

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش - الجزائر
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE (ENSA)
EI - HARRACH – ALGER



Département de **Technologie Alimentaire**

THESE DE DOCTORAT

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en :

Sciences Agronomiques

Option : Sciences Alimentaires

Présentée par: M^{elle} **ABDELLAOUI Zakia**

Thème

**Effet de la fertilisation azotée sur, la composition
des protéines de réserve et la qualité technologique
des produits de deuxième transformation du blé dur.**

Soutenue devant le jury composé de :

Mr BELLAL.M	Professeur (ENSA,Alger)	Président
Mme OUNANE.G	Professeur (ENSA,Alger)	Directrice de thèse
Mr AISSAT.AMCA (Saad Dahleb,Blida1)		Examineur
Mme YAHIAOUI. KMCA (UMB, Boumerdès)		Examinatrice

Année universitaire: 2019/2020

Je dédie ce travail à :
Mes très chers parents
Ma famille
Mes amis
A tous ceux qui m'aiment et que j'aime
Et
A tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail de près ou de loin.

A. Zakia 

Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie d'abord le bon Dieu qui m'a beaucoup aidé en me donnant courage et patience dans la réalisation de cette thèse.

Je tiens à remercier le professeur OUNANE.G d'avoir accepté d'encadrer ce travail. Ses orientations, conseils sa disponibilité m'ont été très utiles et m'ont aidé dans l'aboutissement de cette thèse.

Pour avoir accepté de juger ce travail, je remercie le professeur BELLAL.M, enseignant à l'Ecole Nationale Agronomique qui m'a fait l'honneur de présider le jury, qu'il trouve ici ma haute considération. Mes remerciements vont aussi à Mr AISSAT.A maître conférence A à l'université Blida1, faculté SNV et Mme YAHIAOUI.K maître de conférence A à l'université M'Hamed Bougarra de Boumerdès.

Un grand merci à l'équipe ITGC (Oued Smar) qui m'a aidé dans la mise en place des essais sur terrain.

Ma grande gratitude va également à l'équipe du laboratoire de biochimie de l'Université de TUSCIA, département des sciences agronomiques et forestières de Viterbo, en Italie, représenté par le professeur Dominico Lafiandra, Stephania Massi et Francisco Sesteli. J'exprime aussi mes sincères reconnaissances à tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également ma famille et mes amis pour leur soutien et leurs encouragements

Liste d'abréviations

ACN: Acétonitrile
APG: Angiosper phylogeny group
APS: Ammonium Persulfate
ARNm : Acide ribonucléique messenger
CE : Capacité de fixation d'eau
CP : Corpuscules protéiques
Coll : Collant
DTT : Dithiothreitol
DPI : Dots Per Inch : pixels par pouce.
GH: Gluten humide
GI: Gluten index
HP : Hauteur du pic
IB : Indice de brun
IJ : Indice de jaune
JAF: Jours après floraison
MBB : Mohammed Ben Bachir
MCH : Moucheture
MP: Protéines monomériques
NTP : Note de panification
PC : Pertes à la cuisson
PG : Teneur en protéines des grains
PMG : Poids de 1000grains
PMG : Poids de mille grains
PP: Protéines polymériques
UNI : Nazionale Italiano di Unificazione
PS : Teneur en proteines semoule
Rdt : Rendement
RP-HPLC: Reverse phase High performance liquid chromatography
SDS-PAGE: Electrophorèse en gel de polyacrylamide contenant du dodécylsulfate de sodium
SE-HPLC: Size exclusion high liquid chromatographie
SG-FPM : Sous glutenines à faible poids moléculaire
SG-HPM : Sous glutenines à haut poids moléculaire
t/ha : Tonne/ha
TCA : Acide trichloracétique
TDV: Temps de développement
TEMED: Tétraméthylènediamine
TFA: Trichlorofluoroacétique
UPP: Unextractable polymérique protéines
VB : Valeur boulangère
Vitr : Vitrosité
VP : Volume du pain
W : Force boulangère

Table des matières

Remerciements	ii
Liste d'abréviations.....	iii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
الملخص العام	1
Résumé	2
Summary.....	3
INTRODUCTION.....	4

Bibliographie

I. Généralités sur le blé dur	7
I.1. Situation de la production du blé dur en Algérie	7
I.2. Morphologie et classification botanique	9
I.3. Composition, histologie du grain de blé.....	10
I.3.1. Les enveloppes	10
I.3.2. L'albumen.....	11
I.3.3. Le germe	11
I.4. Les principaux constituants du grain de blé	11
I.5. Les phases de développement du grain de blé	12
II. Les protéines de réserve de blé	14
II.1. Classification des protéines du blé.....	14
II.2. Propriétés et structure des protéines de réserve	15
II.2.1. Les gliadines.....	15
II.2.2. Les gluténines.....	17
II.3. Le gluten	19
II.3.1. Structure du gluten	19
II.3.2. Propriétés du gluten.....	20
II.3.2.1. Mouvement segmentaire	20
II.3.2.2. Distribution du poids moléculaire	20
II.3.2.3. Enchevêtrement	20
II.3.3. Facteurs influençant la solubilité des protéines du gluten	21
II.3.3.1. Comportement des protéines pendant la formation de la pâte	21
II.4. Mécanisme d'accumulation des protéines de réserve au cours de la croissance du grain	24

II.4.1. Biosynthèse des corpuscules protéiques	24
II.4.2. Accumulation des protéines de réserve au cours de la croissance du grain	25
III. Les protéines et qualité technologique du blé dur	26
III.1. Evaluation de la qualité du blé dur	26
III.1.1. La valeur semoulière	26
III.1.2. La valeur pastière	27
III.1.3. Qualité du couscous	28
III.2. Propriétés des protéines de blé	29
VII. Effets des facteurs environnementaux sur l'expression de la qualité du blé	31
VII.1. Influence des conditions environnementales sur l'accumulation des protéines	31
VII.2. Influence de la température sur l'accumulation des protéines	32
VII.3. Influence des microéléments sur les protéines	33
VII.3.1. L'influence du soufre	33
VII.3.2. Influence de l'azote	34
VII.4. Effet de l'azote dans l'expression des gènes codant des protéines de réserve	35

Matériel et Méthodes

I. Conditions expérimentales	36
I.1. Conditions agronomiques de réalisation des essais expérimentaux	36
I.2. Matériel végétal utilisé	37
I.3. La fertilisation azotée	38
II. Mesures effectuées	38
II.1. Le rendement en grains	38
II.2. Paramètres physico-chimiques	38
II.2.1. Le poids de 1000 grains	38
II.2.2. Le taux de mitadinage	38
II.2.3. La moucheture	39
II.2.4. Les indices de coloration: indice de brun et indice de jaune	39
II.2.5. Détermination du taux de cendres	40
II.2.6. Dosage des protéines totales	40
II.3. Paramètres technologiques et rhéologiques	40
II.3.1. Test de sédimentation en milieu S.D.S	40
II.3.2. Détermination de la teneur en gluten et gluten index	41
II.3.3. Essai au mixographe	42

II.3.4. Essai à l'avéographe	43
II.4. Analyse biochimique des protéines de réserve	44
II.4.1. Séparation et quantification des protéines polymériques et monomériques par chromatographie liquide à haute performance d'exclusion (SE-HPLC).....	44
II.4.2. Electrophorèse des gluténines sur gel d'acrylamide en présence de SDS (SDS-PAGE) 45	
II.4.2.1. Extraction des gluténines	45
II.4.2.2. Réalisation de l'électrophorèse	46
II.5. Essais de technologie de deuxième transformation	48
II.5.1. La pastification.....	48
II.5.1.1. Principe.....	48
II.5.1.2. Appréciation de la qualité culinaire des pâtes alimentaires	49
II.5.2. La fabrication et la qualité du couscous	50
II.5.2.1. La fabrication du couscous.....	50
II.5.2.2. Appréciation de la qualité du couscous.....	52
II.5.3. Test de panification	53
III. Analyse statistique des résultats.....	55
III.1. Analyse de variance (ANOVA).....	55
III.2. Analyse Multidimensionnelle.....	55
III.2.1. Analyse en composantes principales (ACP).....	55
III.2.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).....	55

Résultats et discussion

Chapitre I : Effet de la variété et de la fertilisation azotée sur le rendement en grains et les paramètres technologiques des variétés de blé dur

I.1. Le rendement en grain.....	56
I.2. Paramètres technologiques	56
I.2.1. Paramètres physiques	56
I.2.1.1. Le poids de mille grains.....	56
I.2.1.2. La vitrosité	57
I.2.1.3. La moucheture	60
I.2.1.4. Les indices de coloration: indice de jaune et indice de brun	60
I.2.2. Paramètres chimiques et technologiques.....	61
I.2.2.1. Le taux de cendres	61
I.2.2.2. La teneur en protéines.....	62

I.2.2.3. Teneur en gluten et gluten index des semoules	67
I.2.2.4. Test de sédimentation SDS	68
I.2.2.5. Paramètres mixographiques.....	69
I.2.2.6. Paramètres alvéographiques	72
Chapitre II. Effet de la variété et de la fertilisation azotée sur la distribution des protéines de réserve des variétés de blé dur	
II.1. Effet de la variété sur la variation de UPP, MP/PP et GS-HPM/GS-FPM.....	76
II.2. Effet de l'interaction azote x variété sur la variation de UPP, MP/PP et GS-HPM /GS-FPM	78
Chapitre III. : Effet de la variété et de la fertilisation azotée sur l'appréciation de la qualité des produits de deuxième transformation des variétés du blé dur	
III.1. Appréciation de la qualité culinaire des pâtes alimentaires.....	82
III.2. Appréciation de la qualité du couscous	84
III.2.1. Détermination du degré de délitescence	84
III.2.2. Indice du gonflement	86
III.2. Essai de panification	87
III.2.1. Appréciation des pâtes	87
III.2.2. Appréciation des pains	88
Chapitre IV : Etude des relations entre les paramètres mesurés	
IV.1. Corrélations entre les paramètres de qualité et le rendement.....	91
VI.2. Corrélations entre les caractéristiques technologiques et les tests de la qualité culinaire	92
IV.3. Corrélations entre les paramètres de qualité et l'aptitude boulangère du blé dur	93
Chapitre V :Analyse multi-dimensionnelle	
V.1. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	96
V.1.1. Analyse des paramètres physico-chimiques et technologiques	96
V.1.2. Analyse de la qualité culinaire des pâtes alimentaires et du couscous	100
V.1.3. Analyse de l'aptitude boulangère.....	102
V.2. Classification ascendante hiérarchique.....	103
V.2.1. Paramètres physico-chimiques et technologiques.....	104
V.2.2. Qualité culinaire des pâtes alimentaires et du couscous	105
V.2.3. L'aptitude boulangère	108
Références bibliographiques	114
Conclusion.....	111

Perspectives..... 113
Annexe 1..... 132
Annexe 2..... 133
Annexe 3..... 133
Annexe 4..... 134
Annexe 5..... 135

Liste des figures

Figure 1. Superficies moyennes de blé dur (période 2010-2014).	7
Figure 2. Evolution de la production de blé dur pendant la période 2010-2017.	8
Figure 3. Répartition des variétés de blé dur par zone agro-écologique	9
Figure 4. Schéma histologique d'une coupe longitudinale d'un grain de blé	10
Figure 5. Schéma du processus de cellularisation de l'albumen (Olsen et al. 2001).	13
Figure 6. Phases-clés du développement du grain de blé.	14
Figure 7. Classification des protéines du blé.	15
Figure 8. Représentation schématique des structures primaires des prolamines	16
Figure 9. Schéma synthétique des séquences des SG-HPM de type x et y.	18
Figure 10. Modèle schématique de la structure des polymères SG-HPM basé sur les liaisons disulfures.	18
Figure 11. Structure polymérique des gluténines du blé (liées par des liaisons disulfures).	20
Figure 12. Interprétation du développement du gluten: (a) début du mélange, (b) développement optimal et (c) sur pétrissage	23
Figure 13. Schéma conceptuel de l'ontogénie des corpuscules protéiques et de la vacuole de stockage protéique.	25
Figure 14. Relation entre le volume du pain et la teneur totale en sous glutenines de hauts poids moléculaire.	30
Figure 15. Pluviométrie et températures enregistrées pendant les deux années (2011-2012 et 2012-2013)	36
Figure 16. Méthode de calcul des paramètres du mixogramme.	42
Figure 17. Les paramètres alvéographiques.	43
Figure 18. Chromatogramme de l'échantillon de semoule	45
Figure 19. Distribution des sous unités gluténines.	48
Figure 20. Procédé de fabrication du couscous.	51
Figure 21. Schéma de fabrication du couscous traditionnel.	52
Figure 22. Diagramme de panification.	54
Figure 23. Le taux de moucheture et de mitadinage des variétés sous différents apports d'azote.	58
Figure 24. Teneurs en cendres des variétés sous différents apports d'azote.	62
Figure 25. Teneurs en protéines en fonction des doses d'azote.	63
Figure 26. Teneurs en protéines (A) grains et (B) (semoules) des différentes variétés avec l'accroissement des doses d'azote.	66
Figure 27. Teneur en gluten humide et en gluten index des différentes variétés en fonction des doses d'azote.	68
Figure 28. Variation du SDS (mL) des différentes variétés en fonction des doses d'azote.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 29. Variation des paramètres mixographiques des différentes variétés de blé.	70
Figure 30. Variation de la hauteur du pic du mixogramme des différentes variétés en fonction des doses d'azote.	71
Figure 31. Variation du temps de développement de la pâte des différentes variétés en fonction des doses d'azote.	71
Figure 32. Evolution des paramètres alvéographiques.	72
Figure 33. Analyse des gels électrophorétiques.	75
Figure 34. UPP % (protéines polymériques non extractibles) et les ratios : GS-FPM-/GS-FPM, MP/PP des différentes variétés en 2011/2012 (A) et en 2012/2013 (B).	77
Figure 35. Effet de l'interaction variété x fertilisation azotée sur l'UPP % et GS-HPM/GS-FPM en 2011-2012 (A) et MP/PP en 2012-2013 (B).	79

Figure 36. Variation des pertes à la cuisson, capacité de fixation d'eau de la fermeté des pâtes alimentaires des variétés avec l'apport de fertilisation azotée.	82
Figure 37. Variation de la délitescence des pâtes alimentaires en fonction de la fertilisation azotée.....	83
Figure 38. Les temps de cuisson des pâtes alimentaires des différentes variétés	84
Figure 39. Variation du degré de délitescence de couscous des différentes variétés.....	85
Figure 40. Variation de l'indice de gonflement du couscous des différentes variétés.....	87
Figure 41. Valeurs boulangères et note des pains des différentes variétés.....	90
Figure 42. Répartition des caractéristiques technologiques et du rendement sur les deux axes F1 et F2.....	98
Figure 43. Interaction année x variété x fertilisation azotée représenté par le biplot relative aux deux premiers axes (F1 et F2) de l'ACP.....	99
Figure 44. Répartition des caractéristiques culinaires et les paramètres technologiques sur les deux axes F1 et F2.....	101
Figure 45. Répartition des aptitudes boulangères et les paramètres technologiques sur les deux axes F1 et F2.....	104
Figure 46. Dendogramme de classification par dissimilarité.....	107
Figure 47. Dendogramme de classification par dissimilarité (2011/2012).....	109
Figure 48. Dendogramme de classification par dissimilarité (2012-2013).....	110

Liste des tableaux

Tableau 1. La classification de blé dur (<i>Triticum turgidum</i> L. subsp. durum (Desf.) Husn.)... 10	10
Tableau 2 . Distribution histologique des principaux constituants du grain de blé. 12	12
Tableau 3. Composition en protéines du grain de blé. 14	14
Tableau 4. Caractéristiques des variétés. 37	37
Tableau 5. Résultats de l'ANOVA des variétés sous différents apports d'azote pour les paramètres: vitr, PS, GH, GI, HP et TDV. 57	57
Tableau 6. Rendement en grain et paramètres de qualité : des variétés du blé dur sous différents apports azotés (essai 1 et essai 2)..... 59	59
Tableau 7. Paramètres de qualité : année 2011/2012. 64	64
Tableau 8. Paramètres de qualité : (année 2012-2013). 65	65
Tableau 9. Résultats du test ANOVA sur la variation des UPP%et des rapports GS-HPM/GS-FPM et MP/PP des variétés de blé dur sous différentes doses d'azote au cours des deux années d'expérimentation..... 76	76
Tableau 10. Paramètres de distribution des protéines de réserve: HPM-GS/FPM-GS, MP/PP et UPP%. 78	78
Tableau 11. Résultats de l'essai de panification. 88	88
Tableau 12. Corrélations entre les paramètres de qualité et le rendement..... 94	94
Tableau 13. Corrélation entre la qualité culinaire des pâtes alimentaires et du couscous et la qualité technologique des semoules. 95	95
Tableau 14. Corrélations entre les paramètres de qualité et l'aptitude boulangère du blé dur. 95	95
Tableau 15. Valeurs propres et la variabilité entre les facteurs. 96	96
Tableau 16. Corrélations des variables avec les facteurs (en 2011/2012et 2012/2013). 97	97
Tableau 17. Valeurs propres et la variabilité entre les facteurs (en 2011/2012)..... 100	100
Tableau 18. Corrélations des variables (tests culinaires et paramètres technologiques) avec les facteurs (année 2011/2012). 102	102
Tableau 19. Valeurs propres et la variabilité entre les facteurs (2012/2013)..... 102	102
Tableau 20. Corrélations des variables avec les facteurs (2012/2013). 103	103
Tableau 21. Composition des classes obtenues par la CAH (en 2011/2012 et 2012/2013)... 105	105
Tableau 22. Composition des classes obtenues par la CAH (année 2011/2012). 106	106
Tableau 23. Composition des classes obtenues par la CAH (année 2012/2013). 108	108



Blé Dur

Summary

Résumé

Introduction générale

كلمات مفتاحيه :

القمح الصلب, البروتين, توزيع البروتين, الجودة
التكنولوجية, السماد الأزوتي, ظروف زراعية للنمو,
منتجات القمح الصلب.

Mots clés : blé dur, protéines,
distribution des protéines, qualité
technologique, fertilisation azotée,
conditions culturelles, produits de
deuxième transformation.

Key words: durum wheat, protein,
protein distribution, technological
quality, nitrogen fertilization, cultural
conditions, secondary processing
products.



الملخص العام

يعتبر القمح من أكثر المحاصيل الزراعية والغذائية أهمية في بلادنا وفي العالم كله. لأنه يدخل في كثير من الأغذية الأساسية التي يتناولها الإنسان. نظرا لأهميته، أجريت دراسات عديدة حول زراعة نبات القمح وخاصة القمح الصلب. لهذا ارتأينا في بحثنا هذا إلى دراسة زراعة نبات القمح الصلب.

الهدف من هته الدراسة هو تحديد تأثير السماد الأزوتي على الجودة التكنولوجية وعلى توزيع بروتين التخزين للقمح الصلب المزروع في الجزائر. غطت الدراسة أربعة أصناف من القمح (بوسلام, شان S, جتادور ومحمد بن بشير).

نمت هته الأصناف تحت أربعة مستويات مختلفة من السماد الأزوتي، التجربة أجريت في عامين تحت ظروف زراعية مختلفة. تعتمد استجابة الأصناف للأزوت ولتراكم البروتين على التركيب الوراثي للصنف المدروس وأيضا على وسط نموه. وهذه الاستجابة تكون بمستويات أعلى عندما تكون ظروف النمو غير ملائمة. في ظل هته الأخيرة، يتم تحسين الخصائص mixographiques للقمح الصلب بواسطة السماد الأزوتي. لاحظنا أيضا أن كمية الأزوت التي تعطى للقمح الصلب تغير من الخصائص Alvéographiques وفقا للنمط الجيني.

من خلال دراسة الأصناف تحت ظروف زراعية غير ملائمة وجدنا أن الصنف بوسلام يتميز بأدنى نسبة مئوية من UPP وأن الأصناف جتادور ومحمد بن بشير تتميز بوجود أعلى من HPM-GS/FPM-GS. أما دراستها تحت ظروف زراعية ملائمة، النتائج أثبتت لنا أن الزيادة في السماد الأزوتي يؤدي إلى تحسين مستوى البروتينات الغير قابلة للاستخراج (UPP) لدى الصنف بوسلام وزيادة نسبة HPM-GS/FPM-GS لدى الصنف جيتادور.

النتائج المتحصل عليها أثبتت أن كمية 120 كغ من الأزوت في الهكتار الواحد تقلل من نوعية خصائص طبخ المعكرونة للأصناف بوسلام ومحمد بن بشير. وأيضا أثبتنا أن الصنف شان S المعالج بكمية 40 كغ من الأزوت للهكتار الواحد يعطينا أفضل أنواع الخبز. كذلك زيادة محتوى البروتين في القمح الصلب يقلل من نوعية الخبز وأن توزيع الغلوتينين، HPM-GS/FPM-GS و UPP% يؤثر على جودة طهي المعكرونة.

في الأخير استخلصنا من خلال هته الدراسة أن تأثير الظروف الزراعية للنمو وتأثير زيادة السماد الأزوتي على الجودة التكنولوجية للقمح الصلب متباينة كثيرا مع الأصناف محمد بن بشير وجيتادور.

كلمات مفتاحيه :

القمح الصلب، البروتين، توزيع البروتين، الجودة التكنولوجية، السماد الأزوتي، ظروف زراعية للنمو، منتجات القمح الصلب.

Résumé

L'objectif de cette étude est de déterminer l'effet de la fertilisation azotée sur la qualité technologique et sur la variation de la distribution des fractions protéiques des protéines de réserve du blé dur cultivé en Algérie. L'étude a porté sur quatre variétés (Bousselam, Chen S, GTA Dur et MBB) cultivées sous quatre niveaux de fertilisation azotée. L'expérimentation est menée pendant deux années caractérisées par des conditions culturales différentes. La réponse des variétés à l'azote pour l'accumulation des protéines dépend du génotype et de son milieu de croissance avec des teneurs plus élevées quand les conditions de croissance sont défavorables. Dans ces conditions culturales, les propriétés mixographiques du blé dur sont améliorées par la fertilisation azotée. L'apport d'azote varie les paramètres alvéographiques en fonction du génotype. La variété Bousselam est caractérisée par le plus faible UPP %. Un rapport plus élevé de HPM-GS/FPM-GS est observé avec les variétés GTA Dur et MBB en conditions de culture défavorables. En conditions favorables, l'accroissement des doses d'azote améliore le taux de protéines non extractibles de Bousselam et augmente le rapport HPM-GS/FPM-GS de GTA Dur. L'apport de 120 KgN.ha⁻¹ diminue la perte à la cuisson des pâtes alimentaires des variétés Bousselam et MBB. Les meilleurs pains sont obtenus par la variété Chen S avec 80kg.N.ha⁻¹ et la variété GTA Dur avec 40KgN.ha⁻¹. L'augmentation de la teneur en protéine diminue la valeur boulangère du blé dur. La distribution des glutenines HPM-GS/FPM-GS et UPP % influe sur la qualité culinaire des pâtes alimentaires. L'impact des conditions culturales sur l'effet de l'accroissement de la fertilisation azotée et sur la qualité technologique est plus marquée avec les variétés MBB et GTA Dur.

Mots clés : blé dur, protéines, distribution des protéines, qualité technologique, fertilisation azotée, conditions culturales, produits de deuxième transformation.

Summary

The objective of this study is to determine the effect of nitrogen fertilization on the technological quality and the distribution of storage protein of durum wheat grown in Algeria. The study covered four cultivars (Bousselam, Chen S, GTA Dur and MBB) grown with four nitrogen rate. The experiment was performed over two years in different cultural conditions. The response of cultivars to nitrogen for protein accumulation depends on the genotype and its grown conditions with best level seen in unfavorable growing conditions. Under these conditions, the dough mixing properties of durum are improved by nitrogen fertilization. Nitrogen fertilization varies the alveograph parameters according to genotype. Bousselam has the lowest UPP% in various growing conditions. A higher ratio of HPM-GS / FPM-GS is observed with GTA Dur and MBB under unfavorable growing conditions.

In favorable growing conditions, the increase of nitrogen rate improves the level of unextractable protein of Bousselam and increases the HPM-GS/FPM-GS ratio of GTA Dur. The rate of 120 kg.N.ha⁻¹ decreases the pasta cooking loss of Bousselam and MBB. The best breads are obtained by Chen S with 80Kg.N.ha⁻¹ and GTA Dur with 40Kg.N.ha⁻¹. Increasing the protein content decreases the baking value of durum wheat. The distribution of glutenins, HPM-GS, FPM-GS and UPP% affects the culinary quality of pasta. The impact of growing conditions on the effect of nitrogen fertilization on and technological quality is more pronounced with MBB and GTA Dur cultivars.

Key words: durum wheat, protein, protein distribution, technological quality, nitrogen fertilization, cultural conditions, secondary processing products.

INTRODUCTION

Les céréales qui couvrent les 3,5 millions d'hectares (soit 41% de la superficie agricole utile) occupent une place considérable dans l'agriculture algérienne. Cependant, la production demeure faible par rapport aux besoins. Elle représente en moyenne 41,8 millions de quintaux (calculé sur la période 2013-2018) couvrant à peine 30% des besoins de consommation (Anonyme, 2019b). L'optimisation de la production céréalière à travers les marges de développement et la relance des capacités productives par taux de rendement par hectare des cultures est une préoccupation majeure de l'agriculture.

Le blé dur est un aliment de base dans l'alimentation de la population algérienne mais ses rendements sont faibles et ne suffisent pas à satisfaire les besoins du pays. Plusieurs programmes ont été initiés pour améliorer sa production qui reste toujours dépendante des contraintes édapho-climatiques. La sélection végétale a permis de développer de nouvelles variétés adaptées aux différentes zones agro-écologiques locales. L'utilisation de variétés à haut rendement, une voie prometteuse, permettrait une augmentation de la production et par conséquent une réduction des importations. Le blé dur destiné à l'industrie alimentaire doit être de bonne qualité afin de répondre aux exigences des processus de fabrication. Chaque produit fini tel que les pâtes alimentaires, le pain ou le couscous nécessite un matériel végétal (semoule ou farine) ayant des caractéristiques technologiques requises pour chaque industrie de transformation. Leur fabrication requiert des propriétés fonctionnelles spécifiques qui dépendent en grande partie des structures et des interactions des protéines de réserve du grain, les gliadines et les glutenines (gluten). Les propriétés rhéologiques du gluten et de la pâte de blé dépendent de l'équilibre entre les gliadines monomériques et les gluténines polymériques et, surtout, de la répartition de ces dernières (Weegels et al., 1996 ; MacRitchie, 1999). Le rapport protéines polymériques non extractibles (UPP) sur SDS/protéines polymériques totales a souvent été utilisé pour mesurer la distribution des polymères de gluténines et systématiquement associé aux propriétés de la pâte.

De nombreuses études ont montré que le facteur génétique, à lui seul, ne détermine pas la composition des protéines. Des facteurs abiotiques et biotiques peuvent également l'affecter. En effet, l'instabilité des taux de protéines au sein d'une même variété (qui peuvent diminuer assez bas) est largement tributaire des conditions climatiques ou des perturbations de l'absorption de l'azote induites par la sécheresse ou l'excès d'eau (Brabant et Levy Häner, 2016). Par conséquent, l'ajustement de la variabilité pour compenser les variations interannuelles et géographiques de la qualité peut entraîner des coûts plus élevés pour les

transformateurs de l'industrie du blé. Il est donc nécessaire de connaître les conditions culturales qui régissent les variations de la composition en protéines du grain pour mieux contrôler sa qualité

Les gliadines et les gluténines du gluten s'accablent pendant la période de remplissage du grain et leurs quantités relatives sont déterminées pendant cette phase de développement. Tous les facteurs qui affectent la période du remplissage du grain contribuent à la variation des fractions protéiques. Flagella et al (2010) ont démontré que le déficit hydrique réduit la phase du remplissage du grain et affecte la teneur et la composition des protéines (protéines monomères, polymères et insolubles). Les périodes prolongées de températures élevées sont courantes dans la plupart des régions productrices du blé dur au monde et la température sub-optimale est l'une des principaux facteurs affectant le rendement et la qualité du blé dur. Ces conditions provoquent aussi une diminution marquée de la proportion des UPP, indépendamment des modifications de la concentration en protéines totales des grains ou des proportions de gliadines ou de gluténines (Wardlaw et al., 2002; Don et al., 2005).

La nutrition azotée joue un rôle important dans l'accumulation et la composition en protéines du grain. Une forte absorption d'azote tend à augmenter le rapport gliadine/gluténine et à diminuer la proportion des UPP, entraînant une extensibilité plus élevée de la pâte (Godfrey et al., 2010). La maîtrise des modalités d'apport de l'azote est impérative pour répondre aux exigences technologiques des industries de transformation. La détermination de l'effet des interactions génotype et d'apport d'azote sur la qualité et la composition en protéines du grain et la distribution des polymères de gluténine sont nécessaires.

De plus, connaître l'effet des conditions de croissance qui accompagnent les apports azotés sur la qualité du grain du blé permet de mieux connaître la variation des fractions protéiques et par conséquent prédire un meilleur raisonnement de la fertilisation.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la variété et de la fertilisation azotée, en relation avec les conditions de culture, sur les caractéristiques physico-chimiques et technologiques ainsi que sur la composition protéique, la distribution des protéines polymériques et leur équilibre.

A cet effet, nous nous sommes intéressés à :

- déterminer les caractéristiques physico-chimiques des différentes variétés,
- suivre l'évolution de la composition des protéines de réserve,

- déterminer les caractéristiques technologiques et rhéologiques (teneur en gluten, test SDS, mixographe et alvéographe),
- réaliser des essais de pastification, panification et fabrication du couscous,
- réaliser une étude multidimensionnelle pour établir les relations entre les différents paramètres mesurés.



Blé Dur

Aperçu théorique

Bibliographie

Bibliographie

- Généralités sur le blé dur
- Les protéines de réserve de blé
- Le gluten
- Mécanisme d'accumulation des protéines de réserve au cours de la croissance du grain
- Les protéines et qualité technologique du blé dur



I. Généralités sur le blé dur

I.1. Situation de la production du blé dur en Algérie

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en développement notamment les pays maghrébins (Djermoun, 2009). En effet, elles ont l'avantage de constituer des provisions pouvant se conserver sous forme de grains constitués principalement de substances amylacées et de protéines qui leur confèrent une grande valeur nutritionnelle. Les céréales constituent 60% de l'apport calorique et 71% de l'apport protéique de la population algérienne (Bensalem, 1995).

La céréaliculture algérienne demeure une spéculation de premier plan qu'elle soit au niveau de la localisation ou de la taille de l'exploitation.

Depuis l'indépendance, la production des céréales présente une caractéristique fondamentale à travers l'extrême variabilité du volume des récoltes qui varie entre 2 et 6 millions de tonnes par an en fonction de la pluviométrie. Elle occupe une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale (Djermoun, 2009).

Par ailleurs, la céréaliculture, jachère comprise, occupe environ 80% de la superficie agricole utile (SAU) du pays. Parmi les céréales cultivées, le blé dur occupe une place importante dans l'alimentation de la population algérienne. Il entre dans la composition d'un grand nombre de plats traditionnels: couscous, galettes, pain, pâtes alimentaires, fric, makrout, burgul. etc.

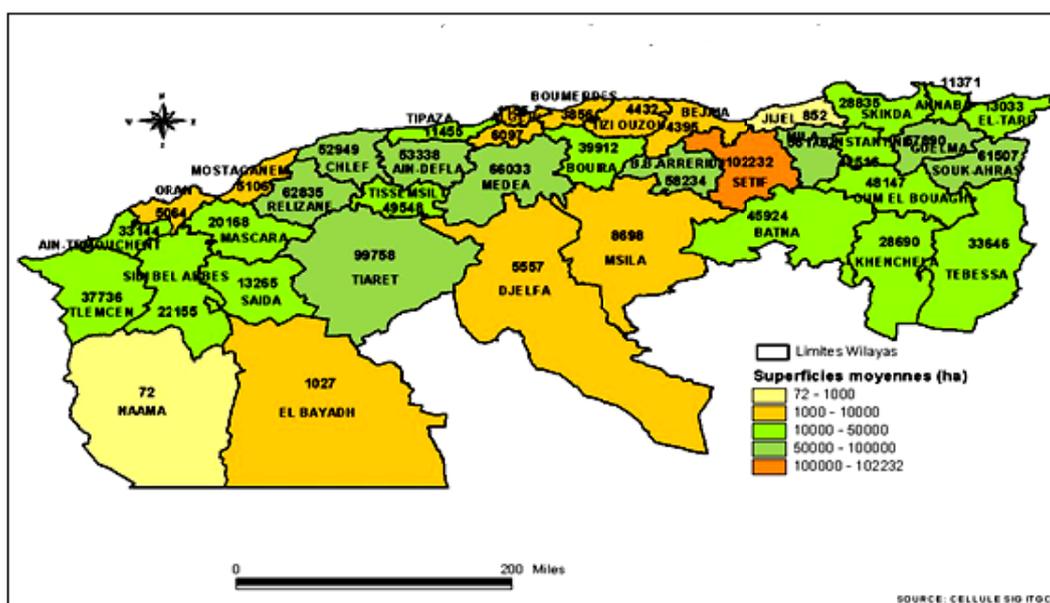


Figure 1. Superficies moyennes de blé dur (période 2010-2014) (Anonyme, 2016a).

La superficie moyenne de blé dur dans les différentes wilayas au cours de la période 2010-2017 est montrée dans la figure 1 avec une production moyenne de 20335953 quintaux (figure 2). Les fluctuations dans la production sont dues essentiellement aux conditions climatiques et au non maitrise des techniques culturales.

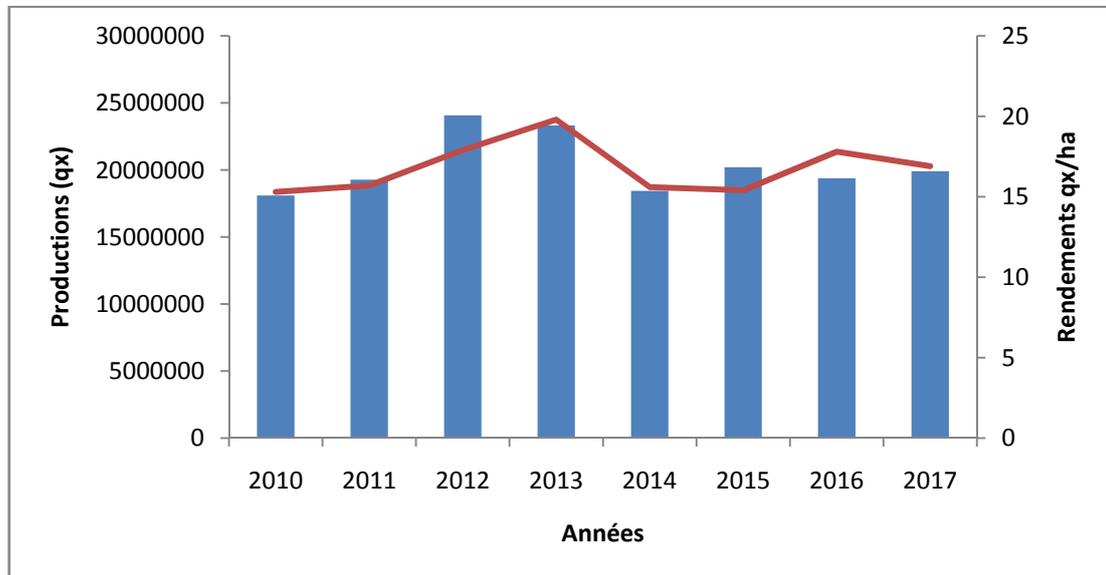


Figure 2. Evolution de la production de blé dur pendant la période 2010-2017.

Le niveau du rendement de blé dur au cours de cette période (2010/2017) a connu une augmentation considérable de 15q/ha en 2010 à 19,8q/ha en 2013; soit une hausse de plus de 32%. Cet essor est la résultante de toutes les actions entreprises dans le cadre de la mise en œuvre de la politique du renouveau agricole et du renouveau rural. Durant la campagne 2014, il est à constater une baisse du rendement (15,6q/ha) due en grande partie à un déficit hydrique coïncidant avec la phase du remplissage du grain.

La gamme variétale des blés durs autorisée à la production et à la commercialisation a connu une évolution particulière. En effet, le nombre total de variétés de blé dur homologuées est de 46 variétés ; mais un nombre plus restreint est produit par les agriculteurs (Anonyme,2016b).

La gamme variétale en production de semences de blé dur durant la campagne 2014-2015 au niveau national a compté 19 variétés: Targui, Boussellam, Cannizzo, Chen's, Ciccio, Cirta, Colosseo, Core, Gta Dur, Hedba 03, Vitron, Megress, Mohamed Benbachir, Ofanto, Saourah, Simeto, Tassili, Waha et Wahbi. La répartition de ces variétés est illustrée dans la figure 3.

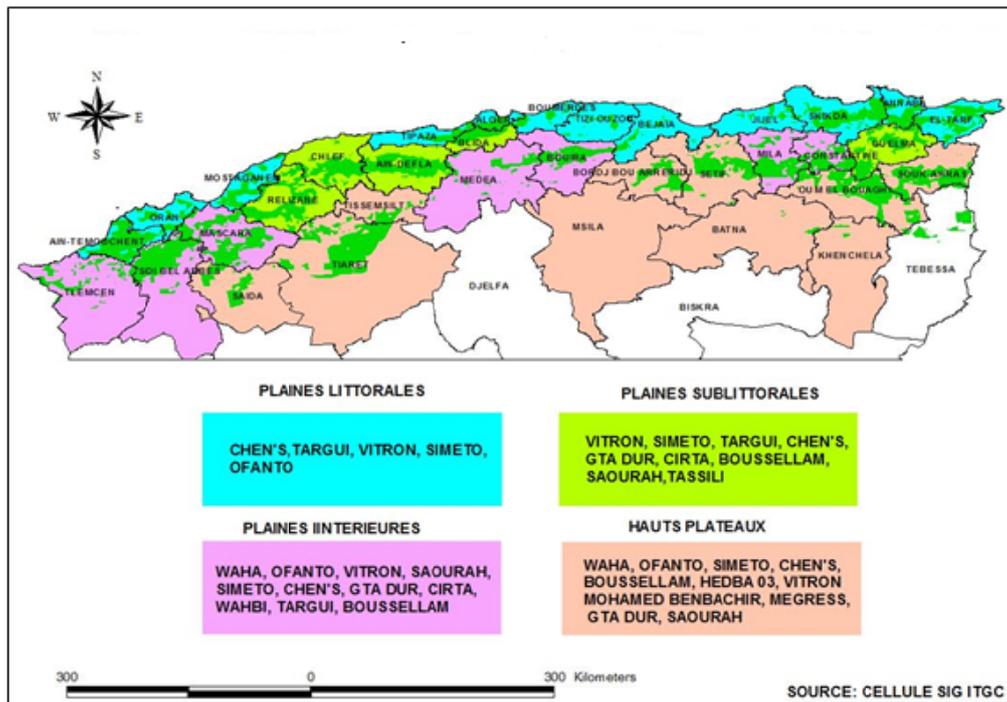


Figure 3. Répartition des variétés de blé dur par zone agro-écologique (Anonyme, 2016a)

Au niveau du littoral, les variétés produites sont Chen's, Targui, Vitron, Simeto avec une prédominance de la variété Vitron dans la région centre. Au niveau de la zone sublittoral, on retrouve les mêmes variétés en plus d'autres qui viennent s'ajouter telles que GTA Dur, Cirta, Boussellam, Saourah et Tassili.

Dans les plaines intérieures, on retrouve les variétés : Waha, Ofanto, Wahbi, Simeto, Targui, Chen's, Boussellam, Vitron, GTA Dur et Cirta. La plus répandue dans la région Centre est Simeto. Dans la région Est, c'est la variété GTA Dur qui est la plus importante du point de vue superficie suivie de Vitron et Cirta.

Au niveau des hauts plateaux, les variétés les plus cultivées sont GTA dur, Mohamed Ben Bachir et Boussellam à l'Est et Simeto, Boussellam et Ofanto à l'Ouest.

I.2. Morphologie et classification botanique

Le blé dur (*Triticum durum*) est une monocotylédone au genre *Triticum* de la famille des Gramineae (Tableau 1). C'est une céréale dont le grain est un fruit sec et indéhiscent, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments (Feillet, 2000). Sur l'épi, il est entouré d'enveloppes: les glumes et les glumelles qui n'adhèrent pas au grain et sont éliminées lors du battage. Sur le plan morphologique, le grain possède une forme ovoïde, caractérisé par la présence d'un sillon qui s'étend sur toute la longueur de la face ventrale. Sur la face dorsale, le

germe s'étend du pôle basal jusqu'au tiers de la longueur du grain. À l'opposé, sur le pôle apical le grain est coiffé d'une brosse à peine visible à l'œil nu.

Tableau 1. La classification de blé dur (*Triticum turgidum* L. subsp. durum (Desf.) Husn.) Classification APG III (2009).

Ordre	Poales
Famille	Poaceae
Espèce	<i>Triticum turgidum</i>
Sous-classe	Commelinidae
Sous-famille	Pooideae
Sous règne	Tracheobionta

I.3. Composition, histologie du grain de blé

Le grain de blé dur caractérisé par une brosse, est parcouru en surface par un sillon longitudinale dont le repli atteint parfois le quartier médian du grain. Ce dernier est formé de trois types de tissu : le germe (3%), les enveloppes (13-16% du grain) et l'albumen (80-85% du grain) (Kent et Evers, 1994, Barronet al., 2007)(Figure 4).

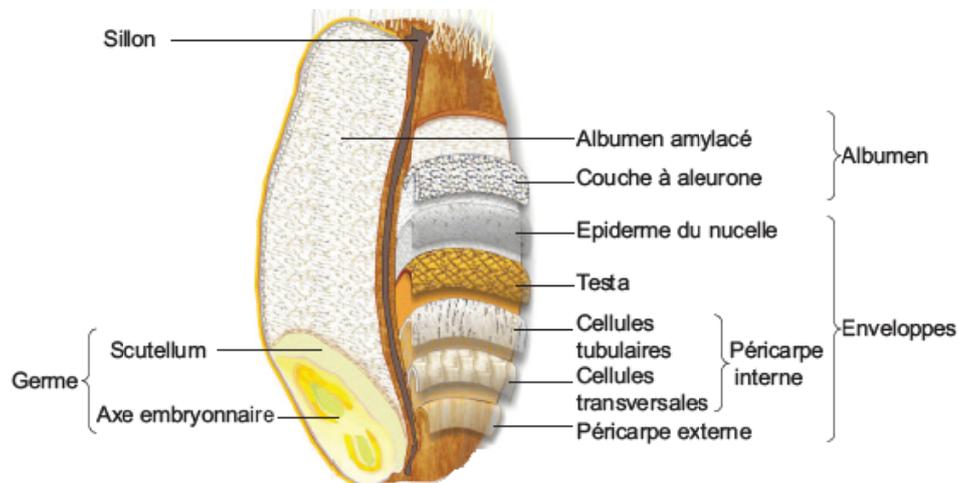


Figure 4. Schéma histologique d'une coupe longitudinale d'un grain de blé (Surget et Barron, 2005).

I.3.1. Les enveloppes

Les enveloppes forment la paroi du fruit ou péricarpe, subdivisé en épicarpe protégé par la cuticule et les poils, en mésocarpe formé de cellules transversales et en endocarpe par des cellules tubulaires. (Godon B et William C., 1998).

I.3.2. L'albumen

Constitué de l'albumen amylicé au sein duquel subsistent des cellules remplies de granules d'amidon dispersés au milieu d'une matrice protéique dont les parois celluloses sont peu visibles et de la couche à aleurone (80-85 % du grain).

I.3.3. Le germe

Le germe est responsable de la perpétuation de la vie de la plante par sa richesse en nutriments (vitamine, protides et lipides). Il fait partie du grain et comporte l'embryon protégé par le scutellum qui est un tissu de réserve riche en protéines et en lipides. Il est particulièrement intéressant du point de vue nutritionnel.

I.4. Les principaux constituants du grain de blé

Le grain est principalement constitué de glucides (amidon et fibres, 65-75%) et de protéines (8 à 17%, selon les variétés et les conditions de culture). Il renferme aussi des lipides (2-6%), de l'eau (12-14%) et des micronutriments (Pomeranz, 1988 ; Kent et Evers, 1994). Ces constituants se répartissent de manière inégale au sein des différentes fractions histologiques du grain.

L'amidon se retrouve en totalité dans l'albumen amylicé, les protéines et les lipides dans le germe et dans la couche à aleurone (Hemery et al., 2007). Les matières minérales sont abondantes dans la couche à aleurone. Les pentosanes sont les constituants dominants dans cette dernière et dans le péricarpe. Les lipides voisinent ou dépassant les 10 % dans le germe et la couche à aleurone. L'hétérogénéité existe également entre les cellules de ces différents tissus. En particulier, il est bien établi qu'il existe un gradient protéique entre l'albumen amylicé et les cellules externes de la couche à aleurone (subaleurone), qui sont plus riches en protéines avec moins d'amidon que les cellules de l'albumen central (Evers, 1970, Lending et Larkins, 1989). Ces constituants se répartissent de manière inégale au sein de différentes fractions histologiques du grain (Tableau 2). L'amidon se retrouve en totalité dans l'amande ; alors que les protéines sont plus élevées dans le germe et la couche à aleurone. Les matières minérales sont abondantes dans la couche à aleurone. Les pentosanes sont les constituants dominants dans cette dernière et dans le péricarpe. Les lipides voisinent ou dépassant les 10 % dans le germe et la couche à aleurone.

Les protéines du blé sont divisées selon leurs caractéristiques biologiques et leur localisation dans le grain. On distingue ainsi deux classes de protéines : les protéines métaboliques avec les albumines et les globulines (15-20% des protéines) et les protéines de réserve avec les gliadines et les gluténines (80-85% des protéines) (Wrigley et Bietz,

1988). Les albumines-globulines, encore appelées protéines solubles, sont constituées d'un grand nombre de protéines se différenciant par leurs propriétés physico-chimiques (poids moléculaire, point isoélectrique et acides aminés) et fonctionnelles (activités enzymatiques: α et β amylase, protéases, oxydoréductases; inhibiteurs enzymatiques, pouvoir émulsifiant et moussant). On les retrouve dans l'ensemble des différents compartiments de la graine. Les gliadines et les gluténines, aussi appelées prolamines en raison de leur richesse en proline et en glutamine, représentent une source d'acides aminés pour la germination et pour le développement de la graine (Richard et al., 1996). Ces protéines de réserve sont majoritairement localisées au sein de l'albumen amylicé. Elles sont également les principaux constituants du gluten ; le complexe protéique viscoélastique est obtenu par lavage à l'eau d'une pâte de blé.

Tableau2. Distribution histologique des principaux constituants du grain de blé (Feillet, 2000).

	Grain		Péricarpe ⁽¹⁾		Aleurone		Albumen		Germe	
	%G	%T	%G	%T	%G	%T	%G	%T	%G	
Protéines	13,7	10	4,4	30	15,3	12	73,5	31	6,8	
Lipides	2,7	0	0	9	23,6	2	62,9	12	13,5	
Amidon	68,9	0	0	0	0	82	100	0	0	
Sucre 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	
%T = % du constituant dans le tissu %G = % du constituant dans le grain (1) % de tissu dans le grain										

I.5. Les phases de développement du grain de blé

Le développement du grain est classiquement divisé en quatre phases, selon le développement de l'albumen (Simmonds et O'Brien, 1981 ; Olsen, 2001) (Figure 5) :

- a) La phase syncytiale (0-4 JAF) qui correspond à une période de divisions mitotiques sans formation des parois cellulaires. Suite à ces divisions, les noyaux migrent formant l'albumencoenocytique.
- b) La division cellulaire ou embryogenèse (4-18 JAF) caractérisée par une intensemultiplication cellulaire et la formation des parois cellulaires conduisant à la cellularisationcomplète de l'albumen.

- c) L'accumulation ou remplissage (18-36 JAF) correspondant à la déposition linéaire de la matière sèche.
- d) La phase de dessiccation ou de maturation (36-58 JAF), marquée par un arrêt de l'accumulation de la matière sèche et une chute de la teneur en eau du grain.

Le développement de l'albumen commence par la fécondation de la cellule centrale diploïde du sac embryonnaire. Après la floraison, son développement est caractérisé par une courte phase syncytiale pendant laquelle le noyau de la cellule centrale se divise sans la formation des parois cellulaires. Les noyaux sont alors répartis dans une bande de cytoplasme entourant une large vacuole centrale : c'est l'albumencoenocytique (Figure 5A).

