/0144-8617(94)90146-5)
- Shinde, S.V., Nelson, J.E., Huber, K.C., 2003. Soft Wheat Starch Pasting Behavior in Relation to A- and B-type Granule Content and Composition. *Cereal Chem. J.* 80, 91–98. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2003.80.1.91>
- Simoès Larráz Ferreira, M., 2011. Dynamique d'assemblage des protéines de réserve et du remplissage du grain de blé dur (Thèse de doctorat). Montpellier, SupAgro.
- Singh, H., MacRitchie, F., 2001. Application of Polymer Science to Properties of Gluten. *J. Cereal Sci.* 33, 231–243. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2000.0360>
- Singh, N.K., Donovan, R., MacRitchie, F., 1990. Use of sonication and size-exclusion high-performance liquid chromatography in the study of wheat flour proteins. II. Relative quantity of glutenin as a measure of breadmaking quality. *Cereal Chem. USA*.
- Singh, N. K., & Shepherd, K. W., 1988. Linkage mapping of genes controlling endosperm storage proteins in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 75(4), 628-641.

- Solomon, K.F., Smit, H.A., Malan, E., Du Toit, W.J., 2012. Parametric model based assessment of genotype×environment interactions for grain yield in durum wheat under irrigation. *Int. J. Plant Prod.* 2, 23–36. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.588>
- Soltner, D., 2003. Les bases de la production végétale.
- Southan, M., MacRitchie, F., 1999. Molecular Weight Distribution of Wheat Proteins. *Cereal Chem.* 76, 827–836. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.6.827>
- Stone, B., Morell, M., 2009. Carbohydrates: Wheat, chemistry and technology.
- Surget, A., Barron, C., 2005. Histologie du grain de blé. *Histol. Grain Blé* 3–7.
- Surma, M., Adamski, T., Banaszak, Z., Kaczmarek, Z., Kuczyńska, H., Majcher, M., Ługowska, B., Obuchowski, W., Salmanowicz, B., Krystkowiak, K., 2012. Effect of Genotype, Environment and Their Interaction on Quality Parameters of Wheat Breeding Lines of Diverse Grain Hardness. *Plant Prod. Sci.* 15, 192–203. <https://doi.org/10.1626/pp.15.192>
- Svihus, B., Uhlen, A.K., Harstad, O.M., 2005. Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: A review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 122, 303–320. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.02.025>
- Taulemesse, F., 2015. Analyse écophysiological et génétique de l'absorption d'azote post-floraison chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) en relation avec la concentration en protéines des grains 194.
- Tester, R.F., Debon, S.J.J., 2000. Annealing of starch — a review. *Int. J. Biol. Macromol.* 27, 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(99\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(99)00121-X)
- Tester, R.F., Karkalas, J., 2001. The Effects of Environmental Conditions on the Structural Features and Physico-chemical Properties of Starches. *Starch - Stärke* 53, 513–519. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200110\)53:10<513::AID-STAR513>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200110)53:10<513::AID-STAR513>3.0.CO;2-5)
- Tewolde, H., Fernandez, C.J., Erickson, C.A., 2006. Wheat Cultivars Adapted to Post-Heading High Temperature Stress. *J. Agron. Crop Sci.* 192, 111–120. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2006.00189.x>
- Thitisaksakul, M., Jiménez, R.C., Arias, M.C., Beckles, D.M., 2012. Effects of environmental factors on cereal starch biosynthesis and composition. *J. Cereal Sci., Cereal Grain Development: Molecular Mechanisms and Impacts on Grain Composition and Functionality* 56, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.04.002>

- Toyota, K.; Tamura, M.; Ohdan, T.; Nakamura, Y., 2006. Expression Profiling of Starch Metabolism-Related Plastidic Translocator Genes in Rice. *Planta* 223, 248–257, doi:10.1007/s00425-005-0128-5.
- Triboi, E., 1990. Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre (*Triticum aestivum* em Thell). *Agronomie* 10, 191–200. <https://doi.org/10.1051/agro:19900302>
- Veraverbeke, W.S., Courtin, C.M., Verbruggen, I.M., Delcour, J.A., 1999. Factors Governing Levels and Composition of the Sodium Dodecyl Sulphate-Unextractable Glutenin Polymers During Straight Dough Breadmaking. *J. Cereal Sci.* 29, 129–138. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1998.0232>
- Veraverbeke, W.S., Delcour, J.A., 2010. Wheat Protein Composition and Properties of Wheat Glutenin in Relation to Breadmaking Functionality. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* <https://doi.org/10.1080/10408690290825510>
- Vilain, M., 1987. Production végétale T.1, les composantes de la production. Ed. J.B. Balliere et fils. Paris, 403 p.
- Vinkx, C., Van Nieuwenhove, C., Delcour, J., 1991. Physicochemical and Functional-Properties of Rye Nonstarch Polysaccharides. 3. Oxidative Gelation of a Fraction Containing Water-Soluble Pentosans and Proteins. *Cereal Chem.* 68, 617–622.
- Waigh, T.A., Gidley, M.J., Komanshek, B.U., Donald, A.M., 2000. The phase transformations in starch during gelatinisation: a liquid crystalline approach. *Carbohydr. Res.* 328, 165–176. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)00098-7)
- Walker, C., Hazelton, J., 1996. Dough rheological tests. *Cereal Foods World* 41, 23–28.
- Wall, J.S., 1979. The role of wheat proteins in determining baking quality. *Recent Adv. Biochem. Cereals* 275–311.
- Wang, M., 2003. Effect of Pentosans on Gluten Formation and Properties. Wageningen University and Research.
- Wang, X., Cai, J., Liu, F., Jin, M., Yu, H., Jiang, D., Wollenweber, B., Dai, T., Cao, W., 2012. Pre-anthesis high temperature acclimation alleviates the negative effects of post-anthesis heat stress on stem stored carbohydrates remobilization and grain starch accumulation in wheat. *J. Cereal Sci.* 55, 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.01.004>
- Wang, Y.G., Khan, K., Hareland, G., Nygard, G., 2006. Quantitative Glutenin Composition from Gel Electrophoresis of Flour Mill Streams and Relationship to Breadmaking Quality. *Cereal Chem. J.* 83, 293–299. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0293>

- Weegels, P.L., de Groot, A.M.G., Verhoek, J.A., Hamer, R.J., 1994. Effects on Gluten of Heating at Different Moisture Contents. II. Changes in Physico-Chemical Properties and Secondary Structure. *J. Cereal Sci.* 19, 39–47. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1994.1006>
- Weegels, P.L., Hamer, R.J., Schofield, J.D., 1996. Functional Properties of Wheat Glutenin. *J. Cereal Sci.* 23, 1–17. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0001>
- Wiegand, C.L., Cuellar, J.A., 1981. Duration of Grain Filling and Kernel Weight of Wheat as Affected by Temperature 1. *Crop Sci.* 21, 95–101. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X001100010027x>
- Wieser, H., Kieffer, R., 2001. Correlations of the Amount of Gluten Protein Types to the Technological Properties of Wheat Flours Determined on a Micro-scale. *J. Cereal Sci.* 34, 19–27. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2000.0385>
- Williams, P., El-Haramein, F.J., Nakkoul, H., Rihawi, S., 1988. Crop quality evaluation methods and guidelines. *Crop Qual. Eval. Methods Guidel.*
- Williams, R.M., O'Brien, L., Eagles, H.A., Solah, V.A., Jayasena, V., 2008. The influences of genotype, environment, and genotype×environment interaction on wheat quality. *Aust. J. Agric. Res.* 59, 95. <https://doi.org/10.1071/AR07185>
- Worldbank, 2019. http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=downscaled_data_download&menu=historical
- Wrigley, C., Békés, F., Bushuk, W. (Eds.), 2006. *Gliadin and Glutenin: The Unique Balance of Wheat Quality*. AACC International, Inc., 3340 Pilot Knob Road, St. Paul, Minnesota 55121, U.S.A. <https://doi.org/10.1094/9781891127519>
- Wyatt, P.J., 1991. Combined differential light scattering with various liquid chromatography separation techniques. *Biochem. Soc. Trans.* 19, 485–485. <https://doi.org/10.1042/bst0190485>
- Yamamoto, H., Worthington, S.T., Hou, G., Ng, P.K.W., 1996. Rheological properties and baking qualities of selected soft wheats grown in the United States. *Cereal Chem. USA.*
- Yin, L.-P., Li, P., Wen, B., Taylor, D., Berry, J.O., 2007. Characterization and expression of a high-affinity nitrate system transporter gene (TaNRT2.1) from wheat roots, and its evolutionary relationship to other NTR2 genes. *Plant Sci.* 172, 621–631. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.11.014>

- Yong, Z., Zhonghu, H., Ye, G., Aimin, Z., Ginkel, M.V., 2004. Effect of environment and genotype on bread-making quality of spring-sown spring wheat cultivars in China. *Euphytica* 139, 75–83. <https://doi.org/10.1007/s10681-004-2131-5>
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14, 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zobel, H.F., 2006. Starch Crystal Transformations and Their Industrial Importance. *Starch - Stärke* 40, 1–7. <https://doi.org/10.1002/star.19880400102>

Article

Bread Wheat Quality under Limiting Environmental Conditions: I-Molecular Properties of Storage Proteins and Starch Constituents in Mature Grains

Nada Sakr ¹, Larbi Rhazi ²  and Thierry Aussenac ^{2,*} ¹ Rural Development Department, Ministry of Agriculture, Beirut 2827, Lebanon; nada.sakr@etud.u-picardie.fr² Transformations & Agro-Ressources Research Unit–ULR 7519, Institut Polytechnique UniLaSalle, Université d'Artois, 19 Rue Pierre Waguët, 60026 Beauvais CEDEX, France; larbi.rhazi@unilasalle.fr

* Correspondence: Thierry.aussenac@unilasalle.fr; Tel.: +33-034-406-2500

Abstract: To support the introduction of local soft wheat varieties, the Lebanese state has implemented, during recent years, an improvement program to select plant material with good productivity in semi-arid conditions that can lead to national production that can, at the same time, meet quality needs expressed by Lebanese processors. In the present study, the main biochemical components of grains conventionally associated with bread-making properties (storage proteins, starch polysaccharides) were physiochemically characterized for a panel of local soft wheat varieties selected. During the two consecutive years of cultivation, the post-flowering thermal constraints significantly modified the kinetics of accumulation of the major constituents by mainly limiting the grain filling time. The level of polymerization/aggregation (i.e., gliadin/glutenin ratio, unextractable polymeric protein (UPP) amount, molecular weight average of glutenins) of prolamins was very high. The reduction in the amount of starch was accompanied by a significant change in the amylopectin/amylose ratio. Finally, the genotypes studied were characterized by significantly different distributions of starch granules; the percentage of the volume occupied by A-type and B-type starch granules varied between genotypes for the two cropping years. All these observations must be considered because of their determining role in the technological aptitude of the flours generated.

Keywords: bread wheat; environmental constraints; prolamins; starch

check for updates

Citation: Sakr, N.; Rhazi, L.; Aussenac, T. Bread Wheat Quality under Limiting Environmental Conditions: I-Molecular Properties of Storage Proteins and Starch Constituents in Mature Grains. *Agriculture* **2021**, *11*, 289. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040289>

Academic Editor: Silvia Tavarini

Received: 12 February 2021

Accepted: 24 March 2021

Published: 27 March 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Wheat count among the most important raw materials for human consumption. It is well known for its nutritional qualities. In Lebanon, this cereal is grown mainly in the Beqaa plain, considered as the country's agricultural basket. Annual production in 2019 reached a level of 140,000 tons [1], with 75% made up of durum wheat (*Triticum durum*), mainly due to its better adaptation to environmental conditions, resulting in acceptable levels of yield appreciated by farmers. At the same time, annual imports in 2019 amounted to 1,575,000 tons [1], mainly constituting soft wheat suitable for breadmaking. Today, in order to limit this level of imports, the Lebanese state wishes to support the introduction of local soft wheat varieties. Thus, an improvement program has been put in place to select plant material adapted to environmental conditions (i.e., good productivity in semi-arid conditions) that can lead to national production of a good quality (i.e., respect the needs expressed by Lebanese processors (i.e., millers and bakers)).

It is mostly environmental conditions (i.e., temperature and/or humidity) observed during the grain filling phase [2–4] that significantly affect productivity and the quality of wheat grains [5–8]. As early as the 1950s, Finney and Barmore [9] confirmed that the technological capacities are principally conferred by gluten [10]. Gluten consists of a polydisperse mix of prolamin proteins (i.e., glutenins and gliadins) that interact via non-covalent and covalent bonds (ionic, hydrogen, hydrophobic, inter S-S bonds, etc.) [11–15].

From these works, the variation of the baking properties of wheat flour clearly depends on the ability of its storage protein fractions (i.e., prolamins) to establish, during mixing, a three-dimensional structure with viscoelasticity characteristics [16]. Consequently, the storage proteins found in common wheat flour show a strong tendency to auto-aggregate into a three-dimensional plastic network during the kneading of dough. Since the 2000s, particular attention has been paid to glutenin proteins because a close relationship/correlation has been established between baking properties (i.e., extensibility, mixing time, and loaf volume) and the molecular weight distribution (MWD) of the aggregates of polymeric proteins [17].

Beyond these important protein parameters, it is essential to consider modifications of the content and/or characteristics of starch components contained in the grains [18–21]. Indeed, several authors have previously pointed to the influence of different amylaceous characteristics (i.e., amylose/amylopectin ratio [22], distribution of starch granule sizes [23], grain surface-to-volume ratio [24]) on grain processing aptitudes.

Our work is part of a general study on the assessment of processing skills (mainly bread-making performance) of local soft wheat varieties selected by LARI's (Lebanese Agricultural Research Institute) Grain and Vegetable Research Department in collaboration with the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) and the Arab Center for the Studies of Arid Zones and Drylands (ACSAD) for their agronomic behavior to handle environmental constraints. The first part of this general study (part I: present paper) is dedicated to the characterization of the main biochemical components selected (i.e., molecular properties of storage proteins and starch of matured grains) and a second part, which is in press [9], is dedicated to the characterization of the rheological behavior of flours and doughs produced.

2. Materials and Methods

2.1. Plant Materials

Four different bread wheat genotypes, selected for their potential tolerance/resistance to hydric stress and rust [25–27] by two agricultural research centers operating in dry zones (ICARDA and ACSAD, Bekaa Valley, Lebanon), are delivered by LARI (Bekaa Valley, Lebanon) to be the material of this study. These cultivar pedigrees are shown in Table 1.

Table 1. Parentage and pedigree of the bread wheat genotypes studied.

| Wheat Genotypes | Line/Pedigree Source |
|-----------------|---|
| SHAM 8 | KAUZ = JUP/BJY/URES/CM67458 (ICARDA, 2015) |
| TAL AMARA 2 | Belikh/Gediz/Bit/ACS-D-7284-22 IZ-17-IZ-4 IZ-OIZ (ACSAD, 2015) |
| KATILA | KAUZ/ATTILA/CMSS93Y0066S-5AP-2AP-6AP-0APS-0AP (ICARDA, 2015) |
| ACSAD 1133 | Snb>s>/shi4414/crow>s>/3/Mon>s>/crows>s>/ACS-W-9678 (2001)-23IZ-2IZ-0IZ (ACSAD, 2015) |

ICARDA—International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, ACSAD—the Arab Center for the Studies of Arid Zones and Drylands.

Bread wheat varieties were cultivated for 2 successive years (2015 and 2016) at Tal Amara Lebanon in LARI experimental farm, located at 905 m altitude, 33°28' N latitude, and 36°30' E longitude. The four cultivars were grown in a sandy loam clay soil with three replications according to a randomized complete block design. Experiments were performed without irrigation intervention. Seeding took place in early December, whereas harvesting was done in late June. Central Beqaa climate is semi-arid, wherein rain is concentrated between December and April.

2.2. Wheat Grain Quality Assessment

Studied traits of wheat homogeneous grain samples were based on the determination of the thousand kernels weight (TKW), the protein total content ($N \times 5.7$) by Dumas method (AACC 76.13.01) on LECO FP-528 (Perkin Elmer, Villebon sur Yvette, France), and starch content [28].

2.3. Wheat Flour Preparation

Wheat grains were dampened at 16% (*w/w*) humidity and tempered for 24 h before being milled on an experimental Bühler miller (type MLU-202, Bühler, Vilepinte, France) according to (AACC 26-21.02) [28]. Resulting white flour, having a mean extraction rate of 65% and a mean ash content of 0.68%, was subjected to different analysis with 3 replicates of each sample.

2.4. Quantification of Grain Proteins by Size Exclusion–High Performance Liquid Chromatography (SE-HPLC)

For the extraction of Sodium Dodecyl Sulphate (SDS)-extractable proteins, 10 mg of white flour samples were mixed with sodium phosphate buffer solution (1 mL, pH 6.90, 0.05 M, SDS (2%, *w/v*)). After 2 h of incubation at 60 °C with continuous stirring, mixtures were centrifuged at 12,500 × *g* for 30 min at 20 °C. Supernatants containing the SDS-soluble proteins were filtrated through a syringe filter of regenerated cellulose (porosity = 0.45 µm), and 20 µL was then injected into the SE-HPLC system. The pellets were resuspended in of the same sodium phosphate solution (1 mL, pH 6.90, 0.05 M, SDS (2%, *w/v*)) and sonicated for 20 s using a 3 mm microtip probe (Sonics Materials, Thermo Fisher Scientific, Les Ulis, France, model 75038) and centrifuged for 30 min (12,500 × *g* at 20 °C). The supernatants containing the SDS-unextractable proteins were filtered through 0.45 µm followed by injection of 20 µL.

For the total protein extraction, 10 mg of white flour was incubated at 60 °C for 2 h with a continuous stirring in the presence of sodium phosphate buffer solution (1 mL, pH 6.90, 0.05 M, SDS (2%, *w/v*)). Sonication was then performed for 20 s using a 3 mm microtip probe (Sonics Materials, Thermo Fisher Scientific, Les Ulis, France model 75038). After this, samples were centrifuged at 12,500 × *g* for 30 min at 20 °C. As above, the supernatants were filtered through 0.45 µm, and 20 µL was then injected into the column.

The analysis of protein fractions was performed on a Spectra SYSTEM LC (Thermo Fisher Scientific, Les Ulis, France). The used column for SE-HPLC analysis was a TSK G 400 SW (300 × 7.5 mm, 450 Å) preceded by a pre-column (6 × 40 mm TSK gel SWXL). Eluent consisted of sodium phosphate solution (0.05 M, pH 6.90, SDS (0.1%, *w/v*)). The pump was set at a constant flow rate (0.7 mL·min⁻¹). In order to avoid SDS precipitation during protein separation, we thermostated the HPLC oven at 25 °C. In accordance with the work of Hajas et al. [29], 3 protein fractions were quantified: fraction 1 (glutenins), fraction 2 (gliadins), and fraction 3 (albumins/globulins). Amounts of the different protein fractions were determined as a relative proportion of the total chromatogram area. Unextractable polymeric proteins (UPP) were calculated as follows:

$$\text{UPP (\%)} = (\text{nextractable glutenin/total glutenin}) \times 100 \quad (1)$$

2.5. Determination of the Molecular Distribution of Flour Protein by Asymmetrical Flow Field Flow Fractionation (A4F)

Wheat protein molecular weight distribution was performed as reported previously [17]. Flour (30 mg) was mixed with sodium phosphate solution (1 mL, pH 6.90, 0.05 M, SDS (2%, *w/v*)) and incubated for 2 h at 60 °C with vortexing every 10 min. Samples were then sonicated (20 s at power setting ≈30%) with a 3 mm microtip probe before being centrifuged (12,500 × *g*) for 15 min at 25 °C and filtered through 0.45 µm and then injected (30 µL) in A4F/MALLS system. The A4F machine used was an Eclipse3 F System (Wyatt Technology, Santa Barbara, CA, USA) combined with a multi-angle light scattering (MALLS) detector (Dawn multi-angle Heleos TM, Wyatt Technology, Santa Barbara, CA, USA) and an Optilab T-rEX refractive index detector (Wyatt Technology, Santa Barbara, CA, USA). In addition, The Agilent HPLC 1200 Series (Agilent Technologies, Les Ulis, France) was used in tandem with the AF4 system. The Trapezoidal channel had 286 mm of length and the used spacer was 350 µm. The ultrafiltration wall consisted of regenerated cellulose membrane with a cutoff of 10 kDa. The mobile phase consisting of a sodium phosphate buffer solution (pH 6.90, 0.05 M, SDS (0.1%, *w/v*)) passed continually through

a 0.1 μm regenerated cellulose filter (Merck Millipore, Guyancourt, France). Absorbance was recorded at 214 nm. The cross flow used for fractionation was focused at 0.5 min at a constant flow rate of $2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Injection step was realized during 1.0 min at a flow rate of $0.2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, and a relaxation phase was adjusted to 0.5 min. These steps were followed by elution at flow detector of $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ and cross-flow rate decreasing from 3.0 to $0.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. After 14 min of elution, cross-flow rate was maintained at $0.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ for 9 min. Determination of number-average molar mass (M_n), weight-average (M_w) molar mass, radius of gyration (R_z), and hydrodynamic radius of gyration (R_h) was performed using ASTRA 7.1.2 software (Wyatt Technology, Santa Barbara, CA, USA).

2.6. Quantitation of High Molecular Weight Glutenin Subunits (HMW-GS) by Lab-on-a-Chip

Extraction and quantification of glutenin subunits was achieved as reported in our previous study [30]. Wheat flour (30 mg) was suspended for 20 min at 22°C in a buffer solution (1 mL, 0.08 M Tris-HCL, pH 7.50, propanol-1 (50%, v/v)). Samples were centrifuged for 15 min ($15,900\times g$). Monomeric proteins (i.e., gliadins, albumins, and globulins) contained in the supernatant were discarded. Pellets containing polymeric proteins were mixed with 0.6 mL of a Tris-HCl solution with SDS (2%, w/v) and DTT (1%, w/v) and sonicated for 20 s (30%) with a microtip probe of 3 mm. The mixes were incubated for 30 min at 60°C before being centrifuged for 15 min ($12,500\times g$ at 22°C). The separation of glutenin subunits was performed on a Lab-on-a-Chip apparatus (LabChip GXII Touch HT Protein Characterization System, PerkinElmer, Waltham, MA, USA), where the chip channel was primed with a polymer solution of polydimethyl methacrylate of high molecular weight (pDMA) in a solution of Tris-Tricine containing SDS and a non-covalent coloration of 0.27% (w/v).

2.7. Extraction of Starch Granules of the Wheat Flours and Determination of Their Size

Starch granule extraction was based on the developed INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) protocol by Bancel et al., 2010 [31]. A sample of 500 mg of flour was added to 10 mL of ultrapure water, mixed and filtered (100 μm), and then centrifuged at $4000\times g$ for 5 min at 22°C . The precipitated material was twice treated in the same way. A total of 5 mL of Tris-HCL buffer (55 mM, pH 6.80, SDS 2.3% (w/v), 10% glycerol (v/v), and 1% thiothreitol (w/v)) were then added to the precipitate and vigorously stirred for 30 min. Samples were then sonicated (20 s, 30% at power max) (3 mm microtip probe) and centrifuged ($4000\times g$) for 5–10 min at 20°C . Pellets were washed for 3 consecutive times using ultra-pure water (10 mL) and then washed twice with acetone (10 mL). Centrifugation for 5–10 min ($4000\times g$, 20°C) was performed after each washing step. Dried starch was kept at 4°C .

Starch granule size distribution was performed through laser diffraction using Malvern Masterizer 2000 (Malvern, Palaiseau, France). Distribution of starch granules is expressed by the percentage of the volume occupied by granules due to their size. It is a particle size analyzer that sizes starch particles through a wet dispersion unit. The measurements were conducted using a MU hydro dispersion unit. The stirring energy ensured the homogenization of the sample suspension. The chosen pump speed was 2500 revolution per minute (rpm) in order to obtain a maximum homogenization of the suspension in the beaker by elimination of air bubbles. A particular detector registers the intensity of laser light in the optical cell that is converted to particles size distribution.

2.8. The Molecular Weight Distribution of Starch Polysaccharides by Asymmetrical Flow Field Flow Fractionation (A4F)

The molar mass distribution of starch polysaccharides was performed according to the developed procedure reported by Chiamonte et al. [32]. Purified starch (10 mg) was dissolved in dimethyl sulfoxide (1 mL, DMSO 95% (w/v)) at 100°C for 1 h, then precipitated in 5 mL of ethanol and centrifuged ($20,000\times g$) for 20 min (20°C). The precipitate was added to 4 mL of NaOH (20 mM) and solubilized for 8 min at 135°C in a microwave (Discover CEM, Saclay, France), then filtered through a 0.45 μm syringe filter (Merck

Millipore, Guyancourt, France) and injected (100 μ L) in the A4F/MALLS system. The A4F machine used was an Eclipse3 F System (Wyatt Technology, Toulouse, France), which can be similarly described as previously (Section 2.5). However, the used channel was the short channel that had a 195 mm length and the used spacer was of 0.35 mm. The system was normalized and checked with pullulan 110 kDa and 800 kDa, respectively. Detection of molecules was obtained by a differential refractometer (DRI) and through multiangular light scattering MALLS.

2.9. Statistical Analysis

Data statistical analysis was performed using XLSTAT 2020 (Addinsoft, Paris, France). Multiple mean comparison by ANOVA multifactor was calculated through a variance analysis-type ANOVA ($p = 0.05$). Multiple mean comparisons were performed using Tukey's test HSD (honestly significant difference) ($p = 0.05$).

3. Results

3.1. Characteristics of the Grain Filling Period

Climatic changes impact on ecophysiology, and potentials of wheat cultures essentially depend on the temperature and water. In semi-arid zones, such as in Lebanon, mean day temperatures and maximal day temperature are of higher levels [33]. The frequency of day temperature level exceeding 30 °C is significantly elevated. Thus, in these particular zones, high temperatures can lead to higher evapotranspiration and the apparition of a hydric deficit, resulting in a lower photosynthesis activity. These environmental conditions can have important consequences if they occur after the anthesis during the phases of cell division and/or the cell enlargement in wheat kernels.

In our study, the grain filling period of the different wheat genotypes studied can be characterized by the sum of degree day (Σ DD) registered during two different seasons of culture (i.e., 2015 and 2016) from anthesis up to the harvest maturity of the grains. Figure 1 shows the data recorded in terms of (i) sum of degree day (Σ DD) but also in terms of (ii) grain filling period duration for the four different wheat genotypes studied. The sums of degree day observed were fairly homogeneous; they varied between 677 DD (mean value for 2015) and 679 DD (mean value for 2016). KATILA and ACSAD 1133 are two genotypes characterized by higher precociousness, and this is regardless of the cultivation year concerned. At the same time, the grain filling period length observed for the same wheat genotypes varied between 34 days after anthesis (DAA) (mean value for 2016) and 39 DAA (mean value for 2015). Whatever the wheat genotype studied, these values correspond to a severe limitation of the accumulation time length of the grain reserves (storage proteins and starch) classically observed (i.e., more than 10 or 20 days of limitation) [34]. Thus, the higher the daily temperature, the number of days of accumulation decreases.