Le processus de cellularisation de l'albumencoenocytique est initié par la formation d'un réseau de microtubules émergeant de l'enveloppe des noyaux. La maturation de l'albumen continue par des divisions répétées des noyaux triploïdes. La formation progressive de la paroi cellulaire et après plusieurs cycles de divisions cellulaires centripètes, la vacuole centrale est comblée (Figure 5).

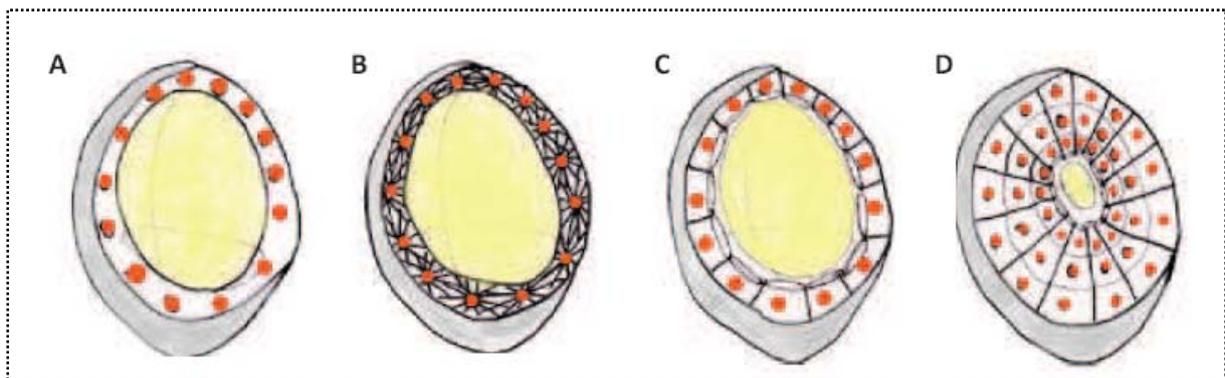


Figure 5. Schéma du processus de cellularisation de l'albumen (Olsen et al. 2001).

Le développement du grain peut également être décrit selon des critères physiologiques et de composition du tissu, ce qui permet de déterminer les phases clés en prenant en compte les points de transition de l'accumulation en eau, de la matière sèche totale, de l'amidon et des protéines (DuPont et Altenbach, 2003) (Figure 6).

La phase de division cellulaire est la période pendant laquelle la teneur en eau augmente rapidement tandis que les grains d'amidon et les protéines de réserve s'accumulent à une faible vitesse (Carceller et Aussenac, 1999 ; DuPont et Altenbach, 2003). Les quantités d'amidon et de protéines qui vont être accumulées dans chaque grain sont dépendantes du nombre de cellules de l'albumen et de la taille finale des cellules, elle-même influencée par l'absorption d'eau, la plasticité de la paroi cellulaire, la vitesse et la durée de remplissage du grain (Egli, 1998).

A la fin de la phase de division cellulaire, le grain se trouve au stade « laiteux » et contient environ 60% d'eau.

La quantité maximale de protéines accumulées dans chaque grain dépend du nombre de cellules de l'endosperme formées déterminées au début du remplissage des grains et de la taille finale des cellules, qui est influencée par l'absorption d'eau, l'extensibilité de la paroi cellulaire et la durée de la phase remplissage des grains (Egli, 1998).

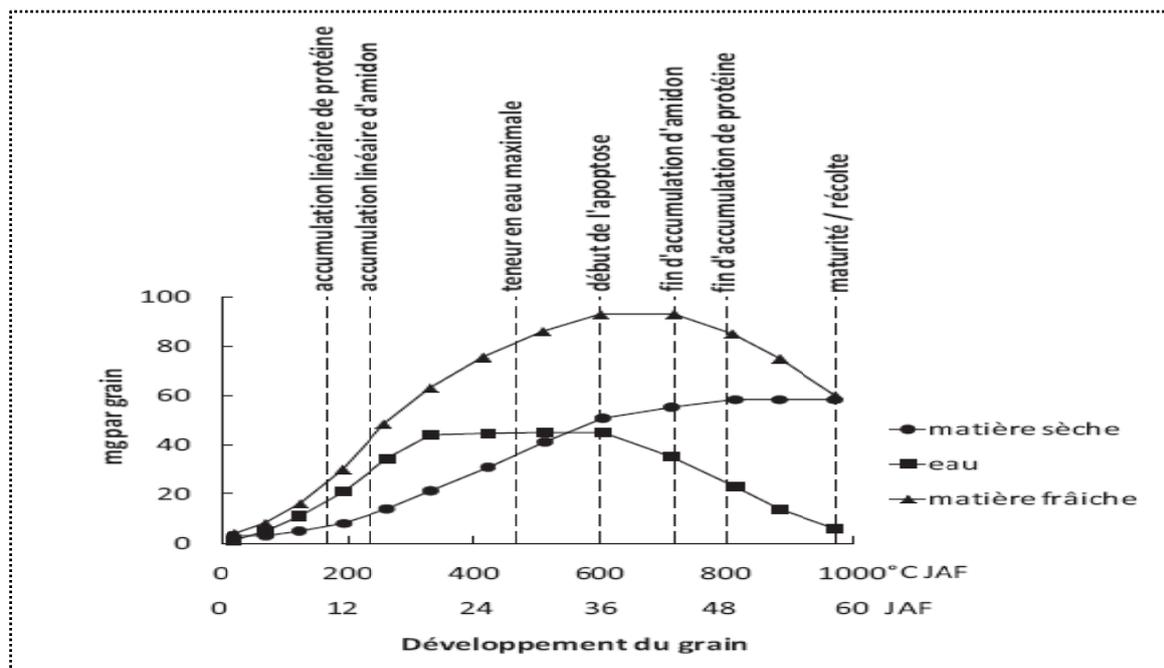


Figure 6. Phases-clés du développement du grain de blé. Adapté de DuPont et Altenbach (2003)

II. Les protéines de réserve de blé

II.1. Classification des protéines du blé

Traditionnellement, les protéines sont classées selon leurs caractéristiques de solubilité. Dès 1907, Osborne propose une classification des protéines du blé en 4 types: les albumines, les globulines, les gliadines, les gluténines (Multon, 1982). Les glutenines insolubles sont de poids moléculaires plus élevés que les glutenines solubles (Tableau 3).

Tableau 2. Composition en protéines du grain de blé (Boudreau et Ménard, 1992).

Solvant	Groupe protéique	Quantité (%)	Poids moléculaire
Eau	Albumines	15	5000 – 30000
Na Cl 0.5N	Globulines	5	20000 – 90000
Ethanol 70%	Gliadines	30 – 40	25000 – 75000
Acide acétique 0.01N	Gluténines solubles	15 – 20	100000 et plus
Résidu insoluble	Gluténines insolubles	25 – 35	1000000 et plus

En 1986, Shewrya proposé une autre classification basée sur le degré de polymérisation et la teneur en acides aminés sulfurés des protéines insolubles (figure 7). Les gliadines forment la famille des prolamines monomériques, mélange de chaînes polypeptidiques simples de teneur variable en soufre. Les gluténines sont regroupées dans la famille des prolamines polymériques constituées de sous unités de faible et de haut poids moléculaire rassemblées au sein d'agrégats par des liaisons disulfures (Shewry et al., 1986).

Le schéma de la figure (7) permet de rapprocher cette classification de celle d'Osborne.

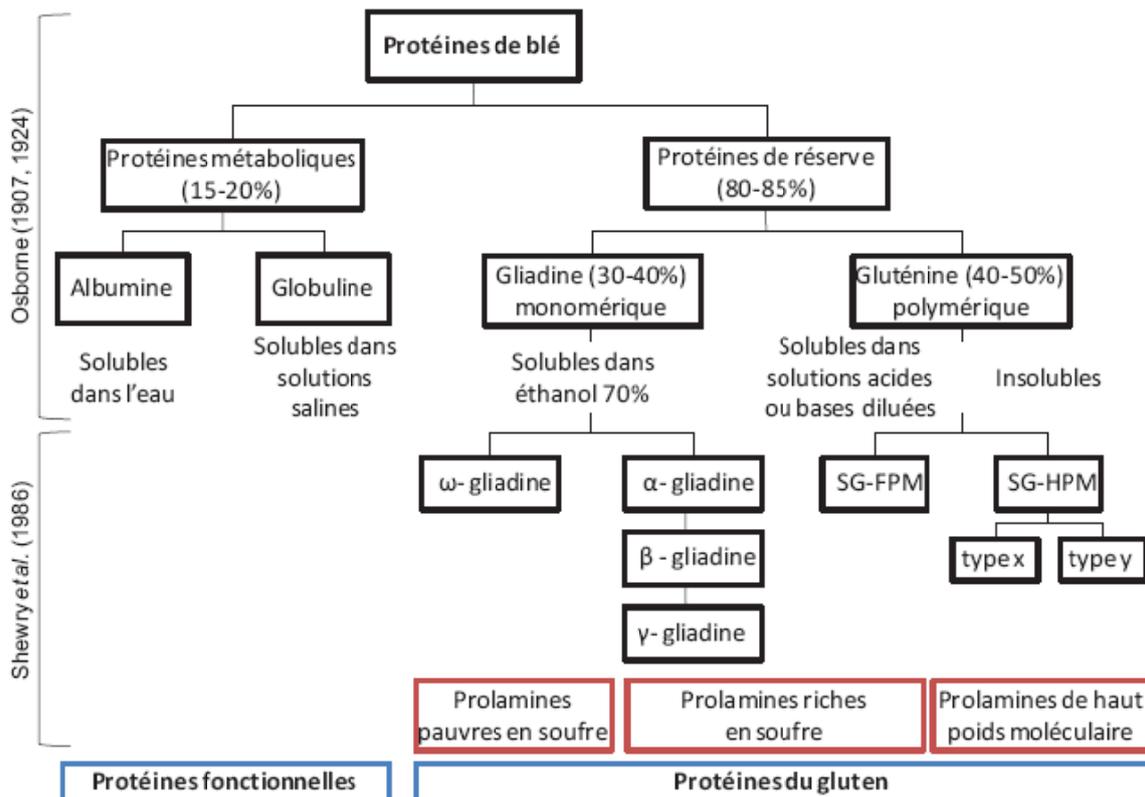


Figure 7. Classification des protéines du blé. Comparaison des classifications d'Osborne (1907) et de Shewry et al. (1986) in Simões (2011).

II.2. Propriétés et structure des protéines de réserve

II.2.1. Les gliadines

Les gliadines représentent 40 à 50 % des protéines totales du blé ; elles sont solubles dans les solutions alcooliques. Elles se concentrent surtout dans l'amande ou endosperme du grain du blé. On les retrouve dans le gluten auquel elles apportent des caractéristiques visqueuses (fluidité et extensibilité). Leur poids moléculaire varie de $3 \cdot 10^4$ à $9 \cdot 10^4$ (Boudreau et Ménard, 1992).

Selon Guignard (1996), la vingtaine de gliadines individualisées dans une variété du blé après une séparation par électrophorèse en gel de polyacrylamide en milieu acide sont classées en fonction de leur mobilité croissante en 4 classes :

- **ω -gliadines** : ce sont des protéines de 60 à 80 kDa. Elles sont dépourvues de ponts disulfures et sont incapables de participer à la formation d'un réseau protéique par la formation des liaisons covalentes.
- **α - et β -gliadines** : représentent 45 à 60 % des gliadines totales et possèdent six cystéines engagées dans des liaisons intramoléculaires. Compte tenu de leur grande similarité (même composition et même structure), on peut réunir ces deux groupes au sein de la même famille.
- **γ - gliadines** : représentent 30 à 45 % des gliadines totales. Elles contiennent huit cystéines engagées généralement dans quatre ponts disulfures intramoléculaires et présentent une forte analogie structurale avec les sous unités gluténines de faible poids moléculaire (SG-FPM).

La figure 8 présente un exemple d'une prolamine pauvre en soufre : ω -gliadine (A) et un exemple d'une prolamine riche en soufre (B) (γ -gliadine. P : proline ; Q: glutamine ; F: phénylalanine).

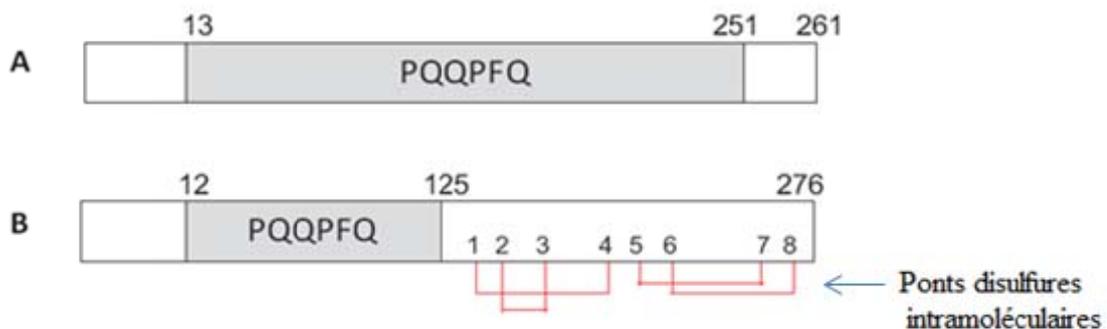


Figure 8. Représentation schématique des structures primaires des prolamines (Shewry et Halford, 2002)

Au cours de la formation de la pâte, les gliadines ne sont pas liées par covalence en grands réseaux élastiques comme les gluténines mais agissent comme un «plastifiant», favorisant l'écoulement visqueux et l'extensibilité qui sont des caractéristiques rhéologiques importantes de la pâte. Elles peuvent interagir par des interactions hydrophobes et des liaisons hydrogènes (Belton, 1999).

II.2.2. Les gluténines

Les gluténines représentent 40 à 50% des protéines de réserve du blé. Elles se présentent sous la forme de polymères polydispersés stabilisés par des liaisons disulfures intermoléculaires qui peuvent atteindre des tailles supérieures à 1 million (Wrigley, 1996). L'encombrement moléculaire de ces polymères alliés à leur faible densité de charge et leur propension à interagir rend difficile leur analyse par les techniques biochimiques classiques. Ce sont des assemblages protéiques insolubles dans l'eau et l'éthanol et solubles en présence d'agents fortement dissociants comme l'urée (Pomeranz, 1965) ou le dodécyl sulfate de sodium (SDS) (Graveland et al., 1979). Les polypeptides qui composent les gluténines et les sous-unités de gluténines sont libérés après l'action d'agents réducteurs de ponts disulfures et sont également insolubles dans les tampons classiques ; seuls les solvants protéiques polaires assurent leur mise en solution. Ces sous-unités sont séparées en deux sous-groupes ; les SG-FPM (poids moléculaire compris entre 30 et 45 kDa) et les SG-HPM (poids moléculaire compris entre 70 et 90 kDa).

Les SG-FPM se rapprochent des gliadines par leur composition, leur structure secondaire et leurs propriétés physico-chimiques (Payne et Corfield, 1979 ; Tatham et al., 1987). Les SG-FPM séparées par SDS-PAGE ont été subdivisées en trois groupes (B, C et D). Le groupe B, le plus abondant, inclut trois types de sous-unités appelés s-, m- et i-. Ces sous-unités diffèrent par leurs séquences qui présentent respectivement des résidus sérine, méthionine et isoleucine en position N-terminale. Le groupe D inclurait des ω -gliadines ayant acquis un résidu cystéine (D'Ovidio et Masci, 2004). Le groupe C est constitué de sous-unités présentant un faible encombrement (<35 kDa).

En se basant sur les caractéristiques structurales des groupes B, C et D, Kasarda (1989) a suggéré l'existence de deux types de SG-FPM. Le premier type qui englobe principalement les SG-FPM de type B aurait la capacité de former deux ponts disulfures intermoléculaires permettant l'extension des polymères de gluténines. Le second type, présent parmi les SG-FPM de type C et D, ne posséderait qu'un seul résidu cystéine et pourrait jouer un rôle dit déterminaison.

Les SG-HPM présentent un poids moléculaire compris entre 70 et 90 kDa. Comparativement aux SG-FPM, elles incluent un nombre limité d'espèces moléculaires avec en général 2 à 3 sous-unités pour les blés *Triticum turgidum durum* contre 4 à 5 pour *Triticum aestivum*. Chez ces deux espèces, elles représentent respectivement 5% à 10% des protéines totales. Les SG-HPM sont classées en type x et y selon leur structure primaire et le

nombre de résidus cystéines présents dans leurs séquences, en général pair pour les types x et impair pour les types y.

Les gènes codant pour les SG-HPM sont situés sur le bras long des chromosomes 1A et 1B qui sont liés aux locus Glu-A1 et Glu-B1 dans le cas du blé dur et en plus au locus Glu-D1 dans le cas du blé tendre. Chacun de ces locus code pour une sous-unité de type-x et de type-y. Les locus Glu-A3, Glu-B3 et Glu-D3 sont situés sur le bras court des chromosomes 1 et sont les locus majeurs des SG-FPM. Plus complexes, ils codent pour un nombre plus important de composés. Trois à cinq SG-HPM et 15-20 SG-FPM différentes sont identifiées en électrophorèse 2D pour les blés hexaploïdes (Lewetal., 1992).

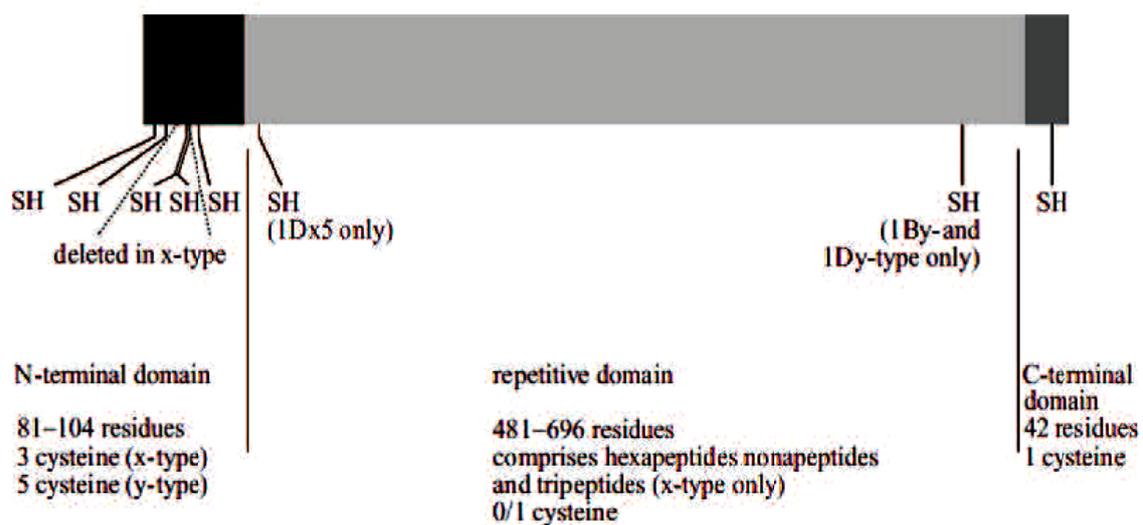


Figure 9. Schéma synthétique des séquences des SG-HPM de type x et y (Shewry et al., 2002).

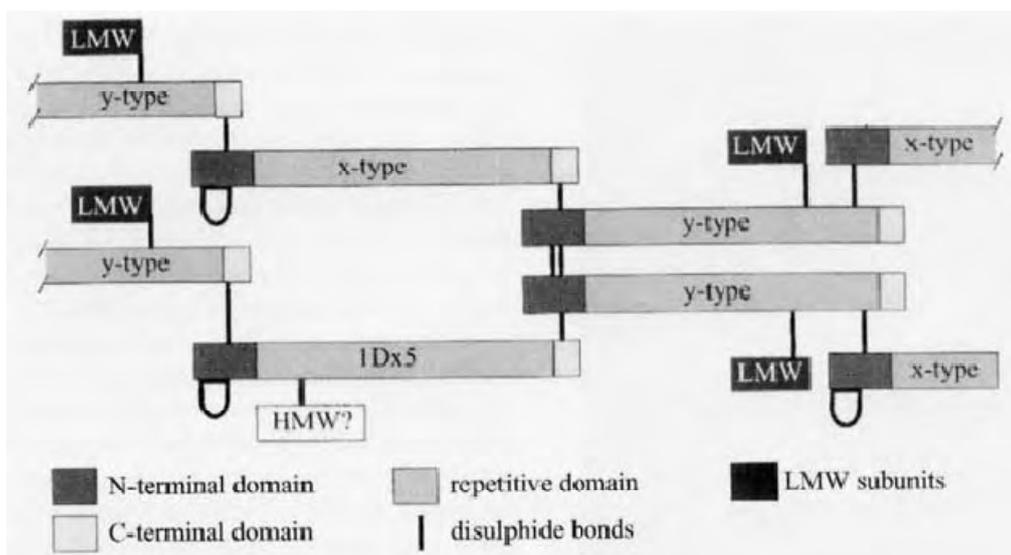


Figure 10. Modèle schématique de la structure des polymères SG-HPM basé sur les liaisons disulfures (Shewry et al., 2002).

II.3. Le gluten

II.3.1. Structure du gluten

Plusieurs modèles sur la structure du gluten de blé ont été proposés. Selon ces modèles, la gluténine ne possède que des liaisons disulfure intra-chaîne (Kuktaitè, 2004). Ces dernières facilitent l'interaction des molécules de gluténines adjacentes par des liaisons non covalentes provoquant ainsi leur agrégation (Kasarda et al., 1976). Ewart (1979) a proposé un autre modèle dans lequel le polypeptide adjacent aux chaînes de gluténines est composé de polymères linéaires et de deux chaînes adjacentes reliées entre elles par une liaison disulfure. Dans ce modèle, les propriétés rhéologiques de la pâte dépendent de la présence de liaisons disulfures actives et des groupements thiol (Ewart, 1979). Khan et Bushuk (1979) ont proposé un autre modèle dans lequel les complexes fonctionnels de gluténines contenaient à la fois des liaisons disulfures inter et intra-chaîne. En se basant sur les résultats de SDS-PAGE, ils ont proposé un agrégat de deux types de gluténines complexes, I et II. Dans leur modèle, les gluténines I, de poids moléculaire inférieur ou égal à $6,8 \times 10^4$, sont maintenues ensemble par des liaisons hydrogènes et des interactions hydrophobes. Les gluténines II sont des sous-unités réticulées de poids moléculaires supérieurs à $6,8 \times 10^4$, liées par des liaisons disulfures inter-chaînes.

D'autres études ont montré que les polymères de protéines de gluten ont une large gamme de distribution de taille allant de dimères aux polymères avec des poids moléculaires pouvant dépasser 1×10^7 (Larroque et al., 1996 ; Wrigley, 1996) (Figure 11). Les protéines ayant le poids moléculaire le plus élevé contribuent fortement aux propriétés de la pâte (MacRitchie, 1984). Une certaine quantité de ces polymères reste non extractible avec divers systèmes d'extraction (solution d'acide acétique ou tampon phosphate SDS). Le % UPP (pourcentage de protéine polymérique non extractible dans les protéines totales) est souvent utilisé pour mesurer la quantité et la distribution de la taille des polymères de protéines (Gupta et al., 1992 ; Field et al., 1983). Les valeurs élevées des %UPP sont liées à une plus grande proportion de gluténines qui sont insolubles dans le SDS et possèdent le poids moléculaire le plus élevé (MacRitchie et Singh, 2004).

Ainsi, les blés ayant un pourcentage plus élevé d'UPP devraient avoir une plus grande résistance de la pâte (élasticité) et une meilleure tolérance au pétrissage que ceux avec une plus grande proportion de protéines polymériques extractibles (Gupta et al., 1993).

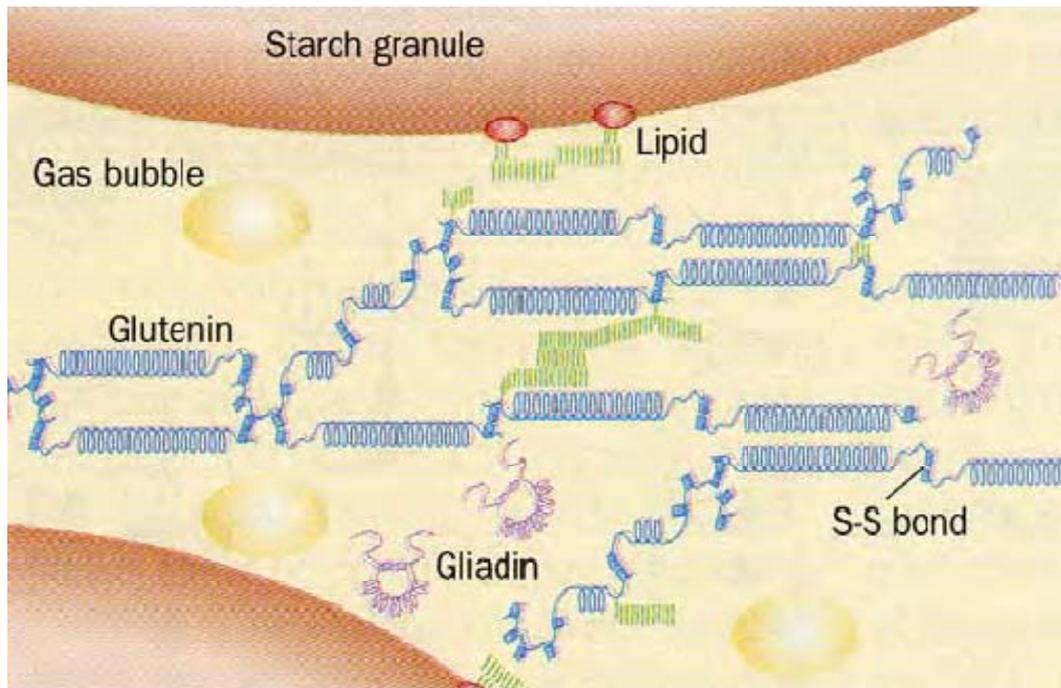


Figure 11. Structure polymérique desgluténines du blé (liées par des liaisons disulfures) (Wrigley, 1996)

II.3.2. Propriétés du gluten

II.3.2.1. Mouvement segmentaire

Des fractions spécifiques ou des segments de grosses molécules ont été identifiés pour être la principale raison de l'énergie d'activation de cette molécule (Kauzmann et Eyring, 1940). Dans une certaine mesure, ces polymères peuvent se déplacer comme unité indépendante. La taille de cette protéine contient environ 6 à 10 résidus d'acides aminés (MacRitchie, 1998).

II.3.2.2. Distribution du poids moléculaire

Les gliadines sont des polypeptides à chaîne monomérique avec des poids moléculaires similaires, par rapport aux gluténines qui sont des unités polymériques. Ces derniers sont formés à partir d'une polymérisation de sous unités de glutenines. Les polymères sont présents dans les grains de blé, les farines et la pâte avec une large distribution de poids moléculaire.

II.3.2.3. Enchevêtrement

Les propriétés rhéologiques (viscosité) augmentent habituellement avec l'augmentation du poids moléculaire. Cependant, la viscosité augmente plus fortement à un poids moléculaire critique (Bueche, 1962) qui est dû à des enchevêtrements des chaînes polymériques induisant

une forte viscosité. Ces enchevêtrements agissent comme des liens et contribuent à la force du gluten (Singh et MacRitchie, 2001).

II.3.3. Facteurs influençant la solubilité des protéines du gluten

L'insolubilisation des protéines de gluten est due d'une part au manque de groupes ionisables et d'autre part au très hauts poids moléculaire des gluténines (Singh et MacRitchie, 2001). Les protéines contiennent à la fois des chaînes d'acides aminés polaires et non polaires. Les chaînes latérales non polaires contribuent au manque de solubilité dans des solutions aqueuses (effet hydrophobe) (Singh et MacRitchie, 2001). La fréquence de la chaîne latérale non polaire est un paramètre qui fournit une mesure de l'effet hydrophobe. La fréquence de la chaîne latérale non polaire est définie comme le nombre de tryptophane, isoleucine, tyrosine, phénylalanine, proline, leucine et résidus de valine divisés par le nombre total de résidus. Un autre paramètre qui influence la solubilité est la fréquence du groupe chargé défini comme le nombre des acides aspartique et glutamique, histidine, lysine et arginine exprimés en fonction du nombre total de résidus (Nelson et Cox, 2003). Les domaines répétitifs des molécules de polymère de gluten de blé contiennent de nombreux résidus de glutamine hydrophiles pouvant interagir avec le solvant (eau) par des liaisons hydrogènes intermoléculaires, conduisant à des interactions non-entropiques. Lorsque le nombre d'arrangements avec des molécules de solvant diminue, cela conduit à l'augmentation de l'insolubilité des protéines du gluten due à un changement d'entropie (Belton, 1999).

II.3.3.1. Comportement des protéines pendant la formation de la pâte

II.3.3.1.1. Développement de la pâte

Trois facteurs sont nécessaires pour former la pâte, la farine, l'eau et l'énergie. Les pâtes sont des systèmes concentrés où les forces de cisaillement et de traction sont transmises par mélange et lient les protéines de gluten en formant ainsi un réseau continu dans la pâte (Singh et MacRitchie, 2001). Pendant le développement, la pâte acquiert des propriétés viscoélastiques qui deviennent optimales à la consistance maximale. Au niveau moléculaire de leur conformation équilibrée, les grosses molécules de gluténines sont élargies par les forces de cisaillement et de traction. Les molécules étendues donnent naissance à des forces de rappel élastiques similaires à l'élasticité du caoutchouc. L'élasticité élevée découle principalement de l'association d'enchevêtrement des molécules de gluténines retarde la rétraction moléculaire et maintient l'élasticité pendant le repos de la pâte. Au niveau moléculaire, les gluténines se rétractent pendant le pétrissage. Les molécules polymériques répondent à l'application du pétrissage par trois processus principaux : démêlage, orientation

de la chaîne et rupture de la liaison. La séparation des plus grandes molécules de gluténines résulte des chaînes ne pouvant pas glisser rapidement aux enchevêtrements. Les liaisons covalentes rompues sont les liaisons disulfures entre les gluténines sous-unités. La plus grande probabilité de scission de la chaîne glutinique est au niveau des molécules où le pétrissage est plus important (Singh et MacRitchie, 2001).

II.3.3.1.2. Protéines dans la pâte

Les rôles des différents composants du gluten dans la fonctionnalité de la pâte sont complexes (Gupta et al., 1991, 1992 ; Khatkar et al., 2002). Lorsque les gliadines isolées sont mélangées avec de l'amidon et de l'eau, un matériau purement visqueux est formé et il n'y a pas de stade de développement comme dans la pâte commune. En revanche, la gluténine pure forme un matériau caoutchouteux avec une faible extensibilité. Les propriétés élastiques qui apparaissent dans la pâte pendant le pétrissage sont dues à la gluténine (MacRitchie et Singh, 2004). De nombreuses approches ont tenté d'expliquer la base moléculaire des interactions des protéines de la pâte (Létang et al., 1999). La pâte non développée est définie comme une farine complètement hydratée sans être déformée (c'est-à-dire sans action mécanique). La pâte développée est décrite comme une transformation de pâte non développée à travers une entrée d'énergie de déformation appropriée pour former la matrice protéique développée (Campos et al., 1997).

II.3.3.1.3. Le pétrissage

La plupart des études concernant les protéines polymériques sont liées à l'impact des classes protéiques individuelles, SG-HPM- et SG-FPMainsi que les gènes codant (Bekes et al., 2001). Les modèles moléculaires utilisés pour décrire le développement du gluten concernent les gluténines et les liaisons entre elles. Les mécanismes impliqués dans la formation de la pâte sont montrés sur la figure 12.

La variation de la composition des protéines polymériques entre les cultivars du blé durant le pétrissage de la pâte a été démontrée (Gupta et al., 1996 ; Johansson et al., 2001 ; Kuktaite et al., 2000 ; Lindsay et Skerritt, 2000). La force du gluten augmente avec la quantité relative des protéines polymériques (Johansson et al., 2001 ; Kuktaite et al., 2000). Cependant, la composition en protéines n'explique que peu la variation de qualité. Les changements spécifiques dans le poids moléculaire et la composition des gluténines polymériques se produisent pendant le développement et l'affaiblissement de la pâte (Lindsay et Skerritt,

1999). De nombreuses études sur les structures protéiques au cours du pétrissage et de la cuisson ont indiqué que les liaisons disulfures contribuent au processus de formation de la pâte par l'intermédiaire de l'échange disulfure-sulphydrile (Lindsay et al., 2000) (Figure 12).

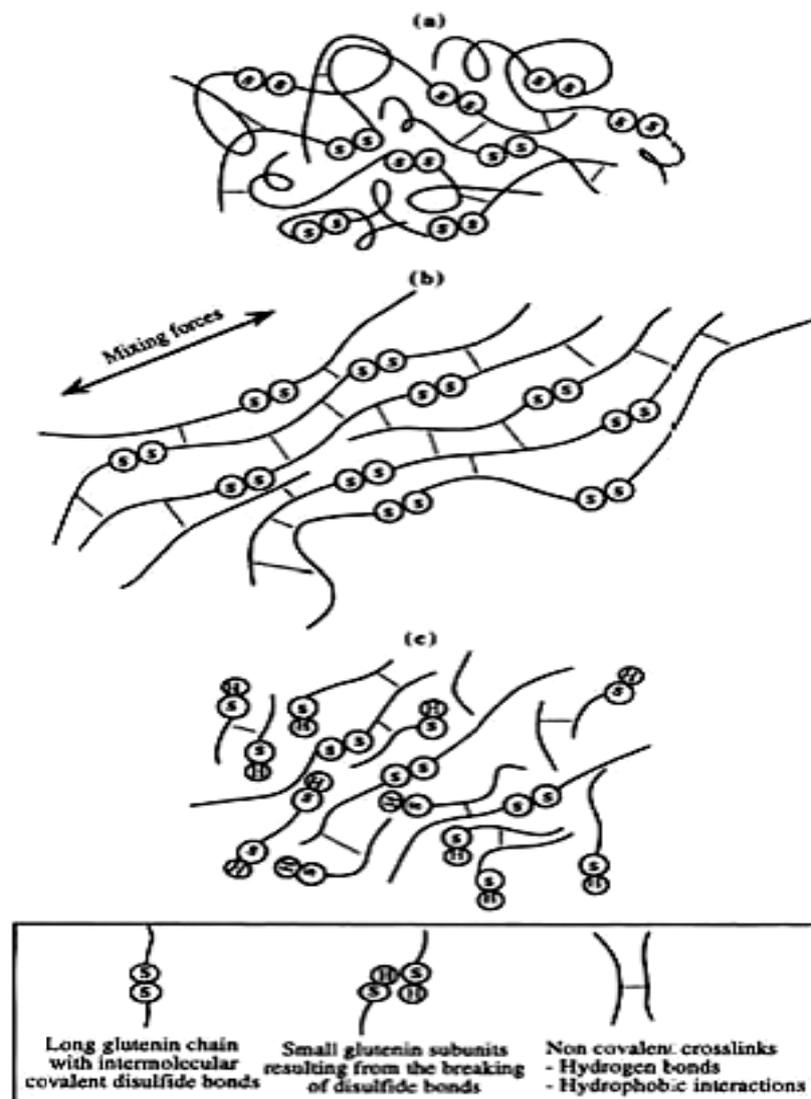


Figure 12. Interprétation du développement du gluten:(a) début du mélange, (b) développement optimal et (c) surpétrissage (Létang et al., 1999)

Cependant, une compréhension complète de la structure du gluten pendant la formation de la pâte, ainsi que des changements dans les associations moléculaires, est encore loin d'être atteinte (kuktai, 2004).

II.4. Mécanisme d'accumulation des protéines de réserve au cours de la croissance du grain

II.4.1. Biosynthèse des corpuscules protéiques

Le réticulum endoplasmique (RE) est le lieu de synthèse de toutes les protéines de réserve des céréales. Au départ, ces protéines possèdent un peptide ou séquence-signal localisé dans la partie N-terminale de la séquence protéique. Des informations nécessaires pour le routage des protéines sont contenues dans ce peptide qui va permettre la translocation de la chaîne polypeptidique dans la lumière du RE. Les protéines se regroupent dans le RE avant d'être acheminées, *via* des vésicules, vers leurs lieux de stockage et ce après avoir transitées ou non dans l'appareil de Golgi (Simos, 2011). Les protéines de réserve se replient dans la lumière du RE (*foldings*) catalysées par des protéines chaperonnes et des protéases (DuPontet al., 1998). Ces molécules sont, la BiP (bindingprotein) et la PDI (protéine disulfure isomérase) qui seront impliquées dans la maturation des protéines de réserve du blé et la stabilisation de leur structure tertiaire par l'établissement de ponts intramoléculaires (Li et al., 1993 ; DuPontet al., 1998). Néanmoins, il est encore difficile de savoir si ces molécules participent seulement au repliement des protéines ou encore à leur condensation.

Les protéines de réserve s'accumulent sous la forme de corpuscules protéiques (CP) chez le blé durant le développement du grain et cela avant la formation d'une matrice protéique (Pernollet et Camilleri, 1983). Toutefois, l'espèce végétale considérée et le stade du développement de l'albumen varient les voies de synthèse de ces CP qui sont a priori très complexes (Tosiet al., 2009).

L'acheminement subcellulaire des protéines de réserve jusqu'aux vacuoles a été étudié de façon précise chez le blé. A partir de coupes de grains du blé immatures et au niveau ultra structural, on a révélé le dépôt des protéines de réserve avec utilisation des techniques d'immunomarquage (Parker et al., 1990, Bechtel *et al.*, 1991, Stenramet al., 1991).

Ces auteurs ont mis en évidence deux voies de routage des protéines de réserve et donc déformation des CP qui peuvent coexister (Levanonyet al., 1992 ; Rubin et al., 1992 ; Tosiet al., 2009). La première voie concerne le transport des protéines sécrétées à travers le système endo-membranaire avant leur transfert vers les vacuoles *via* l'appareil de Golgi (Bechtel et al., 1982 ; Kim et al., 1988 ; Loussert et al., 2008). La seconde voie, qui semblerait plus spécifique des protéines de réserve du blé, la production par le RE de vésicules ou le contenu, par un processus similaire à l'autophagocytose, serait déchargé dans les vacuoles

sans transit *via* l'appareil de Golgi (Levanonyetal., 1992 ; Herman &Larkins, 1999) (Figure 13).

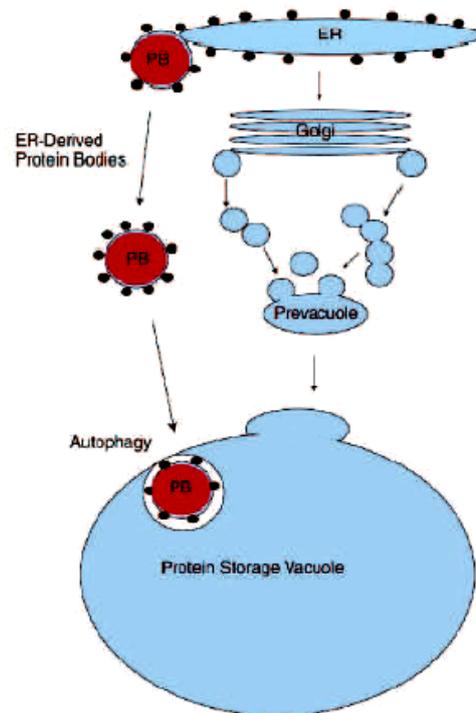


Figure 13. Schéma conceptuel de l'ontogénie des corpuscules protéiques et de la vacuole de stockage protéique (Herman et Larkins, 1999).

II.4.2. Accumulation des protéines de réserve au cours de la croissance du grain

L'accumulation et la polymérisation des gluténines au cours du développement du grain de blé tendre ont été étudié par plusieurs auteurs (Johansson et al., 1994 ; Gupta et al., 1996 ; Stone et Nicolas, 1996 ; Carceller et Aussenac, 1999, 2001 ; Daniel et Triboï, 2002 ; Rhaziet al., 2003 ; Shewry et al., 2009b). Toutefois, sur le blé dur, les travaux conduits sont très peu nombreux. Ils ont montré que toutes les fractions protéiques (α -, β -, γ -gliadines, ω -gliadines et les SG-FPM et HPM, ainsi que les albumines) étaient synthétisées simultanément (Galterio et al., 1987 ; Bénétrix et al., 1994). Les travaux conduits sur le blé tendre ont également montré qu'entre 5 et 13 JAF, la synthèse des SG-HPM se produit en même temps que celle des SG-FPM et des gliadines (Johansson et al., 1994 ; Gupta et al., 1996 ; Carceller et Aussenac, 1999 ; DuPont et Altenbach, 2003 ; Abonyiet al., 2007) et se poursuit jusqu'au stade pâteux du grain.

De plus, les gènes individuels des SG-HPM et au moins sept gènes de SG-FPM présentent des profils temporels de régulation identiques ; cela a été révélé par une analyse des populations d'ARNm (Altenbach et al., 2002). Cependant, Panozzo et al (2001) ont signalé que les SG-FPM

ne sont synthétisées en quantités significatives qu'après le 14^{ème} jour après floraison, clairement après les SG-HPM. Shewry et al (2009), à travers une analyse densitométrique des gels SDS-PAGE, ont confirmé les SG-HPM précèdent d'environ 2 jours l'accumulation des SG-FPM et les gliadines et continueraient au-delà de la phase d'accumulation de la matière sèche. Selon ces mêmes auteurs les différentes fractions de protéines de réserve (gliadines, SG-FPM et SG-HPM) s'accumulent surtout entre 14 et 35 jours après floraison et selon des profils relatifs d'accumulation stables (par rapport à la quantité finale de chaque fraction protéique). Contrairement Gupta et al (1996) révèlent que le rapport entre SG-HPM et SG-FPM augmente au cours du développement du grain.

III. Les protéines et qualité technologique du blé dur

III.1. Evaluation de la qualité du blé dur

La qualité technologique des blés durs dépend de l'orientation des produits qui en sont issus. Elle est évaluée à travers plusieurs critères, à savoir: la valeur semoulière, influencée par la taille et la texture des grains et la valeur pastière qui dépend de la composition qualitative et quantitative en protéines.

III.1.1. La valeur semoulière

Elle est définie comme étant l'aptitude d'un blé à donner, dans des conditions industrielles, un rendement élevé en semoule de pureté déterminée (Abecassis, 1993). Elle tient compte des caractéristiques commerciales du lot (teneur en eau, quantité des impuretés...etc.) (Feillet, 2000). Le rendement en semoule dépend essentiellement du mitadinage qui correspond à la diminution de la vitrosité du grain par l'apparition des zones farineuses blanchâtres dont la taille dépend de l'importance de cet accident.

Chez le blé dur, l'effet de mitadinage se manifeste lorsque les grains atteints ont tendance à s'effriter à la mouture pour donner du gruau au lieu de la semoule d'où la diminution du rendement semoulier (Sombrero et Monneveux, 1989).

Les facteurs qui influent sur la valeur semoulière sont regroupés en trois groupes principaux :

1. Les facteurs extrinsèques: liés aux conditions de culture et de récolte, ils sont régulièrement pris en compte au cours des transactions commerciales:

- La teneur en eau du grain que l'on souhaite la plus faible possible ; elle est généralement comprise entre 12 à 15%, car la conservation du blé dur est d'autant meilleure que la teneur en eau est plus faible.

- Le taux d'impuretés, le plus souvent égal à 2 ou 3% et qui représente la somme des produits étrangères utilisables (graines d'autres céréales et graines de légumineuses), nuisibles (ergot) ou inertes (pierre et cailloux).
 - Le taux et la grosseur des grains cassés qu'il est parfois difficile de séparer d'autres impuretés au cours du nettoyage.
- 2. Les facteurs intrinsèques :** Ils dépendent des caractéristiques propres du blé et définissent ainsi sa qualité technologique. Dans cette optique la valeur semoulière dépend de :
- Rapport albumen/enveloppe qui est en fonction de l'épaisseur des enveloppes, de la forme du grain et de son degré d'échaudage. On le souhaite aussi d'être élevé que possible.
 - La texture de l'albumen qui détermine les rendements relatifs en semoules: plus l'amande est vitreuse et dure, moins elle aura tendance à se réduire en farine ; alors qu'un grain fortement mitadiné dont l'amande est farineuse et friable, aura tendance à se désagréger en produits très fins au détriment du rendement en semoule. Elle est appréciée par la mesure du taux de mitadinage qui rend compte des proportions d'amande farineuse et vitreuse.
 - Le degré d'adhésion entre l'albumen, la couche à l'aleurone et les enveloppes : une liaison trop intime diminue le rendement semoulier (à qualité de semoule identique) ou augmente les piqures dans les semoules (à rendement semoulier égal).
- 3. Facteur réglementaire :** Il s'agit de la richesse du grain en matières minérales. Il est possible de déterminer la pureté et le taux d'extraction des semoules en mesurant leur teneur en matières minérales: Plus le taux de cendres sera faible, plus une semoule sera considérée comme pure du point de vue réglementaire. Le taux de cendres des semoules dépend non seulement de leur pureté mais également de la minéralisation des blés mis en œuvre (Abecassis et Feillet, 1985).

III.1.2. La valeur pastière

La qualité pastière des blés durs rend compte leur aptitude à être transformés en semoules puis en pâtes alimentaires qui possèdent les caractéristiques recherchées: aspect à l'état cru, comportement durant et après la cuisson (Feillet, 2000).

a) Aspect de la pâte crue

Elle est déterminée par les paramètres suivants:

- La couleur qui résulte de la superposition d'une composante jaune recherchée, dont l'intensité dépend de la teneur en pigments caroténoïdes et en lipoxygénases de l'albumen et d'une composante brune indésirable.
- Le nombre et l'origine des piqures (piques brunes dues à la présence de particules de sons et piqures noires provenant de grains mouchetés).
- La texture des produits (gerçures, bulles d'air, points blancs et l'état de surface des pâtes sèches qui dépend des conditions de fabrication des pâtes) (Feillet, 2000).

b) Qualité culinaire

C'est l'aptitude des pâtes à résister à la désintégration et à conserver un degré satisfaisant de fermeté après une cuisson prolongée ; d'autres y intègrent la tendance à coller et à la quantité d'eau durant la cuisson. Certain enfin y ajoutent la saveur, l'arôme et la couleur (Abecassis et al, 1994). Ce critère de qualité culinaire est complexe et recouvre plusieurs facteurs dont la texture des produits qui tient compte de la fermeté et la masticabilité des pâtes après cuisson et qui peut être déterminée par des caractéristiques rhéologiques (fermeté, ténacité et viscoélasticité).

III.1.3. Qualité du couscous

Guezlane (1993) a défini la qualité du couscous comme étant la possibilité pour une semoule de donner un couscous de granulométrie régulière et homogène ; à l'état sec il doit être de couleur jaune ambrée possédant une capacité d'absorption suffisante et qui après cuisson, ses grains doivent rester bien individualisés sans se déliter, ni coller entre eux.

Comme tout produit alimentaire élaboré, le couscous dépend essentiellement de la matière première dont il est issu. En l'occurrence la semoule qui elle-même, est liée à ses caractéristiques physiques (granulométrie) et sa composition chimique. D'autres facteurs aussi importants interviennent au cours de la fabrication du couscous (le traitement hygrothermique, le roulage...).

Selon Kaup et Walker (1986), un couscous de qualité doit avoir:

- des grains de couleur jaune doré, de diamètre uniforme contenant le moins possible de débris de son,
- des grains à taux d'absorption en sauce élevé,
- des grains qui ne collent pas entre eux.

III.2. Propriétés des protéines de blé

La teneur en protéines est un critère de qualité fréquemment utilisé dans les échanges commerciaux. Elle est en effet essentielle à plus d'un titre dans la mesure où, la fréquence d'umidification et la teneur en protéines sont des paramètres inversement reliés (Dexteret al., 1988, 1989 ; Samson et al., 2005). Selon Dexteret al (1989), le mitadinage serait lié à une diminution du contenu protéique du grain du fait d'un déficit de fertilisation azotée. Selon Matveef (1963), le rapport protéine sur amidon serait critique afin de saturer l'espace inter-granulaire ; en l'absence de quoi on assisterait à la formation de vacuoles d'air au sein de l'albumen qui devient poreux et d'aspect blanc caractéristique.

Les propriétés viscoélastiques des pâtes alimentaires sont en grande partie déterminées par les propriétés fonctionnelles des protéines de réserve du blé qui, à l'état hydraté, s'associent pour former une masse viscoélastique : le gluten.