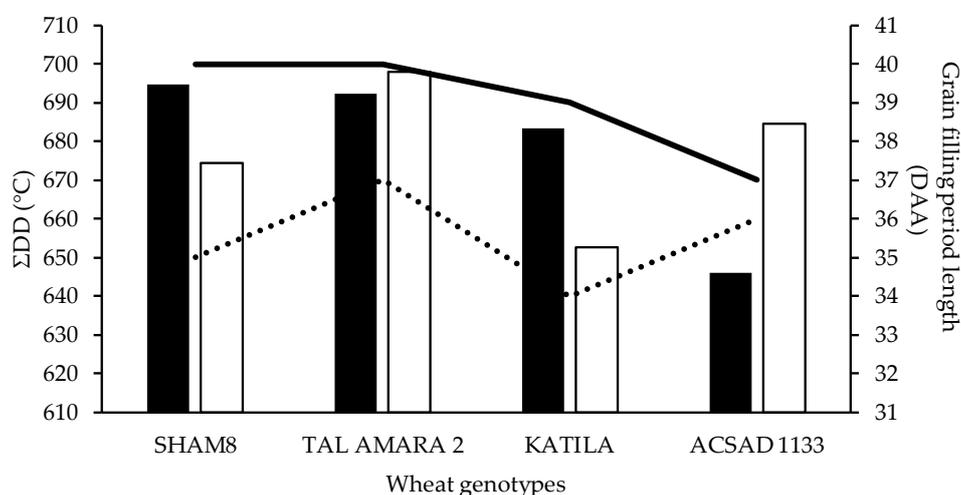


Figure 1. Grain filling period for the four different wheat genotypes. Σ DD (sum of degree day) for 2015 (■) and for 2016 (□); grain filling period length for 2015 (—) and for 2016 (...). DAA-days after anthesis.

For the two cultivation seasons, the temperatures and the precipitation recorded during the same period are presented in Figure 2.

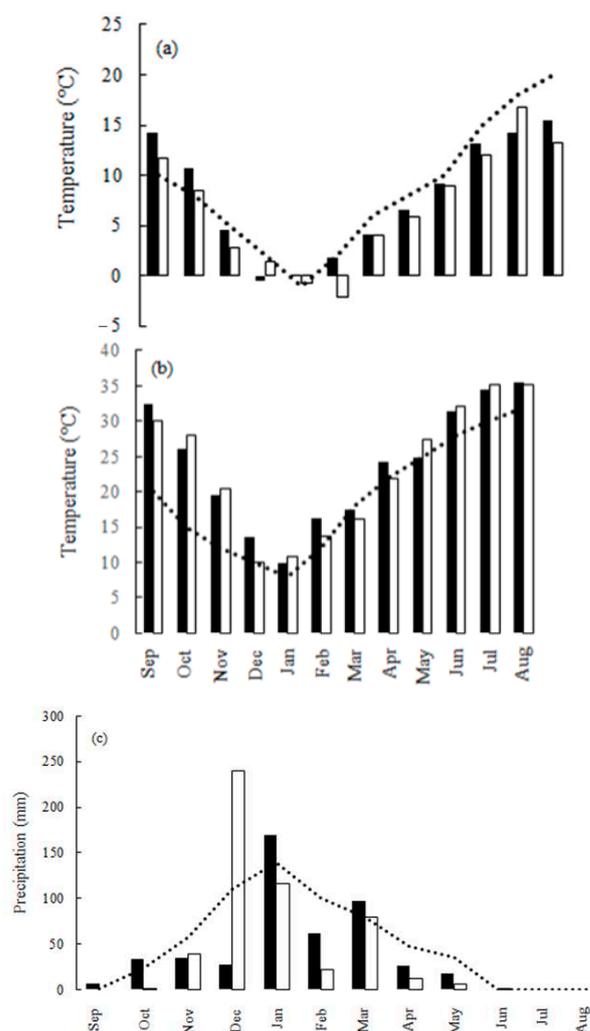


Figure 2. Temperatures (a,b) and precipitations (c) for the two cropping seasons (2015/2016 (■); 2016/2017 (□)). (a) Monthly minimum temperatures; (b) monthly maximum temperatures. Historical averages (1954–2010) (dotted lines).

These first physiological observations seem to confirm that the different soft wheat genotypes used during our study were subjected to environmental conditions that can be qualified as “limiting” physiological conditions. These environmental conditions have led to a natural limitation of the length of the grain filling phase that, in the absence of modification of the filling speed of the grains [2], has had, as is shown later, a significant impact on the intensity of the accumulation of total dry matter in the grains.

The general characteristics of wheat grains (i.e., TKW, protein content, starch content) harvested in 2015 and in 2016 are presented in Table 2. Thus, the TKW values were between 21.42 and 25.96 g, with a very low multi-year average value corresponding to 24.5 g (from 23.35 to 25.69 g for 2016 and 2015, respectively). In fact, TKW values observed in our study were significantly reduced (i.e., from -25% to -35%) compared to those previously obtained by El-Kareem and El-Saidy [35], who mentioned mean values of about 34.2 g for the genotypes parented of the wheat cultivars studied here in classical environmental conditions in Egypt. In our study, SHAM 8 was the only wheat genotype that differentiated statistically ($p = 0.05$), with an average value of 21.42 g. These results, which reflect a strong limitation of the dry matter accumulation in the grains for all the genotypes studied, seemed

to be mainly related to a significant dysfunction of the post-anthesis carbon metabolism (i.e., the biosynthesis and the accumulation of the starch resulting from post-anthesis photosynthetic activity). Indeed, as shown in the results presented in Table 2, the grains of the different genotypes studied were characterized by very high levels of total proteins (average protein content of 17.43 g/100 g DM (dry matter) with annual averages between 14.78 and 20.29 for 2016 and 2015, respectively) and low levels of starch (average starch content of 55.16 g/100 g DM with annual averages between 53.57 and 56.75 for 2015 and 2016, respectively).

Table 2. General characteristics of wheat grains harvested.

| Genotype | TKW (g) | Protein Content ⁽³⁾ | Starch Content ⁽³⁾ | Prolamin | | | UPP Content ⁽⁴⁾ |
|---------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
| | | | | Glutenin Content ⁽³⁾ | Gliadin Content ⁽³⁾ | Gliadin/Glutenin | |
| SHAM 8 | 21.42 a ⁽¹⁾ | 16.96 a | 57.86 b | 30.69 a | 55.18 b | 1.82 a | 46.70 a |
| TAL AMARA 2 | 25.85 b | 17.58 b | 54.34 a | 36.51 b | 50.19 a | 1.38 b | 41.35 b |
| KATILA | 24.85 b | 17.46 b | 54.31 a | 29.92 a | 55.42 b | 1.89 a | 44.74 a |
| ACSAD 1133 | 25.96 b | 18.14 c | 54.13 a | 31.25 a | 55.47 b | 1.79 a | 46.40 a |
| Mean ⁽²⁾ | 24.52 | 17.53 | 55.16 | 32.09 | 54.06 | 1.72 | 45.00 |
| CV (%) | 8.67 | 2.76 | 3.27 | 9.33 | 4.79 | 13.46 | 5.48 |
| 2015 mean | 25.69 | 20.29 | 53.37 | 32.54 | 53.73 | 1.70 | 46.50 |
| 2016 mean | 23.35 | 14.78 | 56.75 | 31.64 | 54.40 | 1.73 | 43.10 |

⁽¹⁾ Multiple mean comparisons were made using Tukey's test (HSD—honestly significant difference) and different letters indicate a statistically difference ($p < 0.05$). ⁽²⁾ Mean values of two consecutive cultivation years and three blocks. ⁽³⁾ Protein and starch content in g/100 g DM. ⁽⁴⁾ UPP (%) = [unextractable glutenin/total glutenin] × 100. TKW—thousand kernels weight, UPP—Unextractable polymeric proteins.

In contrast to the metabolism of protein accumulation, which is mainly is a remobilization metabolism, the starch accumulation metabolism essentially corresponded to a de novo synthesis metabolism from the post-anthesis photosynthetic activity of the terminal leaf surfaces (i.e., mainly the last two foliage stages) [36]. In fact, any reduction in photosynthetic activity will result in a deficit of biosynthesis and starch accumulation in the grains and, consequently, a lack of dilution of the accumulated protein content, resulting in the consequent reduction of TKW [37]. These results are in total accordance with some previous observations made in different environmental limiting conditions [38,39] and, in the case of our study, these limiting conditions were even more marked in 2015 than in 2016.

3.2. Prolamin Content of Wheat Grains and Their Molecular Weight Distribution

All the different results of these assays are compiled in Table 2. Although there were slight significant differences between the four genotypes studied (i.e., between TAL AMARA 2 and the other wheat genotypes), the polymeric prolamin contents were very close (from 29.92% to 36.51% for KATILA and TAL AMARA 2, respectively). At the same time, the content of gliadin (monomeric prolamins) represented between 50.20% and 55.47% of the total protein content of wheat grains, with a multi-year average value corresponding to 54.06%.

In view of these results, it appears that the four genotypes in the context of our study were characterized by relatively high gliadin contents. In fact, this fraction of prolamins represented here more than 54% of the total protein content, i.e., approximately +10 to +15% more than the protein content commonly encountered for soft wheat varieties [40]. Gliadins were generally synthesized and accumulated most rapidly between 10 and 30 DAA. On the contrary, glutenin subunits [Low molecular weight glutenin subunits (LMW-GS) and particularly high molecular weight glutenin subunits (HMW-GS)] accumulated more slowly but for a longer period during grain filling.

As was shown above, the environmental conditions that were recorded during our study led to a significant reduction in the filling time of the grains. As a consequence, these limiting environmental conditions caused a significant reduction in the synthesis and accumulation of polymeric prolamins in favor of the monomeric prolamins.

Since the 2000s, scientists agreed that the molecular weight distribution (MWD) of prolamins are the main factors determining the technological properties of flours [41]. However, variations in MWD that may exist between wheat genotypes can theoretically result from modification of the ratio between monomeric proteins and polymeric proteins (gliadin to glutenin ratio) but also from modification of size distribution of polymeric proteins alone [42] determined by quantification of the non-extractable polymeric protein (UPP) and/or by analysis of the glutenin fraction using A4F.

In our study, whatever the wheat genotype studied, the gliadin/glutenin ratio (also called the prolamins polymerization index) was herein characterized by high values (i.e., >1.2–1.3) (Table 2). Indeed, this ratio varied between 1.38 and 1.89 for TAL AMARA 2 and KATILA, respectively, with a general mean value of 1.72. TAL AMARA 2 is the only wheat genotype that differentiates statistically ($p = 0.05$) with an average value of 1.38. At the same time, UPP contents were quite comparable between genotypes, with values between 41.35% and 46.70% for TAL AMARA 2 and SHAM 8, respectively. On average (i.e., 45.00%), these high values corresponded to highly aggregated/polymerized glutenin contents.

Table 3 presents the macromolecular features (Mn , Mw , Rz , and Rh) of polymeric prolamins of the wheat grains. As can be seen from the calculation of the polydispersity index ($Ip = Mw/Mn$), all the polymeric fractions present in the different wheat grains were characterized by a high heterogeneity (i.e., $Ip > 5.0$). Indeed, the values collected varied between 6.96 and 9.41 for TAL AMARA 2 and SHAM 8, respectively. The genotypes studied differed significantly ($p = 0.05$) in two statistically distinct groups.

Table 3. Macromolecular features of polymeric prolamins of wheat grains harvested.

| Genotype | Mn ⁽¹⁾ ($\times 10^6$ g/mol) | Mw ⁽¹⁾ ($\times 10^6$ g/mol) | Ip ⁽¹⁾ | Rz (nm) ⁽²⁾ | Rh (nm) ⁽²⁾ |
|---------------------|---|---|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| SHAM 8 | 0.55 c ⁽³⁾ | 5.13 a | 9.41 a | 94.16 a | 8.06 a |
| TAL AMARA 2 | 0.58 b | 3.92 c | 6.96 b | 87.74 b | 8.21 a |
| KATILA | 0.61 a | 4.47 b | 7.40 b | 88.18 b | 8.23 a |
| ACSAD 1133 | 0.56 bc | 4.17 bc | 7.30 b | 85.70 b | 8.01 a |
| Mean ⁽⁴⁾ | 0.58 | 4.42 | 7.77 | 92.95 | 8.13 |
| CV (%) | 4.60 | 11.81 | 14.27 | 4.09 | 1.32 |

⁽¹⁾ Mn : molecular weight number-average, Mw : molecular weight weight-average, Ip : polydispersity index (Mw/Mn); ⁽²⁾ Rz : radii of gyration, and Rh : hydrodynamic radii of gyration; ⁽³⁾ multiple mean comparisons made using Tukey's test (HSD) and different letters indicate a statistically difference ($p < 0.05$); ⁽⁴⁾ mean values of two consecutive years and three blocks.

The number-average molar mass (Mn) and the weight-average molar mass (Mw) respectively varied from 0.55×10^6 g/mol to 0.61×10^6 g/mol, and from 3.92×10^6 g/mol to 5.13×10^6 g/mol. These two macromolecular features allowed us to discriminate some genotypes studied (mainly SHAM8 and TAL AMARA 2), with the calculated average molecular weights being characteristic of highly polymerized/aggregated prolamins, thus confirming the results obtained previously by quantifying the UPP fraction. In the same way, radius of gyration Rz and hydrodynamic radius Rh respectively ranged from 85.70 nm to 94.16 nm and from 8.01 nm to 8.23 nm.

3.3. Composition and Content of Glutenin Subunits of Wheat Grains

Table 4 shows, for the first time to our knowledge, the high molecular weight glutenin subunits (HMW-GS) composition of the polymeric prolamins of each of the selected genotypes and the HMW-GS/LMW-GS (Low molecular weight glutenin subunits) ratio.