Les gliadines sont responsables de la composante visqueuse du comportement rhéologique des pâtes et les gluténines de leur composante élastique. Très extensibles quand elles sont hydratées, les gliadines (qui possèdent des propriétés plastifiantes) confèrent à la pâte son extensibilité, sa viscosité et sa plasticité. La viscosité et l'extensibilité sont associées à la teneur en gliadine (Wall, 1979). Cette dernière constitue une phase "diluante" des gluténines. En agissant comme un compétiteur des liaisons intermoléculaires entre les polymères de gluténines, elle contribuerait à diminuer l'élasticité du gluten et à augmenter l'extensibilité. Ces fonctions sont corrélées à la teneur en protéines monomériques (Feillet, 2000). Les γ gliadines sont les fractions les plus fonctionnelles à cause de leur hydrophobicité.

L'élasticité et la ténacité du gluten s'appliquent sur les propriétés très particulières des gluténines. Les agrégats de très hauts poids moléculaires seraient les plus fonctionnels, de sorte que la détermination de la teneur totale en polymères protéiques n'aurait d'intérêt que si elle est complétée par une mesure de la distribution par taille des polymères. En effet, l'élasticité du polymère de gluténines dépend de la nature des sous-unités entrant dans sa composition (MacRitchie et al., 1991 ; Gupta et al., 1992 ; Khatkaret al., 2002).

Bien que les SG-HPM ne représentant pas plus de 10% des protéines totales ou encore 20% de la fraction gluténine chez le blé tendre, elles influent directement sur la qualité de la pâte en panification et sont considérées comme responsables pour 45-70% de la variation de la performance boulangère des blés européens (Branlard et Dardevet, 1985, Payne et al., 1987) (Figure 14).

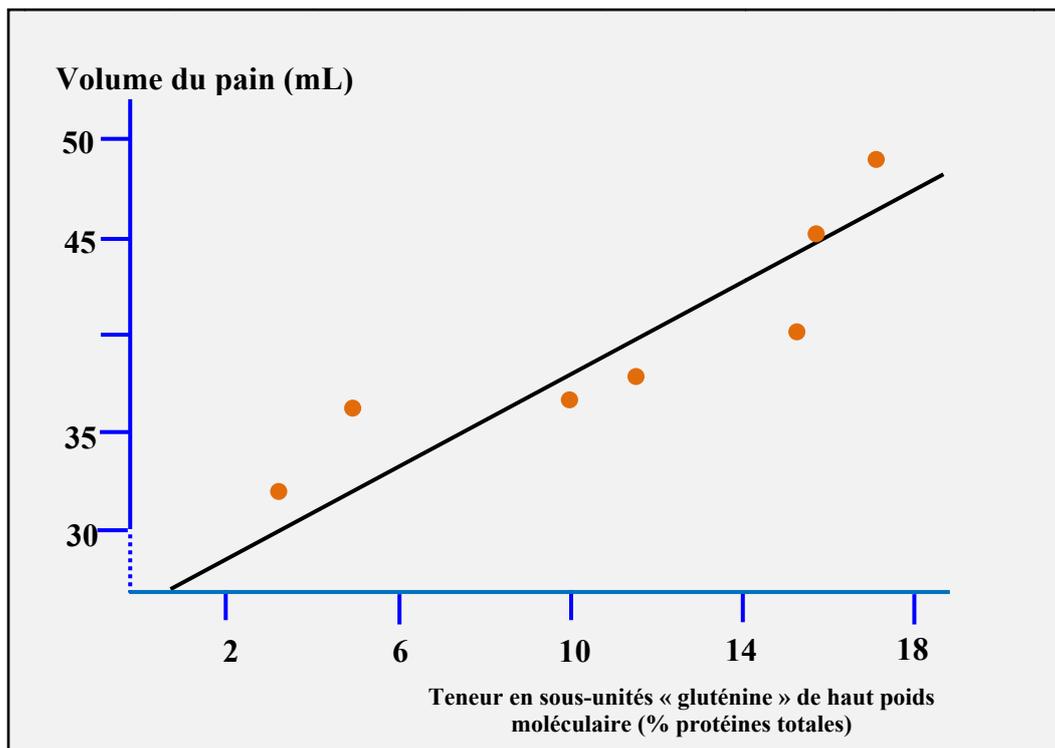


Figure 14. Relation entre le volume du pain et la teneur totale en sous glutenines de hauts poids moléculaire (Feillet, 2000).

Par ailleurs, l'encombrement en taille des polymères, évalué notamment à travers la fraction de polymères insolubles dans les solutions de SDS, est un facteur clef de l'élasticité du gluten (Singh et al., 1990 ; MacRitchie et al., 1991 ; Gupta et al., 1992 ; Popineau et al., 1994 ; Flagella et al., 2010). L'encombrement en taille des polymères de gluténines et leur contenu en SG-HPM sont d'ailleurs des paramètres fortement liés (Popineau et al., 1994). La situation est différente chez le blé dur où l'absence du génome D entraîne une diminution de la proportion de SG-HPM. L'effet est également qualitatif puisque avec la disparition du locus Glu-1D ce sont les SG-HPM qui deviennent les plus importantes pour l'élasticité des gluténines qui disparaissent.

Dans le cas des blés durs et contrairement au blé tendre, la qualité viscoélastique du gluten a été évaluée après un traitement thermique. Les glutens de blé dur présentent une élasticité et une ténacité nettement inférieures à celles des glutens de blé tendre. Par contre, après un traitement thermique, la classification s'inverse et les glutens de blé dur s'avèrent plus tenaces et élastiques (Damidaux et al., 1978). Les propriétés rhéologiques des glutens du blé dur thermoformés sont directement liées à leur composition et à leur teneur en SG-FPM. Ce sont les SG-FPM du groupe B codées par le locus Glu-B3 qui exercent l'effet le plus marqué (Masciet al., 2000 ; Edwards et al., 2003 ; Edwards et al., 2007). D'un génotype à l'autre, la différence de qualité rhéologique du gluten serait davantage liée aux taux d'expression des

sous-unités selon les allèles, plutôt qu'à des différences structurales (Autran et al., 1987, Morel et Autran, 1990).

Par ailleurs, il semblerait que les SG-FPM exercent à quantité égale, moins d'effet sur la machinabilité de la pâte que les SG-HPM et que les variations qui se manifestent au locus Glu-A3 génèrent les plus grandes variations dans l'extensibilité de la pâte que celles qui apparaissent aux locus Glu-B3 et Glu-D3.

Les travaux de Simos (2011) ont montré que la valeur pastière des blés dur est déterminée par la teneur en protéines qui est associée à une plus forte teneur en polymères insolubles dans le SDS. Dans le cas de la valeur boulangère, c'est ce dernier critère qui est mis en avant devant la teneur en protéines.

VII. Effets des facteurs environnementaux sur l'expression de la qualité du blé

La qualité des grains de blé est fonction de leur composition, principalement les protéines qui dépendent du génotype et de l'environnement. L'effet génétique est principalement indiqué par la variation qualitative telle que le polymorphisme des protéines et d'autre part par la variation quantitative de la protéine totale ou des différentes unités et sous-unités.

En revanche, l'effet de l'environnement (conditions de croissance, site et fertilisation) sur la qualité du blé est principalement reflété par la variation quantitative des protéines totales ainsi que leurs sous unités (Triboï et al., 2000). Des interactions génotype-environnement ont aussi un effet significatif sur la variation de la composition protéique (Jamieson et al., 2004).

VII.1. Influence des conditions environnementales sur l'accumulation des protéines

Avant l'anthèse, les conditions environnementales affectent la germination, la photosynthèse, le tallage, le développement de l'inflorescence ainsi que le nombre de grains de blé formés. Après l'anthèse, elles affectent principalement le poids du grain et sa composition (Dupont et Altenbach, 2003).

Plusieurs études indiquent que les conditions environnementales, en particulier l'engrais et la température, affectent la quantité, la composition et/ou la polymérisation des protéines du gluten (Wrigley et al., 1984 ; Ciaffi et al., 1996 ; Graybosch et al., 1995 ; Panozzo et Eagles, 2000, Flagella et al., 2010).

VII.2. Influence de la température sur l'accumulation des protéines

L'accumulation des différentes fractions protéiques est hautement asynchrone induisant ainsi une variation de la composition en protéines du grain pendant le développement du blé (Torbica et al., 2008). Les conditions environnementales qui raccourcissent le remplissage du grain, comme les hautes températures ou la sécheresse, affectent la distribution des fractions protéiques (Jamieson et al., 2001; Triboï et al., 2003). Bien que les déficits hydriques affectent sévèrement la qualité et l'utilisation finale de plusieurs cultivars de blé (Guttieri et al., 2000, 2001). On en sait peu sur l'effet du déficit hydrique et son interaction avec la température sur l'accumulation des fractions protéiques. Panozzo et al. (2001), à travers l'analyse de la cinétique de l'accumulation des protéines dans des parcelles de blé conduites en irriguées et en non irriguées, a montré qu'il n'y a pas d'effet significatif de la sécheresse sur les gliadines et les gluténines à haut et bas poids moléculaires. De même, la sécheresse post-anthèse n'a pas affecté le taux d'accumulation des fractions solubles et insolubles en SDS des polymères de gluténines (Daniel et Triboï, 2002), alors que la sécheresse post-anthesis raccourcit la période de floculation des céréales avant le début de l'insolubilisation des polymères (Daniel et Triboï, 2002 ; Triboï et al., 2003). Cependant, Flagella et al. (2010) ont révélé qu'un stress hydrique terminal au cours du remplissage des grains améliore la force du gluten et augmente la quantité de macro-polymères de gluténine associée à une modulation générale des niveaux des SG-HPM et SG-FPM.

Panozzo et al. (2001) ont révélé que les polymères à poids moléculaire élevé (>400) augmentent au cours du remplissage du grain, alors que ceux ayant un poids moléculaire compris entre 150 et 400 restent relativement constants et ceux ayant un faible poids moléculaire diminuent. Wardlaw et al. (2002) ajoutent que, bien que la quantité totale de protéines par grain soit généralement peu affectée par la température pendant la période de remplissage des grains, les caractéristiques fonctionnelles des protéines de réserve du grain peuvent être significativement modifiées.

Dans une autre étude de Blumenthal et al. (1995), il a été montré que les températures élevées augmentent la proportion de gliadines par rapport aux gluténines et diminuent celle des gros polymères de farines de plusieurs variétés de blé cultivées en milieu contrôlé. Cependant la réponse des variétés à ces conditions de stress thermique est différente. Il a été révélé que les génotypes ayant des allèles pour la paire HMW-GS 1Dx5, 1Dy10 montrent moins de variabilité de la composition en protéines à haute température que les génotypes ayant des allèles pour la paire HMW-GS 1Dx2, 1Dy12 (Blumenthal et al., 1995).

Lorsque les plants de blé ne reçoivent pas des niveaux élevés d'engrais, la teneur en protéines peut être augmentée par la chaleur en raison des effets différentiels de la température sur les protéines et le dépôt d'amidon et cela peut ou non conduire à des différences dans la composition et la qualité des protéines de la farine (Randall et Moss, 1990 ; Daniel et Triboi, 2000 ; Selles et al., 1998).

Flagella et al(2010)ont révélé que le déficit hydrique associé à une contrainte à haute température qui se produit généralement dans les environnements méditerranéens pendant le remplissage des grains peut provoquer un niveau d'agrégation plus élevé des sous-unités de gluténines se traduisant par une amélioration de la qualité technologique.

DuPont et al (1998)n'ont observé aucune différence significative dans la composition des protéines entre plants cultivés sous des régimes de températures de 24/17°C ou 37/17°C (jour/nuit), lorsque les plants de blé sont fertilisés après floraison et la farine avait une teneur élevée en protéines. Cependant, lorsque les plants ne sont pas fertilisés après floraison et sous les deux régimes de températures, des différences dans la quantité et la composition en protéines étaient observées. La teneur en protéines et les niveaux de ω -gliadines étaient plus élevés pour la farine issue de plants cultivés sous niveaux élevé de fertilisation ou sous régime à haute température (DuPont et al., 2000).

VII.3. Influence des micro-éléments sur les protéines

VII.3.1. L'influence du soufre

Les effets du soufre sur les propriétés de la pâte sont principalement attribués à son influence sur la composition en prolamines. De plus, il a été montré que la distribution quantitative des protéines de gluten est fortement influencée par la fertilisation soufrée. L'augmentation de la résistance de la pâte à la suite d'une déficience en soufre est due à une augmentation du ratio dessous unités de gluténines à haut poids moléculaire (HPM)/sous-unités de gluténineà bas poids moléculaire (FPM) et un changement conséquent de protéines polymériques vers un poids moléculaire plus élevé (Torbica et al, 2008). Tea et al (2003)ont montré, en utilisant l'isotope ^{34}S comme un traceur d'une fertilisation foliaire, que l'engrais soufré appliqué à la floraison est incorporé dans les protéines de réserve du grain en modifiant la composition en prolamine et leur degré de polymérisation. Ces changements influencent les propriétés au cours du pétrissage de la pâte(Tea et al., 2003). Dans une étude similaire, il a été montré que de fortes augmentations des ω -gliadines et d'une façon moindre celles des HMW-GS ont également été révélés sous des conditions de carence en soufre (Wrigley et al., 1984).

VII.3.2. Influence de l'azote

La fertilisation azotée est le plus important facteur affectant la teneur en protéines et sa composition (Ferrise et al., 2015). L'effet le plus important est quantitatif ; la teneur en protéines totales et les sous unités protéiques augmentent avec l'accumulation de l'azote dans le grain. Quand la teneur en protéine dans le grain augmente, les teneurs en gliadine et en gluténine et le rapport gliadine/gluténine augmentent également (Torbica et al., 2008). Les gliadines ont montré une forte corrélation avec la teneur en protéines totales que les glutenines. La composition en acides aminés (g en acide aminé/100 g de protéines) varie avec la teneur en N ; le rapport gliadine/ gluténine augmente avec la quantité de l'azote dans le grain. Triboï et al(2000)ont révélé que la concentration de certains groupes de gliadines, mesurés par électrophorèse et par densimètre, change avec la variation de la teneur en azote du grain. Ils ajoutent aussi, une préférence pour l'accumulation des gliadines par rapport aux glutenines avec l'accroissement de l'apport en azote.

Des augmentations de la teneur en protéines du grain et des rapports (gliadine/gluténine et HPM-GS / FPM-GS) ont été observés avec des niveaux élevés d'engrais azotés (Gupta et al., 1992 ; Wieser et Seilmeier, 1998 ; Jia et al., 1996). Cependant, les quantités d'albumines et de globulines ont relativement diminué (Wieser et Seilmeier, 1998 ; Doekes et Wennekes, 1982). La nature polymérique du gluten rend la séparation et la quantification de ses composants difficiles. Cependant, il reste difficile de comparer les résultats des travaux utilisant différentes méthodes de fractionnement et d'analyses des protéines. Wieser et Seilmeier. (1998) ont utilisé la RP-HPLC pour mener une analyse quantitative détaillée et l'étude des effets de l'engrais azoté sur les unités gliadines et gluténines de 13 variétés de blé hexaploïdes. Ils ont révélé que l'accroissement de la fumure azotée a augmenté de 44 à 68% la quantité des protéines totales par mg de farine. Les ω -gliadines ont augmenté de 2 à 3 fois et les HPM-GS de 56 à 101% par mg de farine, alors que de faibles changements ont été observés chez les α , les γ -gliadines et les FPM-GS.

Dans la même étude, la quantité d'albumine plus globuline par mg de farine n'a pas été affectée par l'engrais azoté et la proportion d'albumines et de globulines a diminué par rapport aux protéines totales de la farine. Bien que l'albumine totale et la globuline tendent à être insensibles aux engrais appliqués ; aucune étude n'a déterminé si cela est vrai pour l'albumine et globuline individuellement.

Les plantes ont des mécanismes complexes pour réguler l'équilibre de carbone, d'azote et de soufre dans leurs grains (Galili et al., 2001 ; Tabe et al., 2002). Réponses des protéines de

réserve à l'azote et au soufre peuvent être liées à leurs compositions en acides aminés. Tatham et Shewry (1995) ont classé les protéines de réserve riches en glutamines et en prolines en trois groupes basés sur la teneur en soufre: les pauvres en soufre (les ω -gliadines), les HPM-GS avec des quantités intermédiaires de soufre et les riches en soufre (les α -gliadines, γ -gliadines et les LMW-GS).

Beaucoup d'albumines et de globulines sont riches en acides aminés soufrés. Les ω -gliadines et les HPM-GS sont principalement composés par les acides aminés, glutamine et proline, qui sont de bons entrepôts pour l'azote quand il y a excédent d'azote ou insuffisance de soufre.

VII.4. Effet de l'azote dans l'expression des gènes codant des protéines de réserve

L'accumulation de protéines de réserve du blé et de l'orge est affectée par l'azote (Shewry et al., 2001). La présence du Motif GCN4 des gènes codant pour la formation du gluten de blé majeur suggère que la disponibilité de l'azote peut affecter la transcription de ces gènes. L'effet de l'azote sur l'expression des gènes dans des grains ou des épis a été démontré pour le gène C-hordein de l'orge (Müller et Knudsen, 1993). Chez le blé, les niveaux de transcription des gènes codant pour les ω -gliadines ont diminué en absence d'une fertilisation après floraison ; cependant les niveaux de transcription des gènes pour d'autres classes de gliadines ou de gluténines n'ont pas été affectés (DuPont et al., 2000). Ceci suggère que la régulation transcriptionnelle joue un rôle dans la réponse à la fertilisation des gènes codant pour les ω -gliadines. Sous des températures modérées, la fertilisation après floraison n'a pas influencé l'expression temporelle des gènes des protéines du gluten.

Les gènes de l'endosperme du blé codant pour plusieurs protéines pouvant être impliqués dans le processus et la traduction des modifications des protéines de réserve ont été identifiés et caractérisés. Deux de ces protéines, protéine de liaison (BiP) et protéine disulfure isomérase (PDI), une foldase, résident dans le réticulum endoplasmique et sont nécessaires pour la synthèse, polymérisation et accumulation des protéines de réserve dans de nombreux tissus (Li et al., 1993), bien que leur rôle dans le dépôt de gluten ne soit pas clair.



Blé Dur

Partie pratique Matériel et Méthodes

- Conditions expérimentales
- Mesures effectuées
- Analyse statistique des résultats



I. Conditions expérimentales

I.1. Conditions agronomiques de réalisation des essais expérimentaux

Les essais agronomiques ont été réalisés à la station de recherche de l'Institut technique des grandes cultures (36° 43,2'N, 3° 9,6' E, environ 24 m.s.l). La texture du sol est constituée de terre argileuse avec plus de 360 g.kg⁻¹ d'argile et jusqu'à 440 g.kg⁻¹ de limon sur toute la profondeur du sol. L'essai est conduit sur deux années successives (cycles de culture), 2011-2012 et 2012-2013. Les précipitations sont de 973 mm en 2011-2012 et de 836 mm en 2012-2013. La distribution des précipitations est similaire pendant les deux années. Durant cette période, 26% et 27% du cumul total est enregistré en automne. En hiver, les précipitations sont de 41% en 2011-2012 et de 36% en 2012-2013 par rapport au cumul annuel total (figure 15). Au printemps, les précipitations sont plus élevées en 2011-2012 avec une répartition homogène, soit 32% par rapport au cumul annuel. La somme des températures moyennes journalières est de 567°C en 2011-2012 et de 644°C en 2012-2013.

Le précédent cultural est une culture de trèfle d'Alexandrie. La préparation du sol avant la mise en place de la culture est effectuée au mois d'octobre de chaque année. La fertilisation est assurée par un apport de super phosphate à 46% de P₂O₅ à raison de deux quintaux /ha. Les opérations d'entretien de la culture n'ont pas été effectuées en 2011-2012 car les fortes pluviométries ont entravé les opérations de désherbage, ce qui a favorisé une forte infestation en mauvaises herbes susceptibles de provoquer une concurrence vis-à-vis des nutriments du sol notamment aux stades critiques de développement de la culture.

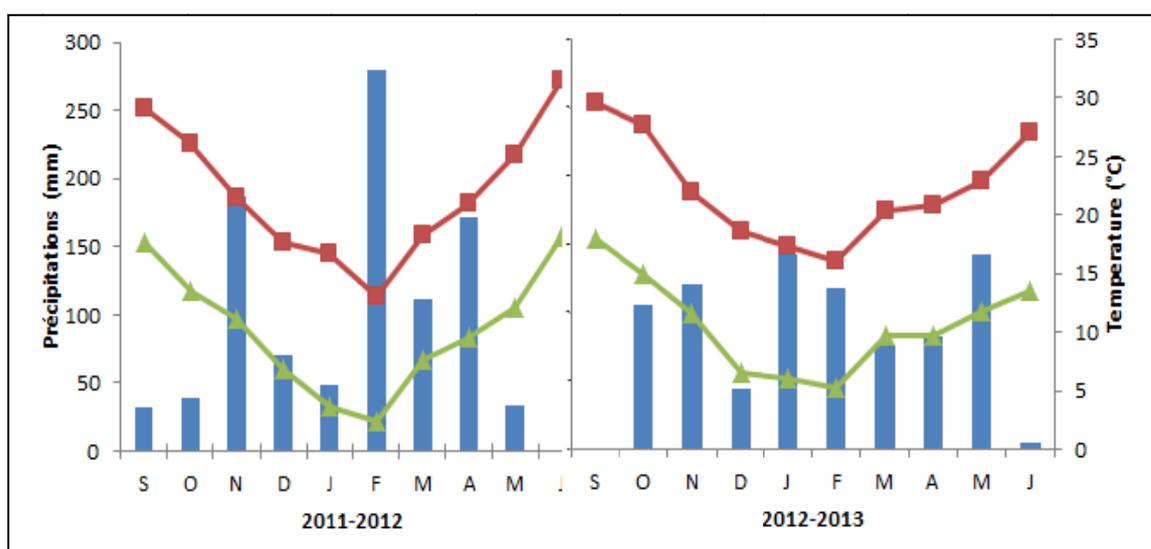


Figure 15. Pluviométrie et températures enregistrées pendant les deux années (2011-2012 et 2012-2013) (Station météo ITGC)

Le semis est réalisé le 3 janvier 2012 et le 7 janvier 2013 à raison de 120 Kg.ha⁻¹ pour les deux années d'expérimentation.

I.2. Matériel végétal utilisé

Quatre variétés de blé dur ont été mises en culture, trois variétés à hauts rendements: "Bousselam", "Chen S" et "GTA Dur" qui ont remplacé les anciennes variétés utilisées par les agriculteurs, et la quatrième est une variété locale, "Mohammed Ben Bachir" (MBB). Les caractéristiques des différentes variétés sont regroupées dans le tableau (4).

Tableau 3. Caractéristiques des variétés.

Caractéristiques des variétés	Chen S	Bousselam	Mohamed ben Bachir	GTA dur
Origine	CIMMYT(Mexique)	ICARDA-CIMMYT	Station centrale d'amélioration des grandes cultures	CIMMYT (Mexique)
Demandeur	ITGC	ITGC	ITGC	ITGC
Type de variété	Lignée pure	Lignée pure	Lignée pur	Lignée pure
Compacité de l'épi	Compact	Demi-lâche	Compact	Compact
Couleur de l'épi	Blanc a roux pale	Blanche	Roux	Blanc
Hauteur de la plante a la maturité	65 75 cm	90 -100 cm	120 cm	Moyenne
Alternat vite	Hiver	Hiver	Automne	Hiver
Cycle végétatif	Précoce	Mi-tardif	Tardif	Précoce
Tallage	Moyen à fort	Fort	Moyen	Fort
Résistance au froid	Tolérante	Bonne	Résistante	Résistante
Résistance a la verse	Résistante	Bonne	Sensible	Moyennement résistante
Résistance à la sécheresse	Moyennement tolérante	Bonne	Tolérante	Résistante
Date de semis	Mi-novembre a la mi-décembre	Novembre-début décembre	Mi-octobre à la mi-novembre	Fin novembre-début janvier
Dose de semis (kg/ha)	110 à 150	130-150	120	130 150
Fertilisation (kg/ha) azotée	46 à 90	46 à 70	46	90 à 100
Fertilisation phosphatée	46	46	46	90
Fertilisation potassique	46	46	46	46
Rendement en grain optimal (qx/ha)	35 à 40	38	20	50
Poids de mille grains	Moyen	Élevé	Moyen	Moyen
Mitadinage	Résistante	Résistante	Résistante	Moyennement résistante
Moucheture	Résistante	Résistante	Résistante	Sensible

I.3. La fertilisation azotée

Les différentes doses d'azotes utilisées sont apportées sous forme d'urée à 46%, en couverture en deux fois, la moitié au semis et l'autre moitié au stade fin tallage de la culture de blé:

- N0: 0 kg N ha⁻¹
- N1: 40kg N ha⁻¹
- N2: 80kg N ha⁻¹
- N3: 120kg N ha⁻¹

Le dispositif expérimental (annexe 1) est un split plot à quatre répétitions. Chaque répétition (bloc) est divisée en grande parcelle qui comporte le facteur variété et en petites parcelles qui comporte le facteur azote.

II. Mesures effectuées

II.1. Le rendement en grains

Le rendement réel de chaque parcelle élémentaire est déterminé après la récolte. Les grains sont récupérés, nettoyés et pesés. Le rendement est exprimé en tonne par hectare (t.ha⁻¹).

II.2. Paramètres physico-chimiques

II.2.1. Le poids de 1000 grains

La détermination du poids de 1000 grains (PMG) est réalisée selon la norme algérienne NA 73189. Le poids de 1000 grains est un critère variétal qui dépend aussi des conditions de culture.

II.2.2. Le taux de mitadinage

C'est le pourcentage en nombre de grains de blé dur reconnus non entièrement vitreux. En effet le grain de blé dur étant normalement vitreux, s'il présente des amandes farineuses ; il entre dans la catégorie des grains mitadinés. L'analyse est réalisée selon la norme ICC-129. Le taux de mitadinage pénalise la valeur semoulière. C'est un accident physiologique qui entraîne un changement de la texture de l'albumen. Celui-ci, normalement translucide et vitreux, devient en partie ou en totalité opaque et farineux.

La détermination est faite sur 600 grains au moins en comptant les grains mitadinés après coupe transversale à l'aide d'un coupe grain, le farinotome de POHL (méthode normalisée pratique (NE* 1-1-36/ 1985).

II.2.3. La moucheture

L'appréciation de la moucheture est visuelle. Elle est réalisée selon la norme : NF en ISO 15587. Le poids de grains mouchetés est déterminé dans 20 g de grains propres. Seuls sont considérés comme mouchetés les grains qui présentent à d'autres endroits que le germe des colorations situées entre le brun et le noir brunâtre.

$$TM (\%) = \left(\frac{MGM}{20} \right) \times 100 \quad (1)$$

Où, MGM est la masse du grain moucheté.

II.2.4. Les indices de coloration: indice de brun et indice de jaune

L'intérêt de la mesure est essentiellement commerciale, car le consommateur cherche des pâtes claires de belle couleur jaune ambrée ; plus l'indice de jaune est élevé, plus les pâtes sont jaunes et par conséquent plus attractives et de qualité commerciale élevée.

Le principe est d'apprécier la couleur de la semoule qui se caractérise par deux composantes, l'indice de brun et l'indice de jaune à l'aide d'un spectrophotomètre Hunterlab (géométrie 0/45, illuminant D65 et angle d'observation 10°) ; ces conditions sont celles retenues par la commission internationale de l'éclairage (C.I.E).

Avant chaque série d'essai, il est nécessaire d'étalonner le spectrophotomètre; ensuite mettre environ 50g de semoule dans une boîte de pétri, bien l'homogénéiser et enfin placer l'échantillon sous la source lumineuse. Dix mesures successives sont effectuées en tournant l'échantillon d'un quart de tour avant chaque lecture de manière à limiter les effets dus à l'hétérogénéité de la réflexion sur une surface non homogène.

Les résultats sont exprimés dans le système par les variables L et b, dans les conditions retenues par la commission internationale de l'éclairage (C.I.E).

$$IB = 100 - L \quad (2)$$

$$Ij = b \quad (3)$$

- L'indice 'b' est d'autant plus élevé que la semoule est plus jaune.
- La valeur (100 - L) augmente avec le brunissement
- L : la clarté. (Luminosité)

II.2.5. Détermination du taux de cendres

Les cendres représentent un résidu obtenu après incinération à 900°C exprimé généralement en pourcentage en masse par rapport à la matière sèche (NA :733. 1991.En, ISO 2171)

La détermination du taux de cendres nous donne une indication sur la quantité de matières minérales contenues dans un blé ou dérivé. C'est un critère pour apprécier la pureté d'une farine ou semoule.

La teneur en cendres est déterminée par la pesée du résidu obtenu par incinération d'une prise d'essai de 5g de grains broyés ou de semoule dans laquelle on peut rajouter quelques gouttes d'éthanol dans une atmosphère oxydante à une température de 900°C jusqu'à combustion complète de la matière organique.

La teneur en cendres est déterminée par la pesée du résidu ; elle est exprimée en pourcentage par rapport à la matière sèche.

$$\text{Teneur en cendres (\%)} = m_1 \times \left(\frac{100}{m_0}\right) \times \left(\frac{100}{100-H}\right) \quad (4)$$

Où, m_0 est la masse de la prise d'essai (g), m_1 la masse du résidu (g) et H est la teneur en eau de l'échantillon (%).

II.2.6. Dosage des protéines totales

L'azote total est dosé selon la méthode KJELDAHL, appliquée aux céréales et normalisée en Algérie sous la référence NA 1185/1990. Elle permet une évaluation de la teneur en protéines par utilisation du facteur de conversion adéquat. Le dosage des protéines est réalisé sur grain et semoule. Le résultat est exprimée en pourcentage par rapport à la matière telle quelle est donnée par la formule suivante :

$$\text{Teneur en protéines (\%)} = \frac{(0.0014 \times V \times 100 \times K)}{m} \quad (5)$$

Où, V est le volume de la solution de titrage (ml), m la masse de la prise d'essai (g) et K est le coefficient de conversion, dans le cas de blé et ses dérivés (K = 5,7).

II.3. Paramètres technologiques et rhéologiques

II.3.1. Test de sédimentation en milieu S.D.S

La mesure de l'indice de sédimentation permet de classer les blés suivant leur aptitude boulangère. Il donne une indication sur la force du gluten.

La méthode consiste à peser 6g de semoule, l'introduire dans une éprouvette de 100 mL et ajouter 50 mL d'eau distillée. Agiter vigoureusement pendant 15 secondes, laissé le contenu reposer pendant 2mn; faire une agitation analogue à t=2mn et t=4mn.

Immédiatement après la dernière agitation, ajouter 50 mL de réactif SDS et d'acide lactique (20g/L de SDS et 20mL d'acide lactique) dans les éprouvettes.

Procéder alors à un mélange par quatre inversions lentes des éprouvettes à t=0mn, t=2mn, t=4mn et t=6mn. Le contenu des éprouvettes est laissé au repos pendant 20 mn (Axford et al.,1978).

La méthode permet de réaliser 2 échantillons en double à la fois. La moyenne arithmétique des résultats des deux essais est prise en considération.

L'indice de sédimentation est représenté par le volume du dépôt exprimé en millilitres après 20 minutes de repos. Il est d'autant plus élevé que la qualité des semoules ou farines est bonne.

II.3.2. Détermination de la teneur en gluten et gluten index

Cette mesure permet d'apprécier la quantité et la force du gluten. La détermination de la teneur en gluten est effectuée selon la méthode normalisée (NE. 124/1985).

Le principe est la préparation d'un pâton au moyen d'un échantillon de semoule ou de farine et d'une solution salée (NaCl à 2,5%). Isolement du gluten humide par lixiviation avec une solution de NaCl, puis essorage et pesée du produit obtenu suivi d'un séchage du gluten humide (GH) en vue d'obtenir le gluten sec (GS).

Le mode opératoire consiste à peser 10g du produit et à les introduire dans un mortier. Ajouter 5 mL de la solution de chlorure de sodium et malaxer le mélange à l'aide d'une baguette en verre jusqu'à ce que la pâte n'adhère plus au mortier. Après 20 minutes de repos, le pâton est légèrement comprimé entre les doigts sous un mince filet d'eau salée jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire.

La masse plastique obtenue est pesée à l'état humide après essorage : c'est le gluten humide (GH). Après l'obtention du gluten humide, mettre le pâton dans une centrifugeuse pendant 1 minute. Le pourcentage du gluten humide restant sur la grille de la centrifugeuse constitue le gluten index (GI). Une fois le gluten index est déterminé, on réunit les deux fractions du gluten humide (refus et extraction de la filière) et le disposer dans le glutork (dessiccateur rapide) pendant 4 mn à 160°C jusqu'à dessiccation complète : c'est le gluten sec GS.

$$\text{Gluten index (GI)} = \frac{\text{Quantité du gluten qui reste sur la grille}}{\text{Quantité totale du gluten}} \times 100 \quad (6)$$

II.3.3. Essai au mixographe

Ce test permet de tester la force d'une semoule et d'enregistrer la tolérance de la pâte au cours du mixage. Il a été réalisé selon la méthode normalisée AACC 54-40 A.

Le principe de cette méthode est la préparation d'une pâte à partir de 10g de semoule de blé dur et selon sa teneur en protéine, elle est ramenée à une humidité constante (annexe 2). Le malaxage se fait dans le bol du mixographe par le biais de deux tiges et le stylet (la plume) est posé à la base de la feuille d'enregistreur.

L'enregistrement graphique de la résistance de la pâte au malaxage se fait pendant 8 minutes. Un blé de force met beaucoup de temps pour que le mixographe atteigne son maximum. L'intensité du pic décroît lorsque la résistance est maximale. La vitesse de chute varie en fonction de la pâte: les blés de faible qualité atteignent leur intensité maximale très rapidement puis rechutent brusquement.

Les paramètres à étudier sont:

- Le temps de développement: il caractérise la force de la pâte.
- La hauteur de la pente: elle correspond à la tolérance de la pâte au pétrissage.

Le calcul de ces paramètres se fait de la manière indiquée sur la figure (16).

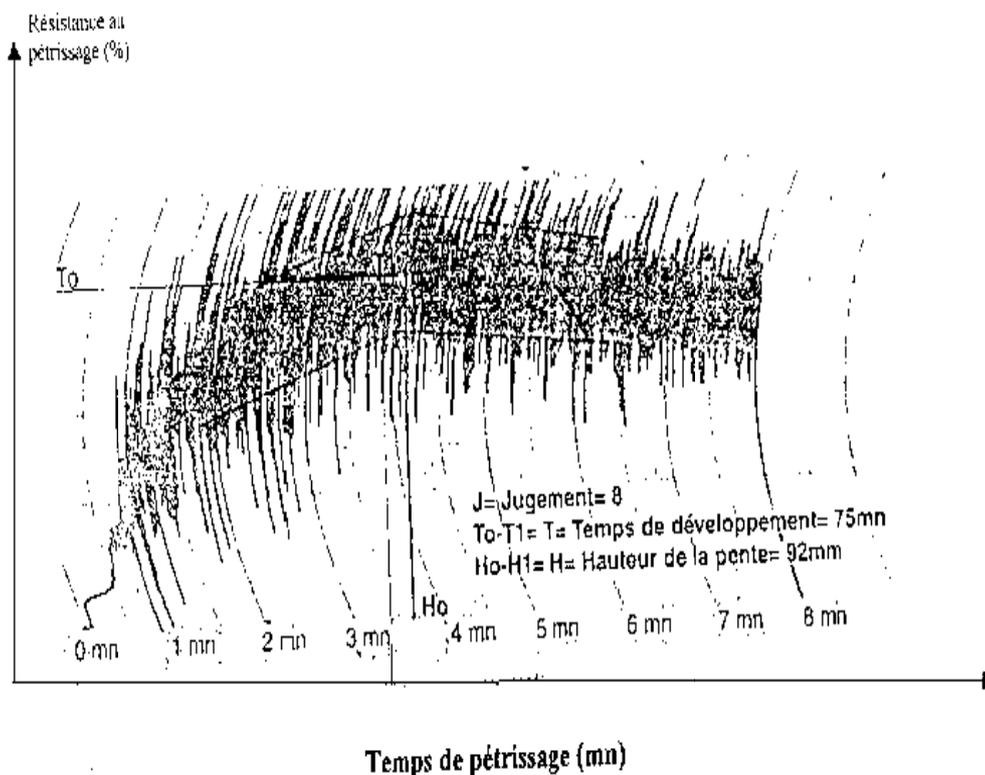


Figure 16. Méthode de calcul des paramètres du mixogramme (Mebtouche, 1998).

II.3.4. Essai à l'avéographe

L'essai à l'alvéographe de Chopin est réalisé sur les variétés récoltées en 2012-2013 selon un protocole normalisé (AACC 54-30, UNI 10453). L'analyse est réalisée sur les semoules extraites des variétés Chen S, GTA Dur et MBB car il y'avait un manque de quantité de semoule pour la variété Boussalem. Le principe de la méthode repose sur l'appréciation de la résistance à la déformation d'un disque de pâte soumis à une extension bi-axiale. L'intérêt de cette mesure réside dans la similitude des déformations observées avec celles qui s'exercent au cours de la formation et de l'expansion des alvéoles du gaz au sein de la pâte pendant la fermentation (sous la pression du gaz carbonique) et la cuisson.

L'évolution de la pression dans la bulle est mesurée et reportée sous forme de courbe appelée alvéogramme (Figure 17).

****Expression des résultats* : L'Alvéolink enregistre les variations de pression d'air mesurées au cours du temps lors de la formation de la bulle. Les courbes obtenues peuvent être visualisées, imprimées et analysées. Les fichiers ainsi créés peuvent même être exportés vers un tableur sur ordinateur (pour une analyse plus poussée).

L'analyse de la courbe $P = f(t)$, appelée alveogramme, permet de calculer les paramètres suivants :

- **W** : qui représente le travail de déformation de la pâte soumise à l'essai ; il est en relation avec la surface du diagramme et une bonne indication de la force boulangère.
- **G** : ou indice de gonflement, déduit de la longueur **L**, exprime l'extensibilité de la pâte.
- **P** : ou pression maximale, rend compte de la ténacité. Il est d'usage de parler du rapport P/L pour exprimer l'état d'équilibre entre la ténacité et l'extensibilité.

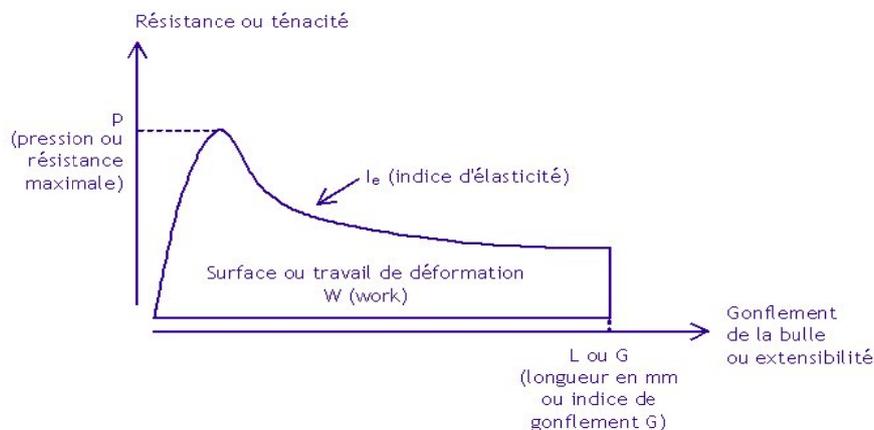


Figure 17. Les paramètres alvéographiques.

I.4. Analyse biochimique des protéines de réserve

La détermination de la variation des protéines de réserve en fonction des différentes variétés cultivées sous quatre taux d'azote est effectuée par une analyse de chromatographie liquide à haute performance d'exclusion (SE-HPLC) et une électrophorèse.

II.4.1. Séparation et quantification des protéines polymériques et monomériques par chromatographie liquide à haute performance d'exclusion (SE-HPLC)

L'extraction des protéines est réalisée en deux étapes (Gupta et al., 1993). Ainsi, une aliquote de 10 mg de semoule est mis en suspension dans 1000 µL d'une solution composée d'acétonitrile (ACN) à 50% et d'acide trichlorofluoroacétique (TFA) à 0,05% suivi d'une agitation vigoureuse pendant cinq minutes dans le vortex. Après un repos de cinq minutes, les échantillons sont centrifugés pendant quinze minutes à 15000 x g. Le surnageant contenant les protéines extractibles est filtré sur cartouche micropore 0,45µm (Tuffryn Acrodisc Syringe Filter) avec une centrifugation de trois minutes à 15000xg. Le culot est repris avec 1000µL avec le même solvant extracteur (ACN 50% et TFA 0,05%) avant de subir une sonication à l'aide d'ultrasons délivrant une puissance de 50 watts et une fréquence de 20KHz et cela pendant 20 secondes pour solubiliser les protéines non extractibles. Après centrifugation à 15000xg pendant quinze minutes le surnageant est filtré.

Un volume de 50µL de la solution filtrée des solutions contenant les protéines solubles et insolubles est injecté dans le chromatographe d'exclusion-diffusion (SE-HPLC) pour être fractionné. Les protéines sont fractionnées en fonction de leur poids moléculaire sur une colonne TSK 3000 SWXL 5µm (300 mm x 7,8mm), muni d'un détecteur UV visible.

Les protéines sont éluées par le solvant A (ACN 50% + TFA 0.05%) et le solvant B (TFA 0.05%) avec un débit de 1 mL.min⁻¹ et sous une absorbance de 214nm.

Le chromatogramme de chaque échantillon de semoule est divisé en deux parties, protéines polymériques (PP) et protéines monomériques (MP) (Figure 18).

Le pourcentage de polymère non extractible dans la protéine polymérique totale a également été calculé à l'aide de la formule décrite par Johansson et al (2001).

$$\% \text{ UPP} = \frac{\text{Unextractables PP}}{(\text{Extractables PP} + \text{Unextractables PP})} \times 100 \quad (7)$$

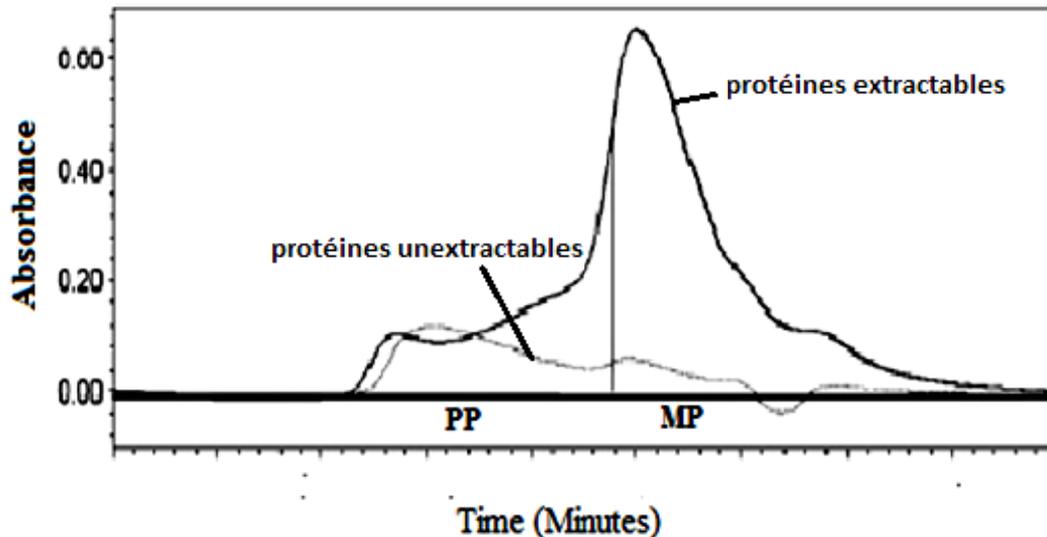


Figure 18. Chromatogramme de l'échantillon de semoule (Hussain et al., 2012)

II.4.2. Electrophorèse des gluténines sur gel d'acrylamide en présence de SDS (SDS-PAGE)

L'électrophorèse SDS-PAGE (électrophorèse en gel de polyacrylamide contenant du dodécylsulfate de sodium) est une technique consistant à faire migrer des protéines dans un gel sous l'influence d'un champ électrique, permettant ainsi leur séparation. La vitesse de migration dépend non seulement de la charge des protéines, de leur taille et de leur forme mais aussi des conditions expérimentales tels que le pH, la composition des solutions et le support électrophorétique.

La révélation se fait après coloration des protéines avec du bleu de Coomassie en présence d'un fixateur acide le TCA (acide trichloracétique)

II.4.2.1. Extraction des gluténines

Selon Singh et al (1991), une quantité de 20 mg est mise en suspension dans 100 μ L d'une solution contenant 50% v/v propan-1-ol pendant 30 minutes dans un bain thermostat réglé à 65°C sous agitation. Vortexer toutes les dix minutes, suivi d'une centrifugation à 14500 x g pendant quinze minutes. Après avoir répété l'extraction une autre fois, le résidu est lavé avec une solution contenant 50% v/v propanol et centrifugé pendant 5 minutes; ensuite tout le liquide est éliminé par une aspiration. Il est important d'arriver à une extraction complète des gliadines à ce stade afin d'éviter la contamination des préparations ultérieures des gluténines.

Après avoir éliminé le surnageant, on ajoute au culot 100 μ L d'une solution contenant propan-1-ol à 50% v/v., 3M Tris HCl pH 8.8 et dithiothreitol à 1%. Après avoir vortexer, les eppendorfs sont incubés sous agitation à 65°C pendant 30 minutes. Après 5 mn de centrifugation à 14500 x g, 20 μ L du surnageant contenant les glutenines est récupéré dans un autre eppendorf séché sous vide. On ajoute ensuite 20 μ L d'une solution stock SDS (10% SDS, gamma pyronine, Tris 0.5 M pH 6.8, triglycerol et Diméthylformamide) en présence de 10% DTT. Après avoir vortexer, 4 μ L du mélange sont prélevés pour une électrophorèse.

II.4.2.2. Réalisation de l'électrophorèse

Il s'agit d'une électrophorèse monodimensionnelle en présence du Sodium Dodécyl-Sulfate sur gel polyacrylamide (SDS-PAGE) selon la méthode de Singh et al. (1991).

a. Préparation des gels

Dans la méthode de séparation par SDS-PAGE, nous devons préparer deux types de gels. Un gel de séparation qui permet de fractionner les différentes protéines et les sous-unités protéiques selon leurs poids moléculaires et un gel de concentration permettant de retenir les impuretés et de tasser les protéines. Avant de préparer les gels on doit procéder au montage des plaques, après les avoir nettoyées à l'éthanol. On les place l'une contre l'autre en les séparant avec deux espaceurs dont la largeur est choisie.

➤ *Le gel de séparation (running gel):*

Le gel est à T= 10% et C= 1%. Ces dimensions sont de 160x140 x1 mm. Il est constitué d'acrylamide à 40% (p/v), de Bisacrylamide à 2% (p/v), de Tris 3M HCl à pH=8.8, de SDS à 10% (p/v) et d'eau distillée. La réaction de polymérisation de l'acrylamide est catalysée par l'ammonium persulfate (APS) à 10% (p/v) et de 0,05% de TEMED. Une fois tous les constituants mélangés (les catalyseurs sont ajoutés en dernier lieu), il est coulé entre les plaques (montées auparavant) doucement pour ne pas faire de bulles jusqu'à un niveau délimité sur la plaque pour laisser la place au gel de concentration. Une fine couche de butanol est coulée pour égaliser la surface du gel et pour éviter son contact avec l'air (pour faciliter la polymérisation). Au bout de 30 à 45 minutes le gel prend, on se débarrasse du butanol et on rince à l'eau distillée.

➤ *Le gel de concentration (stacking gel)*

Il est constitué de la même façon que le gel de séparation avec une seule différence au niveau du Tris HCl qui a un pH de 6.8. Le gel est coulé sur le gel de séparation et les peignes sont posés bien centrés entre les plaques et sans faire de bulles. Le gel prend après 45 à 60

minutes ; les peignes sont retirés soigneusement pour ne pas casser les puits. Enfin, on verse du tampon dans les puits est on fait les dépôts.

b. Le tampon d'électrophorèse

Le tampon de migration est constitué de glycine à 1.41% (p/v), de Tris à 0.3% (p/v) et de SDS à 0.1% (p/v).

c. La migration

Après le dépôt des différents échantillons; la cuve d'électrophorèse (bac inférieur) est remplie à un niveau suffisant avec le tampon d'électrophorèse.