Table 4. Composition and content of glutenin subunits of wheat grains harvested.

| Genotype | HMW/LMW | HMW-GS (%) ⁽¹⁾ | | | | | |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|----------|---------|-------|---------|---------|
| | | 9 | 10 | 7 | 1 | 2* | 5 |
| SHAM 8 | 0.25 a ⁽²⁾ | 13.77 a | 16.95 ab | 29.24 a | - | 12.41 b | 27.63 a |
| TAL AMARA 2 | 0.23 a | 13.71 a | 17.30 ab | 29.38 a | - | 12.41 b | 27.03 a |
| KATILA | 0.25 a | 11.92 a | 18.87 b | 31.25 a | 13.62 | - | 24.33 a |
| ACSAD 1133 | 0.26 a | 18.67 b | 15.84 a | 31.05 a | - | 4.59 a | 27.54 a |
| Mean ⁽³⁾ | 0.25 | 14.52 | 17.24 | 30.23 | - | 9.86 | 26.63 |
| CV (%) | 4.11 | 19.95 | 7.27 | 3.53 | - | 46.31 | 5.85 |

⁽¹⁾ Glutenin subunit content: relative percentage expressed in relation to the total content of HMW-GS (high molecular weight glutenin subunits); ⁽²⁾ multiple mean comparisons made using Tukey's test (HSD) and different letters indicate a statistically difference ($p < 0.05$); ⁽³⁾ mean values of two consecutive years and three blocks. LMW—low molecular weight.

As can be seen from the results, the majority of the protein samples (i.e., SHAM 8, TAL AMARA 2, and ACSAD 1133) had the same composition in HMW-GS, namely, the allelic combination *Glu-A1*: 2*, *Glu-B1*: 7 + 9, and *Glu-D1*: 5 + 10, with rather similar relative concentrations except for the HMW-GS 9 and 2*, for which the proportions varied significantly for SHAM 8 and TAL AMARA 2 vs. ACSAD 1133 (13.77% and 13.71% vs. 18.67% for the HMW-GS 9 and 12.41% vs. 4.59% for the HMW-GS 2*). The only genotype characterized by a different HMW-GS composition corresponded to KATILA with the allelic combination *Glu-A1*: 1, *Glu-B1*: 7 + 9, and *Glu-D1*: 5 + 10. In addition, the polymeric prolamins of the various wheat genotypes can be characterized by their HMW-GS/LMW-GS ratios. Although these ratios were fairly close statistically ($p = 0.05$), some genotypes had quite different ratios despite the same allelic combination. Thus, TAL AMARA 2 and ACSAD 1133, which have the allelic combination (*Glu-A1*: 2*, *Glu-B1*: 7 + 9, and *Glu-D1*: 5 + 10), were found to be characterized by HMW-GS/LMW-GS ratios of 0.23 and 0.26, respectively.

The interactions that may exist between polymeric proteins were strongly related to the nature of the HMW-GS (especially HMW-GS pair 5 + 10 vs. HMW-GS pair 2 + 12 coded by *Glu-D1*) and the HMW-GS/LMW-GS ratio [41]. Thus, any modification of HMW-GS composition within the polymeric prolamins will cause a modification of the MWD of these polymers. As seen in SHAM and TAL AMARA 2, for the same allelic combination of HMW-GS, any improvement in the HMW-GS/LMW-GS ratio (Table 4) resulted in an increase in the weight-average molecular weight (M_w) (Table 3) and vice versa.

3.4. Starch Content of Wheat Grains and Their Molecular Weight Distribution

Starch consists of two structurally different polymers: (i) amylose (AML), a linear polymer of (1,4) α -linked glucose units, and (ii) amylopectin (AMP), a highly branched structure of glucose units with (1,6) and (1,4) α -linkages [43]. Amylopectin and amylose are present in a ratio of about 3:1 in most plant starches, and analysis of the mature grains in our study showed about 34.22% amylose (Table 5). Our results can be considered important; however, this quantification is very dependent on the methodology used. As has already been demonstrated [32], the separation and quantification of starch polymers by A4F makes it possible to obtain more reliable and reproducible results. In any case, this content seems very stable (i.e., no significant differences between the different genotypes during the two years of culture).

The two constituent polymers of starch (AML and AMP) can be characterized by different macromolecular features (M_n , M_w , and R_z). As shown by the results of these measurements (Table 5), the amylopectin polymers (AMP), which were the most abundant polymers, were characterized by very high molecular weights: 16.1×10^6 g/mol and 58.8×10^6 g/mol for M_n the M_w , respectively.

Table 5. Composition and macromolecular features of starchy fraction of wheat grains harvested and distribution of corresponding starch granules.

| Genotype | Amylopectin (AMP) | | | | | Amylose (AML) | | | | Starch Granules | | |
|---------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------|------------|
| | Mn ⁽¹⁾ | Mw ⁽¹⁾ | Rz ⁽¹⁾ | V ⁽¹⁾ | AMP Content (%) | Mn ⁽¹⁾ | Mw ⁽¹⁾ | Rz ⁽¹⁾ | AML Content (%) | A-Type (%) | B-Type (%) | C-Type (%) |
| SHAM 8 | 12.7 a ⁽²⁾ | 55.3 a | 134.4 a | 0.33 b | 66.0 a | 0.61 a | 0.33 b | 69.3 b | 34.2 a | 72.8 a | 22.8 c | 3.9 b |
| TALAMARA 2 | 24.0 b | 66.2 b | 139.3 a | 0.29 a | 66.6 a | 0.80 b | 0.37 c | 72.7 b | 33.4 a | 76.5 b | 17.3 a | 4.7 c |
| KATILA | 14.8 a | 59.5 a | 140.3 a | 0.32 ab | 65.0 a | 0.61 a | 0.31 ab | 70.5 b | 34.5 a | 79.2 c | 16.8 a | 3.3 a |
| ACSAD 1133 | 13.0 a | 54.3 a | 140.6 a | 0.33 b | 65.3 a | 0.60 a | 0.29 a | 58.9 a | 34.7 a | 76.7 b | 18.4 b | 4.2 b |
| Mean ⁽³⁾ | 16.1 | 58.8 | 138.6 | 0.32 | 65.7 | 0.66 | 0.33 | 67.8 | 34.2 | 76.3 | 18.8 | 4.0 |
| CV (%) | 33.0 | 9.2 | 2.1 | 6.7 | 1.1 | 14.4 | 10.4 | 9.0 | 1.6 | 3.5 | 14.6 | 13.9 |

⁽¹⁾ Mn = molecular weight number-average ($\times 10^6$ g/mol), Mw = molecular weight-average ($\times 10^6$ g/mol), Rz = radii of gyration (nm), V = slope of the log–log plot of Rz vs. Mw; ⁽²⁾ multiple mean comparisons made using Tukey's test (HSD) and different letters indicate a statistically difference ($p < 0.05$); ⁽³⁾ mean values of two consecutive years and three blocks.

For the same AMP content, TAL AMARA 2 was the only genotype to differ in having significantly higher molecular weights than the other three genotypes studied (i.e., 24.0×10^6 g/mol and 66.2×10^6 g/mol for Mn and Mw, respectively). At the same time, amylose polymers (AML) were characterized by more limited molecular weights: 0.66×10^6 g/mol and 0.33×10^6 g/mol for Mn and Mw, respectively. As in the previous case, for the same AML content, TAL AMARA 2 was the only genotype to differ in having significantly higher molecular weights than the other three genotypes studied (i.e., 0.80×10^6 g/mol and 0.37×10^6 g/mol for Mn and Mw, respectively).

For macromolecular assemblies such as starch polymers, the shape or the branching rate was most reliably determined from the slope V of the log–log plot of Rz vs. Mw. The calculated values of V for the AMP polymers (≈ 0.32) corresponded to branched macromolecular assemblies. As can be seen from the results presented in Table 5 even if the calculated data for V were close, TAL AMARA 2 differentiated significantly ($p = 0.05$) from the other wheat genotypes retained, with a value of $V = 0.29$. Thus, under the conditions of our study, for a quantity of stable AMP comparable to that of the other genotypes (i.e., no statistical difference in AMP%), TAL AMARA 2 presented polymers of AMP whose branching rate was higher (i.e., significant decrease of V).

3.5. Starch Granule Distribution

Starch presents as granules in the wheat grain endosperm. These granules have been reported to have trimodal size distributions [44]. The biosynthesis of the A-type starch granules (generally with diameters > 10 nm) begins in the first days of endosperm formation. The formation of B-type starch granules (with diameters < 10 nm) starts from about 10 DAA. Finally, the synthesis of C-type starch granules (less than 5 nm) initiates from approximately 21 DAA [45].

Table 5 shows the distribution of starch granules in the grains of the four wheat genotypes studied. As shown in our results, A-type were present in a very large majority (76.3%), and B-type and C-type represented 18.8% and 4.0%, respectively. Our observations were in total agreement with previous results obtained from the majority of common wheat genotypes. Under the physiological conditions of our study (i.e., "limiting" conditions, §3.1), certain genotypes differed statistically ($p = 0.05$). Thus, SHAM 8 was characterized by a population of granules poorer in A-type starch granules (72.8% vs. 76.3% on average) and richer in B-type starch granules (22.8% vs. 18.8% on average). Conversely, KATILA was characterized by a starch granule distribution with a large majority of A-type starch granules (79.2% vs. 76.3% on average) and a lower proportion in B-type starch granules (16.8% vs. 18.8% on average).

The modifications of the size and/or the number of the different types of starch granules in grains can be a characteristic of wheat genotype studied, or it can be caused by the modification of environmental conditions (particularly growth temperature) during the grain-filling period. The volume percentage of A-type and B-type starch granules can

be modified when growth temperature increases from about 15 to 40 °C during the grain storage accumulation period [46]. These environmental effects could induce changes in the grain-filling pattern of starch granules (A- and B-type granules specifically). A-type granules are formed in the amyloplast from approximately 5 DAA and continue to grow until achieving a maximum diameter at physiological maturity [43]. However, the final number of A-amyloplasts is reached at about 7 DAA, coinciding with the cessation of cell division. On the other hand, B-type granules are initiated at about 11 DAA and continue to increase until 21 DAA, and up to a maximum diameter at maturity (35 DAA). Therefore, considering the behavior of type A and type B granules, we argue that any increase in temperature during the cell enlargement phase could induce a reduction in the activity of starch synthase but also a reduction in the grain filling phase (Figure 1 and Table 2), resulting in significant changes in the size and number of different types of starch granules in the endosperm. All of these elements must be considered because, due to their significant differences in terms of composition, molecular structure, granule swelling, gelatinization properties, and pasting/rheological behavior, proportion of the different type of starch granules (particularly A- and B-type) in flour has an impact on the properties of traditional wheat-based products [46].

4. Conclusions

Within the general framework of the implementation of a program to improve the production of local common wheat by the Lebanese State, we characterized the plant material selected for its adaptation to environmental conditions (i.e., good productivity in semi-arid conditions) by initially retaining all the biochemical components of the grains that are able to guarantee the desired processing performance (i.e., mainly baking performance).

Despite the selection of the plant material used in this study, our results demonstrate that environmental conditions induce limitations in its physiological functioning during the important phases of grain development and maturation. Thus, the post-flowering thermal constraints characteristic of semi-arid environments significantly modify the kinetics of accumulation of the major constituents of the grain by mainly limiting the grain filling time. The wheat grains thus formed were characterized by reduced TKW resulting from a deficit in starch accumulation.

At the same time, the synthesized and accumulated prolamins can be characterized by their particular molecular distributions. Whatever plant material selected, the level of polymerization/aggregation of polymeric prolamins was very high. The reduction in the amounts of synthesized and accumulated starch polysaccharides was accompanied by a significant change in the amylopectin/amylose ratio, with amylose content being greater than normal (i.e., >34%). Finally, the different genotypes studied were characterized by significantly different distributions of starch granules, with the percentage of the volume occupied by A-type and B-type starch granules varying between genotypes for the two cropping years. Here, again, we confirm with our results that the specific thermal regime during the synthesis and accumulation phases of prolamins and starch can explain the polymerization/aggregation changes of prolamins but also the modifications in the distribution of granules starch (A-type vs. B-type).

All these observations (i.e., molecular distribution of prolamins and starch, distribution of starch granules) must be considered because of their determining role for the definition of the technological aptitudes of the flours generated. These relationships between composition and rheological properties will be discussed in a future publication.

Author Contributions: All of the authors contributed significantly to the research. T.A. designed the experimental studies in collaboration with L.R.; N.S. and L.R., performed all prolamins and starch characterizations; N.S., L.R., and T.A. performed the statistical analyses; N.S., T.A., and L.R. contributed to the writing of the final manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: No specific funding has been implemented for this program.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: Authors would like to thank LARI (Lebanese Agricultural Research Institute) and Taj Mills for supporting part of this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Indexmundi. 2019. Available online: <https://www.indexmundi.com/agriculture/?country=lb&commodity=wheat&graph> (accessed on 20 February 2019).
2. Triboi, E. Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre (*Triticum aestivum em Thell*). *Agronomie* **1990**, *10*, 191–200. [[CrossRef](#)]
3. Farooq, M.; Bramley, H.; Palta, J.A.; Siddique, K.H.M. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. *Crit. Rev. Plant Sci.* **2011**, *30*, 491–507. [[CrossRef](#)]
4. Satorre, E.H.; Slafer, G.A. *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*; Food Products Press: New York, NY, USA, 1999.
5. Dupont, F.M.; Altenbach, S.B. Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *J. Cereal Sci.* **2003**, *38*, 133–146. [[CrossRef](#)]
6. Farooq, J.; Khaliq, I.; Mahmood, A. Evaluation of some wheat hybrids under normal and heat stress conditions. *Triticeae Genom. Genet.* **2015**, *5*, 1–11. [[CrossRef](#)]
7. Narayanan, S.; Prasad, P.V.V.; Fritz, A.K.; Boyle, D.L.; Gill, B.S. Impact of high night-time and high daytime temperature stress on winter wheat. *J. Agro. Crop Sci.* **2015**, *201*, 206–218. [[CrossRef](#)]
8. Asseng, S.; Ewert, F.; Martre, P.; Rötter, R.P.; Lobell, D.B.; Cammarano, D.; Kimball, B.A.; Ottman, M.J.; Wall, G.W.; White, J.W.; et al. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nat. Clim. Chang.* **2015**, *5*, 143–147. [[CrossRef](#)]
9. Finney, K.F.; Barmore, M.A. Loaf volume and protein content of hard winter and spring wheats. *Cereal Chem.* **1948**, *25*, 291–312.
10. Schofield, J.D. Wheat proteins: Structure and functionality in milling and breadmaking. In *Wheat Production, Properties and Quality*; Bushuk, W., Rasper, V.F., Eds.; Chapman & Hall: London, UK, 1994; pp. 72–106.
11. Shewry, P.R.; Halford, N.G.; Belton, P.S. The structure and properties of gluten: An elastic protein from wheat grain. *Philos. Trans. R. Soc. B* **2002**, *357*, 133–142. [[CrossRef](#)]
12. Shewry, P.R.; Tatham, A.S.; Barro, F.; Barcelo, P.; Lazzeri, P. Biotechnology of breadmaking: Unraveling and manipulating the multi-protein gluten complex. *Nat. Biotechnol.* **1995**, *13*, 1185–1190. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Keck, B.; Köhler, P.; Wieser, H. Disulphide bonds in wheat gluten: Cystine peptides derived from gluten proteins following peptic and thermolytic digestion. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* **1995**, *200*, 432–439. [[CrossRef](#)]
14. D'Ovidio, R.; Masci, S. The low-molecular-weight glutenin subunits of wheat gluten. *J. Cereal Sci.* **2004**, *39*, 321–339. [[CrossRef](#)]
15. Tatham, A.S.; Shewry, P.R. The conformation of wheat gluten proteins. The secondary structures and thermal stabilities of α -, β , γ and ω -Gliadins. *J. Cereal Sci.* **1995**, *3*, 103–113. [[CrossRef](#)]
16. Bietz, J.A.; Huebner, F.R. Structure of glutenin: Achievements at the Northern Regional Research Center. *Ann. Technol. Agric.* **1980**, *29*, 249–277.
17. Lemelin, E.; Branlard, G.; Salvo, L.; Lein, V.; Aussenac, T.; Daydé, J. Breadmaking stability of wheat flours: Relation between mixing properties and molecular weight distribution of polymeric glutenins. *J. Cereal Sci.* **2005**, *42*, 317–326. [[CrossRef](#)]
18. Barrera, G.; Pérez, G.; Ribotta, P.; León, A. Influence of Damaged Starch on Cookie and Bread-making Quality. *Eur. Food Res. Technol.* **2007**, *225*, 1–7. [[CrossRef](#)]
19. Dodds, N.J.H. Damaged Starch Determination in Wheat Flours in Relation to Dough Water Absorption. *Starch Stärke* **1971**, *23*, 23–27. [[CrossRef](#)]
20. Ghodke, S.K.; Ananthanarayan, L.; Rodrigues, L. Use of Response Surface Methodology to Investigate the Effects of Milling Conditions on Damaged Starch, Dough Stickiness and Chapatti Quality. *Food Chem.* **2009**, *112*, 1010–1015. [[CrossRef](#)]
21. Kaletunc, G.; Breslauer, K.J. *Characterization of Cereals and Flours: Properties, Analysis and Applications*; Marcel Dekker, Inc.: New York, NY, USA, 2003; p. 496.
22. Hug-Iten, S.; Handschin, S.; Conde-Petit, B.; Escher, F. Changes in Starch Microstructure on Baking and Staling of Wheat Bread. *LWT Food Sci. Technol.* **1999**, *32*, 255–260. [[CrossRef](#)]
23. Massaux, C.; Bodson, B.; Lenartz, J.; Sindic, M.; Sinnaeve, G.; Dardenne, P.; Falisse, A.; Deroanne, C. *L'amidon Natif du Grain de blé: Un Composé Naturel à Valoriser Par la Connaissance de ses Propriétés Techno-Fonctionnelles*; Livre blanc « céréales »; F.U.S.A et CRAW: Gembloux, Belgium, 2006.
24. Hosney, R.C.; Finney, K.F.; Pomeranz, Y.; Shogren, M.D. Functional (breadmaking) and biochemical properties of wheat flour components. VIII. Starch. *Cereal Chem.* **1971**, *48*, 191–201.
25. Sakr, N.; Rhazi, L.; Aussenac, T. Bread wheat quality under limiting environmental conditions: II—Rheological properties of Lebanese wheat genotypes. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* **2021**, in press. [[CrossRef](#)]

26. Baum, M.; Tadesse, W.; Nachit, M.; Abdalla, O.; Rajaram, S.; Singh, R.; Payne, T.; Ammar, K.; Morgounov, A.; Braun, H. Global Crop Improvement Networks to Bridge Technology Gaps. In *Advances in Wheat Genetics: From Genome to Field*; Ogihara, Y., Takumi, S., Handa, H., Eds.; Springer: Tokyo, Japan, 2015; pp. 387–399.
27. Fellahi, Z.; Hannachi, A.; Ferras, K.; Oulmi, A.; Boutalbi, W.; Bouzerzour, H.; Benmahammed, A. Analysis of the phenotypic variability of twenty f 3 biparental populations of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) evaluated under semi-arid environment. *J. Fundam. Appl. Sci.* **2017**, *9*, 102–118. [[CrossRef](#)]
28. AACC. (76.13.01) *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*, 10th ed.; AACC: St. Paul, MN, USA, 2000.
29. Hajas, L.; Scherf, K.A.; Török, K.; Bugyi, Z.; Schall, E.; Poms, R.E.; Koehler, P.; Tömösközi, S. Variation in protein composition among wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars to identify cultivars suitable as reference material for wheat gluten analysis. *Food Chem.* **2018**, *267*, 387–394. [[CrossRef](#)]
30. Rhazi, L.; Bodard, A.-L.; Fathollahi, B.; Aussenac, T. High throughput microchip-based separation and quantitation of high-molecular-weight glutenin subunits. *J. Cereal Sci.* **2009**, *49*, 272–277. [[CrossRef](#)]
31. Bancel, E.; Rogniaux, H.; Debiton, C.; Chambon, C.; Branlard, G. Extraction and proteome analysis of starch granule-associated proteins in mature wheat kernel (*Triticum aestivum* L.). *J. Proteome Res.* **2010**, *9*, 3299–3310. [[CrossRef](#)]
32. Chiamonte, E.; Rhazi, L.; Aussenac, T.; Richard White, D., Jr. Amylose and amylopectin in starch by asymmetric flow field-flow fractionation with multi-angle light scattering and refractive index detection (AF4-MALS-RI). *J. Cereal Sci.* **2012**, *56*, 457–463. [[CrossRef](#)]
33. Cook, B.I.; Anchukaitis, K.J.; Touchan, R.; Meko, D.M.; Cook, E.R. Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2016**, *121*, 2060–2074. [[CrossRef](#)]
34. Carceller, J.L.; Aussenac, T. Accumulation and changes in molecular size distribution of polymeric proteins in developing grains of hexaploid wheats: Role of the desiccation phase. *Aust. J. Plant Physiol.* **1999**, *26*, 301–310. [[CrossRef](#)]
35. El-Kareem, T.H.A.A.; El-Saidy, A.E. Evaluation of yield and grain quality of some bread wheat genotypes under normal irrigation and drought stress conditions in calcareous soils. *J. Biol. Sci.* **2011**, *11*, 156–164.
36. Jenner, C. Starch Synthesis in the Kernel of Wheat under High Temperature Conditions. *Aust. J. Plant Physiol.* **1994**, *21*, 791. [[CrossRef](#)]
37. Branlard, G.; Lesage, V.S.; Bancel, E.; Martre, P.; Méleard, B.; Rhazi, L. Coping with wheat quality in a changing environment: Proteomics evidence for stress caused by environmental changes. In *Advances in Wheat Genetics: From Genome to Field*; Ogihara, Y., Takumi, S., Handa, H., Eds.; Springer: Tokyo, Japan, 2015; pp. 255–264.
38. Graybosch, R.A.; Peterson, C.J.; Baenziger, P.S.; Shelton, D.R. Environmental modification of hard red winter wheat flour protein composition. *J. Cereal Sci.* **1995**, *22*, 45–51. [[CrossRef](#)]
39. Williams, R.M.; O'Brien, L.; Eagles, H.A.; Solah, V.A.; Jayasena, V. The influences of genotype, environment, and genotype × environment interaction on wheat quality. *Aust. J. Agric. Res.* **2008**, *59*, 95. [[CrossRef](#)]
40. Aussenac, T.; Rhazi, L. Storage Proteins Accumulation and Aggregation in Developing Wheat Grains. In *Global Wheat Production*; Fahad, S., Basir, A., Adnan, M., Eds.; IntechOpen: London, UK, 2018; pp. 134–163.
41. Southan, M.; MacRitchie, F. Molecular Weight Distribution of Wheat Proteins. *Cereal Chem.* **1999**, *76*, 827–836. [[CrossRef](#)]
42. MacRitchie, F.; Lafiandra, D. Structure-function relationships of wheat proteins. In *Food Proteins and Their Applications*; CRC Press: New York, NY, USA, 1997; pp. 293–323.
43. Stone, B.; Morell, M.K. Carbohydrates. In *Wheat: Chemistry and Technology*; Khan, K., Shewry, P.R., Eds.; AACC: St. Paul, MN, USA, 2009; pp. 299–362.
44. Bechtel, D.B.; Zargas, I.; Kaliekau, L.; Pomeranz, Y. Size distribution of wheat starch granules during endosperm development. *Cereal Chem.* **1990**, *67*, 59–63.
45. Shi, Y.C.; Seib, P.A.; Bernardin, J.E. Effects of temperature during grain-filling on starches from six wheat cultivars. *Cereal Chem.* **1994**, *71*, 369–383.
46. Park, S.-H.; Chung, O.K.; Seib, P.A. Effects of varying weight ratios of large and small wheat starch granules on experimental straight-dough bread. *Cereal Chem.* **2005**, *82*, 166–172. [[CrossRef](#)]



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences

journal homepage: www.sciencedirect.com

Bread wheat quality under limiting environmental conditions: II – Rheological properties of Lebanese wheat genotypes



Nada Sakr^a, Larbi Rhazi^b, Thierry Aussenac^{b,*}

^a Ministry of Agriculture, Rural Development Department, Beer Hassan, Lebanon

^b Institut Polytechnique UniLaSalle, Université d'Artois, Transformations & Agro-Ressources Research Unit - ULR7519, 19 rue Pierre Waguet, 60026 Beauvais cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 October 2020

Revised 12 January 2021

Accepted 2 February 2021

Available online 17 February 2021

Keywords:

Bread wheat

Semi-arid environments

Technological quality

Rheological behavior

Limiting weather conditions

Bread making properties

ABSTRACT

In the general framework of a program to improve the local production of common wheat by the Lebanese State, we have characterized the rheology of different bread wheat cultivars selected for their adaptation to semi-arid weather conditions. After a biochemical characterization [i.e. synthesis and accumulation of the major constituents of the grains (mainly storage proteins and starch)] of the plant material selected in a previous work, the main technological behavior of the flour that resulted from these grains and associated with bread-making properties was evaluated in the present study. Despite the selection of the plant material used in this study, the results demonstrate that environmental conditions inducing limitations in reserve accumulation [i.e. high gliadin content, very high level of polymerization/aggregation of polymeric prolamins, significant increase in the amylopectin/amylose ratio, modifications in the distribution of starch granules (A-type vs. B-type)] during grain filling affected the rheological behavior. The studied flours showed high wet and dry gluten contents, high Zeleny values, and a low gluten index value. They also showed high extensibility on the alveograph and extensograph and elevated dough strength on the farinograph, as well as great water absorption. Furthermore, flours of the studied cultivars did not express their optimal rheological potential in spite of their favorable glutenin subunit composition.

© 2021 The Authors. Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of King Saud University. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

As presented in a previous publication (Sakr et al., 2021), for several years, the Lebanese state has supported the introduction of local varieties of common wheat in order to limit the volume of its imports. In this context, a general improvement program has been put in place to select plant material adapted to environmental conditions (i.e., good productivity under semi-arid conditions) that can lead to national production of a high-quality product [i.e., respecting the needs expressed by Lebanese processors (i.e., millers and bakers)]. To this end, a specific panel of local varieties of common wheat was selected by the Grain and Vegetable Research Department of Lebanese Agricultural Research Insti-

tute Grain (LARI) with ICARDA and ACSAD, because of their agronomic behavior in the face of environmental constraints.

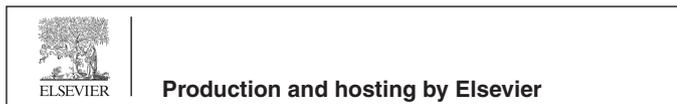
Within the general framework of a characterization of the plant material selected, an earlier study (Sakr et al., 2021) focused specifically on the synthesis and accumulation of the major constituents of the grains harvested at the end of different cropping years (i.e., 2016 and 2017). Under the environmental conditions of this study (semi-arid environments) and despite the genotypic selection of the plant material used, the different important phases of grain development (i.e., cell division, cell enlargement, and grain maturation) are affected. These physiological modifications, which are reflected in particular by a very significant limitation of the thousand kernel weight (TKW) in all of the genotypes studied, mainly result from a limitation of the grain filling time. Given these “physiologically limiting” conditions, and in total agreement with previously published results (Graybosch et al., 1995), the synthesis and accumulation of major grain constituents (i.e., storage proteins and starch) has been affected.