Ensuite, le bac supérieur situé entre les deux plaques (bien serré contre les joints pour éviter les fuites) est rempli lui aussi avec le même tampon jusqu'à ce que les faces supérieures des gels soient immergées. Ce dernier est placé dans la cuve d'électrophorèse pour que les faces inférieures des gels plongent dans le tampon. Enfin, la cuve est fermée et est reliée à un générateur qui va assurer le passage du courant électrique. La migration est menée à une intensité constante de 80mA/gel.

d. Fixation et coloration

Après la sortie du front de migration (coloré en bleu), la migration est arrêtée. Les gels sont démoulés et récupérés dans des bacs en plastique puis recouverts avec une solution de coloration qui est constituée d'un fixateur des protéines, du TCA (acide trichloracétique) à 60% et d'un colorant(bleu de Coomassie R250). Les gels doivent être maintenus en agitation pendant 24 heures pour éviter le dépôt du colorant. Après ils sont décolorés dans de l'eau.

e. Acquisition et analyse d'image

L'obtention des images fluorescentes est réalisée en utilisant un scanner Epson perfection V750 Pro Scanner Gel. L'obtention des images des gels colorés au bleu de Coomassie est effectuée avec un niveau de résolution de 350 DPI. L'analyse d'image est réalisée à l'aide du logiciel LabImage ID L340 PE (Kapelan Bio-Imaging software 2.12) analyzer. Les sous unités SG-HPM et SG-FPM sont identifiés selon Fu et Sapirstein (1996) (Figure 19) et les pourcentages relatifs des sous unité sont calculés.

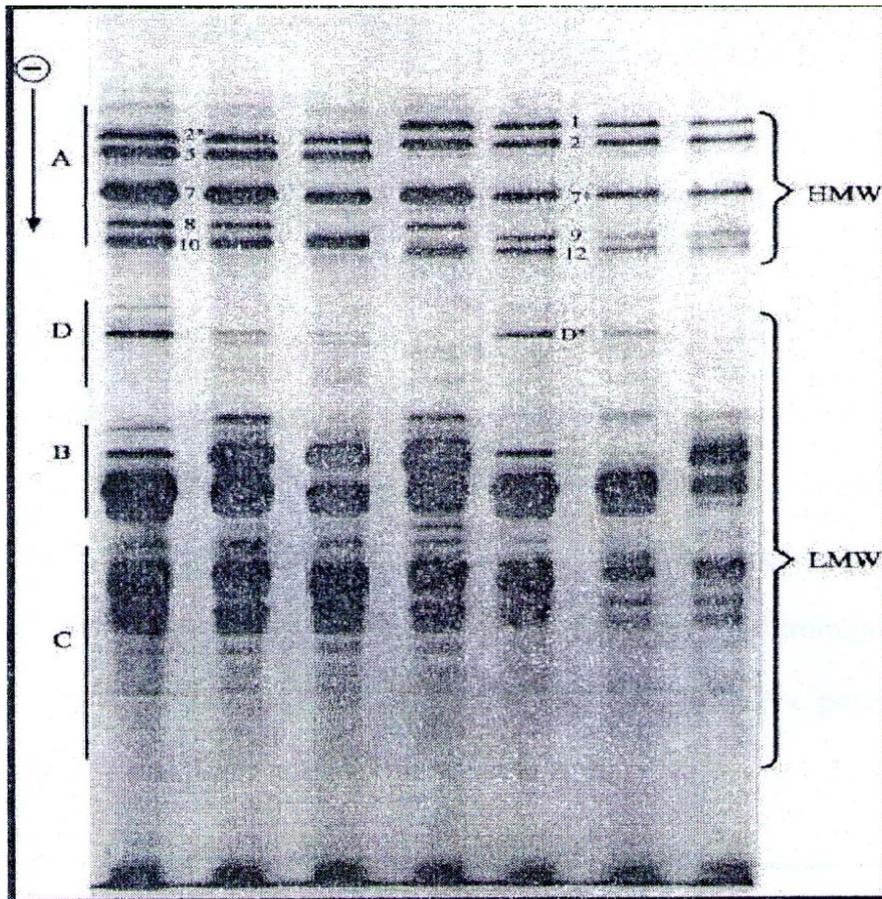


Figure 19. Distribution des sous unités gluténines (Fu et Sapirstein, 1996)

II.5. Essais de technologie de deuxième transformation

II.5.1. La pastification

II.5.1.1. Principe

Le test de pastification permet d'apprécier la qualité pastière des semoules. Il a été réalisé au laboratoire de technologie céréalière de l'I.T.G.C d'El Harrach. Le matériel végétal utilisé est celui issu de la récolte 2011-2012.

Une quantité de 300g de semoule est déposée dans la cuve de malaxage de la presse; on ajoute la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une hydratation de 34%. Le malaxage est effectué sous vide pour éviter l'oxydation des pigments caroténoïdes et préserver la couleur jaune ambrée. Le mélange est enfin extrudé et placé dans un moule choisi de manière à fabriquer des spaghettis. Les pâtes sont séchées dans un séchoir à 46°C pendant 6 heures en abaissant très progressivement l'humidité relative de l'air pendant le séchage de manière à ce que l'humidité finale des pâtes alimentaires ne dépasse pas 12,5%, conformément à la norme d'entreprise appliquée en Algérie.

II.5.1.2. Appréciation de la qualité culinaire des pâtes alimentaires

La cuisson d'une pâte alimentaire vise à gélatiniser l'amidon pour le rendre digestible. Le comportement des pâtes au cours de la cuisson peut être très différent d'un produit à un autre. Dans son acceptation la plus large, la notion de qualité culinaire de pâtes regroupe selon Feillet (1977) l'ensemble des caractéristiques suivantes:

- Temps minimum, optimum et maximum de cuisson.
- Gonflement ou absorption de l'eau pendant la cuisson.
- Texture des produits cuits (fermeté, délitescence).
- Perte à la cuisson.

L'appréciation de la qualité des spaghettis est réalisée selon la norme NF 03-714 (décembre 1981). Cette norme ne s'applique qu'à l'appréciation de la qualité culinaire des spaghettis.

a. Cuisson des pâtes

100g de pâtes sont coupés en brins de 20cm puis versés dans 3 litres d'eau salée bouillante (7g de NaCl par L); maintenir à franche ébullition tout en agitant doucement avec la spatule au début de la cuisson; ne pas couvrir.

- *Le temps minimal de cuisson* : T(min) est déterminé en prélevant les brins des pâtes en cours de cuisson, en les écrasant entre deux plaques de verre et en suivant la disparition d'une ligne centrale blanche dont la présence témoigne de ce que l'amidon situé au cœur de la pâte est encore cru.
- *Cuisson normale* : Au temps $T_1 = T+1$ (minutes), verser le contenu de la casserole sur une passoire et laisser égoutter 15 secondes à partir du moment où les pâtes sont sur la passoire en agitant doucement celles-ci. Après égouttage, la pâte cuite est pesée. L'eau de cuisson est recueillie dans un bêcher et mélangée de sorte à en prélever 25mL à disposer dans un bêcher taré au préalable. Celui-ci est introduit dans une étuve réglée à 98-99°C° jusqu'à dessiccation complète; il est pesé après refroidissement. C'est le poids de l'extrait sec.
- *La surcuisson* : Refaire toutes les opérations réalisées lors de la cuisson normale en prolongeant de 10 minutes le temps T_1 , soit $T_2 = T + 11$ mn ou $T_2 = T_1 + 10$ mn. De cette façon la résistance des pâtes et le temps de cuisson adéquat est déterminé.

b. Perte à la cuisson

Les pertes à la cuisson (PC%) représentent la quantité de matière sèche perdue par 100g de pâtes crues durant la cuisson. Après homogénéisation de l'eau de cuisson, 25 mL sont prélevées et mis à sécher pendant 24 heures à 120°C.

On calcule les pertes à la cuisson PC à partir de l'équation:

$$PC\% = \frac{ES \times (V/25)}{(100 - H)} \times 100 \quad (8)$$

Où ES, V et H sont le poids de l'extrait sec (g), le volume final de l'eau de cuisson (mL) et la teneur en eau des pâtes crues en %, respectivement.

c. Capacité de fixation d'eau des pâtes

La capacité de fixation d'eau (Ce) rend compte de l'aptitude de la pâte cuite à retenir plus ou moins l'eau. Elle est calculée grâce à l'équation:

$$Ce (\%) = (100 - P) \times \frac{100}{(100 - H - PC)} \quad (9)$$

Avec P, PC et H sont le poids des pâtes cuites (g), la perte à la cuisson (g) et la teneur en eau des pâtes crues %, respectivement.

d. Etat de surface

Une appréciation chiffrée des pâtes à T+6 mn a été organisée avec un jury de 8 personnes. Il s'agit d'une notation accordée sur la base des seules caractères pris globalement (délicatesse et collant) : «1= très mauvaise et 9=excellente».

II.5.2. La fabrication et la qualité du couscous

II.5.2.1 La fabrication du couscous

La fabrication du couscous est réalisé selon un processus traditionnel (Figure20) et cela dans les même conditions, à savoir: les ustensiles, l'eau de mouillage, la température ambiante et la personne qui fait le roulage. Le matériel végétal utilisé est celui issu de la récolte 2011-2012.

Le processus de fabrication du couscous manuel est basé sur l'agglomération des particules de semoule-eau, precuisson et séchage à l'air libre pendant quatre jours jusqu'à 11.5 à 12 % d'humidité. Les différentes étapes de la fabrication du couscous sont :

1) Roulage

Le roulage est l'étape la plus importante pour la fabrication du couscous dont dépendent les caractéristiques du produit. Dans une (jatte) en aluminium on introduit une quantité de semoule qu'on humecte progressivement avec de l'eau salé. Avec les mains ouvertes, on fait des mouvements de va et vient pour assurer un bon mélange et favoriser l'absorption de l'eau par les particules de semoules. Ces dernières commencent à gonfler et s'adhérer les uns aux autres. On continue à ajouter de la semoule fine et de l'eau salée jusqu'à l'obtention de la granulation voulue du couscous.

2) Tamisage

Pour assurer de l'homogénéité du produit un double tamisage est nécessaire (tamis en fonction de la granulation désirée). Le premier tamisage vise à éliminer les gros grumeaux. Le second tamisage assure l'élimination des particules fines de semoules.

3) Précuisson

On met le produit, ainsi préparé, dans un couscoussier déposé sur une marmite contenant de l'eau porté à l'ébullition. On arrête la cuisson quand la vapeur d'eau traverse suffisamment le couscoussier.

4) Démottage

Après la précuisson, on obtient certains grains de couscous qui sont collés entre eux. Pour avoir un couscous régulier on frotte les mottes formées contre un tamis pour détacher les grains de couscous.

5) Séchage

On étale le couscous sur un linge propre à la température ambiante et à l'abri de la poussière. On le laisse se déshydrater progressivement, en remuant de temps à l'autre, jusqu'à l'obtention d'un couscous sec d'une teneur en eau de 11.5 à 12%.



Figure 20. Procédé de fabrication du couscous.

I.5.2.2. Appréciation de la qualité du couscous

II.5.2.2.1. Gonflement du couscous

Un échantillon de $20 \pm 0,01$ g de couscous sec est versé dans une éprouvette graduée de 200 mL contenant 50 mL d'eau (100°C). L'éprouvette est bouchée. On effectue 10 retournements successifs de manière à bien hydrater l'ensemble des particules. On ajoute 50mL d'eau pour faire descendre les particules restées collés le long de la paroi. Celle-ci est laissée au repos et les volumes des couscous sont notés après 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 et 60 mn (Guezlane et Abecassis, 1991). On détermine le gonflement (G) selon la relation :

$$G (\%) = 100 \times \frac{VF}{PE} \quad (10)$$

Avec VF et PE sont le volume final du couscous dans l'éprouvette (mL) et la prise d'essai (g).

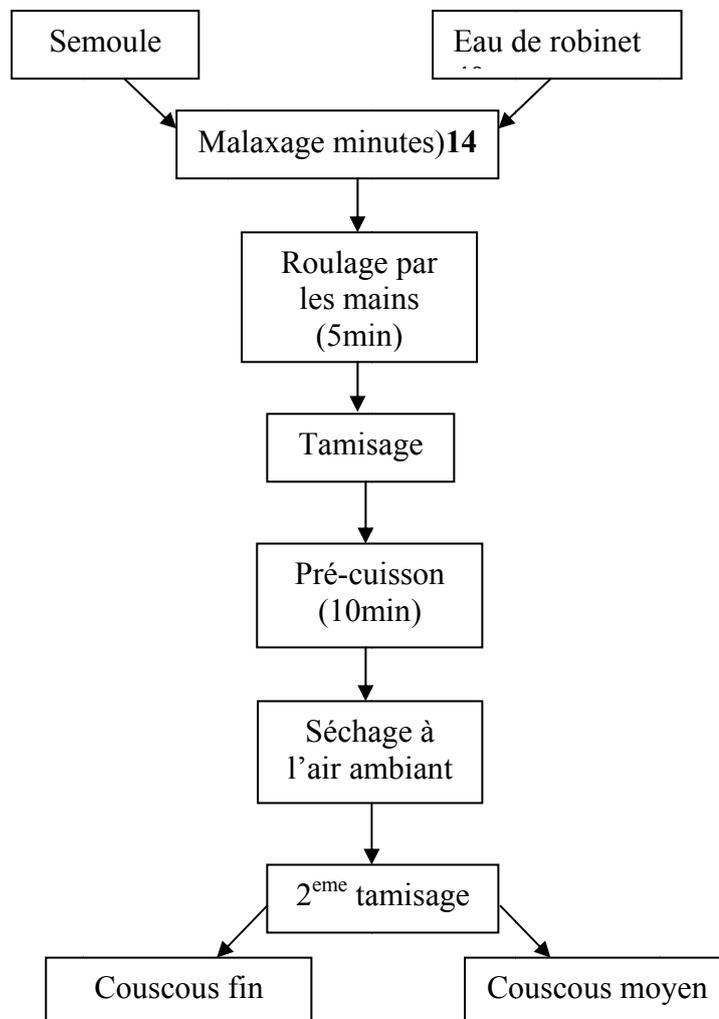


Figure 21. Schéma de fabrication du couscous traditionnel.

II.5.2.3.2. La délitescence

Au départ, les échantillons de couscous ont subi une cuisson rapide selon la méthode de Guezlane et Abecassis (1991). Une prise d'essai de 10g de couscous sec est placée dans un bécher de 200mL et hydratée avec 16,5mL d'eau bouillante salée à 5g/L. Après addition de l'eau, le bécher est immédiatement recouvert et placé pendant 12 minutes dans une étuve maintenue à 90°C, puis le degré de la délitescence est déterminé selon la méthode décrite par Yettou (2000). Un volume de 50 mL d'eau distillée à 25 °C est ajouté au couscous cuit dans un bécher de 200 mL. Après une agitation durant 6 minutes par un agitateur magnétique, le surnageant est récupéré par filtration sur un tamis d'ouverture de maille 1000µm. Une partie aliquote de 10 mL est séchée dans l'étuve à 100°C jusqu'au poids constant. Le degré de délitescence (DD%) exprimé pour 100g de matière sèche (couscous sec étudié) est donné par la relation :

$$DD (\%) = \frac{(ES \times 5 \times 100)}{10 \times (100 - H)} \times 100 \quad (11)$$

Où ES et H sont l'extrait sec en gramme issu des 10 mL de prise aliquote et la teneur en eau du couscous en pourcentage.

II.5.3. Test de panification

Le test de panification nous permet de contrôler l'aptitude d'une farine à être panifiée en étudiant les caractéristiques de la pâte et des pains. Le test est effectué selon la norme NF V03-716, janvier 2001. Le test consiste en l'obtention d'une pâte par pétrissage intensifié de semoule, d'eau, de levure et de sel sans autres ingrédients, suivi d'un pointage de 45 min, d'un façonnage manuel, puis d'un long apprêt sur couche. Incision des pâtons par plusieurs coups de lame puis mise au four et cuisson à 260°C pendant 25min. (Figure 22). Le matériel végétal utilisé est celui issu de la récolte 2012-2013.

Plusieurs critères sont pris en considération pour juger la valeur boulangère de la farine. La somme des observations appréciées présentée dans la grille de notation constitue la note finale de cette valeur boulangère qui est exprimé sur 300 points (Annexe3) et qui est divisée en:

- ✓ Note de pâte sur 100 points;
- ✓ Note de pains sur 100 points;
- ✓ Note de mie sur 100 points.

Le caractère normal ou satisfaisant pour une observation sera noté dans la case 10. Un défaut est à considérer soit par insuffisance, soit par excès. L'intensité de défaut se qualifie à trois niveaux et il est noté comme suit :

- Insuffisance : 7= un peu insuffisant
4= insuffisant
1= très insuffisant
- Bon (suffisant) = 10
- Excès : 7= un peu excessif
4= excessif
1= très excessif

La grille de notation utilisée dans la méthode BIPEA (notation du pain dans la grille NF V03-716) fait apparaître un nombre de critères assez important. Ils ont été retenus parce qu'ils correspondent à des évaluations qualitatives effectuées par les professionnels notamment au stade artisanal.

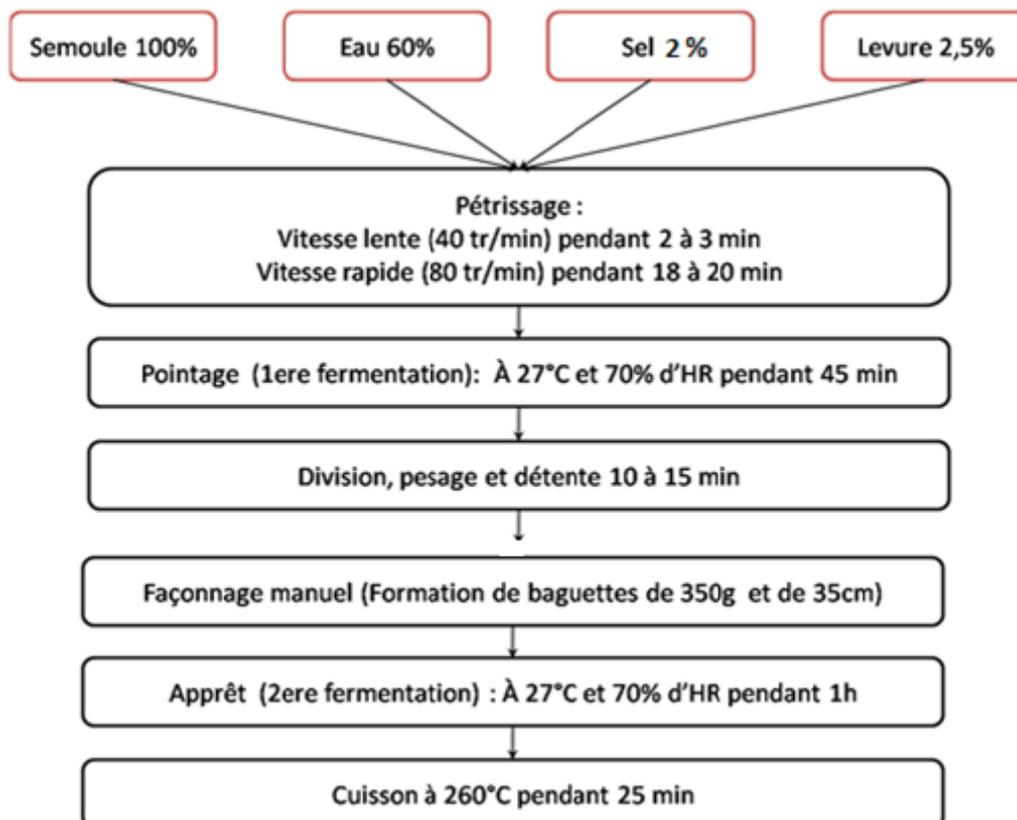


Figure 22. Diagramme de panification (AFNOR NF V03-716).

III. Analyse statistique des résultats

Le traitement des résultats obtenus a fait l'objet d'analyses statistiques à savoir l'analyse de variance (ANOVA) et l'analyse multidimensionnelle.

III.1. Analyse de variance (ANOVA)

Cette analyse est effectuée pour déterminer l'effet des facteurs étudiés et leur interaction. La signification des résultats est exprimée au seuil de 5%. L'analyse est complétée par un test post hoc de classement de groupes homogènes (Newman et Keuls). Les relations entre les différents paramètres mesurés ont été réalisées et une matrice de corrélation est déterminée. Ces analyses statistiques sont effectuées à l'aide du logiciel STATISTICA version 6.

III.2. Analyse Multidimensionnelle

Ces analyses sont effectuées avec EXCELSTAT. Les principales analyses sont l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH).

III.2.1. Analyse en composantes principales (ACP)

C'est l'une des techniques les plus classiques de la statistique multi variée. Elle permet d'extraire le maximum d'informations sous une forme simple et cohérente à partir d'un ensemble très élevé de données. Elle sert aussi à mettre en évidence les interrelations entre les variables et les ressemblances et les oppositions entre les échantillons analysés.

Toutefois, il faut rappeler que cette méthode s'applique à un ensemble de variables quantitatives.

III.2.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

En général, cette classification procède par la partition d'un ensemble de variables en un système de classes disjointes. Dans les classifications hiérarchiques, chaque classe peut être subdivisée au niveau inférieur ou regroupée au niveau supérieur de la hiérarchie. Les résultats obtenus sont de la sorte qu'ils peuvent être synthétisés graphiquement sous la forme de dendrogramme.

Sachant que l'ACP et la CAH sont complémentaires et on est le plus souvent amené à les utiliser conjointement pour analyser un problème donné. Comparant les résultats obtenus par l'ACP avec ceux de la CAH, nous pouvons déduire la distance qui explique le mieux cette classification.



Blé Dur

Partie pratique Résultats et Discussion

Chapitre I : Effet de la variété et de la fertilisation azotée sur le rendement en grains et les paramètres technologiques des variétés de blé dur.

Résultats et discussion

Chapitre I : Effet de la variété et de la fertilisation azotée sur le rendement en grains et les paramètres technologiques des variétés de blé dur

(4/9)

I.1. Le rendement en grains

Le test ANOVA montre une différence significative ($P < 0,05$) entre les rendements en grains, selon les variétés et la fertilisation azotée (essai 1: 2011/2012 et essai 2: 2012/2013) et selon les doses d'azote (essai 1 : 2011/2012) (tableau 4).

Dans les conditions favorables (essai 1), les variétés Bousselam, GTA Dur et ChenS présentent les rendements en grains les plus élevés soient 4.24 t.ha^{-1} , 4.36 t.ha^{-1} et 4.31 t.ha^{-1} respectivement. En revanche, quand les conditions de développement sont défavorables (essai 2), Bousselam enregistre une forte diminution du rendement (84%) par rapport au premier essai (tableau 6).

Dans le premier essai, l'augmentation des doses de fertilisation azotée de 0 kg.N.ha^{-1} à 120 kg.N.ha^{-1} a considérablement amélioré ($P < 0.05$) le rendement en grain de 3.13 t.ha^{-1} à 4.65 t.ha^{-1} . Les bonnes pratiques culturales améliorent l'efficacité de la fertilisation azotée, en favorisant les composantes du rendement et par conséquent le rendement en grains (Madaraset al., 2018).

I.2. Paramètres technologiques

I.2.1. Paramètres physiques

I.2.1.1. Le poids de mille grains

Il constitue un des paramètres le plus important dans la détermination du rendement semoulier. Le poids de grains est plus élevé quand les cultures se développent sans stress abiotique ou biotique. En effet, en 2011-2012, les poids des grains de différentes variétés sont plus élevés (tableau 5), avec une moyenne de 48.83 g contre 41.60 g enregistrée en 2012-2013. La variété Bousselam est plus affectée par les mauvaises conditions culturales avec une différence de 19% du PMG entre la première et la deuxième année d'expérimentation.

Dans les deux années d'expérimentation, l'apport des doses croissantes de fertilisant azoté diminue le poids des grains (tableau 6 et 7).

Les travaux de Dexter et al (1988) affirment que la fertilisation azotée diminue le poids des grains. En effet, l'augmentation de la masse végétative au stade tallage de la culture induit une augmentation du nombre de talles et par conséquent, engendre une diminution du poids des grains. Dans une étude similaire, Benmohamed et Tiguemounine (2011) indiquent que l'apport croissant d'azote diminue le PMG chez la variété GTA Dur bien que cette diminution reste faible par rapport aux autres variétés.

Tableau 4. Résultats de l'ANOVA des variétés sous différents apports d'azote pour les paramètres: vitr, PS, GH, GI, HP et TDV.

Paramètres	2011/2012			2012/2013		
	Variété	N fertilisation	N fertilisation x variété	Variété	N fertilisation	N fertilisation x variété
Rendement	***	***	ns	***	ns	ns
PMG	***	***	***	**	**	*
MCH	***	***	***	***	*	***
Vitr	***	***	***	***	***	**
IJ	***	*	***	***	ns	***
IB	***	***	***	***	***	***
PG	***	**	*	***	***	***
PS	***	**	**	*	*	ns
GH	***	***	**	***	***	**
GI	***	*	***	**	ns	*
GS	***	***	**	ns	*	ns
HP	**	ns	*	**	**	**
TDV	***	ns	ns	***	***	***

*Valeur de $P < 0.05$; ** valeur de $P < 0.001$; *** valeur de $P < 0.0001$.
‡ ns : différence non significative ($P > 0.05$).

I.2.1.2. La vitrosité

La vitrosité est un paramètre de qualité déterminant pour le blé dur en raison de son impact sur les performances de la mouture de la semoule (Dexteret al., 1989). La disponibilité de l'azote pendant le remplissage du grain renforce la structure cohérente des granules d'amidon incorporés dans la matrice protéique, ce qui augmente la vitrosité de l'amande. Les apports d'azote doivent prendre en compte les différences variétales quant à leur capacité d'assimiler cet élément en post floraison pour limiter le taux de mitadinage.

La vitrosité a significativement augmenté ($P < 0,05$) avec l'accroissement de l'apport d'azote (de 0 à 120 kg.N.ha⁻¹). Elle est de 85.1% à 93.4% en 2011/2012 et de 97.7% à 99.3 % en 2012/2013 (tableau 6). Les conditions défavorables (2012/2013) favorisent la diminution du mitadinage mais l'effet de la fertilisation sur ce paramètre est plus faible. Les nutriments stockés au cours de la croissance végétative dans ces conditions ont donc amélioré la vitrosité des grains. En effet l'efficacité d'utilisation de l'azote augmente la teneur en protéines qui améliore l'albumenvitreux. Ce dernier facteur est un paramètre de qualité déterminant pour le blé dur en raison de son impact sur les rendements en semoule lors de la mouture des blés durs.

Gerba et al (2013) dans une étude similaire avec d'autres variétés ont constaté que la fertilisation azotée n'a aucun effet sur la vitrosité, sauf aux doses élevées (180 et 240kg.N.ha⁻¹).

L'interaction des facteurs, variété et fertilisation azotée, est significative ($P < 0.05$) sur la vitrosité du blé (tableau 5). En 2011/2012, une nette augmentation de cette dernière est notée chez la variété Bousselem avec l'accroissement de la fertilisation azotée (figure 23). Chez la variété MBB, l'amélioration de la vitrosité est plus faible. Cependant, l'apport des fortes doses n'a pas diminué le mitadinage de la variété Chen S.

Ces résultats confirment que la variété, la fertilisation azotée et les conditions culturales constituent bien les déterminants majeurs du mitadinage (figure 23).

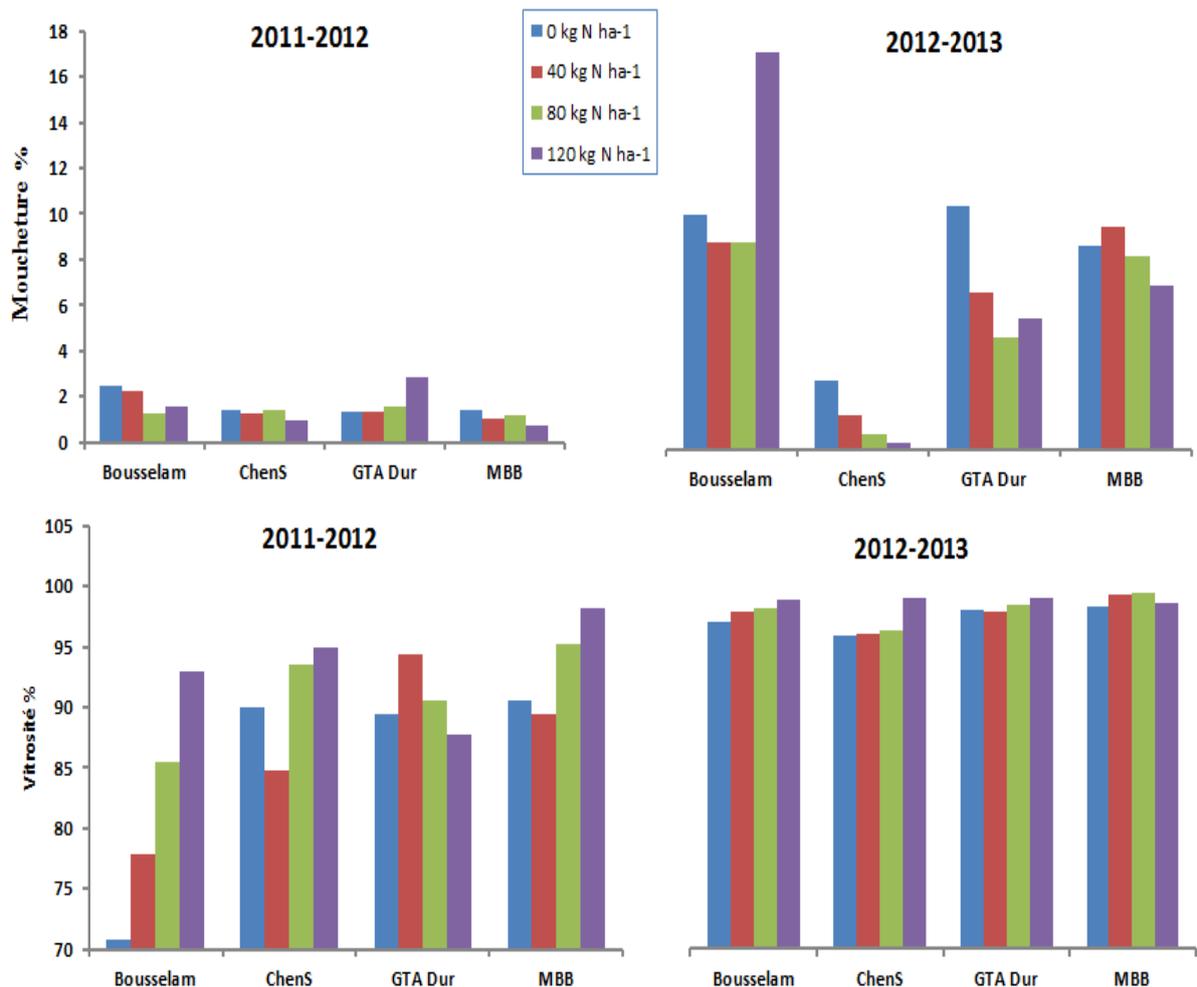


Figure 23. Le taux de moucheture et de mitadinage des variétés sous différents apports d'azote.



Tableau 5. Rendement en grain et paramètres de qualité : des variétés du blé dur sous différents apports azotés (essai1 et essai2).

	Rdt	PMG	MCH	IJ	IB	Vitr	PCG	PCS	SDS	GS	GH	GI	HP	TDV
	t.ha ⁻¹	(g)	%			%	%	%	mL	%	%	%	mm	min
Variétés	2011-2012													
Bousselam	4.24a†	51,63 a	1.9 a	15.63 c	19.87 a	81.7 c	10.6 d	9.6 d	32.63	12,57 a	34.5 a	35.8 c	44.6 a	2.5 c
ChenS	4.36 a	47.28 c	1.2c	15 d	17.92 b	90.8ab	12.4 b	11.7 c	32.25	11,81b	34.7 a	65.6 a	43.3 a	2.9 b
GTA Dur	4.31 a	49.12b	1.8 b	17.28 b	15.24 c	90.5 ab	11.7 c	11.2 b	20.87	11,16 c	31.3 b	42.7b	35.6 b	2.4 c
MBB	3.26 b	47.29 c	1.1 d	20.79 a	14.36 d	93.3 a	12.8 a	12.3 a	25.50	10,86 d	32.0 b	64.6 a	43.0 a	3.3 a
Azote (kg.N.ha⁻¹)														
0	3.13 c	49.77 a	1.64 a	16,94 b	15,31 d	85.1 d	11.4 b	10.7 c	28.13	11,61b	32.8 b	50.0 b	40.6	2.6
40	4.09 b	49.40b	1.49 b	17.34 a	15,56 c	86.6 c	12.3 a	11.7a	27.13	11,09d	31.7 b	52.9 ab	40.5	2.8
80	4.31ab	48.49 c	1.36 c	17.28 a	17,63 b	91.1 b	11.8 a	11.3 ab	28.0	11,28 c	32.2 b	51.3 ab	41.6	2.9
120	4.65 a	47.67 d	1.52 b	17.14 ab	18,90 a	93.4 a	12.0 a	11.1 ab	28.0	12,42 a	35.8 a	54.4 a	43.8	2.9
Variétés	2012-2013													
Bousselam	0.65 c	41.62 b	11.38 a	15.15 c	16,02 c	98.4 b	11.4 c	11.4 b	32.25 b	14,12	62.7 b	45.2 c	60.7 b	2.6 c
ChenS	1.74ab	42.91 a	1.35 c	14.93 d	14,90 d	97.7 c	12.2 b	11.7 ab	35.88 a	13,72	59.4 c	72.1 a	60.6 b	3.1 a
GTA Dur	2.27 a	40.94 b	7 b	15.97 b	17,98 b	98.81 b	11.7 c	11.3 b	22.63 d	13,42	64.4 a	55.4 b	58.6 c	2.2 d
MBB	1.42 b	40.94 b	8.54 b	16.28 a	20,88 a	99.33 a	12.7 a	12.0 a	27.50 c	15,07	65.3 a	52.9 bc	65.8 a	2.8 b
Azote (kg.N.ha⁻¹)														
0	1.44	42.24 a	8.18 a	15.47 a	17,07 c	97.7c	12.1 b	11.8 a	27.50c	13,61b	60.6 b	56.4	58.4 d	2.9 a
40	1.54	41.76 a	6.76 ab	15.57 a	17,54 c	98.2 b	11.6 c	11.2 c	25.88 d	13,16 b	63.9 a	58.1	60.3 c	2.6 b
80	1.67	41.91a	5.74 b	15.66 a	17,56 b	98.5 ab	11.7 c	11.4ab	31,38 b	13,84 b	63.8 a	58.4	62.9 b	2.7 b
120	1.42	40.51 b	7.80 a	15.68 a	17,61 a	99.3 a	12.5 a	11.8 a	33,50 a	15,75 a	63.6 a	52.7	64.1 a	2.3 c
† entre les colonnes, les moyennes suivies par la même lettreontune différence non significative au seuil de probabilité de 5% (Newman-Keuls test).														

I.2.1.3. La moucheture

La moucheture se présente sous forme de tâches brunes ou noires dans le sillon ou sur le germe, défaut très préjudiciable pour les blés durs (Feillet, 2000). Ces tâches sont généralement causées par les conditions abiotiques (température et humidité), les insectes et les champignons (Alaoui et Abecassis, 1979). Les semoules et les produits dérivés issus des grains mouchetés présentent des points noirs indésirables qui diminuent leur qualité commerciale (Feillet, 2000).

Les résultats de l'ANOVA montrent une interaction significative des facteurs variétés et fertilisation azotée sur le taux de moucheture (tableau 5). En 2011-2012, les taux de moucheture de tous les traitements étaient faibles. Néanmoins, la variété la plus résistante à la moucheture est Mohamed ben Bachir (0.72 %) avec la dose d'azote N_3 (120kg.N.ha^{-1}) et la plus sensible (2.85%), la variété GTA Dur avec la dose N_3 (120kg.N.ha^{-1}) (Tableau 7).

En 2012-2013, le niveau de moucheture a considérablement augmenté notamment chez les variétés Bousselam, GTA Dur et Mohammed ben Bachir (Figure 23). La forte infestation en mauvaises herbes a probablement favorisé le développement des champignons qui ont été à l'origine de l'augmentation du degré de moucheture chez ces variétés. En effet, durant la phase de remplissage des grains, la pression parasitaire est connue pour être un des facteurs de risques de la moucheture (Feillet, 2000).

L'effet variétal influe aussi sur le degré de moucheture. La variété Chen S s'est caractérisée par une forte résistance à la moucheture sous les diverses conditions culturales.

L'apport de la dose de 120kg.N.ha^{-1} d'azote a augmenté sensiblement le degré de moucheture de la variété Bousselam en 2012/2013. Cet apport a favorisé également le développement d'adventices et par conséquent les maladies cryptogamiques. L'accroissement de la masse de végétative expose davantage la culture aux attaques fongiques et aux effets d'un climat humide.

I.2.1.4. Les indices de coloration: indice de jaune et indice de brun

L'évaluation de la couleur est un facteur déterminant de la qualité organoleptique des semoules et revêt une importance primordiale en industrie alimentaire (Demarchi, 1994). La composante jaune est recherchée, alors que la composante brune est indésirable. De ce fait, les variétés les plus jaunes sont mieux valorisées. La couleur jaune de la semoule est due à la fois, à la présence des pigments caroténoïdes et aux faibles réactions de brunissement enzymatiques et non enzymatiques dans le grain de blé (Demarchi, 1994).

Il ressort de l'analyse de la variance que les indices de coloration varient en fonction de la variété et de la fertilisation azotée (essai 1 et 2).

En 2011/2012, l'indice de jaune des variétés de blé dur a varié entre 14.53 et 21.21 où la variété MBB a enregistré la valeur la plus élevée avec la dose de 80kg.N.ha⁻¹ contre un indice de 20.28 noté avec le témoin non fertilisé (tableau 7). La variété GTA dura présenté des valeurs moins élevées variant entre 16.64 sans apport d'azote et 18.19 avec l'apport de 40 kg.N.ha⁻¹. Les plus faibles indices de jaune sont obtenus avec les variétés Bousselam et Chen S, soient 15.11 sans apport d'azote et 14.53 avec l'apport de 40kg.N.ha⁻¹ respectivement.

En 2012-2013, les indices de jaune des semoules de toutes les variétés ont diminué. En se référant à l'échelle de classement établie par Houliaropoulosetal(1981)(annexe3), on constate que les valeurs de l'indice de jaune des semoules extraites sont faibles. Cette faiblesse serait due à une déficience en pigments caroténoïdes assortie d'une destruction enzymatique. En effet, la teneur en pigments caroténoïdes est associée à l'activité de la lipoxygénase, l'enzyme responsable de la dégradation oxydative des pigments caroténoïdes au cours du stockage des grains, qui s'accélère après la transformation du blé en semoule (Borrelli et al., 2003).

Bien que plusieurs facteurs environnementaux influent sur la teneur en pigments jaunes (Borrelli et al., 2003) ; cette qualité peut être considérée comme hautement héréditaire (Parker et al., 1998). Trentesaux (1992) précise que plus la teneur en protéines est grande, pour une variété de blé donnée, plus la quantité de pigments jaunes est élevée.

D'après l'échelle de classement de Houliaropoulosetal(1981), l'indice de brun des différentes variétés est faible, mais il augmente avec l'accroissement des doses d'azote notamment en 2011-2012 (tableau 7). Cette augmentation est notée chez les variétés Bousselam et Chen S, de 40% et 22% respectivement.

Benmohamed et Tiguemounine (2011) ont révélé que la fertilisation azotée augmente la coloration brune chez la variété GTA dur.

Nos résultats rejoignent ceux de Houliaropoulosetal (1981) qui montrent que l'indice de brun est beaucoup plus influencé par les facteurs agro-climatiques.

Par ailleurs, le degré de purification des semoules exerce un effet prononcé sur la formation des pigments bruns d'origine enzymatique. En effet l'activité polyphenol-oxydasique est relativement nulle dans l'albumen du grain mur (Kruger, 1976) ; elle augmente dans les semoules lorsque celles-ci ne sont pas correctement purifiées car les enzymes responsables se concentrent dans les parties périphériques du grain (Feillet, 2000).

I.2.2. Paramètres chimiques et technologiques

I.2.2.1. Le taux de cendres

La teneur en cendres permet

d'apprécier la quantité de matières

minérales des blés contenues surtout dans le germe et les enveloppes, et leur mesure est le critère principal utilisé pour apprécier la pureté d'une semoule. L'intérêt est de classer les semoules (blé dur) de façon réglementaire pour leur usage en industrie alimentaire.

Les résultats des deux années ont montré un effet significatif du facteur variétésur la teneur en cendres ($P < 0.05$) (figure 24). Les facteurs liés aux variations du taux de cendres sont entre autre: les facteurs génétiques notamment la dureté, la taille et la teneur en enveloppes de grains, les facteurs pédologiques tels que la nature du sol et la disponibilité des minéraux du sol (Godon, 1978).

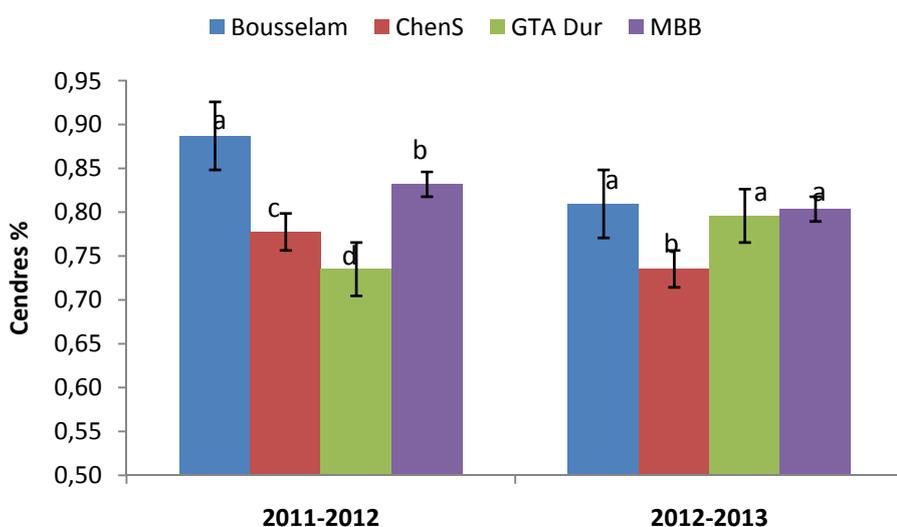


Figure 24. Teneurs en cendres des variétés sous différents apports d'azote.

Les variétés Bousselam et MBB ont les taux de cendres les plus élevés, 0.89%MS et 0.83%MS (la première année) et 0.81%MS et 0.80%MS (la deuxième année). La normalisation algérienne préconise un taux de cendre inférieur à 0.92%.

I.2.2.2. La teneur en protéines

La teneur en protéines est un critère déterminant pour la qualité d'un blé. Campbell et al (1993) ont rapporté que la teneur en protéines est influencée, à la fois, par des facteurs génotypiques et environnementaux.

L'analyse de la variance montre une différence significative ($P < 0,05$) de l'effet de la fertilisation azotée sur la teneur en protéines (tableau 4). La teneur en protéines du grain augmente avec l'accroissement des doses d'azote de 11.4% MS à 12.0% MS en 2011/2012 et de 12% MS à 12.5 % MS en 2012/2013 (Figure 25).

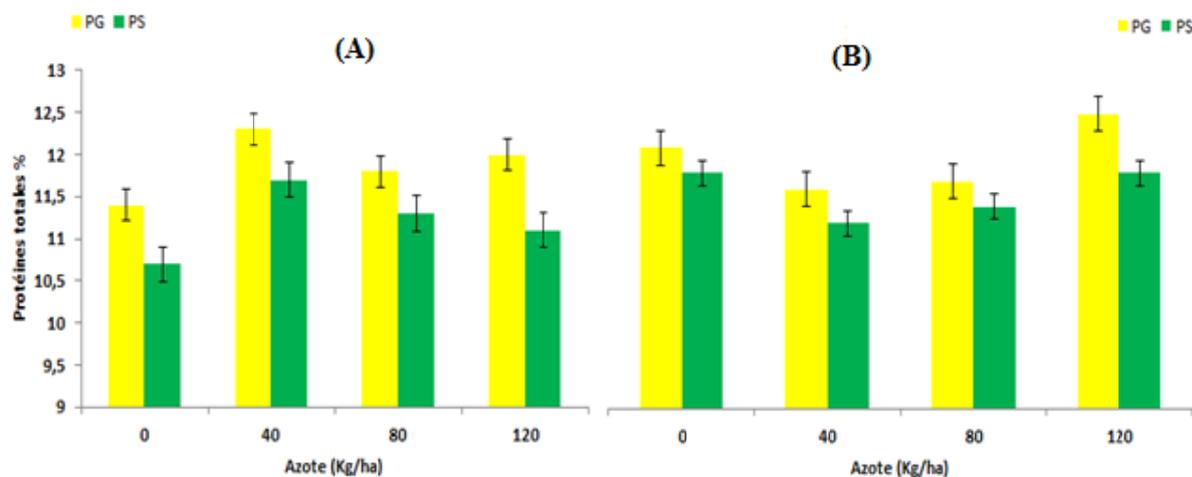


Figure 25. Teneurs en protéines en fonction des doses d'azote en 2011/2012 (A) et en 2012/2013 (B)

Islas-Rubio et al (2011) ont signalé que la disponibilité de l'azote pouvait affecter la teneur en protéines du grain du blé. Les fortes teneurs en protéines correspondent à la disponibilité de l'azote la plus élevée.

Triboiet al (2000) ont rapporté que la disponibilité de N est le facteur le plus important contrôlant la teneur et la composition des protéines.

La réponse des variétés à l'accroissement des doses d'azote est significativement différente ($P < 0.05$). Nachitet al (1995) ont montré que la teneur en protéines du blé dur dépend de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol et du génotype. Sabine (2003) affirme que toutes les variétés n'ont pas la même aptitude à produire des protéines et qu'elles ne répondent pas toutes de la même façon au fractionnement de la dose d'azote. Certaines nécessitent davantage d'azote au début de cycle, alors que d'autres valorisent mieux un apport tardif élevé lorsque ces variétés reçoivent la même dose d'azote avec le même fractionnement.

Tableau 6. Paramètres de qualité : année 2011/2012.

Variétés	Azote (Kg.N.ha ⁻¹)	PMG (g)	MCH (%)	Vitrosité (%)	IJ	IB	PS (%)	PG (%)	GS (%)	GH (%)	GI (%)	SDS (mL)	HP (mm)	TDV (min)
Bousselam	0	52.4 a	2.47 b	70.8 h†	15.11 f	16.53 ef	9.09 e	10.3 f	12.59 b	31.8 de	25.9 f	32.00 a	45.5 a	2.5
	40	52.8 a	2.28 b	77.9 g	16.05 e	16.95 e	10.00 de	10.9 def	12.10 ab	33.3 cde	37.9 e	33.50 a	44.0 a	2.5
	80	50.8 b	1.27 cd	85.5 f	15.59 e	22.76 b	10.00 de	10.6 ef	11.78 ab	33.0 cde	33.5 e	33.00 a	45.0 a	2.6
	120	50.6 b	1.58 c	92.9 c	15.78 e	23.24 a	9.37 e	10.6 ef	13.82 a	39.9 a	45.7d	32.00 a	44.0 a	2.4
Chen S	0	47.59 de	1.38 cd	90.0 d	15.73 e	16.38 ef	11.55 bcd	12.0bcde	12.51b	36.3b	72.8 a	33.50 a	46.5 a	2.9
	40	47.23 e	1.27 cd	84.8 f	14.54 f	16.22 ef	11.19 cd	12.1bcde	10.66 bc	32.9 cde	65.4 b	30.50 a	40.5 ab	2.6
	80	46.40 f	1.38 cd	93.5 bc	15.12 f	17.90 d	11.74 bc	12.3 bcd	11.45 abc	34.4 bed	63.3 b	31.00 a	44.5 a	3.0
	120	47.91 de	0.93 fg	94.9 bc	14.62 g	21.20 c	12.19 bc	12.9 abc	12.62 b	35.3 bc	60.9 bc	34.00 a	41.5 ab	3.3
GTA dur	0	49.26 c	1.33 cd	89.5 d	16.64 e	14.99 g	10.90 cd	11.6 cdef	11.18 bc	32.6 cde	37.7 e	21.50 de	29.5 c	2.3
	40	48.12 d	1.33 cd	94.4 bc	18.20 c	15.41 g	12.00 bc	12.2 bcd	11.56 abc	31.0de	52.7 c	21.00 de	38.0 ab	2.4
	80	49.45 c	1.60 c	90.6 d	17.20 d	15.35 g	11.46 bcd	11.8 cde	10.89 bc	30.1 e	33.4 e	21.00 de	31.5 bc	2.4
	120	49.66 c	2.85 a	87.8 e	17.09 d	15.23 g	10.27 de	11.0 def	11.02 bc	31.4 de	47.1 d	20.00 e	43.5 a	2.8
Mohammed Ben Bachir	0	49.80 c	1.40 cd	90.5 d	20.29 b	13.33 i	11.16 cd	11.7 cdef	10.15 d	30.5 e	63.6 b	25.50 bc	41.0 ab	3.0
	40	49.46 c	1.07 ef	89.5 de	20.59 b	13.67 i	13.43 a	13.9 a	10.06 d	29.7 e	55.8 e	23.50 cd	39.5 ab	3.5
	80	47.35 de	1.17 ef	95.2 b	21.21 a	14.50 h	11.82 bc	12.3 bcd	11.02 bc	31.3 de	74.8 a	27.00 b	45.5 a	3.8
	120	42.56 g	0.73 g	98.2 a	21.07 a	15.93 g	12.64 ab	13.4 ab	12.23 ab	36.7 b	64.0 b	26.00 bc	46.0 a	3.0

† entre les colonnes. les moyennes suivies par la même lettreontune différence non significative au seuil de probabilité de 5% (test de Newman-Keuls).

Tableau 7. Paramètres de qualité : (année 2012-2013).

Variétés	Azote (kg.N.ha ⁻¹)	PMG g	MCH %	Vitr %	IJ	IB	PG %	PS %	GS %	GH %	SDS mL	GI %	HP mm	TDV min
Bousselam	0	42.2 abc	10.25 bc	97.5 bc	16.15 ab	15.65	11.03 g	10.31 b	12.76	62.7 a	28.50 de	58.3 ab	57.0 h	3.0 b
	40	42.8 abc	9.00 bcd	98.3 ab	15.22 c	15.77	11.2 ef	10.98 ab	12.61	63.0 a	31.50 d	45.7 bc	57.0 h	2.5 c
	80	42.2 abc	9.00 bcd	98.6 ab	16.16 ab	16.07	11.9 cde	11.20 ab	13.91	63.4 a	34.50 c	30.3 c	67.4 b	2.5 cd
	120	39.3 c	17.30 a	99.3 a	16.36 b	16.62	12.2 bcd	12.06 a	17.21	61.6 a	34.50 c	46.3 bc	61.2 g	2.4 cd
Chen S	0	43.8 ab	3.00 fg	96.3 c	14.04 d	14.43	12.8 bc	12.06 a	14.36	50.5 b	29.00 de	64.5 ab	55.1 j	3.5 a
	40	41.5 abc	1.50 g	96.5 c	15.09 c	14.50	12.1 bcd	11.30 ab	12.27	62.7a	30.00 cd	76.2 a	63.1 f	3.0 a
	80	44.1 a	0.65 g	96.7 c	15.18 c	15.51	11.5 def	11.39ab	12.11	62.3 a	40.50 b	75.2 a	56.1 i	3.5 b
	120	42.2 abc	0.25 g	99.5 a	15.43 cb	15.16	12.2 bcd	11.88 a	16.16	62.3 a	44.00 a	72.6 ab	68.2 a	2.5 c
GTA dur	0	41.5 abc	10.60 b	98.5 ab	15.98 ab	17.84	12.2 bcd	11.78 a	12.95	63.1 a	23.50 f	54.4abc	55.1 j	2.2 cd
	40	41.3 abc	6.85 cde	98.3 ab	15.16 cb	17.54	11.0 fg	10.91 ab	12.10	64.8 a	20.50 gh	59.7ab	57.0 h	2.0 d
	80	40.7 abc	4.85 ef	98.9 ab	14.66 c	18.19	11.5 def	11.25 ab	13.98	65.0 a	19.00 h	62.7 ab	61.2 g	2.3 cd
	120	40.3 bc	5.70 de	99.5 a	14.77 c	18.38	11.9 bcde	11.12 ab	14.67	64.7 a	27.50 e	44.8 bc	61.2 g	2.1 cd
Mohammed Ben Bachir	0	41.5 abc	8.85 bcd	98.8 ab	15.71 bc	20.39	12.9 b	12.27 a	14.36	66.0 a	29.00 de	48.4 abc	66.3 c	3.0 b
	40	41.3 abc	9.70 bc	99.7 a	16.82 a	22.37	12.3bcd	11.65 ab	15.64	65.0 a	21.50 g	50.9 abc	64.0 e	3.0 b
	80	40.7 abc	8.45 bcd	99.9 a	16.19 ab	20.69	11.9 bcde	11.93 a	15.35	64.4 a	31.50 d	65.4 ab	67.0 b	2.5 cd
	120	40.3 c	7.15 cde	99.0 ab	16.18 ab	20.10	13.7 a	12.22 a	14.94	65.9 a	28.00 e	47.1 bc	65.7d	2.5 cd

† entre les colonnes, les moyennes suivies par la même lettreontune différence non significative au seuil de probabilité de 5% (test de Newman-Keuls).

Une augmentation linéaire de la teneur en protéines des grains de Bousselam en (2012-2013) et de Chen S en (2011-2012) est observée (figure 26).

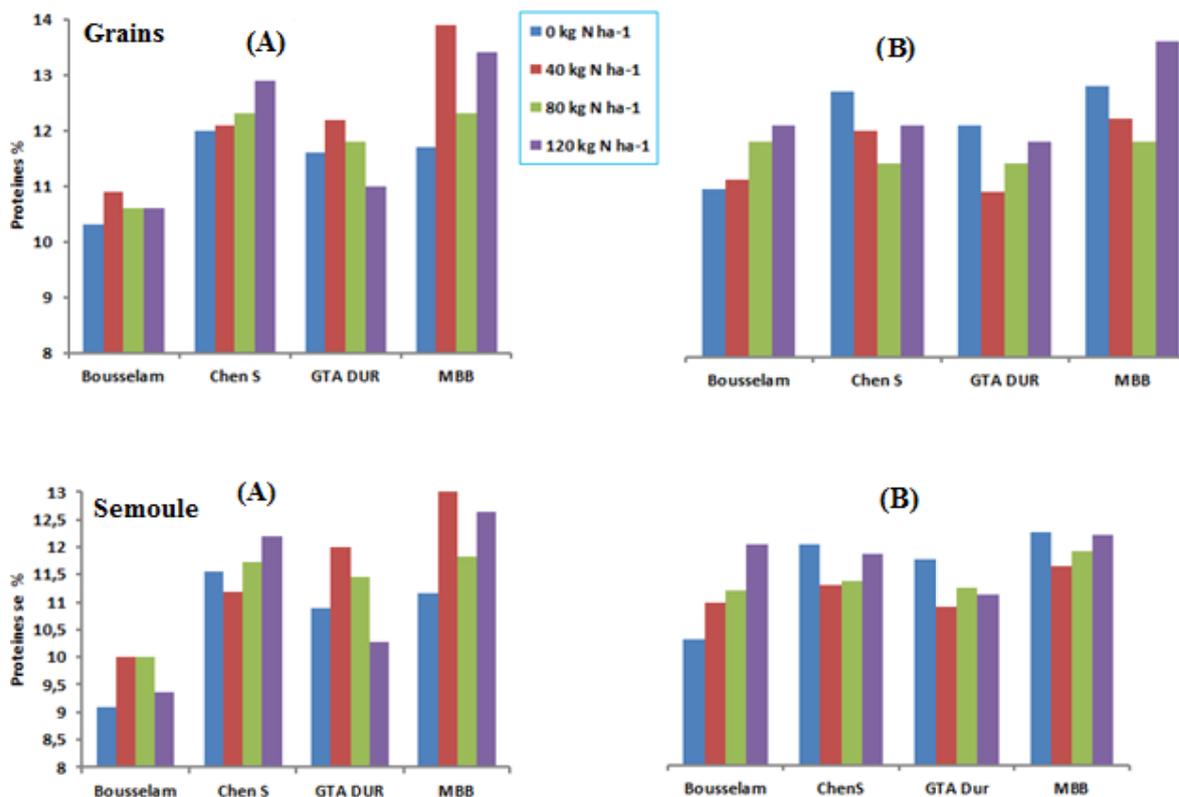


Figure 26. Teneurs en protéines (grains et semoules) dans les deux années (A) et (B) des différentes variétés avec l'accroissement des doses d'azote.

Des résultats similaires ont été rapportés par Agnieszka et al (2008) utilisant quatre niveaux de fertilisation azotée (0, 50, 100 et 150 kg.N.ha⁻¹) et quatre variétés. Ils montrent que la quantité de protéines accumulées en fonction de la fertilisation azotée dépend fortement de la variété et des conditions de développement du blé. Ces différences sont attribuées à la distribution des protéines dans l'endosperme de chaque cultivar. Les conditions de croissance pendant le développement des plants du blé, en particulier la disponibilité des éléments nutritifs après l'anthesis, déterminent en partie l'accumulation de protéines. De plus, les mauvaises herbes peuvent concurrencer la culture pour les éléments nutritifs du sol.

La teneur moyenne en protéines est de 11.4%MS en 2011-2012 et de 12% MS en 2012/2013. Des conditions de croissance défavorables telles que la compétition pour les nutriments et l'eau réduisent la production de blé mais peuvent améliorer l'accumulation de matière sèche et de protéines dans les grains (Flagella et al., 2010).

Gooding (2017) a signalé que les mauvaises herbes (graminées) étaient des hôtes importants des ravageurs des céréales et des maladies affectant la qualité du grain. De même, Awan (2002) a signalé que le poids du grain et la teneur en protéines sont affectés par une concurrence des mauvaises herbes au stade tardif de développement du blé.

I.2.2.3. Teneur en gluten et gluten index des semoules

La détermination de la quantité de gluten existant dans une farine ou semoule doit permettre de reconnaître si cette dernière est bonne ou mauvaise (Feillet, 2000). Le gluten joue un rôle crucial en panification surtout lors de la phase de pétrissage durant laquelle le réseau glutineux s'édifie. La réussite d'une panification dépend pour une grande part de la qualité des protéines de la farine. En effet, selon Roussel et Chiron (2005), la qualité du gluten agit sur la fixation de l'eau, la résistance de la pâte, la rétention gazeuse et la croûte de pain qui sont tous des paramètres déterminants en panification.

L'analyse statistique de la variance de l'interaction variété X azote reflète une différence très hautement significative ($P < 0.0001$) par rapport aux teneurs en gluten et gluten index. Ces résultats montrent l'influence de la variété et de l'azote sur ces paramètres en 2011/2012. Le gluten humide a augmenté significativement de 25.5% et 20.3 % avec l'apport de 120 kg.N.ha⁻¹ pour les variétés Bousselam et MBB (en 2011/2012) respectivement. Le gluten humide de la variété Chen S s'est considérablement amélioré en 2012/2013, soit 62.7% contre 50.5% obtenu sans fertilisation azotée (tableau 7). Les glutens humides les plus élevés ont été observés en 2012-2013 pour toutes les variétés. Ces résultats sont en accord avec ceux de Boggini et Pogna (1989) qui affirment que la teneur en gluten représente un facteur phénotypique influencé par l'environnement, la fertilisation et les façons culturales.

En ce qui concerne la force du gluten, Cubadda et al (1992) ont proposé un gluten index idéal compris entre 66% et 85%. La variété Bousselam présente la plus faible force de gluten (GI=58.3%) malgré l'augmentation des doses d'azote (figure 27).

Par contre, chez la variété GTA Dur, le GI est équilibré en 2012/2013 avec l'apport de 80 kg.N.ha⁻¹ et reste faible en 2011-2012 même avec l'apport d'azote. Cependant, les variétés MBB et Chen S montrent les meilleurs GI, 74.8% en 2011-2012 à 80 kg.N.ha⁻¹ et 76.2% à 40 kg.N.ha⁻¹ en (2012/2013), respectivement.

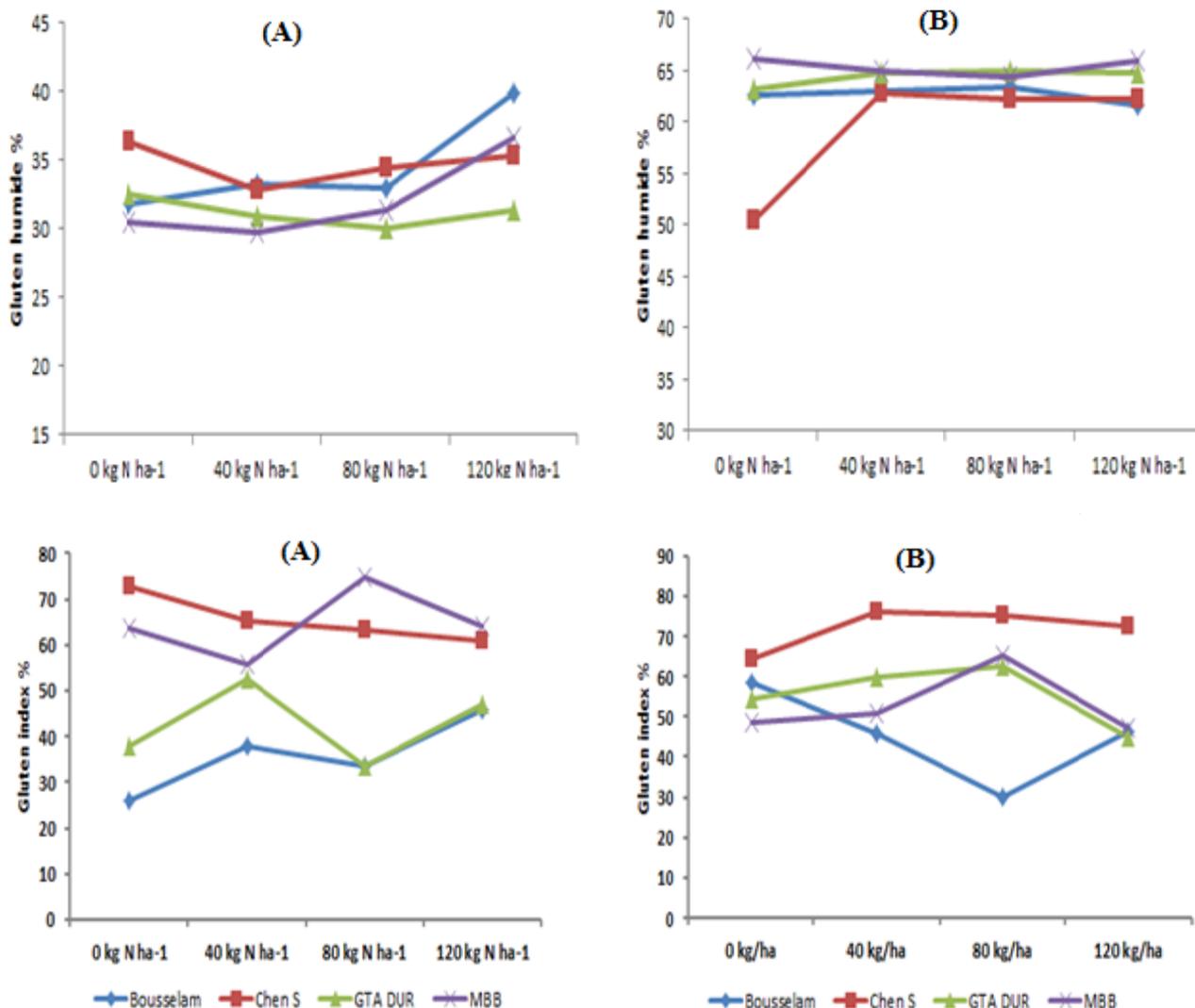


Figure 27. Teneur en gluten humide et en gluten index des différentes variétés en fonction des doses d’azote dans les deux années 2011/2012 (A) et 2012/2013 (B).

L’effet de la fertilisation azotée sur la quantité et la qualité du gluten dépend donc du génotype et des conditions de développement des cultures. Toutefois, Daloulet al (2014) ont révélé une significative augmentation de la teneur en gluten de huit variétés de blé dur avec la fertilisation azotée, cultivées dans deux différentes régions (semi-aride et sub-humide).

I.2.2.4. Test de sédimentation SDS

L’indice de sédimentation SDS est un test qui permet d’apprécier de façon rapide la force des blés. D’après Dexter et al (1997), le SDS et le gluten index sont deux méthodes largement admises pour la mesure de la force du gluten, permettant une bonne prédiction des propriétés rhéologiques de la pâte. D’après Jeant et al (2007), la hauteur du sédiment dépend de la

quantité d'eau absorbée et du gonflement des protéines; elle est fonction de la quantité et de la qualité du gluten. En effet, les gluténines de haut poids moléculaire sont les fractions impliquées dans le gonflement des protéines en présence du SDS et non pas les gliadines (Payne et al., 1984).

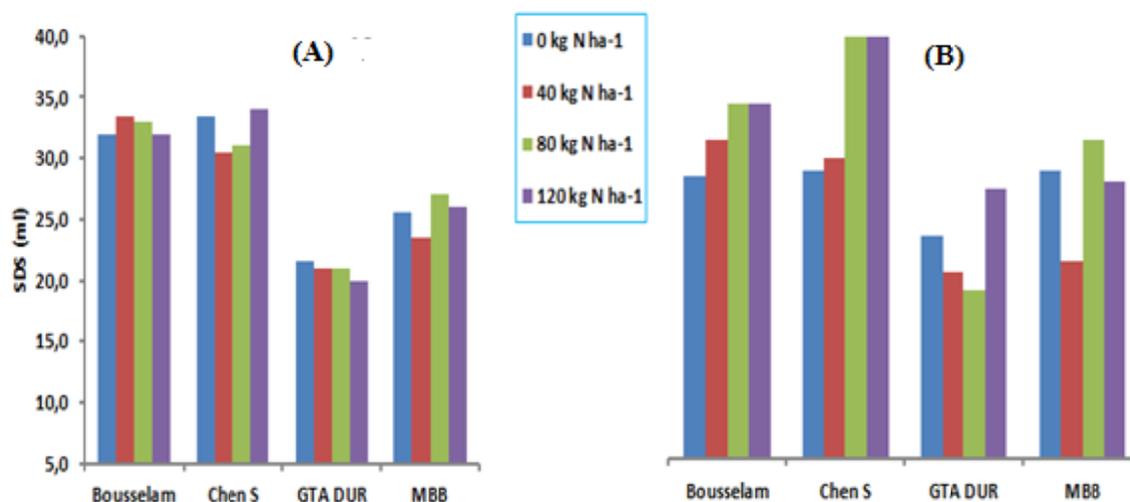


Figure 28. Variation du SDS (mL) des différentes variétés en fonction des doses d'azote dans les deux années 2011/2012 (A) et 2012/2013 (B).

L'analyse statistique de la variance pour l'interaction variété x azote a montré une différence hautement significative ($p < 0.01$) du SDS. Les meilleures valeurs du SDS sont obtenues en 2012/2013 chez toutes les variétés (figure 28).

La variété Chen S présente une augmentation du SDS de 29 mL sans fertilisant à 44 mL avec l'apport de 120 kg N ha⁻¹ en 2012-2013 (figure 28).

Royo et al (2009) ont classé les variétés du blé dur en fonction des valeurs du volume de sédimentation SDS. Une valeur de 30 mL indique un gluten faible et une valeur supérieure à 35 mL indique un gluten fort. Les faibles valeurs de SDS seraient dues à la faible quantité de la fraction gluténine. Selon Nakkoul et Rihawi (1988), les blés durs contrairement aux blés tendres ont des indices de sédimentation qui dépassent rarement les 35 mL.

I.2.2.5. Paramètres mixographiques

Les paramètres étudiés sont principalement le temps de développement ou temps de pétrissage (TDV) qui caractérise la force (exprimé en minutes) et la hauteur de la pente (HP) qui caractérise la force de la pâte (exprimé en millimètres). Uthayakumar et al (2004) ont

montré qu'une force élevée de la pâte est estimée par un long temps de pétrissage au mixographe.

Les paramètres mixographiques (TDV et HP) varient significativement entre les variétés ($P < 0,05$). Le temps de développement de la pâte de la variété GTA Dur est le plus court (2.4min et 2.2 min) par rapport aux autres variétés sous les différentes conditions culturales (figure 29). En 2012/2013, une nette augmentation de la hauteur du pic du mixographe de toutes les variétés est constatée (figure 29). Il semblerait que les conditions culturales défavorables de l'année (2012/2013) améliorent la tolérance au pétrissage de la pâte.

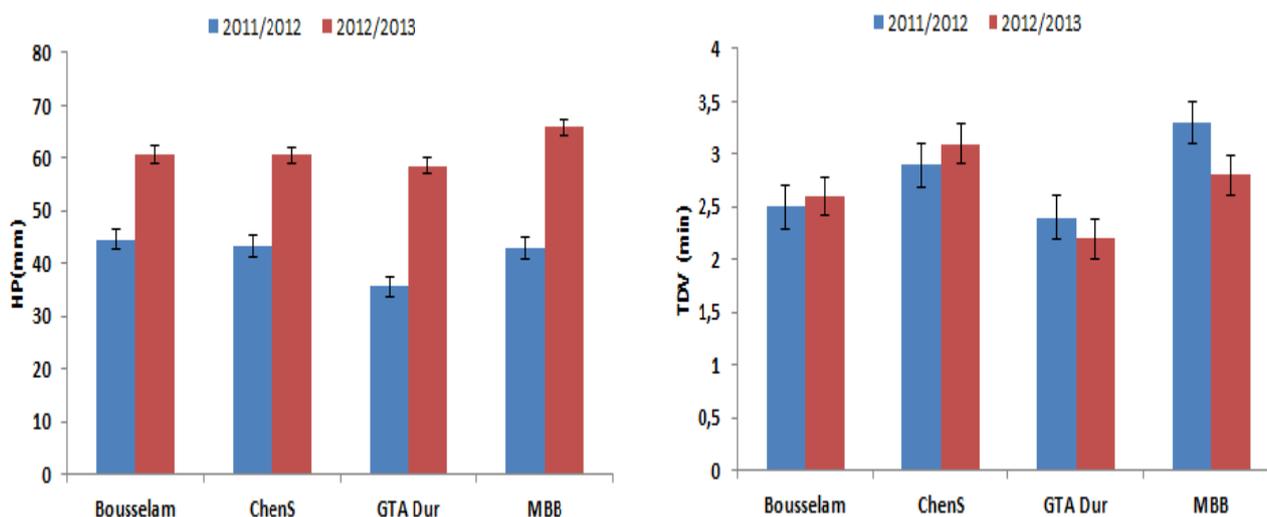


Figure 29. Variation des paramètres mixographiques des différentes variétés de blé.

L'effet de la fertilisation azotée sur ces deux paramètres de qualité (TDV et HP) est significativement différent selon les variétés (tableau 7 et 8). La fertilisation azotée augmente la tolérance au pétrissage (HP) de Bousselam (7%), Chen S (23%) et GTA Dur (10%) en (2012/2013) (figure 30).

La fertilisation azotée diminue le temps de développement de la pâte de toutes les variétés sous les conditions défavorables (figure 31). La variété Chen S enregistre le temps le plus long, 3.5 min avec le traitement non fertilisé, tandis que les temps les plus courts et qui varient entre 2 et 2.5min sont enregistrés chez la variété GTA Dur. Les propriétés mixographiques du blé dur ont donc été considérablement améliorées par la fertilisation azotée dans des conditions de développement défavorables. Comparativement aux résultats d'Isias-Rubio et al (2011), dans une étude réalisée sur le blé tendre, qu'ont révélé que le TDV est significativement influencé par la fertilisation azotée et le génotype mais pas par leur interaction.

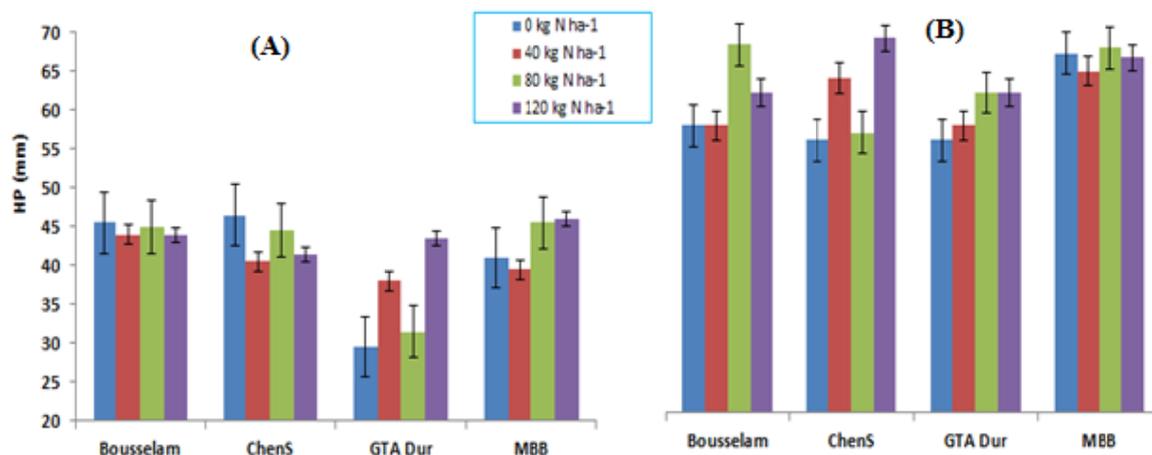


Figure 30. Variation de la hauteur du pic du mixographe des différentes variétés en fonction des doses d'azote dans les deux années 2011/2012 (A) et 2012/2013 (B).

Ces résultats suggèrent que l'on peut améliorer les caractéristiques rhéologiques de la pâte en choisissant une fertilisation azotée adéquate pour chaque variété. Shorgen (1986) a montré que la teneur en protéines influence le temps de développement au mixographe, plus la teneur en protéines est faible plus il est difficile de former une phase continue. Par ailleurs, Williams et al (1988) trouvent que l'aspect qualitatif des protéines est important dans la détermination du temps de développement, tandis que pour Dong et al (1992), les paramètres du mixographe sont influencés essentiellement par la composition en gluténines et non pas par la teneur en protéines totales.

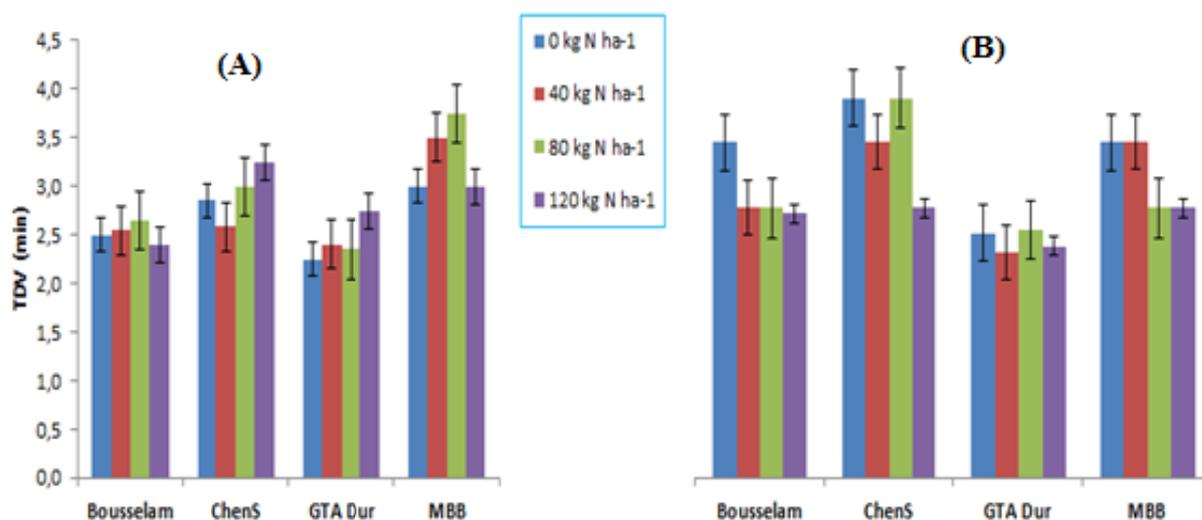


Figure 31. Variation du temps de développement de la pâte des différentes variétés en fonction des doses d'azote dans les deux années 2011/2012 (A) et 2012/2013 (B).

I.2.2.6. Paramètres alvéographiques

L'alvéographe CHOPIN permet d'évaluer les qualités plastiques d'une pâte non fermentée travaillée à hydratation constante en mesurant de manière continue les déformations d'une lamelle de pâte provoquées par la pression d'un courant d'air insufflé à la base de celle-ci jusqu'à sa rupture. Les paramètres mesurés par les courbes de pressions (alvéogrammes) sont : la ténacité (P), le gonflement (G), l'extensibilité (L), le rapport de configuration (P/L) et le travail de déformation (W) (Dubois, 1996). L'interprétation des alvéogrammes renseigne sur le comportement de la semoule en panification.

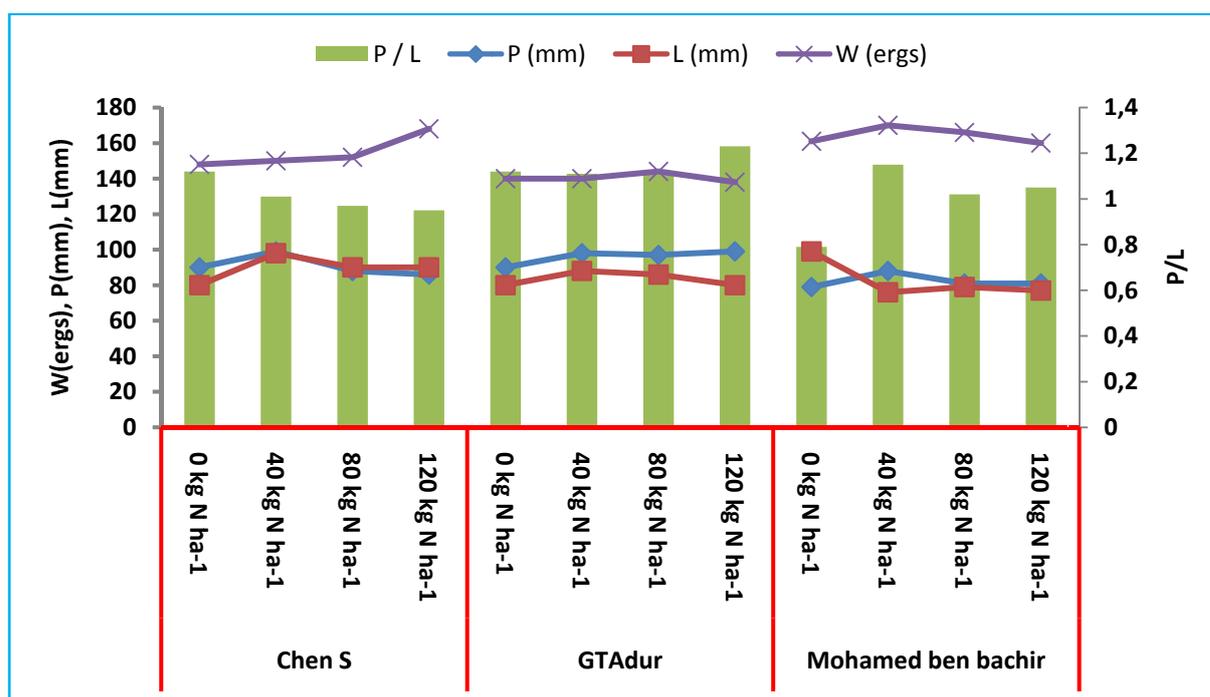


Figure 32. Evolution des paramètres alvéographiques.

✓ La ténacité (P).

Pour l'ensemble des semoules analysées, les valeurs de (P) varient entre 88mm et 99 mm, 90mm et 99 mm, 79mm et 88 mm respectivement pour Chen S, GTA Dur et Mohamed Ben bachir.

D'après Berland et Roussel (2005), les semoules à ténacité moyenne ont un P compris entre 40mm et 60mm, les semoules à bonne ténacité ont un P de 60mm à 80 mm et les semoules trop tenaces ont un P > 80mm. D'après cette classification, nos semoules sont trop tenaces réagissent différemment aux doses d'azote.

La variété Chen S, enregistre une augmentation de la valeur de P (99 mm) avec le traitement 40 kg.N.ha⁻¹, par rapport au témoin non fertilisé qui est de 90 mm (figure 32). Elle

diminue avec les traitements 80 kg.N.ha⁻¹ et 120 kg.N.ha⁻¹ (88mm et 86 mm respectivement). Le même effet est observé avec la variété Mohamed Ben Bachir où les valeurs enregistrées avec les traitements 80 kg.N.ha⁻¹ et 120 kg.N.ha⁻¹ sont égales mais légèrement supérieures à celles du témoin non fertilisé. La variété GTA dur réagit différemment, sa ténacité augmente avec l'accroissement des doses d'azote.

Selon Godon et Loisel (1997), l'augmentation de la ténacité est associée à celle de la teneur en protéines et en grande partie à la quantité des sous unités gluténines de haut poids moléculaire SG-HPM.

✓ Le rapport P/L

Le rapport de configuration P/L est associé à un équilibre entre les caractéristiques physiques des pâtes (Le Blanc, 2008). Il traduit l'équilibre général de l'alvéogramme (équilibre des propriétés de ténacité et d'extensibilité des pâtes formées) (Dubois, 1994).

La figure 32 montre que P/L varie en fonction des variétés d'une part et en fonction des doses d'azote apportées d'une autre part. Les variétés Chen S et GTA dur enregistrent un rapport P/L égal à 1.12 avec l'échantillon témoin non fertilisé. La variété Mohamed Ben Bachir enregistre un rapport P/L moins élevé (0.79) et réagit sensiblement à la fertilisation azotée (figure 32). La variété Chen S révèle une diminution des valeurs de P/L avec l'accroissement des doses d'azote, tandis que la variété GTA Dur enregistre une augmentation avec l'apport de 120 kg.N.ha⁻¹.

Selon Delfrate et Stephan (2005), il est possible de préjuger la ténacité et l'extensibilité d'une pâte en se référant au rapport P/L, plus le rapport de configuration est élevé (>1), plus la pâte sera tenace; par contre si ce rapport est faible (<0.3) les pâtes auront une grande extensibilité.

Dubois (1996) et Feillet (2000) préconisent un P/L compris entre 0.50 et 0.80. Cheftel (1977), prévoit pour les farines panifiables un rapport de configuration P/L compris entre 0.45 et 0.55. De ce fait, on peut conclure que nos semoules sont déséquilibrées.

✓ La force boulangère (W)

Le travail de déformation de la pâte, nécessaire à la création d'une bulle, peut être considéré comme le modèle de ce qui se passe en boulangerie lors de la formation des alvéoles sous l'action du gaz carbonique dégagé au cours de la fermentation panaire (Boudreau et Menard, 1992).

Les résultats obtenus montrent que la force boulangère (W) des variétés Mohammed Ben Bachir et Chen S augmente avec l'apport d'azote, de 5% et 13.5 % respectivement.

La variété GTAdur enregistre le W le plus élevé avec la dose de 80 kg.N.ha⁻¹. La variété Chen S montre des valeurs de W croissantes avec l'augmentation des doses d'azote. Cependant, ces valeurs ne correspondent pas aux bonnes forces boulangères.

La législation Algérienne classe les blés en fonction du W en :

- Blés de force : $W > 250$;
- Blés panifiable, si l'alvéogramme est équilibré : $180 < W < 250$;
- Blés panifiables courants : $130 < W < 180$;
- Blés impanifiables : $W < 130$.

En se basant sur cette classification, on peut avancer que nos échantillons fournissent des semoules panifiables courantes à force boulangère moyenne.



Blé Dur

Partie pratique Résultats et Discussion

Chapitre II.

Effet de la variété et de la fertilisation azotée sur la distribution des protéines de réserve des variétés de blé dur.

Introduction

La composition et la distribution des protéines ont été déterminées en mesurant les paramètres protéines polymériques non extractibles (UPP%), MP/PP et GS- HPM / GS-FPM. Les UPP et le rapport MP/PP ont été déterminés à travers les chromatogrammes (figure 18) et les GS-HPM/ GS-FPM à travers les profils électrophorétiques (figure 33).

Les relations entre ces paramètres et la qualité technologique ont été rapportées par plusieurs études (Dachkevitch et Autran., 1989; Cubbadaet al., 2009; Ammar et al., 2000., Edwards et al., 2007).

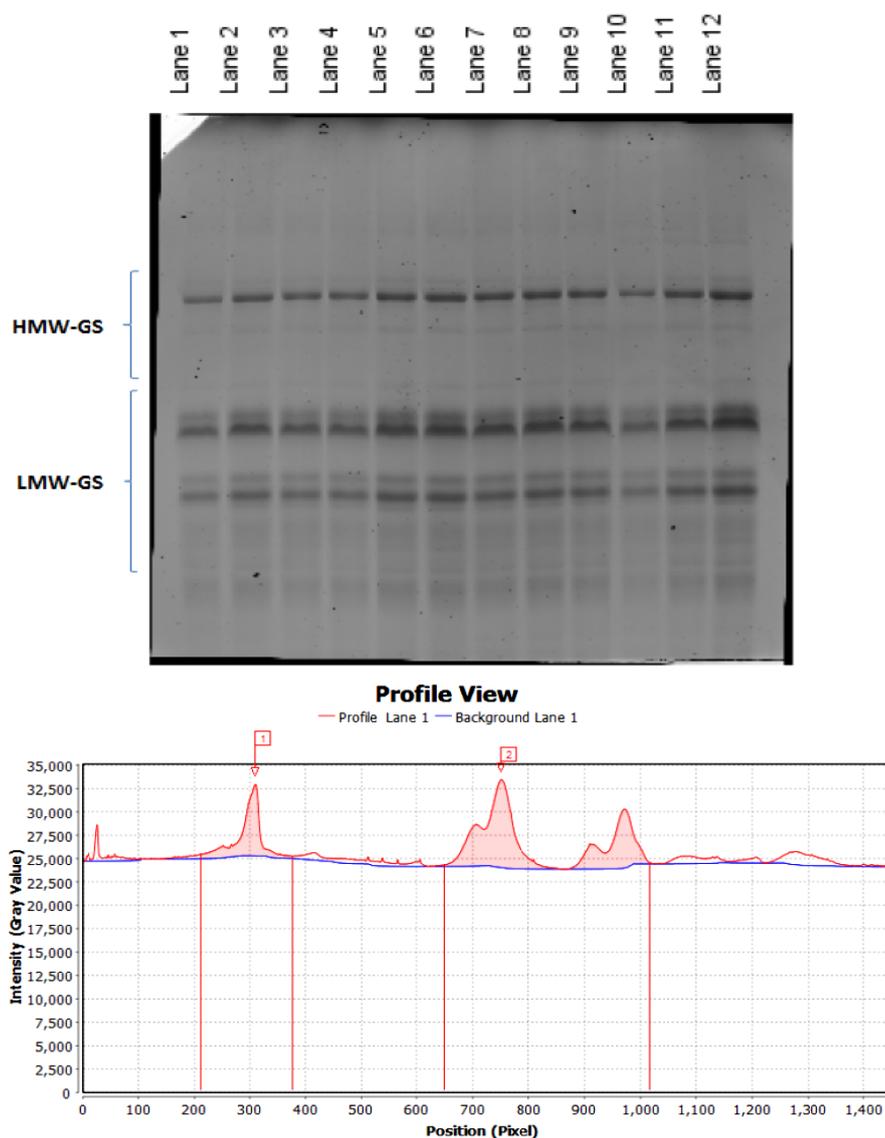


Figure 33. Analyse des gels électrophorétiques (par LabImage1D L340 PE-Kapelan Bio-Imaging software).

II.1. Effet de la variété sur la variation de UPP, MP/PP et GS-HPM/GS-FPM

Le test ANOVA montre que les paramètres UPP, MP/PP et GS-HPM-GS /GS-FPM varient significativement ($P < 0,05$) selon le génotype et cela au cours des deux années d'expérimentation (tableau 9).

Tableau 8. Résultats du test ANOVA sur la variation des UPP% et des rapports GS-HPM/GS-FPM et MP/PP des variétés de blé dur sous différentes doses d'azote au cours des deux années d'expérimentation.

Paramètres	2011/2012			2012/2013		
	Variété	N fertilisation	N fertilisation x variété	Variété	N fertilisation	N fertilisation x variété
GS-HPM/GS-FPM	***	**	*	***	ns	ns
MP/PP	***	ns	ns	***	***	***
UPP %	**	ns	*	***	*	ns

*valeur de $P < 0.05$; ** valeur de $P < 0.001$; *** valeur de $P < 0.0001$.
‡ ns : différence non significative ($P > 0.05$).

Les résultats confirment ceux de Zhu et Khan(2001)et Jiaet al (1996) qui montrent que le génotype détermine la composition et la distribution en protéines du blé dur, ce qui peut orienter l'utilisation finale des variétés dans l'industrie du blé dur.

Les protéines polymériques non extractibles au SDS jouent un rôle clé dans la qualité de la pâte et sont considérées comme une exigence importante dans l'industrie du blé dur.

La variété Bousselam a présenté l'UPP le plus faible (40,8% en 2011/2012 et 40.5% en 2012/2013) par rapport à GTA Dur qui est caractérisée par une forte polymérisation des protéines (51.7% en 2011/2012 et 49.4% en 2012/2013) et un ratio GS-HPM/GS-FPM élevé (0.7), ce qui pourrait contribuer à l'amélioration de la qualité de la pâte (figure.34). Jiaet al (1996) ont révélé que le rapport des polymères solubles sur les polymères insolubles affecte le rapport GS-HPM/GS-FPM et la qualité de la pâte.

Le rapport gliadine/gluténine est un facteur important dans la détermination de la qualité en panification (Gómez et al., 2011; Triboiet al., 2000). Barak et al (2014) ont trouvé un rapport optimal gliadine/glutenine pour la qualité du pain lié à sa capacité de retenir les gaz pendant la levée. Le développement du réseau de gluten a été contrôlé par ces protéines, de sorte que la viscoélasticité dépend du type de protéine (Shewry et Tatham, 1997).

Nos résultats ont montré que GTA Dur et MBB ont le ratio MP/PP le plus élevé, principalement dans des conditions défavorables de développement de la culture (2.9 et 2.7 respectivement) (figure 34).

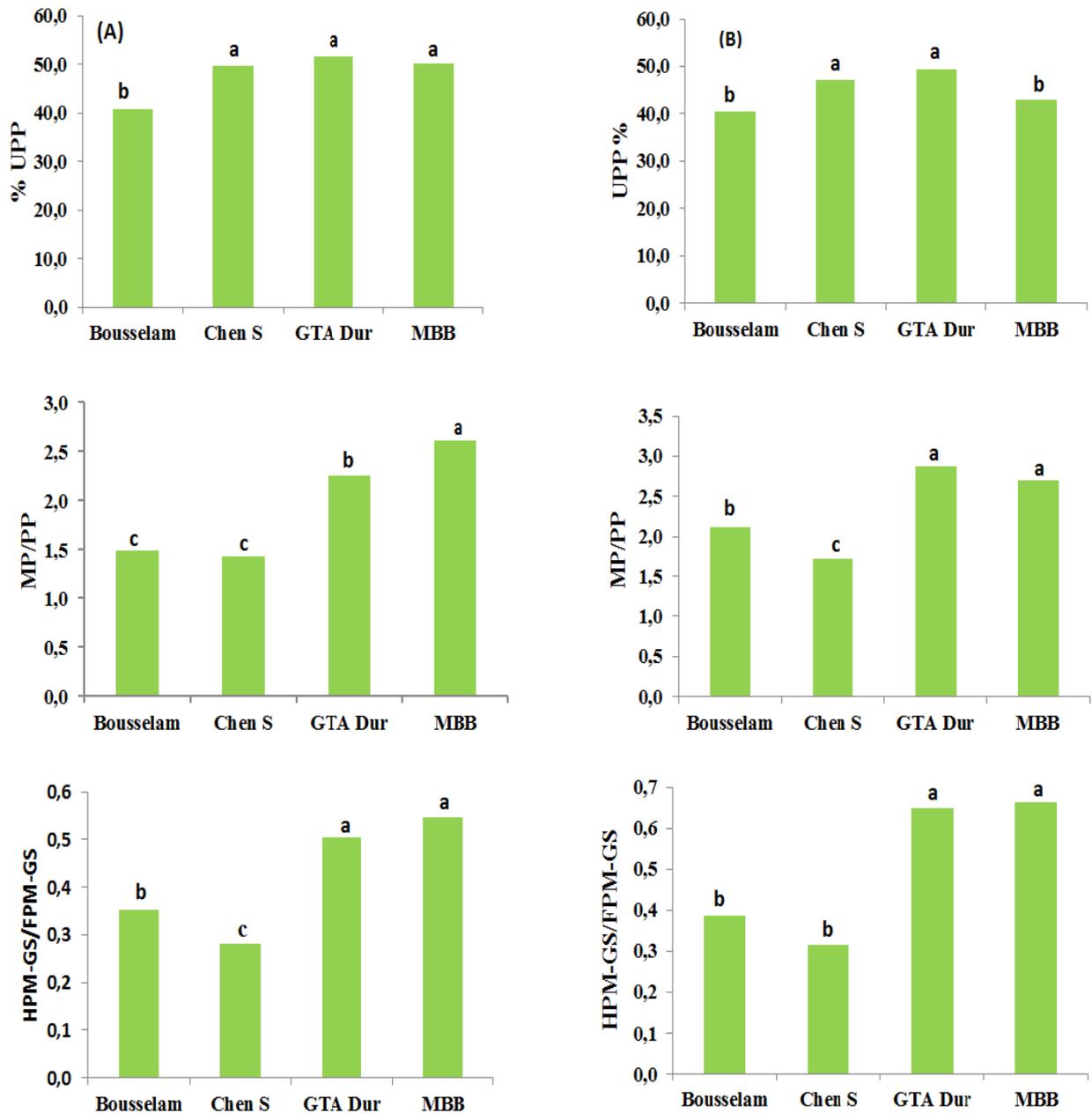


Figure 34. UPP % (protéines polymériques non extractibles) et les ratios : GS-FPM-/GS-FPM, MP/PP des différentes variétés en 2011/2012 (A) et en 2012/2013 (B).

Les différentes conditions de développement de la culture déterminent son environnement nutritif, ce qui implique une différenciation dans l'accumulation des fractions protéiques.

De ce fait, la composition en protéines dépend de l'environnement nutritif de chaque variété de blé dur. Flagella et al (2010) ont révélé qu'un stress hydrique dû aux températures élevées qui se produisent généralement dans les environnements méditerranéens pendant le remplissage du grain, peut provoquer un niveau d'agrégation plus élevé des sous-unités gluténines, qui se traduit par une amélioration de la qualité technologique. Blumenthal et al (1991) ont ajouté que le rapport MP/PP peut être augmenté par des chocs thermiques lors du remplissage du grain

II.2. Effet de l'interaction azote x variété sur la variation de UPP, MP/PP et GS-HPM /GS-FPM

La variation de la distribution des fractions protéiques varie significativement ($P < 0,05$) selon l'apport d'azote au sein de chaque variété (tableau 9). Ferrise et al (2015) ont montré que la composition en protéines était influencée par les conditions environnementales et nutritionnelles et ont déterminé des coefficients d'utilisation de l'azote pour les différentes fractions protéiques. Dans les conditions de développement favorables (2011/2012), une interaction significative ($P < 0,05$) de la fertilisation azotée et de la variété sur la polymérisation et le poids moléculaire des gluténines est observée (UPP et GS-HPM/GS-FPM).

Tableau 9. Paramètres de distribution des protéines de réserve: HPM-GS/FPM-GS, MP/PP et UPP%.