First, in this agronomic context, the accumulated storage proteins are characterized by a relatively high gliadin content [greater than 54% of the total protein content, approximately 10% to 15% greater than the protein content commonly encountered in soft

* Corresponding author.

E-mail address: thierry.aussenac@unilasalle.fr (T. Aussenac).

Peer review under responsibility of King Saud University.



wheat varieties (Aussenac and Rhazi, 2018)] and a very high level of polymerization/aggregation of polymeric prolamins [i.e., a high unextractable glutenin protein (UPP) content and a very high average molecular weight/average radius of gyration].

At the same time, a reduction in the amounts of synthesized and accumulated starch polysaccharides is accompanied by a significant change in the amylopectin/amylose ratio, the amylose content being greater than normal (i.e., >34%). Finally, the different genotypes studied are characterized by significantly different distributions of starch granules; the percentage of the volume occupied by A-type and B-type starch granules varied between genotypes for the two cropping years, confirming that the specific thermal regime during the synthesis and accumulation phases of prolamins and starch can explain the polymerization/aggregation changes in prolamins but also the modifications in the distribution of starch granules (A-type vs. B-type) (Park et al., 2009).

All of these results which, for the first time to our knowledge, make it possible to characterize the cumulative metabolism of prolamins and starch in the grains of local varieties (Lebanese) of common wheat selected for their agronomic performance, are essential in the measurement where it largely influences the aptitudes for the transformation of the corresponding flours. Indeed, as the literature shows, the different protein balances (i.e., gliadins/glutenins, UPP content, molecular weight distribution of glutenins) (Aussenac and Rhazi, 2018) and/or starch balances (i.e., amylose/amylopectin, molecular weight distribution, granule starch distribution. . .) (Park et al., 2005) are responsible for the majority of the physical, physicochemical, and rheological properties essential during the stages of transformation of grain into flour and then flour into dough.

Following the first part (part I) devoted to the characterization of Lebanese bread wheat genotypes by studying the molecular properties of their storage proteins and their starch constituents in mature grains, the second part of this study (part II) is devoted to a characterization of the rheological properties of the corresponding flours and doughs. The relationship between the molecular and rheological properties of the different wheat bread genotypes were investigated.

2. Material and methods

2.1. Plant material

The plant material consisted of four different bread wheat genotypes selected by two different agricultural research centers in dry areas ICARDA and ACSAD and tested as a substance for trials in the LARI field. The cultivars showed potential adaptation to semi-arid areas, characterized by low precipitation and high temperatures (Fig. 1). The pedigrees of these cultivars were previously described (Sakr et al., 2021).

2.2. Wheat flour quality traits

Sieved grains from each of the three field blocks (Sakr et al., 2021) were divided into homogeneous samples. Then, samples were milled according to the AACC method (AACC 26–21.02) using a Bühler laboratory miller (MLU-202, Germany). White flours were characterized through different analysis methods with at least three replicates.

Ash content was determined using the ICC standard method (104/1), by incineration of 5 g of flour for 1 h at 900 °C. The gluten index test was run according to the ICC standardized method (137/1) using Perten's Glutomatic machine (GM 2200; Sweden). The Zeleny sedimentation test was performed according to the ICC standard method (116/1). Hagberg falling number determination was carried out using the ICC approved method (107/1).

2.3. Rheological property determination

The alveograph test was applied using the AACC (54–30.1999) method and was conducted on an Alveolab machine by Chopin (Alveolab 2/2, France). Moreover, the farinograph test was applied according to the AACC standardized method (54–21.02). It was conducted on a Farinograph-E machine by Brabender (Germany). Extensography was carried out by applying the AACC method (54–10.01), using an Extensograph-E machine by Brabender (Germany).

2.4. Statistical analysis

XLSTAT (Addinsoft TM) was used for statistical analysis of data. ANOVA was used for variance comparison ($p = 0.05$). Means comparisons were performed by Tukey test (HSD) ($p = 0.05$). Due to a very large number of descriptors used to characterize the rheological (21) but also biochemical properties (24) of the flours used, a principal component analysis was used to compare these properties for the different studied wheat cultivars. During this analysis, only the figures [i.e. combination of two principal components (axes)] representing more than 70% of the total expressed variability were retained for the analysis of the results (i.e. axes F1 and F2).

3. Results

3.1. Wheat flour quality traits

Some significant differences were observed between cultivars regarding the extraction rates, ash content, gluten index, sedimentation test (Zeleny) and Hagberg number, while all genotypes presented similar wet and dry gluten contents (Table 1).

Regarding the extraction rates, values ranged between 60.1% and 67.6%, whereas the ash content varied between 0.61% and 0.72%. Despite the environmental constraints that limited the grain filling period, resulting in a decrease in both starch accumulation and specific grain weight, the extraction rate and the ash content were very similar to those found in the literature.

For wet gluten, significant differences were observed among the genotypes studied, where values ranged from 39.2% to 43.2%. Whereas for dry gluten, values did not vary significantly between cultivars and ranged from 13.3% to 13.9%. These values were higher than those mentioned in the literature by some authors (Surma et al., 2012) but still supported by others (Mutwali, 2011). In this latter study, the author reported wet gluten contents ranging from 26.63% to 46.94% after investigating 20 Sudanese bread wheat cultivars.

Significant variations between cultivars were observed regarding the gluten index. Values ranged from 55% to 68% for SHAM 8 and TAL AMARA 2, respectively, with a mean of 59%. Since the values were between 30% and 80%, the quality of the gluten obtained was considered normal (Cubadda et al., 1992). All of these observations are consistent with the results obtained by Barutcular et al. (2016), who studied the behavior of 16 different bread wheat genotypes under limiting environmental conditions (i.e., high temperature and low precipitation during grain filling) in Turkey. The gluten index values were lower under warm conditions and greater in a rainfed regime, whereas dry gluten was greater under warm conditions than in a rainfed regime.

For Zeleny sedimentation, values ranged from 41.0 mL to 56.9 mL, with an average of 45.9 mL. TAL AMARA 2 differed statistically from other genotypes, presenting the highest value (56.9 mL). This could be explained by the fact that this genotype exhibited the highest content of glutenin. Hagberg numbers differed significantly between cultivars and ranged from 394.08 to

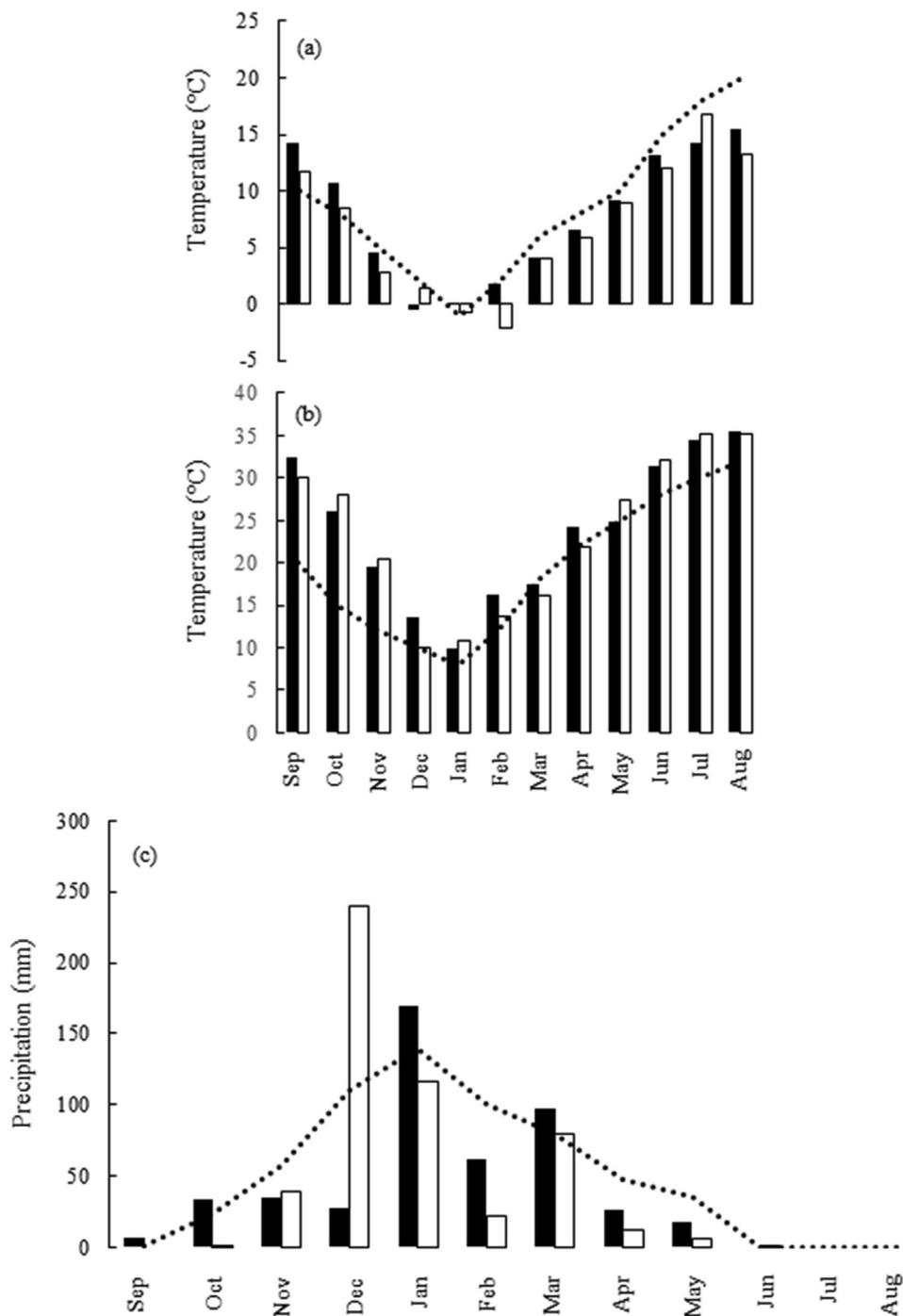


Fig. 1. Temperatures (a, b) and precipitations (c) for the two cropping seasons [2015/2016 (balck bars); 2016/2017 (white bars)]. (a) Monthly minimum temperatures, (b) monthly maximum temperatures. Historical averages (1954–2010) (dotted lines).

Table 1
Wheat flour quality traits.

| Genotype | Extraction rate (%) | Ash (%) (dry base) | Wet Gluten (%) | Dry Gluten (%) | Gluten Index (%) | Zeleny (mL) | Hagberg (sec) |
|---------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|------------------|-------------|---------------|
| SHAM 8 | 67.3b ¹ | 0.72c | 42.78c | 13.56a | 55.00a | 41.08a | 429.17b |
| TAL AMARA 2 | 60.1a | 0.61a | 40.69b | 13.92a | 68.00c | 56.92b | 421.25b |
| KATILA | 67.6b | 0.73c | 38.98a | 13.30a | 60.33b | 41.92a | 462.42c |
| ACSAD 1133 | 67.1b | 0.65b | 43.98c | 13.71a | 54.00a | 43.75a | 394.08a |
| Mean ² | 65.5 | 0.68 | 41.64 | 13.62 | 59.33 | 45.92 | 426.73 |
| CV _G (%) | 5.51 | 8.73 | 5.33 | 1.92 | 10.81 | 16.15 | 6.59 |
| CV _E (%) | 2.20 | 10.48 | 26.82 | 22.01 | 16.59 | 12.96 | 11.32 |

¹ Multiple mean comparisons were performed using a Tukey test (HSD) ($p = 0.05$).

² Mean values of two consecutive cultivation years and three blocks. Genetic coefficient of variation (CV_G) and Environmental coefficient of variation (CV_E).

462.42 sec, exhibiting significantly lower alpha amylase activity (>400 sec) (Madeira et al., 2015). These values above 250 or 300 s. show that our genotypes can be classified as high-quality seeds (Mares and Mrva, 2008).

Moreover, for all parameters the source of variation was mainly due to the environment, rather than the genotype [Environmental coefficient of variation (CV_E) > Genetic coefficient of variation (CV_G)], the exception being extraction. In fact, these results are in accordance with those obtained by Surma et al. (2012), who revealed a higher environmental effect on Zeleny sedimentation and wet gluten in 24 genotypes of winter wheat, although these characteristics are influenced by genotype. Other studies also showed a greater impact of the environment on the Zeleny sedimentation value (Mikhaylenko et al., 2000) and on the gluten index (Oikonomou et al., 2015).

3.2. Rheological quality measured by the alveograph

The four genotypes differed with respect to all alveograph parameters (Table 2). In fact, the dough strength varied from 178.25 to 262.67 × 10⁻⁴ J, where Sham8 seemed to be the weakest (178.25 × 10⁻⁴ J) and KATILA the strongest (262.67 × 10⁻⁴ J). Tenacity levels (P) ranged between 55.00 (TAL AMARA 2) and 93.50 mm (KATILA), whereas those of extensibility (L) were between 68.67 and 138.25 mm (TAL AMARA 2). The extensibility index fluctuated from 42.55% to 55.33% and the swelling index (G) between 19.37% and 26.75%. However, P/L (tenacity/extensibility ratio) ranged between 0.41 (TAL AMARA 2) and 1.23 (SHAM 8), with a mean ratio of 0.86. Also, genotype was the main source of variation for all alveograph parameters [Genetic coefficient of variation (CV_G) > Environmental coefficient of variation (CV_E)]. This shows a dominance of the varietal effect for this rheological test that may be involved in varietal breeding programs, revealing the possibility of predicting the value of a batch of grains from knowledge of its genetic makeup alone. These results are parallel to those obtained by Rousset et al. (1985); however, they are not in accordance with those of Surma et al. (2012), who demonstrated that the response of genotypes to different environments is unpredictable.