Variétés	Azote (kg N ha ⁻¹)	2011-2012			2012-2013		
		GS-HPM/ GS-FPM	UPP%	MP/PP	GS-HPM/ GS-FPM	UPP%	MP/PP
Bousselam	0	0.34	45.31	1.62	0.39	35.59	2.11
	40	0.33	39.72	1.40	0.36	35.78	2.04
	80	0.32	33.09	1.27	0.39	49.66	2.06
	120	0.41	45.14	1.70	0.40	40.91	2.24
Chen S	0	0.26	46.87	1.54	0.32	46.34	1.65
	40	0.30	50.63	1.36	0.31	48.39	1.69
	80	0.29	51.72	1.44	0.32	48.53	1.77
	120	0.27	49.73	1.38	0.32	45.33	1.79
GTA dur	0	0.34	50.02	2.11	0.66	46.19	3.02
	40	0.66	58.17	2.64	0.66	47.79	2.80
	80	0.40	48.93	2.09	0.64	56.89	2.51
	120	0.62	49.48	2.19	0.64	46.67	3.15
MBB	0	0.52	48.06	2.89	0.77	40.93	3.23
	40	0.64	47.52	2.34	0.46	44.79	1.64
	80	0.53	54.45	2.12	0.73	42.78	2.80
	120	0.48	50.51	3.08	0.70	43.35	3.14

L'apport de 120 kg.N.ha⁻¹ n'a pas eu d'effet sur la polymérisation des protéines de toutes les variétés (figure 35). Le niveau élevé de la fertilisation azotée n'a pas augmenté la

polymérisation des protéines. La variété Bousselam a montré une diminution de l'UPP de 45.3% (sans apport d'azote) à 33.1% avec 80 kg.N.ha⁻¹, alors que GTA Dur marque son plus haut UPP (58.2%) avec la dose de 40 kg.N.ha⁻¹ (figure 35).

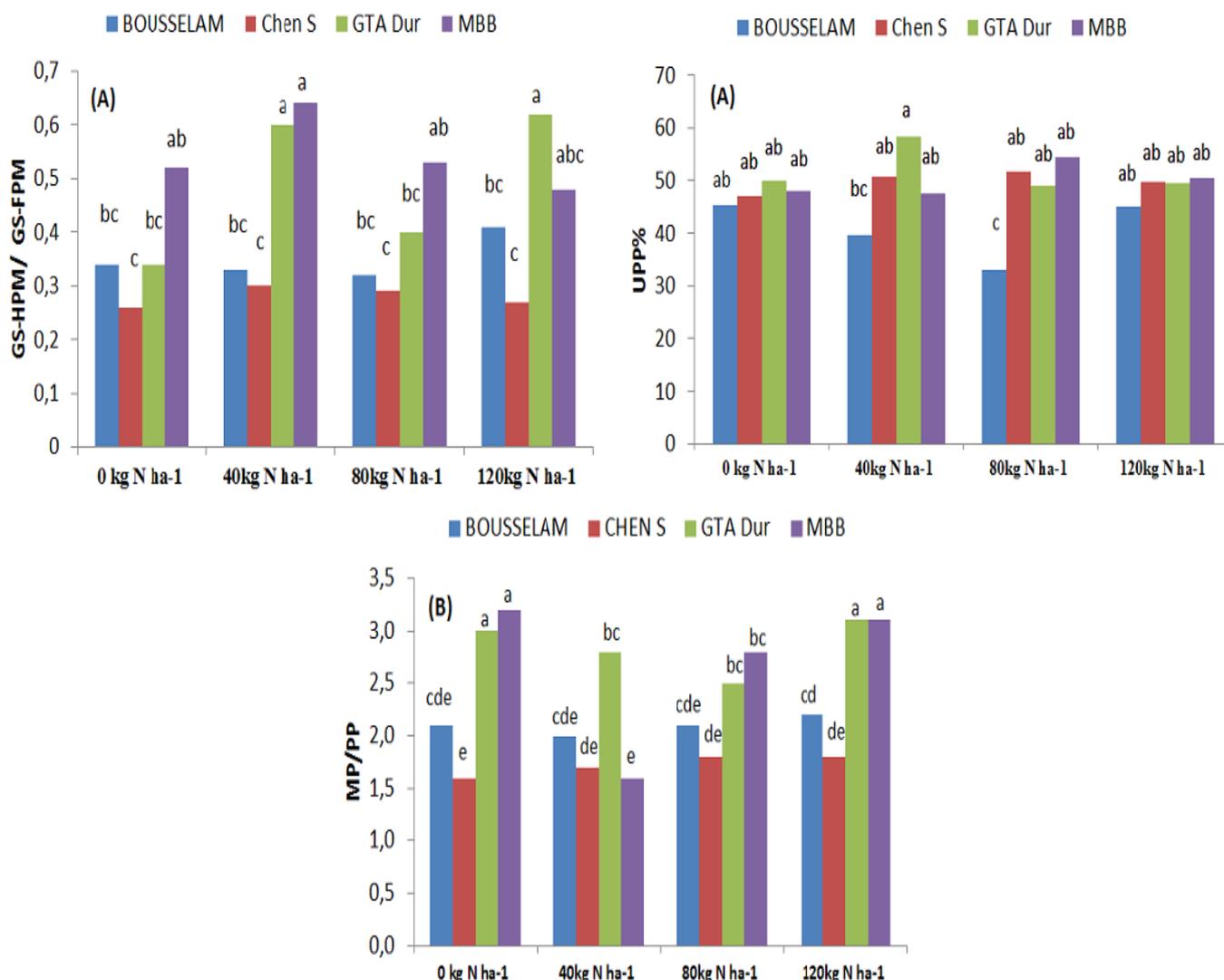


Figure 35. Effet de l'interaction variété x fertilisation azotée sur l'UPP % et GS-HPM/GS-FPM en 2011-2012 (A) et MP/PP en 2012-2013 (B).

Cette différence dans la polymérisation des protéines est probablement due aux conditions environnementales requises pour l'agrégation polymérique des gluténines de chaque variété au cours du remplissage du grain. Labuschagne et al (2009) ont signalé que les variétés de blé dur nécessitaient différentes températures d'accumulation de gluténines polymériques. En outre, Jia et al (1996) ont révélé que les conditions de remplissage des grains influent sur la polymérisation des protéines laquelle est plus élevée, sous des conditions de stress hydrique (Panazzo et al., 2001).

Le rapport GS-HPM/GS-FPM renseigne sur la distribution du poids moléculaire des polymères de gluténines. Il varie significativement avec la fertilisation azotée chez GTA Dur. Il augmente de 0.34 sans apport d'azote à 0.66 avec 40 kg.N.ha⁻¹ et à 0.62 avec 120 kg.N.ha⁻¹. Les sous-unités de gluténines de haut poids moléculaire de cette variété augmentent avec l'accroissement de la fertilisation azotée, alors qu'aucune variation n'a été observée pour Bousselam. Par conséquent, la réponse de HMW-GS/LMW-GS à la fertilisation azotée dépend de la variété. Cependant, Scheromet al (1992) ont rapporté que le GS-HPM/GS-FPM ne dépend pas de la fertilisation azotée, tandis que Jia et al (1996) ont montré qu'il était uniquement affecté par des facteurs environnementaux. La disponibilité du soufre peut également contribuer à la variation du rapport GS-HPM/GS-FPM, car les GS-HPM sont faibles en soufre, tandis que les GS-FPM sont riches en soufre (Zhao et al., 1999).

Le rapport MP/PP a également varié significativement ($P < 0.01$) selon la variété et l'apport d'azote dans les conditions de développement défavorables (2012/2013). L'accroissement de l'apport azoté a diminué le MP/PP des variétés MBB et GTA Dur avec les doses inférieures à 120 kg.N.ha⁻¹. Chez la première, il est passé de 3.2 sans fertilisation à 1.6 et à 2.8 respectivement avec 40 kg.N.ha⁻¹ et 80 kg.N.ha⁻¹; et chez la deuxième, de 3.0 à 2.8 avec 40 kg.N.ha⁻¹ et à 2.5 avec 80 kg.N.ha⁻¹ (figure 35). La fertilisation azotée a réduit significativement l'accumulation des protéines monomériques aux dépens des protéines polymériques.

Samson et al (2005), Islas-rubio et al (2011) et Jia et al (1996) ont conclu que le rapport gliadine/gluténine était lié à la disponibilité en azote et augmente avec la fertilisation azotée, en particulier au moment de l'anthèse et qu'un apport tardif de cet engrais aurait plus d'effet qu'un apport précoce sur l'accumulation de protéines et sur le rapport gliadine/gluténine. Par ailleurs, on sait que le soufre est un élément important dans la formation des sous-unités gluénines et des α - β et γ -gliadines de bas poids moléculaire (Zhao et al., 1999). Une meilleure efficacité de l'utilisation de l'azote par la culture est conditionnée par la présence du soufre dans le sol.

L'effet de la fertilisation azotée sur la variation du rapport MP/PP est différent chez le blé tendre, comme le rapportent Plessis et al (2013) qui ont conclu que le rapport gliadine/gluténine n'est pas affecté par les conditions de développement et la disponibilité de l'azote. Il a également été démontré qu'un taux élevé de fertilisation azotée (140 kg.N.ha⁻¹) réduisait la teneur en gliadine et augmentait la teneur en globuline et en albumine, mais n'affectait pas la composition du gluten (Brabant et Levy häner, 2016).



Blé Dur

Partie pratique Résultats et Discussion

Chapitre III.

Effet de la variété et de la fertilisation azotée sur l'appréciation de la qualité des produits de deuxième transformation des variétés du blé dur.

III.1. Appréciation de la qualité culinaire des pâtes alimentaires

L'appréciation de la qualité culinaire des pâtes alimentaires permet d'évaluer le comportement des pâtes alimentaires au cours de la cuisson qui peut être très différente d'un produit à un autre. Elle est réalisée au moyen d'un test de cuisson où on mesure la durée des temps de cuisson des pâtes alimentaires (temps minimal (T), temps optimal (T+1), sur-cuisson (T+11), les pertes à la cuisson, la capacité de fixation d'eau et l'état de surface.

L'analyse de la variance de l'interaction variété x azote montre un effet très hautement significatif des pertes à la cuisson ($P < 0.001$), de la capacité de fixation d'eau (0.05) et de la fermeté des pâtes (0.05).

L'apport de 120 kg.N.ha⁻¹ diminue significativement les pertes à la cuisson des variétés Bousselam et MBB respectivement de 19.6 % et 22%. Cependant, la capacité de fixation d'eau des pâtes alimentaires diminue chez Bousselam et augmente chez MBB avec la fertilisation azotée (figure 36).

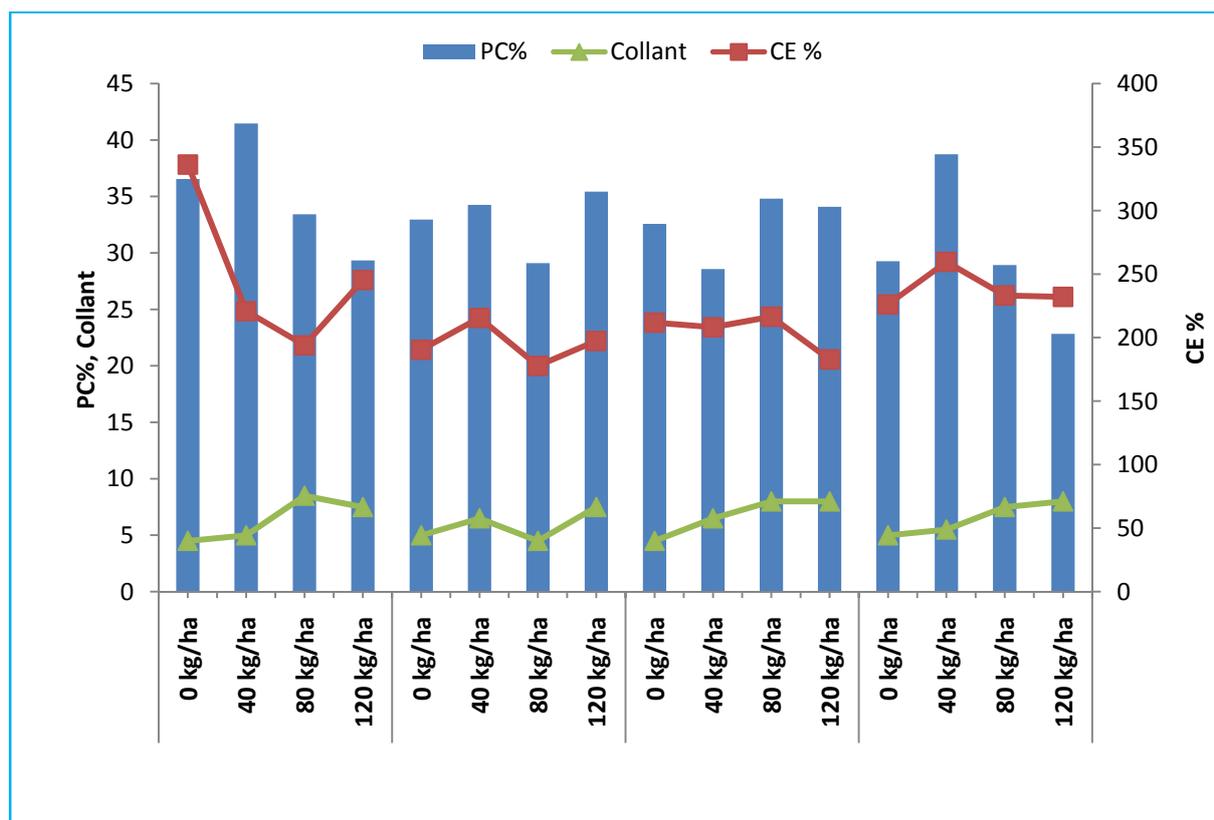


Figure 36. Variation des pertes à la cuisson, capacité de fixation d'eau de la fermeté des pâtes alimentaires des variétés avec l'apport de fertilisation azotée.

Dans une étude similaire, Abdellaoui (2007) a montré que l'accroissement de la dose de fertilisation azotée diminue la capacité de fixation d'eau des pâtes au cours de la cuisson de la variété Waha. Adams (1987) indique que la diminution de la capacité de fixation de l'eau peut s'expliquer par le renforcement de la trame protéique qui contrôle la vitesse de gélatinisation et le degré de gonflement des granules d'amidon qui dépend du milieu de culture.

La collantdes pâtes alimentaires est plus élevé avec l'apport de 120 kg.N.ha⁻¹ chez les variétés GTA Dur, Chen S et MBB, et 80 kg.N.ha⁻¹ chez la variété Bousselam (figure 36). Par contre, la délitescence des pâtes alimentairesaugmente en fonction des doses d'azote pour toutes les variétés (figure 37).

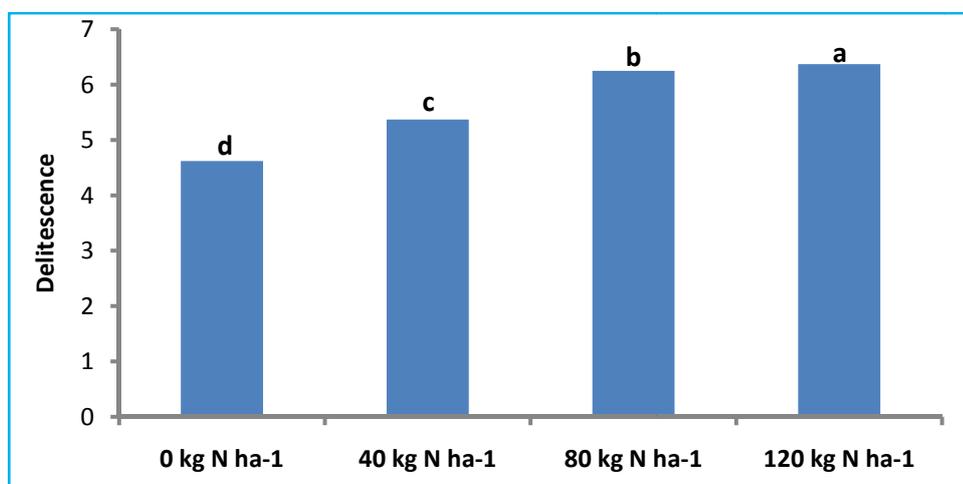


Figure 37. Variation de la délitescence des pâtes alimentaires en fonction de la fertilisation azotée

Le temps de cuisson rend essentiellement compte de l'aspect rhéologique de la qualité culinaire et ne détermine pas l'état de surface des pâtes cuites (Abecassis et al.,1997).

Une pâte alimentaire est considérée de bonne qualité si elle possède l'aptitude à conserver une bonne cohésion et une fermeté satisfaisante même après une cuisson prolongée (Houliopoulosetal.,1981).

La variété MBB a eu le temps de cuisson les plus élevés. La vitesse de gélatinisation de l'amidon et de désintégration des pâtes alimentaires est plus longue chez cette variété (figure 37). Cette différence de comportement est liée à la structure du complexe amidon gluten et de son adhésion qui joue un rôle important dans la qualité culinaire des pâtes alimentaires. Cette propriété est une caractéristique variétale qui peut s'exprimer différemment selon les conditions de culture (Autran., 1996). L'apport de fertilisation azotée a relativement diminué les temps de cuisson des variétés Bousselam, Chen S et GTA Dur. Chez cette dernière, la diminution était négativement proportionnelle à la dose croissante d'azote (figure 38).

Klinget al (2000), à travers une étude sur des variétés de blé dur allemands, ont montré que la variation de la qualité culinaire des pâtes due au facteur génétique est faible (5%) par contre, une forte interaction de la variété du site et de l'année de culture sur ce paramètre est notée (28% dus au site et 28% dus à l'interaction : site x année x variété). Il conclue que la qualité culinaire est optimisée par sélection de variétés dans leurs milieux d'adaptation. Nos résultats montrent aussi qu'elle est optimisée avec une fertilisation azotée adéquate pour chaque variété.

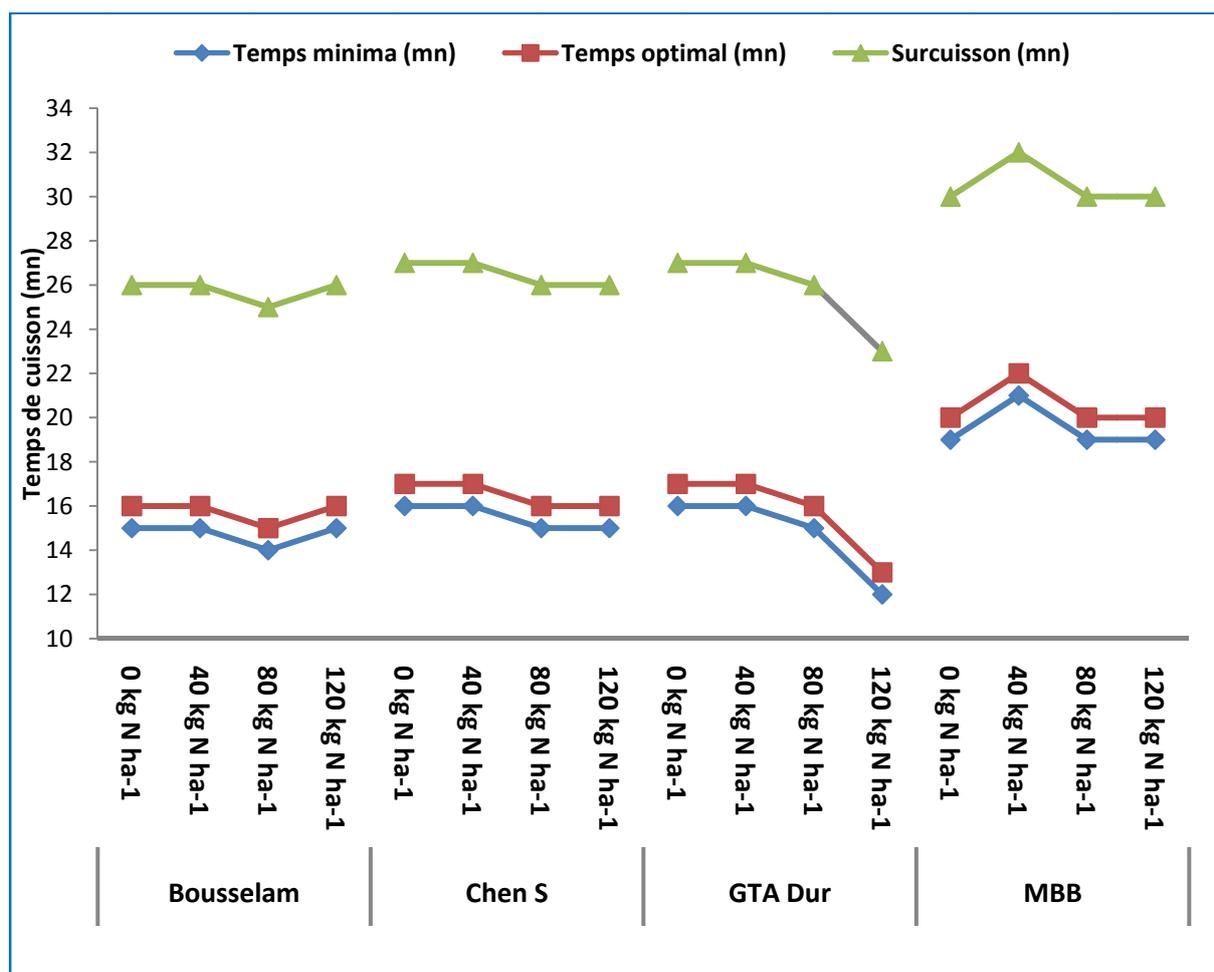


Figure 38. Les temps de cuisson des pâtes alimentaires des différentes variétés

III.2. Appréciation de la qualité du couscous

III.2.1. Détermination du degré de délitescence

Le degré de délitescence du couscous est le degré de désagrégation des grains de couscous cuits (Feillet,2000). La délitescence constitue un paramètre de la qualité culinaire du couscous et représente avec le collant un critère fondamental de la qualité organoleptique du couscous cuit (Yettouetal.,1998).

L'analyse de la variance met en évidence un effet très hautement significatif de l'interaction variété x azote sur la délitescence.

Tous les couscous étudiés ont des niveaux faibles de degré de délitescence. Ceci est en rapport avec le procédé de fabrication de couscous artisanal. En effet, le couscous artisanal présente une bonne tenue à la cuisson, non collant et peu délitescents avec un degré d'individualisation des grains satisfaisant. La force de cohésion entre les particules de semoules diminue le degré de délitescence du couscous. Néanmoins, la fertilisation azotée a augmenté légèrement la délitescence des couscous de toutes les variétés (figure 39). Ceci serait dû à la différence dans la composition biochimique des semoules avec l'apport de l'azote. En effet, Cuq et Abecassis (2006) affirment que la qualité du couscous est liée à la composition biochimique de la matière première, à la taille des particules de semoule et à son processus de fabrication.

En outre, Guezlane (1993) suggère que l'augmentation du temps de roulage renforce la liaison des particules de semoules hydratées qui forment le granule de couscous. De même, l'utilisation d'un taux d'hydratation élevé des semoules contribue à diminuer le degré de désagrégation. Cet auteur, suggère que si les agglomérats ne sont pas suffisamment cohérents, ils vont avoir tendance à se déliter lorsqu'ils seront mis en contact avec l'eau; au contraire la formation d'agglomérats trop denses va donner des produits s'hydratant plus lentement surtout dans l'eau froide.

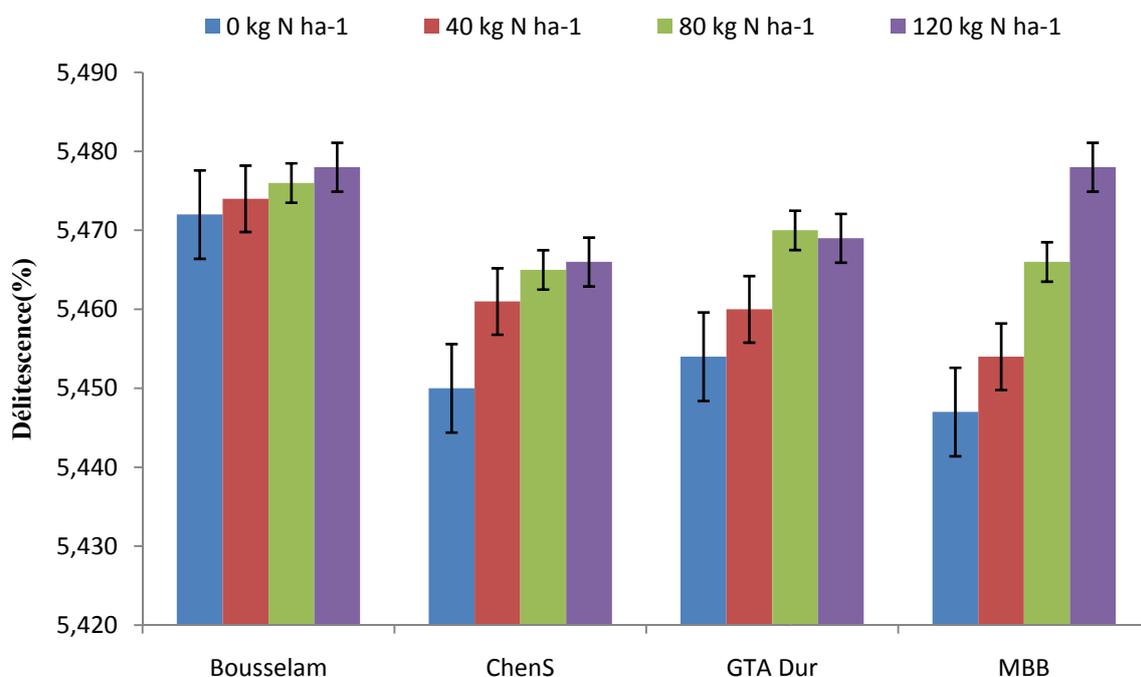


Figure 39. Variation du degré de délitescence de couscous des différentes variétés.

III.2.2. Indice du gonflement

L'indice du gonflement du couscous est un paramètre très important pour le contrôle de la qualité du couscous. La capacité du gonflement du couscous est liée en grande partie à la richesse de la matière première en protéines ainsi qu'à leur qualité. El Yemlahi et al (2014) ont rapporté qu'il existe une corrélation entre la qualité du couscous, la teneur en protéine, l'absorption d'eau et la qualité culinaire du couscous.

Le gonflement des couscous évolue rapidement et d'une manière identique pendant les cinq premières minutes pour les différents traitements étudiés. Après la dixième minute, le gonflement augmente lentement et la différence de l'allure des différents couscous commence à s'apercevoir (figure 40). La capacité d'absorption d'eau du couscous diffère d'une variété à une autre et augmente avec l'accroissement des doses d'azote.

Les indices de gonflement du couscous sont plus élevés avec l'apport de 120 kg.N.ha⁻¹ chez toutes les variétés avec une nette différence marquée chez Chen S et GTA Dur (figure 40).

Cette différence de comportement peut être due à la composition en protéines de ces variétés. D'après Mezroua (2011), le phénomène de gonflement résulte de l'absorption de quantités d'eau par les éléments constitutifs des grains de couscous. Cet auteur a également montré que le couscous fait à base du blé semble absorber le plus d'eau et gonfler à un niveau supérieur à ceux observés pour les couscous sans gluten (trois formulations du couscous : Riz-pois chiche, riz-pois protéagineux et riz-féverole). La présence de protéines (gluten) peut être un bon indicateur et un bon élément de distinction du comportement des couscous issus du blé cultivé sous différents apports azotés.

Le gonflement du couscous après une heure de temps est compris entre 258.33 mL et 340.67 mL chez Bousselam, 233.33 mL et 333.33 mL chez Chen S, 251.66 mL et 320 mL chez GTA Dur et 281,66 mL et 338.33 mL chez Med Ben Bachir.

Selon Guezlane (1993), un bon couscous doit absorber environ deux fois son poids d'eau pendant la cuisson et conserve une certaine fermeté et viscoélasticité et ses grains doivent rester bien individualiser sans se déliter, ni se coller entre eux. Il a montré également que l'augmentation de la durée de malaxage et du taux d'hydratation entraîne une élévation du gonflement.

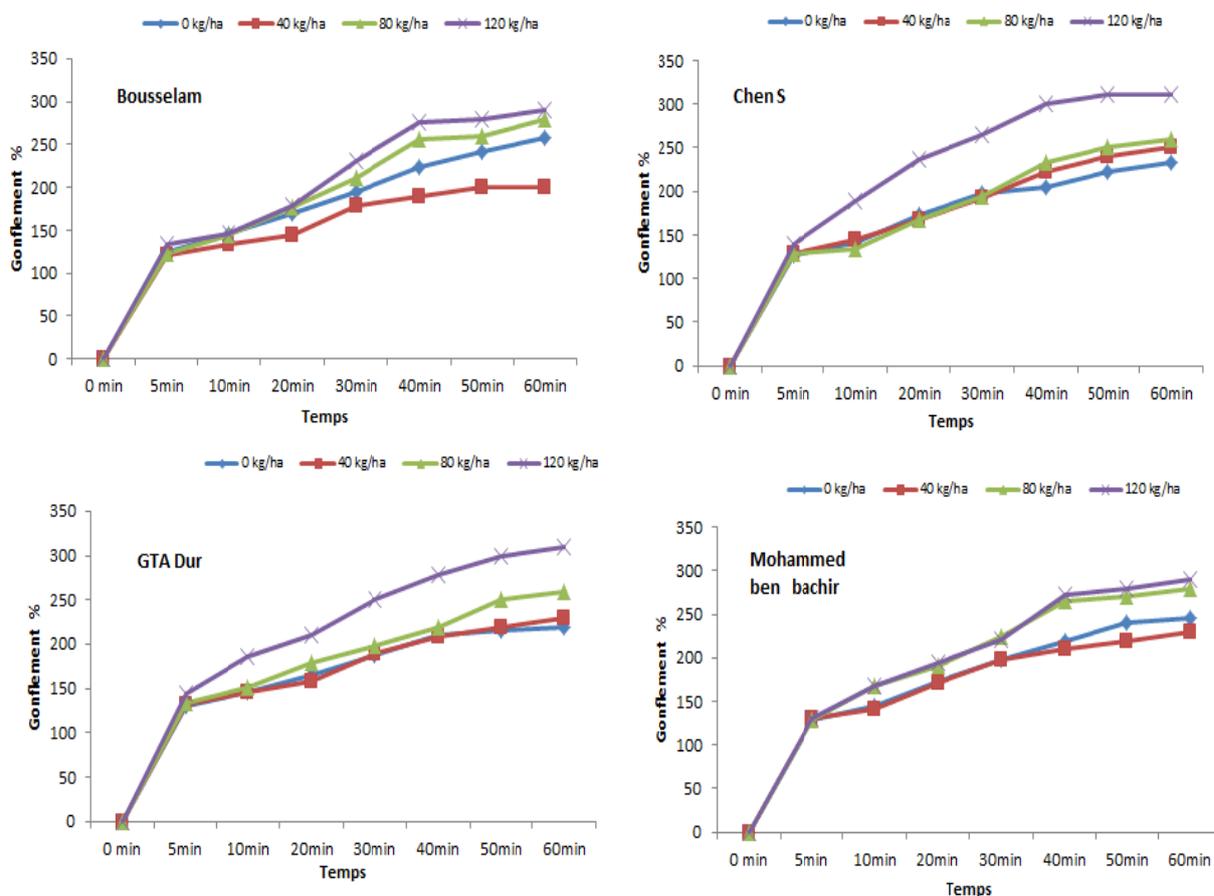


Figure 40. Variation de l'indice de gonflement du couscous des différentes variétés.

III.2. Essai de panification

Un essai de panification réalisé avec soin est le moyen le plus fiable pour apprécier la valeur boulangère des farines (Buchuk, 1985).

Selon Calvel (1973), un bon gluten doit donner une pâte sèche qui ne colle pas, il doit aussi, après pétrissage, donner une pâte souple, élastique et suffisamment imperméable afin d'assurer une bonne rétention de gaz dégagés lors de la fermentation. Aussi, Dubois (1996) affirme que le caractère collant des pâtes est lié principalement au taux d'hydratation et à la quantité et la qualité des protéines.

III.2.1. Appréciation des pâtes

D'après les grilles des notations utilisées pour l'appréciation de la qualité des semoules en panification des variétés étudiées, les notes attribuées aux aspects extérieurs et intérieurs des pains sont représentés dans le tableau 11 et l'aspect final des pains est illustré dans l'annexe 5.

Les meilleures notes des pâtes à pain sont attribuées à celle de la variété Chen S avec l'apport de 80 kg.N.ha⁻¹ et à celle de la variété GTA Dur avec l'apport de 40 kg.N.ha⁻¹ et 120 kg.N.ha⁻¹ de fertilisant azoté. Elles sont plus extensibles, élastiques, non collantes, ne relâchent pas et tiennent bien durant les opérations de pétrissage, de fermentation et de façonnage.

Tableau 10. Résultats de l'essai de panification.

Variété	Dose kg/ha	Note de la pâte / 100	Note du pain / 100	Note de la mie / 100	Volume du pain / 30	Valeur boulangère / 300	Enquête ITCF >236 Très bon > 197 bon > 158 Assez bon >132 Passable > 106 Mauvais
Boussalem	0	83.00	57.23	88	15.98	228.23	
	40	64.00	24.33	61	17.33	149.33	
	80	40.00	35.28	67	16.26	142.25	
	120	†					
Chen S	0	95.50	61.21	94	17.71	250.71	
	40	36.75	49.30	67	17.05	153.05	
	80	97.00	84.05	88	17.05	265.10	
	120	50.00	49.78	64	19.28	163.78	
GTAdur	0	75.75	78.10	70	17.10	223.85	
	40	97.87	84	100	18.85	262.47	
	80	67.39	72.93	88	16.80	228.32	
	120	88.00	73.51	97	17.01	258.51	
Mohamed ben bachir	0	77.25	38.81	43	17.31	159.06	
	40	42.75	58.16	91	16.16	191.91	
	80	64.24	68.48	67	18.48	219.72	
	120	89.50	44.17	88	16.67	221.67	

† Test non réalisé : manque de semoule

Les pâtes insuffisamment extensibles et très peu élastiques, de mauvaises tenue et un peu collantes, sont obtenues avec les variétés Boussalem avec 40 kg.N.ha⁻¹ et 80 kg.N.ha⁻¹, Chen S avec 40 kg.N.ha⁻¹ et 120 kg.N.ha⁻¹ et MBB avec 40 kg.N.ha⁻¹ et 80 kg.N.ha⁻¹.

Ces résultats laissent penser que l'expression de la qualité rhéologique des pâtes dépend des variétés, du type et de la quantité de protéines accumulés sous différentes doses d'azote. Dexter et Matsuo (1980) ont rapporté que la qualité des protéines en particulier la composition en gliadines et gluténines serait responsable des propriétés rhéologiques des pâtes.

Boudreau et Menard (1992) révèlent qu'un enrichissement en protéines périphériques est néfaste pour la qualité de la pâte boulangère (les propriétés fonctionnelles du gluten sont réduites).

III.2.2. Appréciation des pains

Selon Balla et al (1999), le volume du pain est fortement influencé par la quantité de gaz retenue par la pâte qui est lui-même associé au mode de pétrissage. Plus la capacité de

rétenion dans la pâte est élevée, plus important est le volume des pains. Delcoudret al (1991) ajoutent que chaque alvéole d'air est caractérisée par une taille critique au-delà de laquelle la rétenion du CO₂ est aléatoire.

L'aspect extérieur, la couleur de la croûte et de la mie sont fortement liés à la quantité et la qualité des protéines (Boyacioglu et D'Appolonia, 1994). Les mêmes auteurs montrent que la coloration de la croûte est influencée par l'élévation du taux d'amidon endommagé et du taux de sucres totaux présents dans la semoule ou farine,

Les meilleures valeurs boulangères sont données par Chen S avec 80 kg.N.ha⁻¹ et GTA Dur avec 40 kg.N.ha⁻¹, ils ont eu également la meilleure note (84) donnée aux pains dans la grille d'appréciation de la qualité et sont classés comme de très bon pain.

L'effet de la fertilisation azotée est marquant sur la variété MBB où la valeur boulangère augmente de 159 à 221.67 avec l'accroissement des doses d'azote (figure 41).

Bushuk (1985) a révélé que le volume du pain varie avec la composition protéique quantitative et qualitative de la farine. Singh et al (1990) ajoutent que le volume du pain est proportionnel à la quantité et la qualité des gluténines, en particulier les gluténines de haut poids moléculaire dans lesquelles les réactions d'oxydation et les ponts disulfures exercent une action importante sur les propriétés viscoélastiques qui déterminent un meilleur gonflement des pâtes et des pains expansés.

La structure de la mie est bien alvéolée, irrégulière et élastique et assez souple chez la variété GTA Dur avec l'apport de 40 kg.N.ha⁻¹. Contrairement pour MBB, elle a présenté une mie qui manque de souplesse et moins élastique, en l'absence d'un apport d'azote (note:43). La présence de grosses alvéoles dans la mie montre que la structure du gluten supporte la pression du gaz produit par la fermentation.

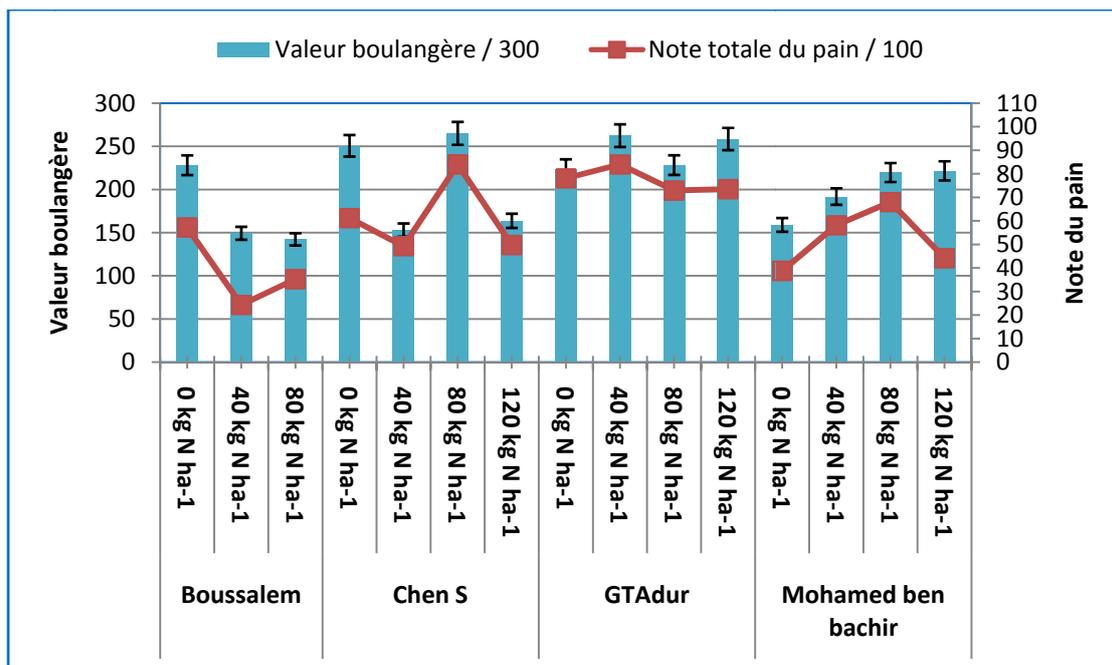


Figure 41. Valeurs boulangères et note des pains des différentes variétés.



**Blé
Dur**

Partie pratique
Résultats et Discussion

**Chapitre IV.
Etude des
relations entre
les paramètres
mesurés**

*



IV.1. Corrélations entre les paramètres de qualité et le rendement

La matrice de corrélation (tableau 12) a révélé des relations significatives positives ou négatives entre les différents paramètres de qualité et le rendement. La fraction protéique UPP% est améliorée significativement ($r=0.34$, $P<0.05$) lorsque le rendement en grain augmente. Cependant, ce dernier est négativement corrélé à la vitrosité ($r=-0.55$, $P<0.01$), au GH ($r=-0.75$, $P <0,01$), à la teneur en protéine totale ($r=-0,39$, $p<0,05$) et à la tolérance au pétrissage HP ($r=-0.75$, $P<0.01$) et MP/PP ($r=-0.25$, $P <0.05$). Ces paramètres de qualité sont plus élevés lorsque le rendement en grain diminue. Miyan et al (2011) ont signalé que le rendement en grain était souvent négativement corrélé à la teneur en protéine. Ceci est lié probablement au faible poids spécifique du grain. En effet, une corrélation positive ($r=0.70$, $P<0.01$) entre le PMG et le rendement en grain est démontrée (Miyane et al., 2011). L'augmentation du poids des grains diminue la vitrosité ($r=0.84$, $P<0.01$), la teneur en protéine ($r=-0.44$, $P<0.05$) et la teneur en gluten ($r=0.89$, $P<0.01$). Les résultats indiquent aussi que la grosseur des grains qui dépend des conditions agronomiques accompagnant la phase de remplissage du grain influence sur le rapport MP/PP ($r=-0.41$, $P< 0.05$). Les grains très vitreux ne sont donc pas nécessairement des gros grains très bien développés qui peuvent contenir une proportion relativement importante d'amidon susceptibles de diluer les composés protéiques dans l'endosperme et de créer ainsi plusieurs espaces vides. D'après Matveef (1963), le rapport protéine sur amidon serait critique afin de saturer l'espace inter-granulaire, en l'absence de quoi, il y'aura formation de vacuoles d'air au sein de l'albumen qui donnera un aspect blanc caractéristique. Les teneurs élevées en protéines diminuent significativement le PMG. Plusieurs auteurs (Dexter et al., 1987 ; Cubbada, 1988) ont rapporté l'existence d'une telle relation. De faibles PMG sont donc à des taux de protéines élevés recherchés lors de la transformation des semoules en pâtes alimentaires.

Entre les paramètres de qualité mesurés, il existe une relation positive entre la vitrosité du grain avec le PG ($r=0.56$, $P<0.05$), le GH ($r=0.71$, $P < 0.01$), le GI ($r=0.39$, $P <0.05$), la HP ($r=0,62$, $P<0,01$) et le MP/PP ($r=0,43$, $P<0,05$). Une accumulation plus élevée de protéines augmente la vitrosité des grains et améliore les propriétés rhéologiques en augmentant la tolérance au pétrissage de la pâte et favorise aussi l'accumulation des protéines monomériques par rapport aux polymériques. Cependant, Samson et al (2005) ont rapporté que le rapport gliadine/glutenine n'était pas corrélé à la vitrosité, bien qu'ils aient trouvé une proportion élevée de gliadines dans les échantillons de blé vitreux par rapport aux échantillons de farine. La distribution des fractions protéiques à savoir les ratios HPM-GS/FPM-GS et

MP/PP sont liés positivement et significativement à la teneur en protéines totales ($r=0.27$ et $r=0.31$, respectivement). Cela concorde bien avec des travaux précédents qui ont montré qu'une augmentation de la teneur en protéines induit une élévation des ratios HPM-GS/FPM-GS (Flagella et al., 2010) et gliadine/glutenine (Triboiet al., 2000).

Les résultats montrent également que la distribution des protéines influe sur les paramètres mixographiques. En effet, une corrélation négative entre MP/PP et le TD ($r = -0.25$, $P < 0,05$), positive entre HPM-GS/FPM-GS et le MPH ($r=0,26$, $P < 0,05$) sont observés. Bangur et al (1997) ont montré que le temps de développement de la pâte dépend de la proportion des protéines polymériques. Les protéines de hauts poids moléculaires augmentent la tolérance au pétrissage de la pâte. Gupta et al (1993) ont confirmé cette corrélation entre la résistance maximale de la pâte et la teneur en protéines polymériques.

Le GI est positivement corrélé à l'UPP ($r=0.27$, $P < 0.05$), ce qui rejoint les travaux de Sissons et al (2005) qui ont montré que la polymérisation des protéines augmente la force du gluten. Ceci confirme bien qu'une polymérisation élevée des protéines influe sur la qualité de la pâte.

Contrairement aux travaux de Flagella et al (2010), nos résultats montrent que le SDS est inversement proportionnel aux rapports HPM-GS/FPM-GS et MP/PP ($r=-0.51$ et $r=-0.45$ respectivement) et rejoignent ceux de Payne et al (1987) qui ont trouvé une corrélation entre la présence de certains HMW-GS et la force du gluten, mesurée par le test de volume de sédimentation SDS.

VI.2. Corrélations entre les caractéristiques technologiques et les tests de la qualité culinaire

Il ressort du tableau 13 que les pertes à la cuisson des pâtes sont positivement et significativement corrélées au PMG ($r=0.70$, $P < 0.01$) et inversement proportionnelles au GI ($r=-0.46$, $P < 0.05$), à la vitrosité ($r=0.68$, $P < 0.05$), à l'UPP% ($r=-0.39$, $P < 0.05$) et au ratio MP/PP ($r=-0.56$, $P < 0.05$). La délitescence des pâtes est positivement corrélée ($r=0.39$, $P < 0.05$) au ratio HPM/FPM.

L'augmentation du taux de gluten index permet d'accroître la résistance au pétrissage en augmentant le temps de développement, ainsi, il permet de renforcer le réseau protéique et ne laisse pas échapper les granules d'amidon pouvant former un empois à la surface de la pâte devient collante, avec des pertes élevées dans l'eau de cuisson.

Feillet et Abecassis (1976) soulignent que les différences de qualité culinaires des pâtes seraient certainement dues à la plus ou moins grande aptitude des protéines de semoules mises

en œuvre à former au cours de la pastification ; un filet capable d'insérer dans ses mailles les autres constituants de semoules, notamment les grains d'amidon. Ils ajoutent, que pour expliquer ces différences de comportement, la teneur en protéines interviendrait par les deux tiers et les propriétés intrinsèques de celles-ci, pour un tiers seulement.

Nos résultats montrent que les fractions protéiques formées ainsi que leur distribution, influent sur la qualité culinaire des pâtes. En effet, les UPP diminuent les pertes à la cuisson des pâtes, alors que le rapport HPM/FPM favorise leur délitescence. La délitescence du couscous n'a pas été influencée par les paramètres technologiques mesurés.

IV.3. Corrélations entre les paramètres de qualité et l'aptitude boulangère du blé dur

Les résultats issus de la matrice de corrélation rejoignent ceux de Rasperet al (1986) et montrent que les teneurs en protéines totales sont corrélées positivement au W alvéographique ($r=0.65$, $P< 0.05$) et négativement au rapport de configuration P/L ($r=-0.56$, $P< 0.05$).

La force boulangère est négativement corrélée à la valeur boulangère ($r=-0.59$, $P<0.05$). Les protéines insolubles ne sont pas corrélées, à la tolérance au pétrissage, au développement de la pâte et à la valeur boulangère et de ce fait contredisent les résultats trouvés sur le blé tendre par Martinant et al(1998) qui ont montré une forte relation entre les protéines insolubles et les paramètres mixographiques.

Une corrélation négative et significative est notée entre la teneur en protéines et la note totale de panification ($r=-0.68$). Cette corrélation révèle que les variétés étudiées perdent leur aptitude à la panification avec des teneurs en protéines élevées et confirme que l'aptitude boulangère du blé dur reste dépendante du génotype (voir tableau 14).

Tableau 11. Corrélations entre les paramètres de qualité et le rendement.

	PMG	Rdt	MIT	MCH	SDS	G H	GS	G I	PS	PG	TD	HP	MP/PP	UPP %	HMW/LMW
PMG	1,00														
Rdt	0,70**	1,00													
MIT	-0,84***	0,55**	1,00												
MCH	-0,61	-0,59	-0,41	1,00											
SDS	-0,03	-0,19	0,03	0,00	1,00										
G H	-0,89***	-0,75***	-0,72**	0,60**	0,16	1,00									
GS	-0,63**	-0,59**	-0,49*	0,59**	0,32*	0,68**	1,00								
G I	-0,30	-0,07	-0,39*	-0,22	0,15	0,13	0,01	1,00							
PS	-0,44	-0,28*	-0,56*	0,13	-0,09	0,17	0,13	0,43*	1,00						
PG	-0,30*	-0,08	-0,39*	-0,01	-0,08	0,04	0,11	0,31*	0,84***	1,00					
TD	0,14	0,03	-0,00	-0,26	0,15	-0,22	-0,22	0,45*	0,32*	0,32*	1,00				
HP	-0,82***	-0,75***	-0,62**	0,53**	0,31*	0,91***	0,74	0,17	0,19	0,12	-0,11	1,00			
MP/PP	-0,41*	-0,25*	-0,43*	0,28*	-0,45*	0,29*	0,11	-0,05	0,37*	0,30*	-0,25*	0,21	1,00		
UPP%	0,11	0,34*	-0,00	-0,42*	-0,25*	-0,27*	-0,22	0,28*	0,04	0,19	0,03	-0,21	-0,07	1,00	
HMW/LMW	-0,33	-0,17	-0,34*	0,24	-0,51**	0,28*	0,13	-0,02	0,27*	0,25*	-0,18	0,26*	0,78***	0,07	1,00

* valeur de $P < 0.05$. ** valeur de $P < 0.01$, *** valeur de $P < 0.001$.

Tableau 12. Corrélation entre la qualité culinaire des pâtes alimentaires et du couscous et la qualité technologique des semoules.

	PMG	Mit	MCH	SDS	G H	GS	G I	PS	PG	TD	MP/PP	UPP%	HPM/FPM
P C	0,71**	-0,68**	0,45	0,21	-0,32	-0,12	-0,46*	-0,23	-0,21	-0,11	-0,56*	-0,39*	-0,20
C E	0,35	-0,53*	0,20	0,08	-0,12	0,14	-0,36	-0,25	-0,16	-0,02	0,08	-0,15	0,12
Coll	-0,22	0,36*	-0,15	-0,13	0,13	0,13	-0,01	0,02	-0,01	0,07	0,17	-0,08	0,19
DEL PATE	-0,10	-0,17	0,05	-0,19	-0,14	0,06	-0,16	0,08	0,04	0,07	0,22	-0,04	0,37*
DEL COUS	-0,00	0,02	-0,03	-0,08	0,00	-0,03	0,05	0,11	-0,02	-0,20	0,08	-0,06	-0,10

* valeur de $P < 0.05$. ** valeur de $P < 0.01$ *** P valeur de $P < 0.001$.

Tableau 13. Corrélations entre les paramètres de qualité et l'aptitude boulangère du blé dur.

	PMG	Vitr	MCH	SDS	G H	GS	G I	PS	PG	TD	P/L	W	MPH	MP/PP	UPP%	HPM/FPM
VP	0,19	-0,25	-0,26	0,41	-0,06	0,13	0,37	-0,13	-0,42	-0,27	-0,24	0,11	0,17	0,07	-0,09	0,01
VB	0,00	0,26	-0,02	-0,20	-0,31	-0,20	-0,16	-0,36	-0,28	-0,04	0,53	-0,59*	-0,72**	0,06	0,20	0,12
P/L	-0,44	-0,04	0,13	-0,55	-0,05	0,10	-0,27	-0,56*	-0,23	-0,41	1,00	-0,48	-0,36	-0,02	0,53	0,22
W	0,02	-0,40	0,05	0,40	0,16	0,54	0,14	0,65*	0,38	0,25	-0,48	1,00	0,74**	-0,14	-0,54	-0,27
Note de pain	0,01	0,03	-0,02	-0,19	0,03	-0,39	-0,01	-0,68*	-0,75**	-0,24	0,54	-0,61*	-0,65	0,08	0,30	0,24

* valeur de $P < 0.05$. ** valeur de $P < 0.01$ *** P valeur de $P < 0.001$



**Blé
Dur**

Partie pratique
Résultats et Discussion

**Chapitre V.
Analyse multi-
dimensionnelle**

V.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

V.1.1. Analyse des paramètres physico-chimiques et technologiques

L'usage de l'ACP nous permet d'analyser les corrélations entre les différentes variables et d'identifier les paramètres physico-chimiques et technologiques qui se distinguent les uns des autres ce qui nous permet d'avoir une vue générale sur la réponse à l'expression de la qualité des variétés sous différentes conditions culturales.

Les valeurs propres indiquent que parmi les cinq facteurs obtenus, les deux axes factoriels (F1 et F2) expliquent 46,94% de la variance totale. Le pourcentage de la variance totale expliquée par chaque axe est mentionné dans le tableau (15). On constate que le premier (axe 1) révèle à lui seul plus de la moitié de la variance totale (30.72%), le suivant décroissant régulièrement à partir de 16.227% (axe 2), 14.414% (axe 3) et 8.298% (axe 4). Cela signifie que si on représente les données sur un seul axe on aura toujours 30.720 % de la variabilité totale qui sera préservée.

D'après ces résultats, on remarque que les axes 1, 2 et 3 représentent une bonne description de la dispersion des variables, puisqu'ils expliquent à eux seuls presque la totalité de la variation totale (61,361% d'inertie cumulée). Ce qui explique l'importance de la contribution de chaque variable.

Tableau 14. Valeurs propres et la variabilité entre les facteurs.

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	7.680	4.057	3.604	2.075	1.709
Variabilité (%)	30.720	16.227	14.414	8.298	6.837
% cumulé	30.720	46.947	61.361	69.660	76.497

Les corrélations de chaque variable avec les facteurs étudiés (tableau 16) montrent que le premier axe explique 30,7% de la variance et il est associé, positivement au rendement en grain, au PMG et au Mit et négativement au GS, à la MCH et à la tolérance au pétrissage de la pâte. Le deuxième axe explique 16,23% de la variance totale et il est corrélé positivement au SDS et négativement à la quantité de protéines totales et à leur distribution (PS, PG, UPP, GI, MP/PP et HPM/FPM), sachant que l'étude de la contribution de chaque variable permet d'hierarchiser les caractères responsables de la formation de chaque axe.

Tableau 15. Corrélations des variables avec les facteurs (en 2011/2012 et 2012/2013).

	F1	F2	F3	F4	F5
PMG	0.951	0.112	-0.048	0.167	0.033
RDT	0.841	-0.206	-0.098	-0.239	0.233
MIT	0.813	0.321	-0.069	0.194	-0.056
MCH	-0.689	0.333	-0.238	0.206	0.080
SDS	-0.102	0.452	0.723	0.023	0.290
G H	-0.939	0.184	0.024	-0.162	-0.135
GS	-0.773	0.292	0.100	-0.062	0.357
G I	-0.184	-0.529	0.595	-0.190	-0.189
PS	-0.420	-0.725	0.238	0.194	0.044
PG	-0.273	-0.753	0.239	0.215	0.236
TD	0.148	-0.393	0.626	0.418	-0.135
HO	-0.904	0.175	0.170	-0.056	-0.009
MP/PP	-0.462	-0.438	-0.636	0.151	0.112
UPP%	0.289	-0.547	0.007	-0.571	0.045
HPM/FPM	-0.417	-0.461	-0.655	0.125	0.023

En ce qui concerne la différence de l'expression de la qualité technologique étudiée entre les deux années (2011/2012 et 2012/2013), illustrée par la figure (42), confirme l'influence des conditions de culture sur l'expression de la qualité du blé dur. Le cercle de corrélation correspond à la projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions constitué par les deux uniques facteurs (F1 et F2). Cette projection des points sur le cercle est nettement éloignée du centre et coïncide avec les résultats obtenus avec la matrice de corrélation. Toutes les variables sont très bien représentées sur le plan principal.

En ce qui concerne, la première année de culture du blé dur (2011/2012) est caractérisée par une amélioration du PMG et du rendement, une augmentation du mitadinage, une diminution de la moucheture des grains et une augmentation de l'accumulation du gluten et de la tolérance au pétrissage de la pâte. Ce qui confirme que le rendement est toujours inversement proportionnel à la qualité du blé dur. Ces résultats corroborent ceux de Surma et al (2012) qui ont étudié l'effet de l'interaction génotype x milieu sur la variation de la qualité boulangère. La représentation graphique des variables sur les axes 1 et 2 confirme ces contributions et constitue de bons plans de projection sur les axes 1 et 2 (47 %).

La figure 42 montre également que les conditions de culture ayant caractérisé l'année 2012/2013 ont favorisé l'accumulation du gluten (GS GH), la tolérance au pétrissage (HP) et l'apparition de la moucheture.

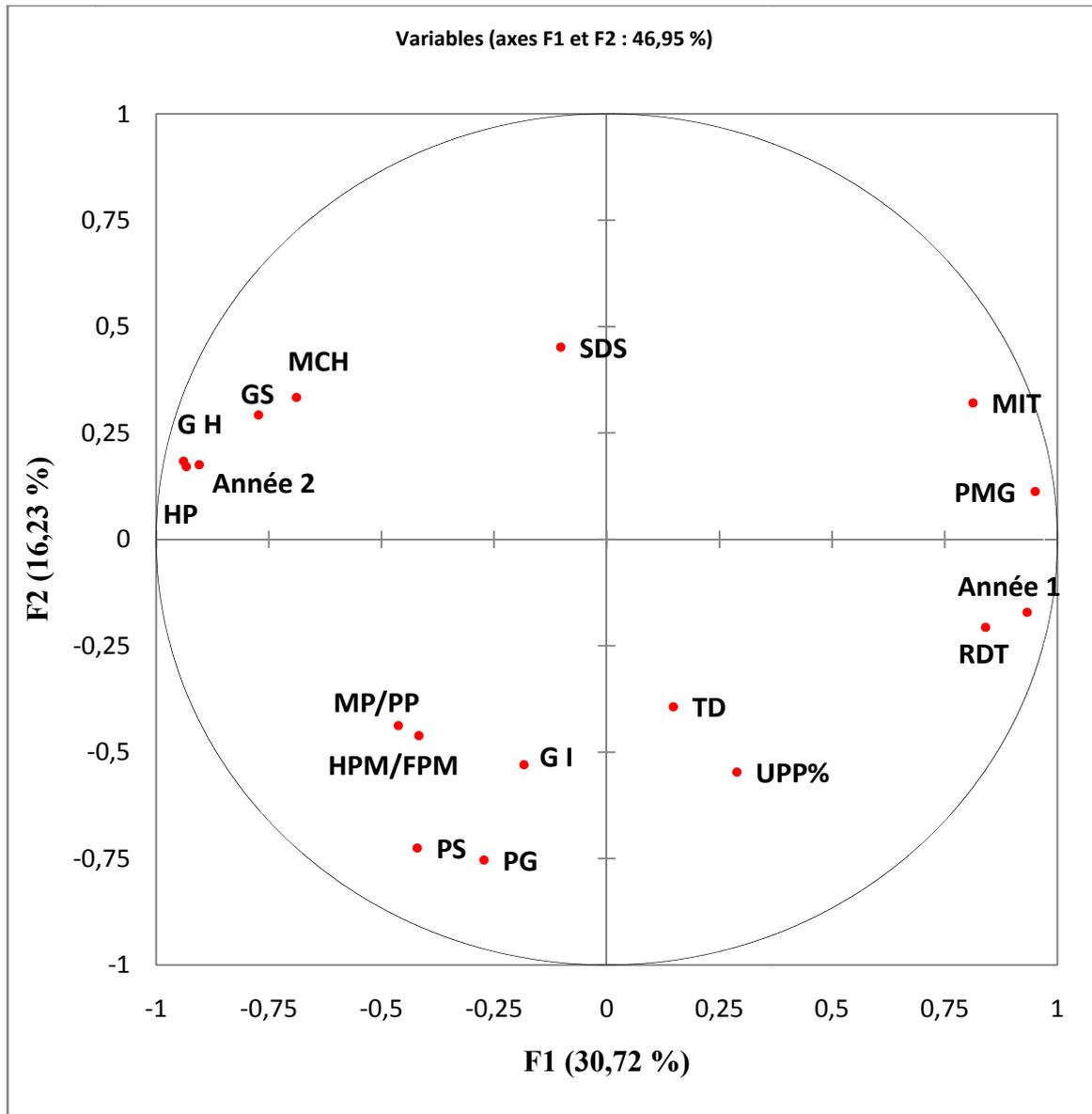


Figure 42. Répartition des caractéristiques technologiques et du rendement sur les deux axes F1 et F2.

Sur le plan factoriel 1-2, (figure 43), l'interaction année x variété x fertilisation azotée démontrée par l'ANOVA est représentée par le bi-plot sur les deux axes (F1 et F2).

Le premier axe discrimine les années. L'apport de l'azote pour Bousselam est plus marquant en première année en augmentant le rendement et le PMG. En deuxième année, le témoin sans apport est plus proche de la deuxième dose que la première, ce qui suppose que le choix de la dose à apporter dépend du milieu environnant de la culture. Le SDS de cette variété est amélioré avec l'apport de fertilisant azoté. Cette amélioration est meilleure la deuxième année.

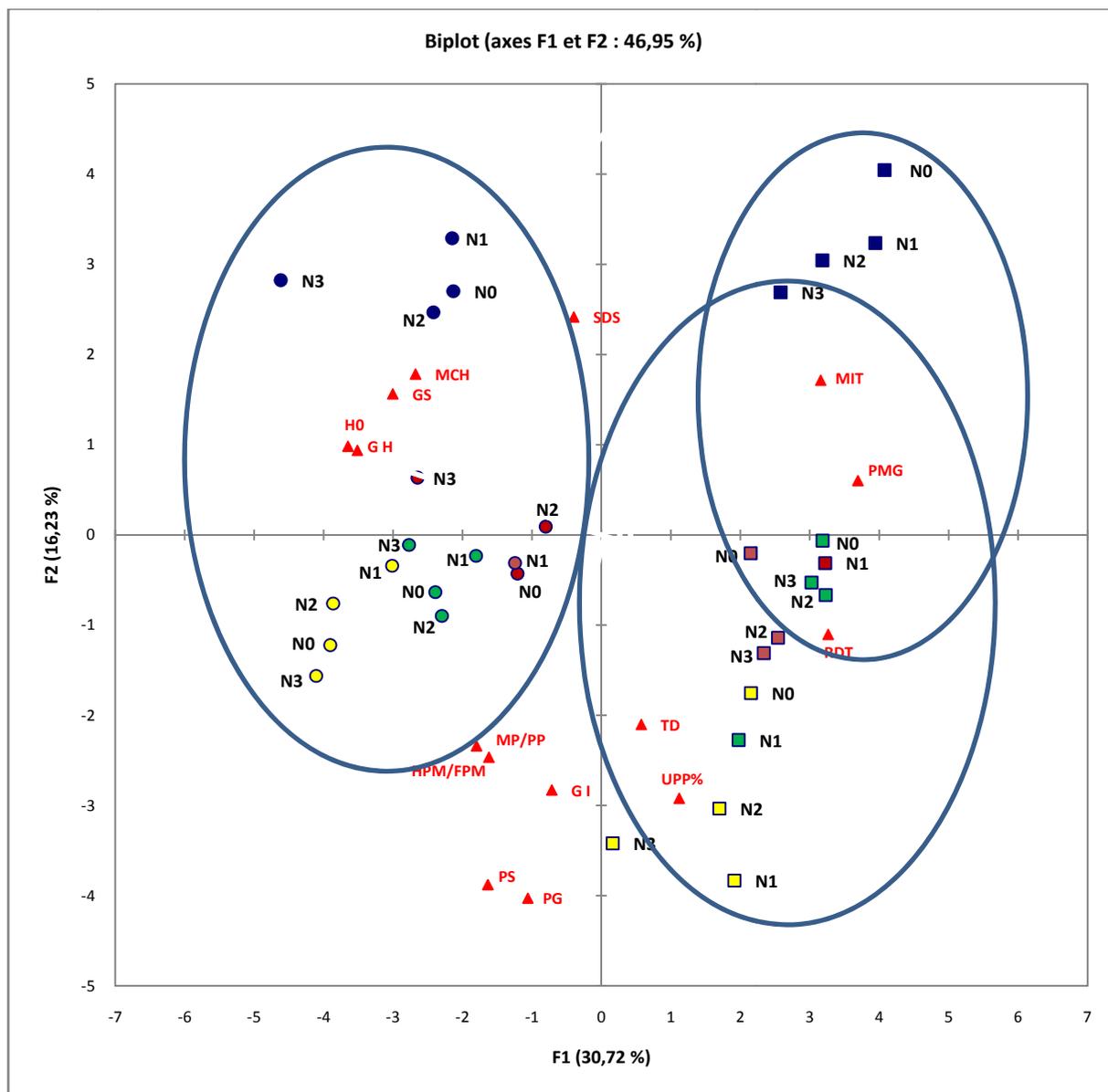


Figure 43. Interaction année x variété x fertilisation azotée représenté par le biplot relative aux deux premiers axes (F1 et F2) de l'ACP. (N0=0kg.N.ha-1, N1=40kg.N.ha-1, N2=80kg.N.ha-1 et N3=120kg.N.ha-1)



Avec les variétés MBB et GTADur, la différence entre les traitements azotés est plus marquée la première année à cause des conditions culturales enregistrées.

V.1.2. Analyse de la qualité culinaire des pâtes alimentaires et du couscous

Afin d'identifier la contribution des paramètres biochimiques et technologiques sur la qualité culinaire, nous avons procédé à une analyse en composantes principales (ACP) (figure 44).

Le pourcentage de la variance totale, expliquée par chaque axe, est mentionné dans le tableau (17). Les valeurs propres de l'ACP indiquent que parmi les cinq facteurs obtenus, les deux axes factoriels (F1 et F2) expliquent à eux seuls presque la moitié de variance (44.55% de la variance totale).

Tableau 16. Valeurs propres et la variabilité entre les facteurs (en 2011/2012).

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	6.785	4.353	3.894	2.585	2.229
Variabilité (%)	27.141	17.411	15.577	10.338	8.915
% cumulé	27.141	44.552	60.128	70.466	79.381

La figure 44 de projection des différents traitements sur les deux axes 1 et 2 montre la relation négative d'UPP, GI, MP/PP et HPM-GS/FPM-GS avec les pertes à la cuisson des pâtes. Ce paramètre technologique (perte à la cuisson) est négativement corrélé à l'axe 1 et à l'axe 2 et augmente avec la variété Bousselam sous les doses N0 et N1 et avec GTA Dur sous les doses N0, N2 et N3.

La délitescence du couscous est opposée à l'axe 1 (F1) de l'ACP ; elle diminue avec l'augmentation des PS, PG et UPP de la variété Bousselam sous les doses N2 et N3 et la variété Chen S sous les doses N0 et N3.

Le collant des pâtes est démontré avec la variété Chen S sous N2 et N3 avec des SDS, PS, et TDV plus importants.

La variation de la délitescence des pâtes et du couscous, expliquée par le deuxième axe (F2), est influencée positivement par le SDS et le GS. La variation de la qualité culinaire de GTA Dur sous différents apports azotés est plus faible par rapport à celle des trois autres variétés (figure 44).

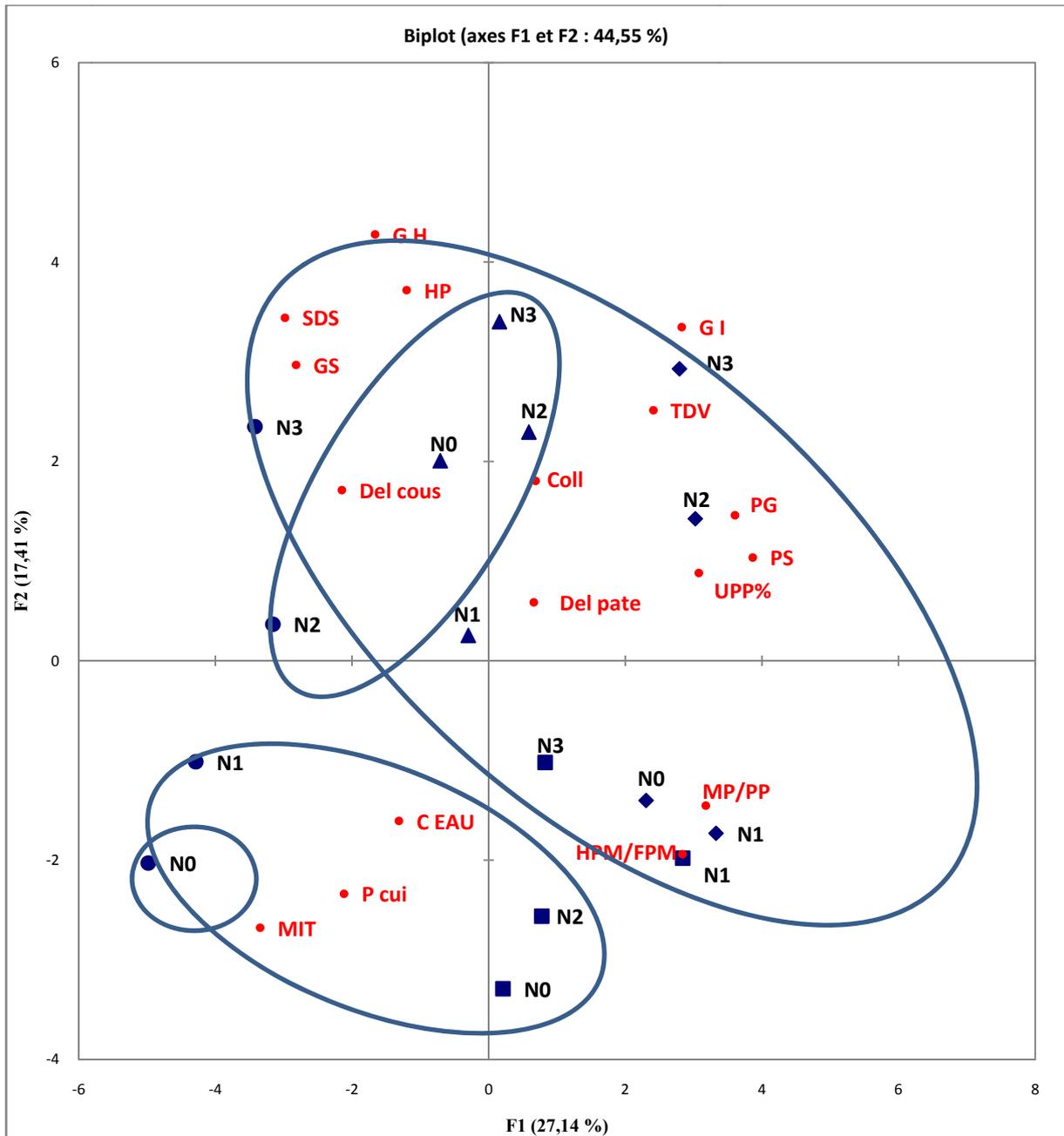


Figure 44. Répartition des caractéristiques culinaires et les paramètres technologiques sur les deux axes F1 et F2.

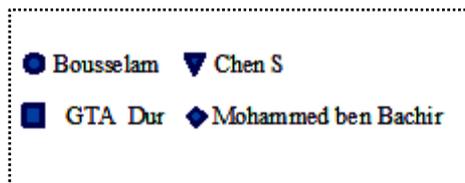


Tableau 17. Corrélations des variables (tests culinaires et paramètres technologiques) avec les facteurs (année 2011/2012).

	F1	F2	F3	F4	F5
MIT	-0.737	-0.473	-0.233	0.236	-0.121
SDS	-0.657	0.607	-0.364	0.103	-0.135
G H	-0.366	0.755	0.079	-0.148	0.365
GS	-0.621	0.524	0.229	-0.057	0.340
G I	0.622	0.591	-0.405	0.002	0.035
PS	0.852	0.183	-0.220	0.013	-0.211
PG	0.795	0.258	-0.252	0.083	-0.182
TD	0.531	0.444	-0.265	0.470	-0.250
H0	-0.264	0.656	-0.055	0.476	-0.016
MP/PP	0.700	-0.256	0.387	0.273	0.371
UPP%	0.678	0.155	-0.018	-0.295	0.293
HPM/FPM	0.625	-0.342	0.364	0.418	0.058
P cui	-0.467	-0.412	-0.302	0.045	-0.521
C EAU	-0.289	-0.283	-0.083	0.673	0.278
Coll	0.152	0.318	0.797	0.026	-0.267
Del pate	0.146	0.103	0.767	-0.051	-0.329
Del cous	-0.473	0.302	0.688	0.201	-0.168

V.1.3. Analyse de l'aptitude boulangère

Afin d'identifier la contribution des paramètres biochimiques et technologiques sur l'aptitude à la panification, nous avons procédé à une analyse en composantes principales (ACP) (figure 45). Le pourcentage de la variance totale, expliquée par chaque axe, est mentionné dans le tableau (18).

Les valeurs propres de l'ACP indiquent que parmi les cinq facteurs, les deux axes factoriels (F1 et F2) expliquent à eux seuls presque la moitié de variance (43,16% de la variance totale).

Tableau 18. Valeurs propres et la variabilité entre les facteurs (2012/2013).

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	5.513	5.278	3.371	2.571	2.147
Variabilité (%)	22.052	21.113	13.484	10.284	8.588
% cumulé	22.052	43.165	56.649	66.933	75.521

La VB, NTP et P/L sont corrélés positivement à l'axe 2. L'aptitude boulangère de la variété GTA Dur augmente avec les doses d'azote N2 et N3.

Les résultats de l'ACP confirment bien que la valeur boulangère est négativement corrélée à la force boulangère (W). La variété Chen S sous la dose N3 présente une faible valeur boulangère et un W et SDS plus élevés. Ce qui laisse supposer que la valeur boulangère ne

s'améliore pas avec des SDS élevés. En effet, Guzman et al(2016) ont rapporté que des taux modérés en SDS sont recommandés en panification du blé dur.

La valeur boulangère est améliorée chez MBB avec les doses N2 et N3 suite à une augmentation de PS. La diminution du GI de la variété Bousselam sous des doses croissantes d'azote a diminué sa valeur boulangère.

Ces résultats confirment que la fertilisation azotée influe sur l'aptitude à la panification en fonction du génotype.

Tableau 19. Corrélations des variables avec les facteurs (2012/2013).

	F1	F2	F3	F4	F5
MIT	-0.701	-0.541	-0.069	0.291	-0.053
SDS	0.202	-0.681	-0.090	-0.393	0.226
G H	0.419	0.539	0.281	-0.189	-0.454
GS	0.719	-0.024	-0.230	-0.210	0.438
G I	-0.396	-0.355	-0.593	-0.170	-0.337
PS	0.643	-0.245	-0.529	0.387	0.201
PG	0.601	-0.099	-0.492	0.219	0.137
TDV	-0.173	-0.766	-0.180	0.399	-0.214
HP	0.821	-0.071	-0.044	-0.371	-0.228
MP/PP	0.364	0.748	-0.114	0.321	-0.018
UPP%	-0.254	0.260	-0.499	-0.439	-0.164
HPM/FPM	0.384	0.790	-0.218	0.301	-0.223
VP	0.046	-0.025	-0.452	-0.347	-0.012
VB	-0.470	0.420	-0.510	0.135	0.199
P/L	-0.421	0.502	0.079	-0.172	0.355
W	0.719	-0.490	-0.017	-0.078	-0.269
NTP	-0.515	0.454	-0.571	-0.081	-0.034

V.2. Classification ascendante hiérarchique

Pour connaître les ressemblances et les dissemblances entre les traitements étudiés, nous avons utilisé la Classification Ascendante Hiérarchique. Cette classification se fait par dissimilarité en utilisant les distances euclidiennes ou par similarité en utilisant la distance de Pearson. Dans notre cas la Classification Ascendante Hiérarchique est utilisé afin de connaître les ressemblances entre les interactions variété x azote x année. Cette classification est réalisée par dissimilarité en utilisant les distances euclidiennes (figure 44).

Les échantillons sont classés en fonction des variables quantitatives en utilisant la méthode de la distance euclidienne avec le critère d'agrégation relatif aux centres d'inertie (méthode de Ward).

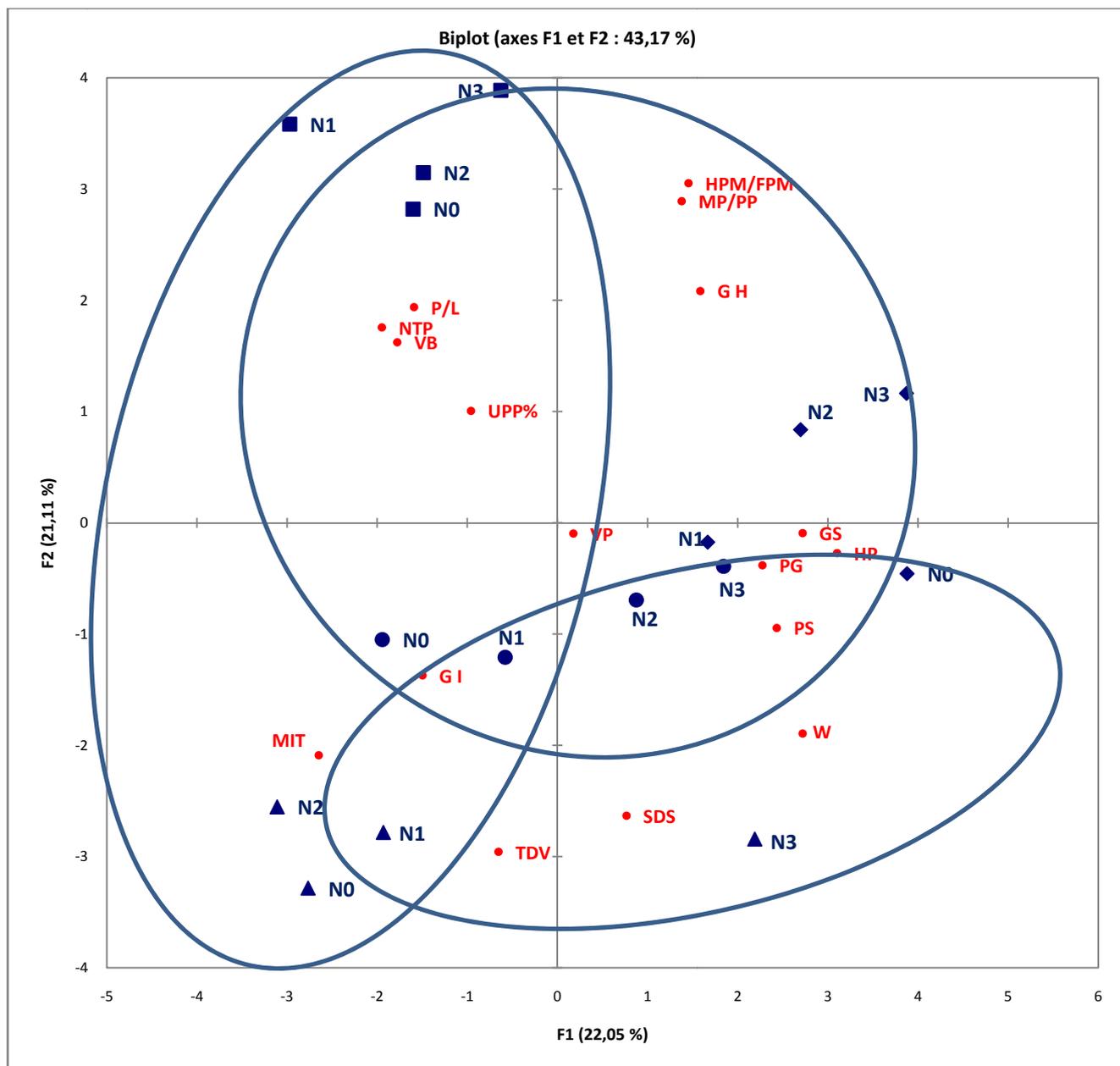


Figure 45. Répartition des aptitudes boulangères et les paramètres technologiques sur les deux axes F1 et F2.



V.2.1. Paramètres physico-chimiques et technologiques

Les résultats de la classification hiérarchique (figure 46) réalisée en fonction des paramètres physico-chimiques et technologiques mesurés pendant les deux années d'expérimentation ont permis d'identifier trois classes (tableau 21). Une première classe

comporte la variété Bousselam avec les doses (N0, N1 et N2) et la variété GTA Dur avec les doses N0 et N1. La deuxième classe comporte tous les autres traitements de la première année et la dernière classe comporte tous les traitements de la deuxième année. Cette classification confirme l'effet année révélé par les résultats de l'ACP.

Les résultats de cette classification montrent que les caractéristiques physico-chimiques et technologiques des variétés diffèrent selon les conditions agronomiques qui ont accompagné le développement du végétal et quand les conditions sont favorables, selon la variété et l'apport d'azote.

Tableau 20. Composition des classes obtenues par la CAH (en 2011/2012 et 2012/2013).

Classe 1	Classe 2	Classe 3
V1N0(1)	V2N3(1)	V4N2(2)
V1N1(1)	V2N2(1)	V3N2(2)
V1N2(1)	V2N1(1)	V2N0(2)
V3N0(1)	V4N1(1)	V2N2(2)
V3N2(1)	V3N1(1)	V2N1(2)
	V3N3(1)	V2N3(2)
	V1N3(1)	V3N1(2)
	V4N2(1)	V3N0(2)
	V2N0(1)	V3N3(2)
	V4N3(1)	V1N1(2)
	V4N0(1)	V1N0(2)
		V1N3(2)
		V4N3(2)
		V4N0(2)
		V4N1(2)
		V1N2(2)
V1=Bousselam, V2= Chen S, V3=GTA Dur, V4=MBB N0=0kg.N.ha ⁻¹ , N1= 40 kg.N.ha ⁻¹ ,N2=80kg.N.ha ⁻¹ , N3=120 kg.N.ha ⁻¹ (1) et (2): années 2011-2012 et 2012-2013		

V.2.2. Qualité culinaire des pâtes alimentaires et du couscous

La classification hiérarchique (figure 47) réalisée en fonction des propriétés culinaires et les paramètres physicochimiques mesurés la première année (2011/2012) a permis d'identifier 4 classes (tableau 22). La première classe comporte la variété Bousselam sous N0, la deuxième classe comporte la variété GTA Dur sous N0 et N2 et la variété Bousselam sous N1, la troisième classe comporte la variété Chen S sous N0, N2 et N3, la variété Bousselam

sous N2 et V3 sous N3 et la quatrième classe comporte la variété MBB sous N0, N1, N2 et N3 ,la variété Chen S sous N1 , la variété GTA Dur sous N1 et la variété Bousselam sous N3. Cette classification confirme bien que l'expression de la qualité technologique et culinaire dépend de la variété et de la dose d'azote apportée.

La variété Bousselam est plus sensible à la variation des niveaux d'azote, elle se retrouve dans toutes les classes, contrairement à la variété MBB quise retrouve dans la même classe avec tous les apports d'azote.

Tableau 21. Composition des classes obtenues par la CAH (année 2011/2012).

Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
V1N0	V1N1	V2N2	V4N0
	V3N0	V2N0	V2N1
	V3N2	V2N3	V3N1
		V1N2	V4N3
		V3N3	V4N2
			V4N1
			V1N3
V1=Bousselam, V2= Chen S, V3=GTA Dur, V4=MBB N0=0kg.N.ha ⁻¹ , N1= 40 kg.N.ha ⁻¹ ,N2=80kg.N.ha ⁻¹ , N3=120 kg.N.ha ⁻¹			

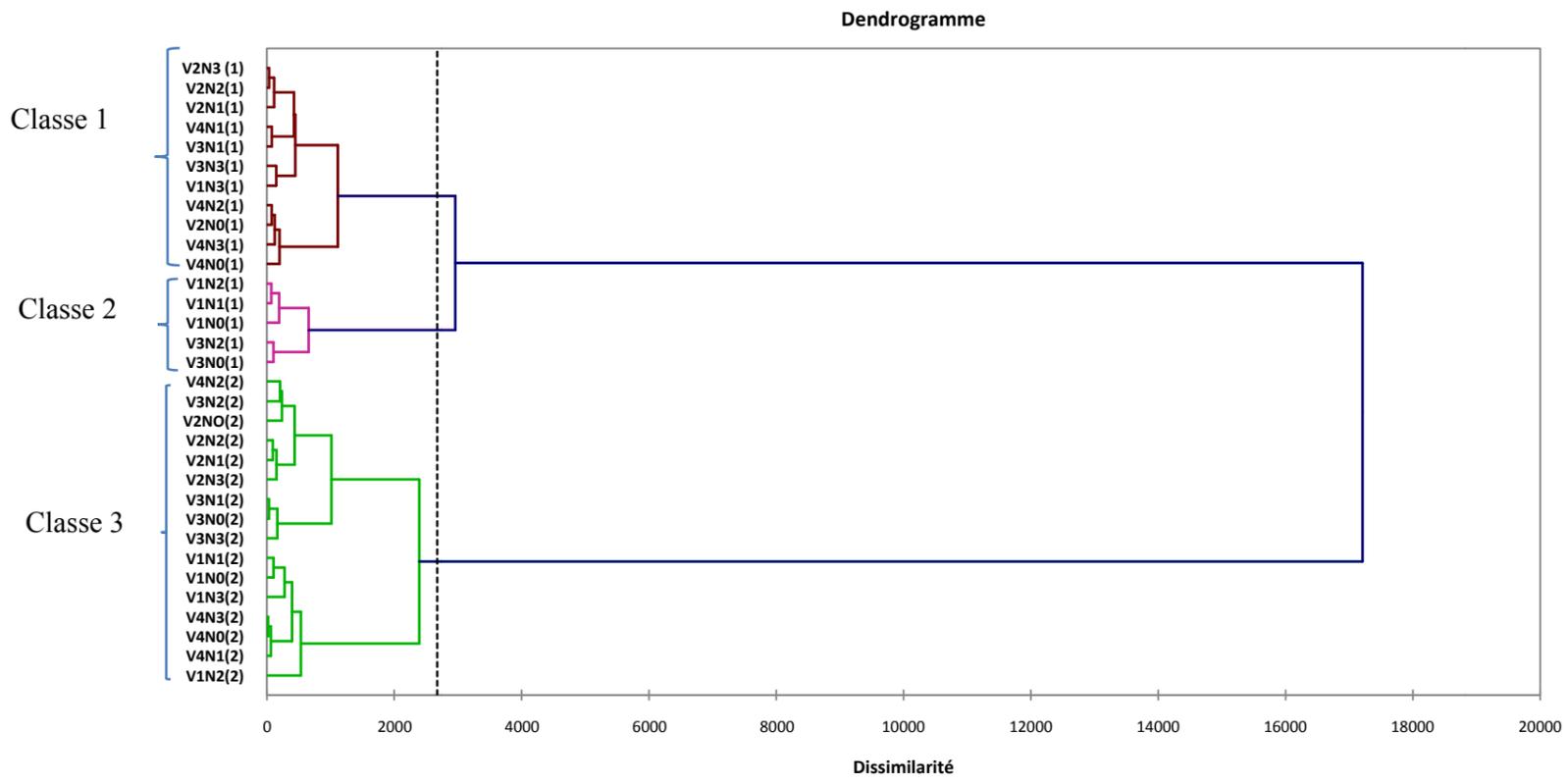


Figure 46. Dendrogramme de classification par dissimilarité (V1=Bousselam, V2= Chen S, V3=GTA Dur et V4=MBB ; N0=0kg.N.ha⁻¹, N1= 40 kg.N.ha⁻¹,N2=80kg.N.ha⁻¹et N3=120 kg.N.ha⁻¹)

V.2.3. L'aptitude boulangère

La classification hiérarchique réalisée (figure 48) en fonction de l'aptitude boulangère et les paramètres physicochimiques mesurés la deuxième année (2012/2013) a permis d'identifier 3 classes (tableau 23).

Tableau 22. Composition des classes obtenues par la CAH (année 2012/2013).

Classe 1	Classe 2	Classe 3
V3N0	V2 N1	V3 N1
V3N2	V2N3	V3N3
V4N1	V1N2	V2N0
V1N3	V1N1	V2N2
V4N3	V4 N0	
V1N0		
V4 N2		
V1=Bousselam, V2= Chen S, V3=GTA Dur, V4=MBB N0=0kg.N.ha ⁻¹ , N1= 40 kg.N.ha ⁻¹ ,N2=80kg.N.ha ⁻¹ , N3=120 kg.N.ha ⁻¹		

La première classe comporte la variété Bousselam sous N0 et N3, la variété MBB sous N1, N2 et N3 et V3 sous N0 et N2 ; la deuxième classe comporte la variété Chen S sous N1 et N3 et la variété Bousselam sous N1 et N2, et la variété MBB sous N0 et la troisième classe comporte la variété Chen S sous N0, N2 et la variété GTA Dur sous N1 et N3.

Cette classification montre qu'il y a une ressemblance des aptitudes boulangères entre les échantillons de chaque classe selon l'apport d'azote de chaque variété. Ceci laisse penser que le raisonnement d'une fertilisation selon le génotype mis en culture permet d'avoir des aptitudes boulangères escomptées.

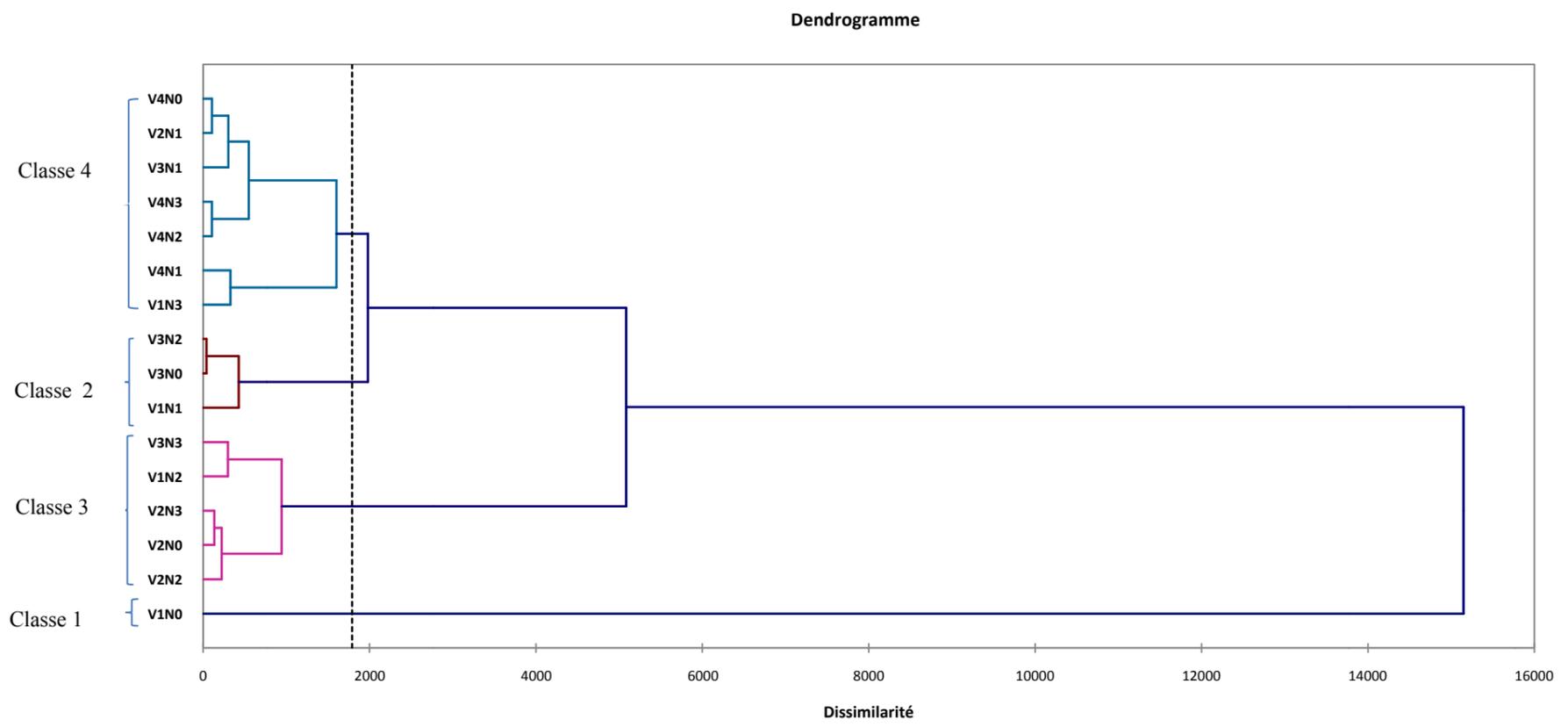


Figure 47. Dendrogramme de classification par dissimilarité (2011/2012) (V1=Bousselam, V2= Chen S, V3=GTA Dur et V4=MBB; N0=0kg.N.ha⁻¹, N1= 40 kg.N.ha⁻¹,N2=80kg.N.ha⁻¹, N3=120 kg.N.ha⁻¹)

Dendrogramme

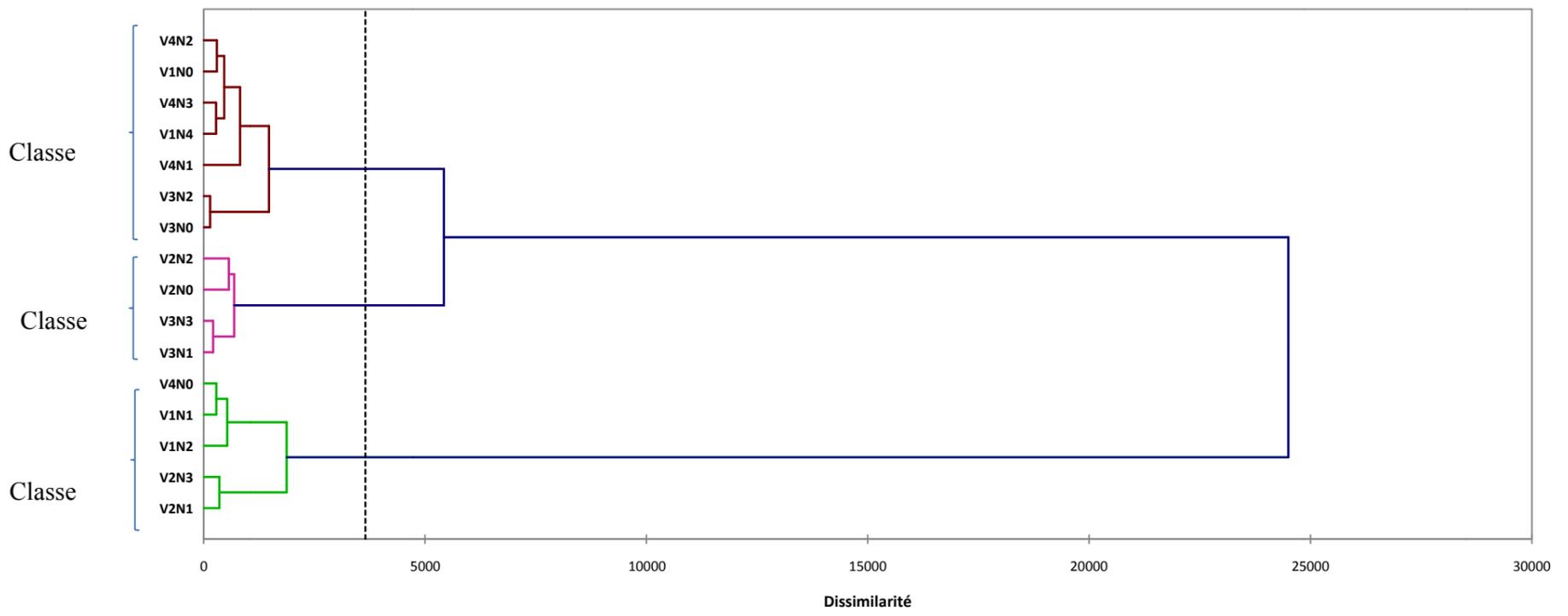


Figure 48. Dendrogramme de classification par dissimilarité (2012-2013) (V1= Bousselam, V2= Chen S, V3=GTA Dur et V4=MBB ; N0=0kg.N.ha-1, N1= 40 kg.N.ha-1,N2=80kg.N.ha-1, N3=120 kg.N.ha-1)



Blé Dur

Annexes

Perspectives

Conclusion générale

- **Références bibliographiques**



Conclusion

La présente étude porte sur l'étude de l'effet de la fertilisation azotée sur la variation des caractéristiques technologiques et sur la distribution des protéines de réserve et leurs impacts sur les produits de deuxième transformation chez plusieurs variétés du blé dur. L'expérimentation menée pendant deux années consécutives est caractérisée par des conditions culturales différentes. Pendant les deux années, l'apport de la fertilisation a diminué le poids des grains tout en augmentant leur vitrosité. Le taux de moucheture des grains est plus marqué en première année (forte infestation en mauvaises herbes) notamment chez la variété Bousselam avec une fertilisation élevée.

L'effet de l'azote sur les protéines totales dépend des variétés et de leur milieu de culture. Une meilleure accumulation est notée quand les conditions de croissance sont défavorables. L'accumulation de gluten humide est plus marquée en conditions défavorables de croissance pour toutes les variétés. Cependant, l'effet de la dose de fertilisation azotée sur la qualité du gluten dépend du génotype et des conditions du développement des cultures. La force de la pâte mesurée par le SDS est plus élevée en conditions défavorables de croissance avec une augmentation linéaire sous les doses croissantes d'azote chez la variété Chen S.

La mesure des paramètres mixographiques a révélé que les conditions culturales défavorables ont amélioré la tolérance au pétrissage de la pâte et ont diminué le temps de développement de toutes les variétés. La fertilisation azotée a augmenté la tolérance au pétrissage des variétés Bousselam (7%), Chen S (23%) et GTA Dur (10%). Les propriétés mixographiques du blé dur ont donc été améliorées par la fertilisation azotée dans des conditions défavorables.

Quant aux paramètres alvéographiques, l'effet de la fertilisation sur la ténacité dépend du génotype. La ténacité optimale est enregistrée avec un faible apport d'azote chez Chen S et MBB par contre, chez GTA Dur, une augmentation linéaire avec l'apport d'azote est notée. L'effet de l'azote sur le rapport P/L et le W dépend de la variété. La force boulangère de la variété Chen S augmente avec l'accroissement de l'azote.