3.3. Rheological quality measured by the farinograph

Cultivars differed regarding all studied parameters on the farinograph (Table 3). The absorption values ranged from 58.18% to 65.26%, for TAL AMARA 2, and SHAM 8, respectively, and were almost in range with those obtained on Syrian and Turkish cultivars (Al Saleh & Brennan, 2012; Şahin et al., 2019). The peak time for the four genotypes presented a mean level of 11.40 min, where Tal Amara showed the highest level (13.03 min). This level exceeded values reported for bread wheat cultivated in the region (Al Saleh & Brennan, 2012; Şahin et al., 2019). Stability and dough weakness (12') varied, respectively, from 9.00 (SHAM 8) to 15.39

(TAL AMARA 2) min and from 42.50 (KATILA) to 98.25 BU (SHAM 8). Compared with the results of Şahin et al. (2019), stability was in range for only SHAM 8 (5.85–8.41 min), where other genotypes were higher. In addition, TAL AMARA 2 and KATILA showed a higher dough strength. Moreover, variations were mostly due to genotype factor [Genetic coefficient of variation (CV_G) > Environmental coefficient of variation (CV_E)], with the exception of peak time. These results are not in accordance with those obtained by Panozzo and Eagles (2000), who proved a superior effect of environment on the peak time, while Solomon et al. (2012) demonstrated a higher environmental effect on the farinogram of 23 genotypes grown in 12 different environments. Also, Denčić et al. (2012) demonstrated a dominant effect of genotype regarding the farinograph of 140 cultivars that originated from 28 different countries.

3.4. Rheological quality measured by the extensograph

Cultivars acted differently regarding the extensograph test (Table 4). Hence, levels of maximal resistance ranged between 203.75 and 405.25 BU for SHAM 8 and KATILA, respectively, whereas resistance to extension varied from 185.25 (SHAM 8) to 324.75 BU (KATILA). Also, SHAM 8 seem to present the weaker dough and KATILA, the strongest. TAL AMARA 2 showed a higher extensibility of 200.17 mm, whereas other cultivars expressed lower values (146.50–165.42 mm). High extensibility, the weakness of SHAM 8, and the highest extensibility of TAL AMARA 2 of cultivars were revealed previously by the alveograph. Coefficient levels were between 1.13 and 2.23, but the energy values ranged from 44.00 (SHAM 8) to 90.75 cm² (TAL AMARA 2), confirming the weakness of SHAM 8. Under semi-dry conditions, bread wheat tended to express lower resistance to extension (160–246 BU) and energy, such as SHAM 8 (44.00 cm²) (Makawi et al., 2013). Hence, the studied cultivars might be suitable for bread making, with the exception of SHAM 8, which seemed to express weakness. Also, variations in all parameters were mainly due to the genotype factor [Genetic coefficient of variation (CV_G) > Environmental coefficient of variation (CV_E)]. This shows the influence of the heredity of the traits of the different cultivars on the extensograph, which is of special importance for varietal breeding programs. These results are not in accordance with those found by Denčić et al. (2012), while they agree with those of Solomon et al. (2012).

4. Discussion

The main components of a wheat grain, mainly proteins, are responsible for most of the physical, physico-chemical, and rheological properties during grain processing. It is therefore important to understand and discuss the effect of environmental constraints on these components, which control all technological parameters. The environmental conditions during the two crop seasons that the lines underwent were characterized by a drastic lack of rainfall

Table 2
Behavior of doughs after mixing (Alveograph results).

| Genotype | W × 10 ⁻⁴ J | P (mm) | L (mm) | P/L | le (%) | G (%) |
|---------------------|------------------------|--------|---------|-------|--------|--------|
| SHAM 8 | 178.25a ¹ | 84.50c | 68.67a | 1.23d | 42.55a | 19.37a |
| TAL AMARA 2 | 230.25b | 55.00a | 138.25d | 0.41a | 55.33c | 26.75c |
| KATILA | 262.67c | 93.50d | 88.25b | 1.05c | 49.58b | 21.18b |
| ACSAD 1133 | 222.75b | 75.92b | 99.75c | 0.77b | 51.72b | 21.82b |
| Mean ² | 223.48 | 77.23 | 98.73 | 0.86 | 49.79 | 22.28 |
| CV _G (%) | 12.37 | 21.32 | 29.68 | 41.83 | 10.81 | 14.17 |
| CV _E (%) | 10.19 | 2.71 | 3.55 | 11.46 | 3.14 | 3.94 |

¹ Multiple mean comparisons were performed using a Tukey test (HSD) (p = 0.05).

² Mean values of two consecutive cultivation years and three blocks. Genetic coefficient of variation (CV_G) and Environmental coefficient of variation (CV_E).

Table 3
Behavior of flours during mixing (farinograph results).

| Genotype | Absorption (%) | Peak time (min) | Stability (min) | Dough weakness 12' (UB) |
|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| SHAM 8 | 65.26c ¹ | 10.77a | 9.00a | 98.25d |
| TAL AMARA 2 | 58.17a | 13.03b | 15.39c | 56.50b |
| KATILA | 65.07c | 11.10a | 15.00c | 42.50a |
| ACSAD 1133 | 62.70b | 10.70a | 9.70b | 85.00c |
| Mean ² | 62.80 | 11.40 | 12.27 | 70.56 |
| CV _G (%) | 5.25 | 9.94 | 27.63 | 36.23 |
| CV _E (%) | 7.33 | 28.12 | 7.89 | 12.15 |

¹ Multiple mean comparisons were performed using a Tukey test (HSD) ($p = 0.05$).

² Mean values of two consecutive cultivation years and three blocks. Genetic coefficient of variation (CV_G) and Environmental coefficient of variation (CV_E).

Table 4
Behavior of flours during mixing (extensograph results).

| Genotype | Maximal resistance (UB) | Resistance to extension (UB) | Extensibility (mm) | Coefficient | Energy (cm ²) |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------|-------------|---------------------------|
| SHAM 8 | 203.75-a ¹ | 185.25a | 146.50a | 1.28a | 44.00a |
| TAL AMARA 2 | 322.75b | 222.00b | 200.17c | 1.13a | 90.75c |
| KATILA | 405.25d | 324.75d | 147.42a | 2.23c | 90.25c |
| ACSAD 1133 | 375.50c | 284.50c | 165.42b | 1.68b | 81.83b |
| Mean ² | 326.81 | 254.13 | 164.88 | 1.57 | 76.71 |
| CV _G (%) | 27.19 | 24.56 | 15.22 | 31.21 | 28.92 |
| CV _E (%) | 8.03 | 7.58 | 1.97 | 7.85 | 17.59 |

¹ Multiple mean comparisons were performed using a Tukey test (HSD) ($p = 0.05$).

² Mean values of two consecutive cultivation years and three blocks. Genetic coefficient of variation (CV_G) and Environmental coefficient of variation (CV_E).

and high temperatures, particularly during the wheat grain filling phases. Although the lines were selected for their adaptation to these environments, the consequences of these particularly severe conditions were that the phases of accumulation of wheat grain reserves were considerably shortened, resulting in a very low specific weight. In addition, the TKW for all genotypes was significantly affected, reflecting a reduction in the accumulation of the major components of a wheat kernel (i.e., proteins and starch). Hence, environmental conditions prevailing during both seasons of culture in our study (i.e., high temperature and negligible precipitation) during grain development reduced the grain filling length and led to modification of grain composition. In fact, high protein levels were observed, accompanied by low starch content in the grain. Also, proteins were rich in gliadins (more than 54% of total protein content), whereas a very high level of polymerization/aggregation of glutenins was revealed. At the same time, low amounts of starch were accompanied by a greater content of amylose (i.e., >34%) and a significant change in the amylopectin/amylose ratio. In addition, a significant modification of the starch granule distribution was recorded (A-type vs. B-type).

It is well known that temperature, rainfall, and their distribution during the growing season have a significant impact on protein quantity and distribution. Denčić et al. (2012) noted that the impact of the environment on the quality and quantity of proteins is determined by climate factors. Thus, the protein content of wheat rises in a semi-arid environment when the temperature intensity is more or less high for a long time. In addition, the combination of water scarcity and high temperatures during the grain filling phase results in an increase in protein content. Furthermore, a high temperature during the grain filling phase increases the overall amount of glutenin sub-units, whereas a water deficit increases the high molecular weight glutenin subunits/low molecular weight glutenin subunits (SG-HMW/SG-LMW) ratio (Flagella et al., 2010). Gliadin synthesis is also affected, since it has been shown that heat and water stresses cause a high accumulation of this protein fraction.

In addition, environmental factors control the biosynthesis and accumulation of starch in the wheat grain. Thus, water stress reduces wheat productivity by accelerating the accumulation of

starch in the grain. Also, water deficit causes an alteration of the activities of the enzymes involved in the synthesis of starch, which include ADP-glucose pyrophosphorylase (catalyzes the transformation of glucose-1-P into ADP-glucose) and starch synthase as well as the branching enzyme (responsible for the conversion of ADP-glucose into amylose and amylopectin) (Ahmadi and Baker, 2001). In addition, water stress alters certain characteristics of starch, such as thermal properties, bonding properties, and the number of granules produced. It causes a decrease in the accumulation of small starch granules (type B) and an increase in large granules (type A). Water stress is considered an inhibitory factor when it occurs in the second phase of starch granule development, which affects B-type granules; however, type-A granules, which develop in the first phase, are not affected by this stress (Liu et al., 2011). Also, heat stress causes morphological and physico-chemical changes in wheat starch, depending on the stage of development of the plant when it occurs. It also has an effect on starch synthesis. A temperature above 35 °C during the grain filling phase causes a decrease in starch biosynthesis due to alterations in synthetic enzymes (Thitisaksakul et al., 2012). Studies have shown that high temperatures applied after anthesis reduce the starch content of the grain and alter its composition by favoring the formation of type A granules and reducing the number of type B granules. Others have reported that temperatures above 30 °C occurring before anthesis cause a decrease in the number of A granules compared with B granules with the appearance of certain morphological deformities (Liu et al., 2011). Thus, water and heat stress affect the accumulation and composition of protein and starch in wheat grains.

In order to understand and interpret all of these rheological properties, which are the results of wheat grain composition being affected by the environmental constraints during both seasons of culture, a principal component analysis (PCA) comparison between these genotypes taking into consideration their rheology and composition parameters was performed (Fig. 2). It showed large differences between the studied cultivars. In fact, flour resulting from the obtained grains exhibited high wet and dry gluten content and Zeleny sedimentation, a low gluten index, a great extensibility on the alveograph and extensograph, and high dough strength on

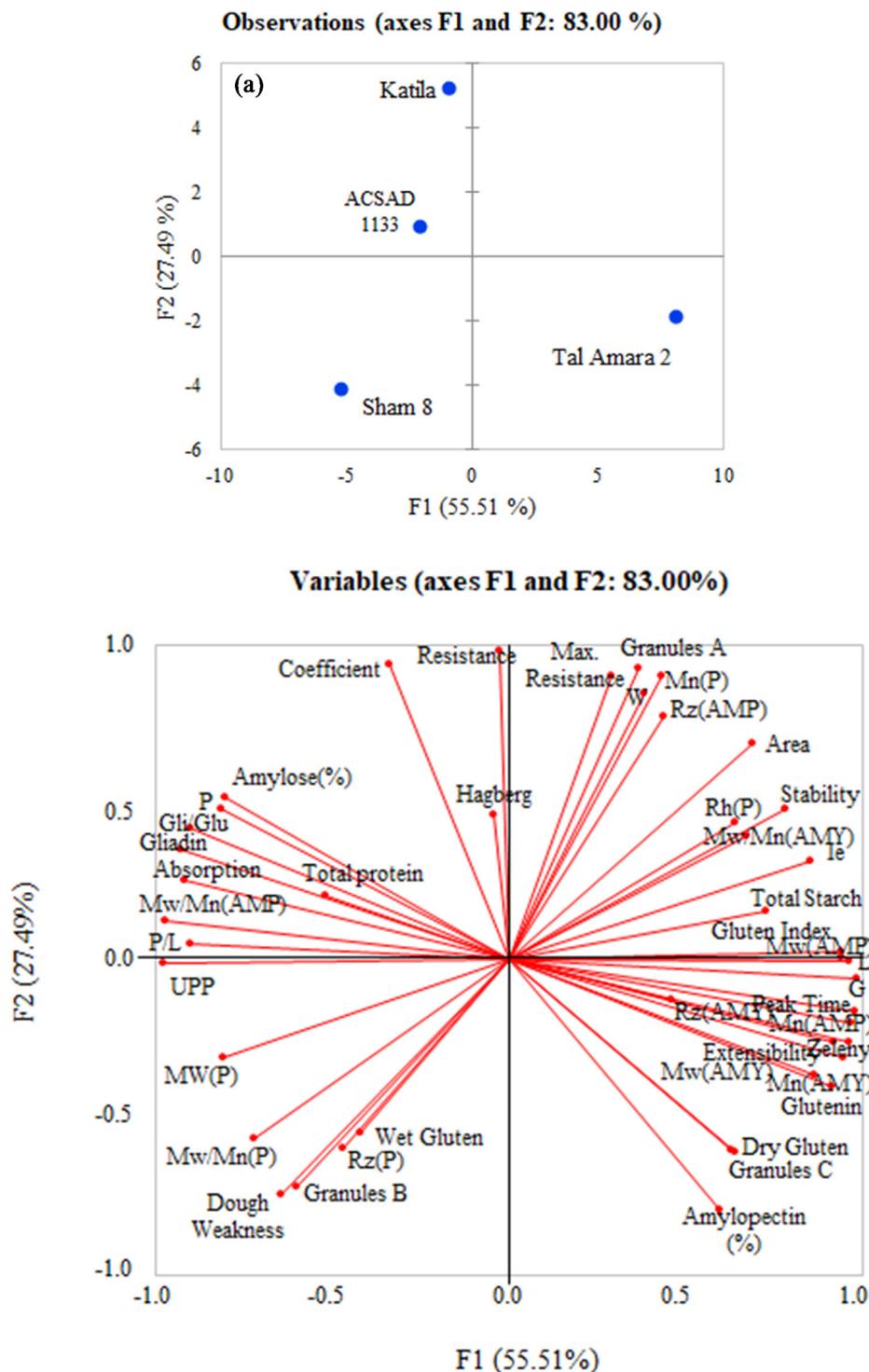


Fig. 2. Principal component analysis (PCA) of the rheological properties and of the biochemical composition of flours of the studied cultivars.

the farinograph. Despite the rheological modifications that occurred to the flour of cropped grains, KATILA and ACSAD 1133 seemed to be the closest in quality (Fig. 2a), whereas SHAM 8 and TAL AMARA 2 differed the most from each other and from the other two genotypes in rheology as well as in composition. Thus, physiological parameters influenced the distribution of genotypes upon these two principal components (PC).

In fact, TAL AMARA 2 showed the highest extensibility, L, G, peak time, Zeleny sedimentation, and dry gluten. These parameters

are generally associated with a high gliadin content and/or high protein content. Extensibility is generally explained by a high gliadin content and is also associated with the presence of the Gli-A1, Gli-B2, and Gli-D2 alleles (Branlard and Metakovsky, 2006). Recently, a very robust relationship was established between extensibility and Gli A2 (Noma et al., 2019). TAL AMARA 2 is characterized by the highest value of extensibility and has the lowest gliadin content. Therefore, its high extensibility could be explained by the quality of the glutenin aggregates obtained. The aggregates

had the lowest molecular weight and the lowest polymerization index (UPP), which led to weak associations. These chemical parameters would be due to the lowest SG-HMW/SG-LMW ratio recorded among the varieties studied. A high quantity of low molecular weight glutenin subunits (SG-LMW) could be responsible for small aggregated polymers, leading to a serious modification of gluten properties, mostly those controlling the rheological characteristics of wheat grains. Regarding the Zeleny sedimentation value, which is known to be positively correlated with the protein content (Denčić et al., 2012), TAL AMARA 2 showed a relatively high protein content, but still much lower than the other genotypes. However, its Zeleny value was the highest. It may be that the low protein content was compensated by its high glutenin content. Therefore, the combination of a low total protein content with a high proportion of glutenins could result in a high sedimentation value.

Diagonally opposite, KATILA and ACSAD had biochemical characteristics that could have allowed these two varieties a very high extensibility and a very high Zeleny value because they have accumulated a lot of proteins, especially gliadins, resulting in very high gliadines/glutenins (Gli/Glu) ratios. However, their rheological characteristics were among the lowest. This could be explained by the fact that these parameters would be influenced by the presence of a strong glutenin aggregation represented by high UPP% and that the molar mass of the polymeric aggregates is very high compared with those of TAL AMARA 2. Therefore, UPP and the molecular distribution of the polymeric aggregates would be responsible for the correction of some rheological defects. In addition, ACSAD 1133 and KATILA have been classified as PCAs based on absorption, dough strength, P, P/L, and Hagberg. These results, especially the alveograph data, can logically be explained by the high molecular weight of the polymer aggregates (Singh & MacRitchie, 2001). In addition, these rheological characteristics were due to their higher protein and gliadin content and a higher Gli/Glu ratio, as confirmed by Iqbal et al. (2015). Therefore, the composition of these genotypes might favor dough extensibility counterbalanced by polymers of high molar mass and a high index of polymerization, resulting in high levels of non-extractible polymers.

In addition, SHAM 8 revealed higher dough weakness and a higher wet gluten content. Its wet gluten content may be attributed not only to its richness in UPP but also to the higher molar mass of its highly dispersed glutenins. The molar mass of the polymer aggregates is the highest among the studied varieties, whereas its dough weakness could be explained by the lower protein content compared to other cultivars, which is supported by Branlard and Dardevet (1985), revealing a positive correlation between dough strength and protein content. Also, this weakness may be attributed to the very high molecular weight of its polymer aggregates.

The granular distribution of starch and molecular distribution of amylose and amylopectin could be involved in explaining certain rheological behaviors, since certain starchy molecular parameters have been strongly involved in the description of genotypes using PCA. Thus, B granules were associated with dough weakness, while C granules were linked to dry gluten as well as amylopectin content. The molar mass of amylopectin showed associations with the gluten index, extensibility, L, and G.

The observed results translated to a drastic effect of weather conditions on the synthesis, accumulation, polymerization, and aggregation of wheat grain reserves. This modified the grain biochemical composition and, consequently, grain dough rheological behavior, despite the potential of the studied varieties to give a yield product of high technological quality, since they contain HMW-GS 5 + 10 and HMW-GS 7 + 9.

5. Conclusions

Within a framework of the introduction of new varieties of bread wheat by the Lebanese State, reducing importations and locally producing grains of a suitable rheological quality in order to meet the technological requirements of preparing Lebanese bread, we have characterized the plant material selected for its adaptation to semi-arid conditions by studying its rheological behavior.

Although the plant material was selected, our results demonstrated that wheat grains of the studied cultivars did not express their optimal rheological potential despite technological suitability defined by their HMW-GS content (5 + 10), due to limitations in environmental conditions that affected the accumulation of grain components (i.e., proteins and starch) by reducing the grain filling time length. Accordingly, flour resulting from the obtained grains exhibited high wet and dry gluten content and Zeleny values, a low gluten index, a great extensibility on the alveograph and extensograph, and high dough strength on the farinograph.

These modifications of rheological behavior of the studied grains can be explained by the grain biochemical composition, which was high in protein and low in starch content. In fact, high protein levels associated with a high gliadin content and the Gli/Glu ratio were supposedly responsible for the revealed extensibility. In addition, the high molar mass of glutenin polymers, highly aggregates, and great amounts of UPP translated to a dough of great strength. On the other hand, the rheological behavior could also be explained by low starch accumulation in the grain, which was related to elevated levels of amylose and a reduced amylopectin/amylose ratio and resulted in significant modifications in starch granule distribution, specifically a higher molecular weight of amylopectin and a higher concentration of type A vs. type B granules.

Thus, a comparison between flour of studied varieties cultivated during two successive years of drought revealed non-comparable rheological characteristics between the studied cultivars.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

Authors would like to thank LARI (Lebanese agricultural research institute) and Crown Flour mills s.a.l. (Beirut, Lebanon) for supporting part of this research.

References

- AACC International Approved Methods of Analysis (eleventh ed.), AACC International, St. Paul, MN USA, 2013. Methods 26-21.02, 54-30.1999, 54-21.02 and 54-10.01
- Ahmadi, A., Baker, D., 2001. The effect of water stress on grain filling processes in wheat. *J. Agric. Sci.* 136, 257–269.
- Al-Saleh, A., Brennan, C.S., 2012. Bread wheat quality: some physical, chemical and rheological characteristics of Syrian and English bread wheat samples. *Foods* 1 (1), 3–17.
- Aussenac T., & Rhazi L., 2018. Storage proteins accumulation and aggregation in developing wheat grains. in: Fahad S., Basir A., Adnan M. (Eds.) *Global Wheat Production*, pp.133. IntechOpen, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75182>.
- Barutcular, C., Yildirim, M., Koc, M., Akinci, C., Tanrikulu, A., El Sabagh, A., Saneoka, H., Ueda, A., Sohitud, I.M., Toptas, I., Albayrak, O., 2016. Quality traits performance of bread wheat genotypes under drought and heat stress conditions. *Fresenius Environ. Bull.* 25 (12a), 6159–6165.
- Branlard, G., Dardevet, M., 1985. Diversity of grain proteins and bread wheat quality: I. Correlation between gliadin bands and flour quality characteristics. *J. Cereal Sci.* 3 (4), 329–343.

- Branlard, G.P., Metakovsky, E.V., 2006. Some Gli alleles related to common wheat dough quality. Gliadin and Glutenin. The unique balance of wheat quality. AACCI Press, St. Paul, MN, USA, 115–140.
- Cubadda, R., Carcea, M., Pasqui, L.A., 1992. Suitability of the gluten index method for assessing gluten strength in durum wheat and semolina. *Cereal Foods World* (USA).
- Denčić, S., Mladenov, N., Kobiljski, B., 2012. Effects of genotype and environment on breadmaking quality in wheat. *Int. J. Plant Prod.* 5, 71–82.
- Flagella, Z., Giuliani, M.M., Giuzio, L., Volpi, C., Masci, S., 2010. Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. *Eur. J. Agron.* 33, 197–207.
- Graybosch, R.A., Peterson, C.J., Baenziger, P.S., Shelton, D.R., 1995. Environmental modification of hard red winter wheat flour protein composition. *J. Cereal Sci.* 22, 45–51.
- ICC, 1994. Standard Methoden der internationalen Gesellschaft für Getreidechemie. Methods 116/1, 118, 107/1, 137/1, 104/1. Verlag Moritz Schäfer: Detmold, Germany.
- Iqbal, Z., Pasha, I., Abrar, M., Masih, S., Hanif, M.S., 2015. Physico-chemical, functional and rheological properties of wheat varieties. *J. Agric. Res.* 53, 253–267.
- Liu, P., Guo, W., Jiang, Z., Pu, H., Feng, C., Zhu, X., Peng, Y., Kuang, A., Little, C.R., 2011. Effects of high temperature after anthesis on starch granules in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agric. Sci.* 149 (2), 159–169.
- Madeira, R.A.V., Fernandes, A.F., Reis, W.P., Carvalho, C.W.P.D., Pereira, J., 2015. Technological characterization and classification of wheat lineages cultivated in the Cerrado mineiro. *Ciência e agrotecnologia* 39 (3), 283–290.
- Makawi, A.B., Mahmood, M.I., Hassan, H.A.R., Ahmed, I.A.M., 2013. Grains quality characteristics of local wheat (*Triticum aestivum*) cultivars grown at Khartoum State, Sudan. *Int. J. Life Sci.* 7 (1), 12–16.
- Mares, D., Mrva, K., 2008. Genetic variation for quality traits in synthetic wheat germplasm. *Aust. J. Agric. Res.* 59 (5), 406–412.
- Mikhaylenko, G.G., Czuchajowska, Z., Baik, B.-K., Kidwell, K.K., 2000. Environmental influences on flour composition, dough rheology, and baking quality of spring wheat. *Cereal Chem.* 77, 507–511.
- Mutwali, N.I.A.K., 2011. Quality of wheat cultivars grown in different locations of Sudan for bread making. (Ph.D. thesis). Department of food science and technology, Faculty of agriculture, University of Khartoum.
- Noma, S., Hayakawa, K., Abe, C., Suzuki, S., Kawaura, K., 2019. Contribution of α -gliadin alleles to the extensibility of flour dough in Japanese wheat cultivars. *J. Cereal Sci.* 86, 15–21.
- Oikonomou, N.A., Bakalis, S., Rahman, M.S., Krokida, M.K., 2015. Gluten index for wheat products: Main variables in affecting the value and nonlinear regression model. *Int. J. Food Prop.* 18 (1), 1–11.
- Panizzo, J.F., Eagles, H.A., 2000. Cultivar and environmental effects on quality characters in wheat. II. Protein. *Aust. J. Agric. Res.* 51, 629–636.
- Park, S.H., Chung, O.K., Seib, P.A., 2005. Effects of varying weight ratios of large and small wheat starch granules on experimental straight-dough bread. *Cereal Chem.* 82 (2), 166–172.
- Park, S.H., Wilson, J.D., Seabourn, B.W., 2009. Starch granule size distribution of hard red winter and hard red spring wheat: Its effects on mixing and breadmaking quality. *J. Cereal Sci.* 49 (1), 98–105.
- Rousset, M., Triboui, E., Branlard, G., Godon, B., 1985. Influence du génotype et du milieu sur les tests d'appréciation de la valeur d'utilisation du blé tendre (*Triticum aestivum* em. Thell.) dans les industries de cuisson. *Agronomie* 5, 653–663.
- Şahin, M., Akcacak, A.G., Aydoğan, S., Hamzaoglu, S., Demir, B., 2019. Evaluation of grain yield, some quality traits and farinograph parameters in bread wheat genotypes grown in irrigated and rainfed. *J. Global Innovations in Agricultural Social Sci.* 7 (3), 119–123.
- Sakr, N., Rhazi, L., Aussenac, T., 2021. Bread wheat quality under limiting environmental conditions: I- Molecular properties of storage proteins and starch constituents in mature grains. Submitted to Agriculture.
- Singh, H., MacRitchie, F., 2001. Application of polymer science to properties of gluten. *J. Cereal Sci.* 33 (3), 231–243.
- Solomon, K.F., Smit, H.A., Malan, E., Du Toit, W.J., 2012. Parametric model based assessment of genotype \times environment interactions for grain yield in durum wheat under irrigation. *Int. J. Plant Prod.* 2, 23–36.
- Surma, M., Adamski, T., Banaszak, Z., Kaczmarek, Z., Kuczyńska, H., Majcher, M., Ługowska, B., Obuchowski, W., Salmanowicz, B., Krystkowiak, K., 2012. Effect of genotype, environment and their interaction on quality parameters of wheat breeding lines of diverse grain hardness. *Plant Prod. Sci.* 15, 192–203.
- Thitisaksakul, M., Jiménez, R.C., Arias, M.C., Beckles, D.M., 2012. Effects of environmental factors on cereal starch biosynthesis and composition. *J. Cereal Sci. Cereal Grain Development: Mol. Mech. Impacts on Grain Composition and Functionality* 56, 67–80.