L'étude de l'effet de la distribution des fractions protéiques des variétés du blé dur montre que la variété Bousselam présente le plus faible taux de polymérisation des protéines, quelque soit les conditions de cultures, contrairement à la variété GTA Dur qui a révélé en plus d'une plus forte polymérisation, un rapport HPM/FPM plus élevé. Les variétés GTA Dur et MBB ont également un rapport MP/PP plus élevé en conditions défavorables. Ces fractions protéiques varient significativement avec l'apport d'azote. L'accroissement des doses d'azote

provoque une augmentation du taux de protéines non extractibles de la variété Bousselam en conditions favorables. Par contre, la variété GTA Dur se distingue par un HPM/FPM plus élevé avec l'accroissement de l'azote. Cependant, le rapport MP/PP diminue significativement avec l'apport d'azote en conditions défavorables de croissance chez les variétés GTA Dur et MBB. On en conclue que l'agrégation et la formation des fractions protéiques au cours du remplissage du grain dépend de la variété et des conditions environnementales qui accompagnent la croissance et le développement de la culture.

L'effet de la fertilisation azotée sur la variation de la qualité culinaire des pâtes alimentaires est fonction du génotype. L'apport de 120 kg N.ha⁻¹ diminue les pertes à la cuisson des pâtes alimentaires des variétés Bousselam et MBB de 19,6% et 22% respectivement. Par ailleurs, la capacité de fixation d'eau des pâtes alimentaires diminue chez la variété Bousselam et augmente chez la variété MBB avec la fertilisation azotée. La qualité culinaire des variétés est optimisée dans leur environnement de croissance. Les meilleurs pains sont obtenus avec la variété Chen S avec 80 kg N.ha⁻¹ et la variété GTA Dur avec 40 kg N.ha⁻¹. L'apport croissant d'azote augmente considérablement la valeur boulangère de la variété MBB.

L'étude des différentes relations entre les paramètres mesurés a montré que :

- Le rendement est négativement corrélé aux paramètres de qualité (vitrosité, gluten humide, tolérance au pétrissage). Les conditions environnementales qui accompagnent le développement du grain influent sur l'expression de la qualité du blé.
- L'augmentation du poids du grain diminue la teneur en protéines, la vitrosité, le gluten humide, la tolérance au pétrissage et le rapport MP/PP.
- Les fractions protéiques formées ainsi que leur distribution influent sur la qualité culinaire des pâtes alimentaires ; les fractions inextractibles diminuent les pertes à la cuisson des pâtes alimentaires, alors que le rapport HPM/FPM favorise leur délitescence.
- Les teneurs élevées des protéines diminuent la note de panification des variétés étudiées. Les fractions inextractibles des protéines (UPP) n'ont pas eu d'effet sur la valeur boulangère du blé dur ; ce qui est différent des résultats trouvés avec le blé tendre.

Ces résultats laissent à penser qu'un raisonnement de la fertilisation en fonction du génotype et en relation avec les conditions environnementales s'impose pour aboutir aux produits de deuxième transformation du blé dur de qualité escomptée.

Perspectives

— Une agriculture raisonnée qui prend en considération la qualité du grain selon la variation des facteurs agronomiques (infestations de mauvaises herbes et de parasites, conditions climatiques, etc.) est nécessaire pour produire un blé présentant les caractéristiques technologiques requises par les fabricants de produits à base de blé dur (pâtes et pain) sans avoir recours aux améliorants.

— La variabilité de la composition en protéines du grain lors de la sélection des variétés de blé dur ne doit pas être occultée car c'est elle qui va conditionner la qualité des produits finis.

— Des essais agronomiques sur une gamme de variétés plus large, prenant en compte les caractéristiques technologiques du grain, sont nécessaires pour permettre aux agriculteurs d'adopter les pratiques culturales notamment le raisonnement de la fertilisation (date, mode d'apport et type d'engrais) qui doivent être adaptées pour chaque variété afin de produire du blé selon son utilisation finale.

— Une étude combinée de la fertilisation soufrée et azotée est requise afin de mieux comprendre les variations des protéines polymériques.

Références bibliographiques

- AACC International. Methodes approuvées de: American Association of Cereal Chemists, 10th Ed. Methode 54-40A. Association: St. Paul, MN (2000).
- Abdellaoui, Z. 2007. Etude de l'effet de la fertilisation azotée sur les propriétés techno-fonctionnelles des protéines de blé. Mémoire de magister. ENSA. p193.
- Abecassis, J. 1993. Nouvelles possibilités d'apprécier la valeur meunière et la valeur semoulière des blés, Industrie des cereals .N°81, 25-37.
- Abecassis, J., Abbou, R., Chaurand, M., Morel, M.H., Vernoux, P. 1994. Influence of extrusion conditions on extrusion speed, temperature and pressure in the extruder and on pasta quality. Cereal Chemistry, 71, 247-253.
- Abecassis, J., Chaurand, M. 1997. Appréciation de la valeur d'utilisation du blé dur en semoulerie et pastification. in : « Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales ». Ed. Lavoisier Tec & Doc. Paris, p765.
- Abecassis, J., Cukmakli, U., Feillet, P. 1974. La qualité culinaire des pâtes alimentaires : méthodes universelles et objectives d'appréciation des pâtes cuites. Ind. Céréales, p264.
- Abecassis, J., Feillet, P. 1985. Pureté des semoules de blé dur, taux de cendres et réglementation. Industrie des cereales, 13-18.
- Abonyi, T., Kiraly, I., Tomoskozi, S., Baticz, O., Guoth, A., Gergely, S., Scholz, E., Lasztity, D., Lasztity, R. 2007. Synthesis of gluten-forming polypeptides. 1. Biosynthesis of gliadins and glutenin subunits. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 55, 3655-3660.
- Adams, K. 1987. Factor affecting the quality of cooked and the interaction of glutenins and gliadins with 7S and 11 soy protein. Dissertation abstract international B47 (12) p180.
- Agnieszka, M., Obuchowski, W., Siewska, H., Koziara, W., Paschke, H. 2008. Effect of nitrogen fertilization of durum wheat varieties on some characteristics important for pasta production. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria, 7, 29-39.
- Alause, J., Abecassis, J. 1979. La qualité des nouvelles variétés française de blé dur. Cahier agriculture.
- Altenbach, S.B., Kothari, K.M., Lieu, D. 2002. Environmental conditions during wheat grain development alter temporal regulation of major gluten protein genes. Cereal Chemistry, 79, 279-285

- Ammar, K., Kronstad, W.E., Morris, C.F. 2000. Bread making quality of selected durum wheat genotype and its relationship with high molecular weight glutenin subunits allélic variation and gluten protein polymeric composition. *Cereal chemistry*, 77, 230-236.
- Anonyme, 2016a. Stratégie de développement du blé dur. Rapport, Inst.Tec.Gr.Cul
- Anonyme, 2019b. Les travaux d'une conférence sur le développement de la filière céréalière. *L'Algérie agricole (Le journal de l'agriculture, de l'agroalimentaire et du monde rural)* Ed 35p 4.
- Autran, J.C., Laignelet, B., Morel, M.H. 1987. Characterization and quantification of low-molecular weight glutenins in durum wheats. *Biochimie*, 69, 699-711.
- Axford, E., McDermott, E.E., Redman, D.G. 1978 : Note on the sodium dodecyl sulfate test of bread making quality, comparison with pelshenke and zeleny tests. *In Cereal Chem.* N°56, pp : 582-584.
- Balla, A., Blecker, C., Oumarou, M., Paquot, M. 1999. Mise au point de pains composites à base de mélanges de farines de sorgho-blé et analyse texturale. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, (2), 69–77.
- Bangur, R., Batey, I.L., Mckenzie, E., Macritchie, F. 1997. Dependence of extensograph parameters on wheat protein composition measured by SE-HPLC. *Journal of cereal science*, 25, 237–245.
- Barak, S., Mudgil, D., Khatkar, B.S. 2014. Influence of gliadin and glutenin fractions on rheological, pasting, and textural properties of dough. *International Journal of Food Properties*, 17, 1428–38.
- Barron, C., Surget, A., Rouau, X. 2007. Relative amounts of tissues in mature wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and their carbohydrate and phenolic acid composition. *Journal of Cereal Science*, 45, 88-96.
- Bechtel, D.B., Gaines, R.L., Pomeranz, Y. 1982. Early stages in wheat endosperm formation and protein body initiation. *Annals of Botany*, 50, 507-518.
- Bechtel, D.B., Wilson, J.D., Shewry, P.R. 1991. Immunocytochemical localization of the wheat storage protein triticin in developing endosperm tissue. *Cereal Chemistry*, 68, 573–577.
- Bekes, F., Gras, P.W., Anderssen, R.S. Appels, R. 2001. Quality traits of wheat determined by small-scale dough testing methods. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52, 1325-1338.

- Bekes, F., Gras, P.W., Gupta, R.B., Hickman, D.R. Tatham, A.S. 1994. Effects of a high M(r) glutenin subunit (1BX20) on the dough mixing properties of wheat-flour. *Journal of Cereal Science*, 19, 3-7.
- Belton, P.S. 1999. On the elasticity of wheat gluten. *Journal of Cereal Science*, 29, 103-107.
- Bénétrix, F., Kaan, F., Autran, J-C. 1994. Changes in protein complexes of durum wheat in developing seed. *Crop Science*, 34, 462-468.
- Benmohamed, Tiguemounine, 2011. Effet de la fertilisation azotée sur la qualité technologique de la variété de blé dur GTA DUR. Mémoire ingéniorat. Université Blida1.
- Bensalem, M., Daaloul, A., Ayadi, A. Le blé dur en Tunisie. In: Di Fonzo N. (ed.), Kaan F. (ed.), Nachit M. (ed.). *Durum wheat quality in the Mediterranean region*. Zaragoza: CIHEAM, 1995. p. 81-91. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 22). Seminar on DurumWheatQuality in the MediterraneanRegion, 17-19 Nov 1993, Zaragoza (Spain)
- Blumenthal, C., Bekes, F., Gras, P.W., Barlow, E.W.R., Wrigley, C.W. 1995. Identification of wheat genotypes tolerant to the effects of heat stress on grain quality. *Cereal Chemistry*, 72, 539 – 544.
- Blumenthal, C.S., Bekes, F., Batey, I.L., Wrigley, C.W., JMoss, H., Mares, D.J., Barlow, E.W.E. 1991. Interpretation of grain quality results from wheat variety trials with reference to high temperature stress. *Australian Journal of Agricultural Research*, 42, 325-334.
- Borrelli, G.M., De-Leonardis, A.M., Fares, C., Platani, C., Di-Fanzo, N. 2003. Effect of modified processing conditions on oxidative properties of semolina dough and pasta. *Cereal Chemistry*, 80, 225-231.
- Boudreau, A., Menard, G. 1992. Le blé éléments fondamentaux et transformation. Ed les presses de l'université Laval Canada, p 439.
- Boyacioglu, M.H., D'Appolonia, B.I. 1994. Characterization and utilization of durum wheat for bread making. Comparison of chemical, rheological and baking properties between bread wheat flours and durum wheat flours. *Cereal Chemistry*, 71p.
- Brabant, C., Levy Häner, L. 2016. Influence de la fumure azotée et de son Fractionnement sur la qualité boulangère du blé. *Recherche Agronomique Suisse* 7, 2, 88–97.

- Brabant, C., Levy, L. 2016. Influence de la fumure azotée et de son fractionnement sur la qualité boulangère du blé. *Recherche Agronomique Suisse*, 7,88–97.
- Branlard, G., Autran, J.C., Monneveux, P. 1989. High molecular-weight glutenin subunit in durum wheat (*Triticum-durum*). *Theoretical and Applied Genetics*, 78, 353-358.
- Branlard, G., Dardevet, M. 1985. Diversity of grain proteins and bread wheat quality. II. Correlation between high molecular weight subunits of glutenin and flour quality characteristics. *Journal of Cereal Science*, 3, 345-354.
- Bueche, F. 1962. *Physical properties of high polymers*, Interscience, New York.
- Bushuk, W. 1985. Flour protein structure and functionality in dough and breads cereal. *Food WORD*, 447-452.
- Calvel, R. 1973. L'évolution de la qualité du pain français. In *Bull. Anc. Eleves, EFM*, p254.
- Campbell, C.A., Zentner, R.P., Selles, F., McConkey, B.G., Dyck, F.B. 1993. Nitrogen management for spring wheat grown annually on zero-tillage: yield and nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal*, 85, 107–114.
- Campos, D.T., Steffe, J.F., Ng, P.K.W. 1997. Rheological behavior of undeveloped and developed wheat dough. *Cereal Chemistry*, 74, 489-494.
- 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. *Australian Journal of Plant Physiology*, 26, 301-310.
- Cheftel, J.C., Cheftel, H. 1977. *Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments*. Ed. Tec et Doc, Lavoisier, Paris. Tome 1 et 2.
- Chopin. 2007. Etude du blé dur à l'alvéographe. *Quality control for grain and flour*. 1-7
- Ciaffi, M., Tozzi, L., Borghi, B., Corbellini, M., Lafiandra, D. 1996. Effect of heat shock during grain filling on the gluten protein composition of bread wheat. *Journal of Cereal Science*, 24, 91 – 100.
- Cubadda, F., Aureli, F., Raggi, A., Carcea, M. 2009. Effect of milling, pasta making and cooking on minerals in durum wheat. *Journal of cereal science*, 49, 92-97.
- 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*, 37, 866–869.

- Cuq, B., Abecassis, J. 2006. Effects of semolina composition and processing conditions on couscous quality. World Grains Summit Symposium: Foods and Beverages, 17-20 September, San Francisco, USA
- Dachkevitch, T., Autran, J.C. 1989. Prediction of baking quality of bread wheat in breeding program by size exclusion high performance liquid chromatography. Cereal Chemistry, 66, 448-456.
- Damidaux, R., Autran, J.C., Grignac, P., Feillet, P. 1978. Mise en évidence de relations applicables en sélection entre l'électrophoregramme des gliadines et les propriétés viscoélastiques du gluten de *Triticum durum* Desf. Comptes Rendu de l'Académie. Sciences Séries D, 287, 701-704.
- Daniel, C., Triboï, E. 2002. Changes in wheat protein aggregation during grain development: effects of temperatures and water stress. European Journal of Agronomy, 16, 1–12.
- Delcour, J.A., Defloor, I., De-Geest, C., Schelkens, M., Martens, A. 1991. Emulsifiers and / or extruded starch for the production of breads from cassava. Cereal Chemistry, 68, 323–327.
- Delfrate, R., Stephan, C. 2005. Mieux connaître la farine : spécial analyses, les nouvelles de la boulangerie, 85p.
- Dexter, J.E., Marchylo, B.A., Clear, R.M., Clarke, J.M. 1997. Effect of *Fusarium* head blight on semolina milling and pasta-making quality of durum wheat. Cereal Chemistry, 74, 519–525.
- Dexter, J.E., Marchylo, B.A., Mac-Gregor, A.W., Tkachuk, R. 1989. The structure and protein composition of vitreous piebald and starchy durum wheat kernels. Journal of Cereal Science, 10, 19-32.
- Dexter, J.E., Williams, P.C., Edwards, N.M., Martin, D.G. 1988. The relationship between durum wheat vitreousness, kernel hardness and processing quality. Journal of Cereal Science, 7, 169-181.
- Djermoun, A. 2009. La production céréalière en Algérie. Les principales caractéristiques. Revue Nature et technologie, 1, 45-53.
- Doekes, G.J., Wennekes, L.M.J. 1982. Effect of nitrogen fertilization on quantity and composition of wheat flour protein. Cereal Chemistry, 59, 276 – 278.

- Don, C., Lookhart, G., Naeem, H., MacRitchie, F., Hamer, R.J. 2005. Heat stress and genotype affect the glutenin particles of the gluteninmacropolymer-gel fraction. *Journal of cereal science*, 42, 69–80.
- Dong, H., Sears, R.G., Cox, T.S., Hosenev, R.C., Lookhart, G.L., Shogren, M.D. 1992. Relationships between protein composition and Mixograph and loaf characteristics in wheat. *CerealChemistry*, 69, 132-136.
- D'Ovidio, R., Masci, S. 2004. The low-molecular-weight glutenin subunits of wheat gluten. *Journalof Cereal Science*, 39, 321-339.
- Dubois, M. 1996. Les farines: caractérisation des farines et des pâtes: dernier développement dans le domaine analytique. *Industrie des Céréales*, p97.
- DuPont, F.M., Altenbach, S., Chan, R., Cronin, K., Lieu, D. 2000. In: Shewry, P.R., Tatham, A.S. (Eds.), *Interactions between Fertilizer, Temperature and Drought in Determining Flour Composition and Quality for Bread Wheat*, Gluten Royal Society of Chemistry, Cambridge, 488 – 491.
- DuPont, F.M., Altenbach, S.B. 2003. Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *Journal of Cereal Science*, 38, 133-146.
- DuPont, F.M., Chan, R., Altenbach, S., Hurkman, W.J., Tanaka, C.K. 1998. Effect of heat stress on flour composition and quality for several American bread wheats. In: Slinkard, A.E., (Ed.), *Proceed-ings of the 9th International Wheat Symposium*, UniversityExtension Press, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatch-ewan, 16 – 17
- DuPont, F.M., Hurkman, W.J., Tanaka, C.K., Chan, R. 1998. BiP, HSP70, NDK and PDI in wheatendosperm. I. Accumulation of mRNA and protein during grain development. *PhysiologiaPlantarum*, 103, 70-79.
- Dupont, M.F., Altenbach, B.S. 2003. Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *Journal of Cereal Science*, 38, 133-146.
- Edwards, N.M., Gianibelli, M.C., McCaig, T.N., Clarke, J.M., Ames, N.P., Larroque, O.R., Dexter, J.E. 2007. Relationships between dough strength, polymeric protein quantity and composition for diverse durum wheat genotypes. *Journal of Cereal Science*, 45, 140-149.

- Edwards, N.M., Gianibelli, M.C., McCaig, T.N., Clarke, J.M., Ames, N.P., Larroque, O.R., Dexter, J.E. 2007. Relationships between dough strength polymeric protein quantity and composition for diverse durum wheat genotypes. *Journal of Cereal Science*, 45, 140-149.
- Edwards, N.M., Scanlon, M.G., Mulvaney, S.J., Dexter, J.E. 2003. The role of gluten and its components in determining durum wheat semolina dough viscoelastic properties. *Cereal Chemistry*, 80, 755-763.
- Egli, D.B. 1998. *Seed Biology and the Yield of Grain Crops*, CAB International, New York.
- El-Yamlahi, A., Salghi, R., Ouhsine, M. 2014. Quality study of cooked and dried barley semolina International. *Journal of Engineering Inventions*, 4, 31-44.
- Evers, A.D. 1970. Development of the endosperm of wheat. *Annals of Botany*, 34, 547-555.
- Ewart, J.A.D. 1979. Glutenin structure. *Journal of the Science and Food Agriculture*, 30, 482-492.
- Feillet, P. 1980. Wheat protein evaluation measurement of wheat quality in recent progress in cereal chemistry and technology, Ed Academy press New york, 198-200.
- Ferrise, R., Bindi, M., Martre, P. 2015. Grain filling duration and glutenin polymerization under variable nitrogen supply and environmental conditions for durum wheat. *Field Crops Research*, 171, 23–31.
- Feuillet, P. 2000. *Grain de blé : composition et utilisation* édition INRA : Institut National de la recherche agronomique, Paris, p308.
- Field, J., Shewry, P.R., Mifflin, B.J. 1983. Solubilization and characterization of wheat gluten proteins; correlations between the amount of aggregated proteins and baking quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 34, 370-378.
- 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. *European Journal of Agronomy*, 33, 197-207.
- Fu, B.X., Sapirstein,, H.D. 1996. Procedure for isolating monomeric proteins and polymeric gluténins of wheat flour. *Cereal chemistry*, 73,143-152.
- Galili, G., Tang, G., Zhu, X., Gakiere, B. 2001. Lysine catabolism: a stress and development super-regulated metabolic pathway. *Current Opinionin Plant Biology*, 4, 261 – 266.

- Galterio, G., Biancolatte, E., Autran, J.C. 1987. Proteins deposition in developing durum wheat. Implications in technological quality. *GeneticaAgraria*, 41, 461-480.
- Gerba, L., Belay, G., Worku, W. 2013. Nitrogen fertilization effects grain quality of durum wheat (*Triticumturgidum*L.Var.Durum) varieties in central Ethiopia. *Journal of Agricultural Science*, 1, 1-7.
- Godon, B., Willm, C. 1998. Les industries de première transformation des céréales. Tec et Doc Lavoisier, Paris, p 680.
- Godon, P., Loisei, W. 1997. Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales (Collection STAA, 2^oEd), Tec et Doc. Lavoisier, 819p.
- Gómez, A., Ferrero, C., Calvelo, A., Añón, M.C., Puppo, M.C. 2011. Effect of mixing time on structural and rheological properties of wheat flour dough for breadmaking. *International Journal of Food properties*, 14, 583-597.
- Gooding, M. 2017. The effect of growth environment and agronomy on grain quality. In *Cereal Grains. 2nd Ed. Assessing and Managing Quality*: 493-510.
- Gooding, M.J., Ellist, R.H., Shewry, P.R., Schofield, J.D. 2003. Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of cereal science*, 37, 295-309.
- Graveland, A., Bongers, P., Bosveld, P. 1979. Extraction and fractionation of wheat flour proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 30, 71-84.
- Guezlane, L. 1993. Mise au point de méthodes de caractérisation et étude des modifications physico-chimiques sous l'effet des traitements hydrothermiques en vue d'optimiser la qualité du couscous de blé dur. Thèse de Doctorat d'Etat. INA, El Harrach, Algérie. p89.
- Guignard, J.L. 1996. *Biochimie végétale*. Ed. Masson, Paris, 255p.
- Gupta, R.B., Batey, I.L., Mac-Ritchie, F. 1992. Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours. *Cereal Chemistry*, 69, 125-131.
- Gupta, R.B., Khan, K., Macritchie, F. 1993. Biochemical basis of flour properties in bread wheat. Effect of variation in the quantity and size distribution of polymeric protein. *Journal of cereal science*, 18, 23-41.
- Gupta, R.B., Mac-Ritchie, F. 1991. A rapid one-step one-dimensional SDS-PAGE procedure for analysis of subunit composition of glutenin in wheat. *Journal of Cereal Science*, 14, 105-109.

- 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. *Journal of Experimental Botany*, 47, 1377-1385.
- Guttieri, M.J., Stark, J.C., O'Brien, K., Souza, E. 2001. Relative sensitivity of spring wheat grain yield and quality parameters to moisture deficit. *Crop Science*, 41, 327-335.
- Guzman, C., Autrique, J.E., Mondal, S., Singh, R.P., Govindan, V., Morales-Dorantes, A., Pena, R.J. 2016. Response of drought and heat stress on wheat quality, with spacial amphiploidy on bread making quality, in durum wheat. *Field crop research*, 186, 157-165.
- Hemery, Y., Rouau, X., Lullien-Pellerin, V., Barron, C., Abecassis, J. 2007. Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality, *Journal of Cereal Science*, 46, 327-347.
- Herman, E., Larkins, B.A. 1999. Protein storage bodies and vacuoles. *The plant Cell*, 11, 601-613.
- Houliaropoulos, S., Abecassis, J., Autran, J.C. 1981. Produits de mouture de blé dur: coloration et caractéristiques culinaires. *Ind. Céréales*, N°2-3, 333-342.
- ICC-International Association of Cereal Chemistry.: Standard method ICC numéro 129. Méthode de détermination de la vitrosité du blé dur (1980).
- Islas-Rubio, A.R., Chavez-Quiroz, K., Vasquez-Lara, F., Silva-Espinoza, B., Granados-Nevarez, M.D.C., Gonzalez-Rio, H., Camacho-Casas, M. 2011. Effect of split application of urea on protein size distribution, physical dough properties, and baking performance of five experimental bread wheat lines. *Agricultural Science*, 2, 181-190.
- Islas-Rubio, A.R., Chávez-Quiroz, K., Vásquez-Lara, F., Silva-Espinoza, B., del Carmen Granados-Neárez, M., Gonzalez-Ríos, H., Camacho-Casas, M. 2011. Effect of split applications of urea on protein size distribution, physical dough properties, and baking performance of five experimental bread wheat lines. *Agricultural Sciences*, 2, 181-190.
- Jamieson, P.D., Martre, M., Samoïl, V., Porter, J.R., Zyskowski, R.L., Semenov, M., Triboi, E. 2004. Modelling protein content and composition in wheat. In *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress Brisbane, Australia, 26 Sep–1 Oct.*

- Jamieson, P.D., Stone, P.J., Semenov, M.A. 2001. Towards modeling quality in wheat from grain nitrogen concentration to protein composition. *Aspects of Applied Biology*, 64,111-126.
- Jeantet, R., Croguennec, T., Schuck, P., Brule, G. 2007. *Sciences des aliments : biochimie, microbiologie, procédés, produits*, Ed. Lavoisier Tec & Doc, Paris, 443p.
- Jia, Y.Q., Fabre, J-L., Aussenac, T. 1996. Effects of growing location on response of protein polymerization to increased nitrogen fertilization for the common wheat cultivar Soissons: relationship with some aspects of the bread making quality. *Cereal Chemistry*, 73, 526 – 532.
- Johansson, E., Oscarson, P., Heneen, W.K., Lundborg, T. 1994. Differences in accumulation of storage proteins between wheat cultivars during development. *Journal of Science Food Agriculture*, 64, 305-313.
- Johansson, E., Prieto-Linde, M.L., Jönsson, J.Ö. 2001. Effects of wheat cultivar and nitrogen application on storage protein composition and bread making quality. *Cereal Chemistry*, 78, 19-25.
- Kasarda, D.D. 1989. Glutenin structure in relation to wheat quality. In: *Wheat is unique*, Pomeranz Y, ed. St Paul, MN: AACC, 277-302.
- Kasarda, D.D., Bernardin, J.E., Nimmo, C.C. 1976. *Advances in cereal science and technology*, Vol 1 (St. Paul, Minnesota, American Association of Cereal Chemists).
- Kaup, S.M., Walker, C.E. 1986. Couscous in North Africa. *Cereal Foods World*, 31, 179-182.
- Kauzmann, W.J., Eyring, H. 1940. The viscous flow of large molecules. *Journal of American Chemical Society*, 62, 3113-3125.
- Kent, N., L., Evers, A.D. 1994. *Technology of Cereals*, 4th Edition. Pergamon Press, Oxford.
- Kent, N.L., Evers, A.D. 1994. *Technology of Cereals*. Oxford: Pergamon Press Ltd.
- Khan, K., Bushuk, W. 1979. Studies of glutenin. XII. Comparison of sodium dodecyl sulphate-polyacrylamide gel electrophoresis of unreduced and reduced glutenin from various isolation and purification procedures. *Cereal Chemistry*, 56, 63-68.
- Khatkar, B.S., Fido, R.J., Tatham, A.S., Schofield, J.D. 2002. Functional properties of wheat gliadins. I. Effects on mixing characteristics and bread making quality. *Journal of Cereal Science*, 35, 299-306.

- Kim, W.T., Franceschi, V.R., Krishnan, H.B., Okita, T.W. 1988. Formation of wheat protein bodies: involvement of the Golgi apparatus in gliadin transport. *Planta*, 176, 173-182.
- Kling, C.I., Ut, H.F., Munzing, K. 2000. Variation of quality traits in durum wheat in relation to variety and environment. In, *Durum wheat, semolina and pasta quality*. INRA Editions, 61-65.
- Kruger, J.E. 1976. Changes in the polyphenoloxidase soft wheat during kernel growth and maturation. *Cereal Chemistry*, 201-213.
- Kuktaite, R., Johansson, E., Juodeikiene, G. 2000. Composition and concentration of proteins in Lithuanian wheat cultivars: relationships with bread-making quality. *Cereal Research Communications*, 28, 195-202.
- Labuschagne, M.T., Elago, O., Koen, E. 2009. Influence of extreme temperatures during grain filling on protein fractions, and its relationship to some quality characteristics in bread, biscuit, and durum wheat. *Cereal Chemistry*, 86, 61–66.
- Larroque, O.R., Gianibelli, M.C., Batey, I.L., MacRitchie, F. 1996. Identification of elution subfractions from the first peak in SE-HPLC chromatograms of wheat storage protein. Paper presented at: 6th International Gluten Workshop, Cereal Chemistry division, Royal Australian Chemical Institute (North Melbourne, Australia).
- Lending, C.R., Larkins, B.A. 1989. Changes in the zein composition of protein bodies during maize endosperm development. *Plant Cell*, 1, 1011-1023.
- Létang, C., Piau, M., Verdier, C. 1999. Characterization of wheat flour-water doughs. Part I: rheometry and microstructure. *Journal of Food Engineering*, 41, 121-132.
- Levanony, H., Rubin, R., Altschuler, Y., Galili, G. 1992. Evidence for a novel route of wheat storage proteins to vacuoles. *The Journal of Cell Biology*, 119, 1117-1128.
- Lew, E.J.L., Kuzmickiy, D.D., Kasarda, D.D. 1992. Characterization of low molecular weight glutenin subunits by Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography, Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis, and N-Terminal amino acid sequencing. *Cereal Chemistry*, 69, 508-515.
- Li, X., Wu, Y., Zhang, D-Z., Gillikin, J.W., Boston, S.R., Franceschi, V.R., Okita, T.W. 1993. Rice prolamine protein body biogenesis: a BiP-mediated process. *Science*, 262, 1054 – 1056.

- Li, X., Zhang, D., Gillikin, J., Boston, R., Franceschi, V., Okita, T. 1993. Rice prolamins protein body biogenesis: a BIP-mediated process. *Science*, 262, 1054-1056.
- Lindsay, M.P., Skerritt, J.H. 1999. The glutenin macropolymer of wheat flour doughs: structure-function perspectives. *Trends in Food Science and Technology*, 10, 247-253.
- Lindsay, M.P., Skerritt, J.H. 2000. Immunocytochemical localisation of gluten proteins uncovers structural organization of glutenin macropolymer. *Cereal Chemistry*, 77, 360-369.
- Loussert, C., Popineau, Y., Mangavel, C. 2008. Protein bodies ontogeny and localization of prolamin components in the developing endosperm of wheat caryopses. *Journal of Cereal Science*, 47, 445-456.
- Mac-Ritchie, F. 1984. Baking quality of wheat flours. *Advances in Food Nutrition Research*, 29, 201-277.
- Mac-Ritchie, F. 1998. Reversibility of protein adsorption. *In Proteins at liquid interfaces*, D. Moebius and R. Miller, ed. (Amsterdam, the Netherlands, Elsevier Science B.V.), 149- 177.
- MacRitchie, F. 1999. Wheat proteins: characterization and role in flour functionality. *Cereal Foods World*, 44, 188–193.
- Mac-Ritchie, F., Kasarda, D.D., Kuzmicky, D.D. 1991. Characterization of wheat protein fractions differing in contributions to bread making quality. *Cereal Chemistry*, 68, 122-130.
- Mac-Ritchie, F., Singh, H. 2004. Polymer concepts applied to gluten behavior in dough. Paper presented at: 8th Gluten Workshop, 8-10 September, 2003 (Viterbo, Italy).
- Madaras, M., Mayerová, M., Kumhalova, J., Lipavský, J. 2018. The influence of mineral fertilisers, farmyard manure, liming and sowing rate on winter wheat grain yields. *Plant, Soil and Environment*, 64, 38–46.
- Martinant, J. P., Nicolas, Y., Bouguennec, A., Popineau, Y., Saulnier, L., Branlard, G. 1998. Relationships Between Mixograph Parameters and Indices of Wheat Grain quality. *Journal of Cereal Science*, 27, 179-189.
- Masci, S., Lafiandra, D., Porceddu, E., Lew, E.J.L., Tao, H.P., Kasarda, D.D. 1993. D-glutenin subunits–Nterminal sequences and evidence for the presence of cysteine. *Cereal Chemistry*, 70, 581-585.

- Mebtouche, K. 1998. Caractérisation technologique de quelques lignées de blé dur. Céréaliculture. Revue technique et scientifique de l'ITGC, 32, 27-23.
- Mezroua, L. 2011. Etude de la qualité culinaire de quelques couscous industriels et artisanaux et effet d'adjonction de la matière grasse durant la cuisson. Thèse de Magister en Sciences Alimentaires, option : Technologies Alimentaires, INATAA. Université de Constantine, 117 p.
- Miyan, M. S., Impiglia, A., Anderson, W.K. 2011. Agronomic practices for durum wheat in an area new to the crop. Communications in biometry and crop science, 6, 64-79.
- Morel, M.H., Autran, J.C. 1990. Separation of durum wheat proteins by ultra-thin IEF: a new tool for the characterization and quantification of low-molecular-weight glutenins. Electrophoresis, 11, 392-399.
- Muller, S., Knudsen, S. 1993. The nitrogen response of a barley C-hordein promoter is controlled by positive and negative regulation of the GCN4 and endosperm box. The Plant Journal, 4, 343 – 355.
- Multon, J.L. 1982. Conservation et stockage des grains et produits dérivés. Ed. Tec et doc, Lavoisier, Paris.
- Nachit, M.M., Baum, M., Impiglia, A., Ketata, H. 1995. Studies on some grain quality traits in durum wheat grown in Mediterranean region. In: di Fonzo, N., Kaan, F., Nachit, M. (Eds.), Proceedings of the Seminar on Durum Wheat Quality in the Mediterranean Region. Options Méditerranéennes. 22, 181–187.
- Nakkoul, Rihawi, 1988. Nouvelles possibilités d'apprécier la valeur pastière du blé dur. Industrie des céréales, 70, 14-26.
- Nelson, D.L., Cox, M.M. 2003. Amino acids, peptides and proteins. *In Principles of biochemistry* (New York, Worth publishers), 115-153.
- Olsen, O.A. 2001. Endosperm development: cellularization and cell fate specification. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 52, 233-267.
- Olsen, O.A., Linnestad, C., Nichols, S.E. 1999. Developmental biology of the cereal endosperm. Trends in Plant Science, 4, 253-257.
- Panozzo, J.F., Eagles, H.A., Cawood, R.J., Wootton, M. 1999. Wheat spike temperatures in relation to varying environmental conditions. Australian Journal of Agricultural Research, 50, 997-1005.

- Panozzo, J.F., Eagles, H.A., Wootton, M. 2001. Changes in protein composition during grain development in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52, 485-493.
- Panozzo, J.F., Eagles, H.A., Wootton, M. 2001. Changes in protein composition during development in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52, 485–493.
- Parker, G.D., Chalmers, K.L., Rathjen, A.J., Langridge, P. 1998. Mapping loci associated with flour colour in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 97, 238-245.
- Parker, M.L., Mills, E.N.C., Morgan, M.R.A. 1990. The potential of immuno-probes for locating storage proteins in wheat endosperm and bread. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 52, 35-45.
- Payne, P., Holt, L., Jakson, A. 1984. The association between gliadin 45 and gluten strength in durum wheat varieties: A direct causal effect or the result of genetic linkage. *Journal of Cereal Science*, 2, 73-81.
- Payne, P.I., Corfield, K.G. 1979. Subunit composition of wheat glutenin proteins, isolated by gel filtration in a dissociating medium. *Planta*, 145, 83-88.
- Payne, P.I., Nightingale, M.A., Krattiger, A.F., Holt, L.M. 1987. The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of british-grown wheat varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 40, 51-65.
- Pernollet, J.C., Camilleri, C. 1983. Formation and development of protein bodies in the wheat endosperm. *Physiologie Végétale*, 21, 1093-1103.
- Plessis, A., Ravel, C., Bordes, J., Balfourier, F., Martre, P. 2013. Association study of wheat grain protein composition reveals that gliadin and glutenin composition are trans-regulated by different chromosome regions. *Journal of experimental botany*, 64, 3627–3644.
- Pomeranz, Y. 1965. Dispersibility of wheat proteins in aqueous urea solutions – New parameter to evaluate bread-making potentialities of wheat flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 16, 586-593.
- Pomeranz, Y. 1988. Chemical composition of kernel structures. In: *Wheat: Chemistry and Technology*, Pomeranz Y, ed. Vol. 4. St. Paul, MN: AACC, 97-158.

- Pompa, M., Giuliani, M.M., Giuzio, L., Gagliardi, A., Di Fonzo, N., Flagella, Z. 2009. Effect of sulphur fertilization on grain quality and protein composition of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Italian Journal of Agronomy*, 4, 159-170.
- Popineau, Y., Cornec, M., Lefebvre, J., Marchylo, B. 1994. Influence of high Mr glutenin subunits on glutenin polymers and rheological properties of glutens and gluten subfractions of nearisogenic lines of wheat Sicco. *Journal of Cereal Science*, 19, 231-241.
- Ramunè, K. 2004. Protein Quality in Wheat: Changes in Protein Polymer Composition during Grain Development and Dough Processing .Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences. Alnarp, p40.
- Randall, P.J., Moss, H.J. 1990. Some effects of temperature regime during grain filling on wheat quality. *Australian Journal of Agricultural Research*, 41, 603 – 617.
- Rasper, V.F., Pico, M.L., Fulcher, F.G. 1986. Alveography in quality assessment of soft white winter wheat cultivars. *Cereal Chemistry*, 63, 560-567.
- Richard, G.M., Turner, P.F., Napier, J.A., Shewry, P.R. 1996. Transport and deposition of cereal prolamins. *Plant Physiology and Biochemistry*, 34, 237-243.
- Roussel, P., Chiron, H. 2005. Les pains français : évolution, qualité, production. Edition MAE ERTI, Paris, 171 – 172
- Royo, C., Elias, M.E., Manthey, F.A. 2009. Durum wheat breeding. In. *Handbook of plant breeding: Cereals*. Springer, 198-219.
- Rubin, R., Levanony, H., Galili, G. 1992. Evidence for the presence of two different types of protein bodies in wheat endosperm. *Plant Physiology*, 99, 718-724.
- Sabine, B. 2003. Fertilisation azotée de blé dur : Des progrès possibles, en respectant les bases. *Perspective Agricole*, N° 117, 158-160.
- Samson, M.F., Mabilie, F., Chéret, R., Abécassis, J., Morel, M.H. 2005. Mechanical and physicochemical Characterization of Vitreous and Mealy Durum Wheat Endosperm. *Cereal Chemistry*, 82, 81–87.
- Scherom, P., Martin, G., Bergoin, A., Autran, J.C. 1992. Influence of nitrogen fertilization on potential bread making of two wheat cultivar differing in their response to increasing nitrogen supplies. *Cereal Chemistry*, 69, 664-670.
- Shewry, P.R., Halford, N.G. 2002. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, 53, 947-958.

- Shewry, P.R., Halford, N.G., Belton, P.S., Tatham, A.S. 2002. The structure and properties of gluten: an elastic protein from wheat grain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 357, 133-142.
- Shewry, P.R., Tatham, A.S. 1997. Disulphide bonds in wheat gluten proteins. *Journal of Cereal Science*, 25, 207–27.
- Shewry, P.R., Tatham, A.S., Forde, J., Kreis, M., Mifflin, B.J. 1986. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of Cereal Science*, 4, 97-106.
- Shewry, P.R., Tatham, A.S., Halford, N.G. 2001. Nutritional control of storage protein synthesis in developing grain of wheat and barley. *Plant Growth Regulation*, 34, 105 – 111.
- Shorgen (1986). *The mixograph. Quality control seminar*, American institute of baking. Manhattan, Kansas.
- Simmonds, D.H., O'Brien, T.P. 1981. Morphological and biochemical development of the wheat endosperm. In: *Advances in Cereal Science and Technology*, Pomeranz Y, ed. Vol. IV. St. Paul, MN: AACC 5-70.
- Simões- Larraz –Ferreira, M. 2011. Dynamique d'assemblage des protéines de réserve et du remplissage du grain de blé dur. Thèse de doctorat en sciences agronomiques de Montpellier.
- Singh, H., MacRitchie, F. 2001. Application of polymer science to properties of gluten. *Journal of Cereal Science*, 33, 231-243.
- Sissons, M.J., Ames, N.P., Hare, R.A., Clarke, J.M. 2005. Relationship between glutenin subunit composition and gluten strength measurements in durum wheat. *Journal of the science of food and agriculture*, 85, 2445–2452.
- Sombrero, A., Monneveux, P. 1989. Le mitadinage chez le blé dur (*T. durum* Desf.): Influence de l'alimentation azotée et hydrique et de la variété. *Agr. Med.*, 11 9: 349-360.
- Stenram, U., Heneen, W.K., Skerritt, J.H. 1991. Immunocytochemical localization of wheat storage proteins in endosperm cells 30 days after anthesis. *Journal of Experimental Botany*, 42, 1347–1355.
- Surget, A., Barron, C. 2005. Histologie du grain de blé. *Industrie des céréales*, 3-7.
- Surma, M., Adamski, T., Banaszak, Z., Kaczmarek, Z., Kuczyńska, H., Majcher, M., ...& Krystkowiak, K. 2012. Effect of genotype, environment and their interaction on

- quality parameters of wheat breeding lines of diverse grain hardness. *Plant Production Science*, 15, 192-203.
- Tabe, L., Hagan, N., Higgins, T.J.V. 2002. Plasticity of seed protein composition in response to nitrogen and sulfur availability. *Current Opinion in Plant Biology*, 5, 212 – 217.
 - Tatham, A.S., Field, J.M., Smith, S.J., Shewry, P.R. 1987. The conformations of wheat gluten proteins, II, aggregated gliadins and low molecular weight subunits of glutenin. *Journal of Cereal Science*, 5, 203-214.
 - Tatham, A.S., Shewry, P.R. 1995. The S-poor prolamins of wheat, barley and rye. *Journal of Cereal Science*, 22, 1 – 1.
 - Tea, I., Genter, T., Nault, N., Morvan, E., Kleiber, D. 2003. Isotopic study of post anthesis foliar incorporation of sulphur and nitrogen in wheat. *Isotopes Environmental and Health Studies*, 39, 289–300.
 - Tosi, P., Parker, M., Gritsch, C.S., Carzaniga, R., Martin, B., Shewry, P.R. 2009. Trafficking of storage proteins in developing grain of wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60, 979-991.
 - Trentesaux, E. 1992. Evaluation de la qualité du blé dur. In: Fonzo N, Kaan F. et Nachit M. Durum wheat quality in the Mediterranean region. *Option Méditerranéennes, Série A, n° 22 CIHEAM-IAMZ*.
 - Triboï, E., Abad, A., Michelena, A., Lloveras, J., Ollier, J. L., Daniel, C. 2000. Environmental effects on the quality of two wheat genotypes: 1. quantitative and qualitative variation of storage proteins. *European Journal of Agronomy*, 13, 47-64.
 - Triboi, E., Abad, A., Michelina, A., Lloveras, J., Ollier, J.L., Daniel, C. 2000. Environmental effects on quality of two wheat genotypes: quantitative and qualitative variation of storage proteins. *European Journal of Agronomy*, 13, 47-64.
 - Triboï, E., Martre, P., Triboï-Blondel, A. 2003. Environmentally-induced changes in protein composition in developing grains of wheat are related to changes in total protein content. *Journal of Experimental Botany*, 54, 1731-1742.
 - Uthayakumaran, S., Lafiandra, D., Gianibelli, M.C. 2004. Evaluation of durum wheat quality using micro-scale and basic rheological tests; *in* The proceedings of the 8th gluten workshop, 8-10 septembre 2003. Viterbo (Italy). *The gluten proteins*. Cambridge, the Royal Society of Chemistry, 192-195

- Wall, J.S. 1979. The role of wheat proteins in determining baking quality. In: *Recent Advances in the Biochemistry of Cereals*, Laidman DL, Jones RGW, eds. New York: Academic Press, 275-311.
- Wardlaw, I.F., Blumenthal, C., Larroque, O., Wrigley, C.W. 2002. Contrasting effects of chronic heat stress and heat shock on kernel weight and flour quality in wheat. *Functional Plant Biology*, 29, 25-34.
- Wardlaw, I.F., Blumenthal, C., Larroque, O., Wrigley, C.W. 2002. Contrasting effects of chronic heat stress and heat shock on kernel weight and flour quality in wheat. *Functional Plant Biology*, 29, 25–34.
- Weegels, P.L., Hamer, R.J., Schofield, J.D. 1996. Critical review: functional properties of wheat glutenin. *Journal of cereal science*, 23, 1–18.
- William, S., Harmein, F., Nakhoul, H., Rihaur, S. 1988. Crop quality evaluation methods and guidelines. Second edition. Mai, 13-16.
- Wrigley, C.W. 1996. Giant proteins with flour power. *Nature*, 381, 738-739.
- Wrigley, C.W., Bietz, J.A. 1988. Proteins and amino acids. *Wheat Chemistry and Technology* eYP, ed. Vol. I. St Paul, MN: AACC, 159-275.
- Wrigley, C.W., Du-Cros, D.L., Fullington, J.G., Kasarda, D.D. 1984. Changes in polypeptide composition and grain quality due to sulfur deficiency in wheat. *Journal of Cereal Science*, 2, 15 – 24.
- Yettou, N., 1998. Les méthodes instrumentales d’appréciation de la qualité culinaire du couscous de blé dur .Mémoire Magister. IN.A. Al Harrach .Alger.
- Yettou, N., Guezlane, L., Ounane, G. 2000. Mise au point d’une méthode instrumentale d’évaluation de la délitescence du couscous de blé dur. Actes du 1^{er} symposium de blé : enjeux et stratégie, Alger, 7-8.
- Zhao, F.J., Salmon, S.E., Withers, P.J.A., Monaghan, J.M., Evans, E J., Shewry, P.R., Mcgrath, S.P. 1999. Variation in bread making quality and rheological properties of wheat in relation to sulfur nutrition under field conditions. *Journal of Cereal Science*, 30, 19-31.
- Zhu, J., Khan, K. 2001. Effects of genotype and environment on glutenin polymers and breadmaking quality. *Cereal Chemistry*, 78, 125–130.

Annexe 1
Schéma du dispositif expérimental.

Bloc 4	V4N2	V4N0	V4N3	V4N1	V2N0	V2N2	V2N3	V2N1	V3N1	V3N3	V3N0	V3N2	V1N3	V1N1	V1N0	V1N2
Bloc 3	V2N2	V2N0	V2N3	V2N1	V1N0	V1N2	V1N3	V1N1	V3N1	V3N3	V3N0	V3N2	V4N3	V4N1	V4N0	V4N2
Bloc 2	V1N2	V1N0	V1N1	V1N3	V4N2	V4N3	V4N1	V4N0	V3N0	V3N3	V3N2	V3N1	V2N0	V2N3	V2N1	V2N2
Bloc 1	V3N2	V3N1	V3N3	V3N0	V1N2	V1N1	V1N3	V1N0	V4N2	V4N1	V4N3	V4N0	V2N2	V2N1	V2N3	V2N0

Annexe 2

Table de correspondance de quantité d'eau à ajouter en fonction du taux de protéines pour le mixoprogramme .Université américaine du Nord DACOSTA Station expérimentale d'agriculture (Département de technologie des céréales, 1987).

Teneur en protéine (%) de la semoule	Quantité d'eau à ajouter (ml)	Teneur en protéine (%) de la semoule	Quantité d'eau à ajouter (ml)
16	6,6	11,4	6,14
15,5	6,55	11,3	6,13
15	6,5	11,2	6,12
14,5	6,45	11,1	6,11
14	6,4	11	6,1
13,5	6,35	10,9	6,09
13	6,3	10,8	6,08
12,9	6,29	10,7	6,07
12,8	6,26	10,6	6,06
12,7	6,27	10,5	6,05
12,6	6,26	10,4	6,04
12,5	6,25	10,3	6,03
12,4	6,24	10,2	6,02
12,3	6,23	10,1	6,01
12,2	6,22	10	6,0
12,1	6,21		
12	6,2		
11,9	6,29		
11,6	6,18		
11,7	6,17		
11,6	6,16		
11,5	6,15		

Annexe 3

Echelle de classement des indices colorimétrique(Houliaropoulos et al.,1981)

Indice	Valeur	Classification
IJ	> 35	Elevé
	28 - 35	Moyen
	< 28	Faible
IB	> 21	Elevé
	18 - 21	Moyen
	< 18	Faible

Annexe 4

Grille d'appréciation de la qualité des pains : la notation du pain dans la grille NF V03-716 (méthode AFNOR)

Interprétations observations et notes	insuffisance				excès				principe de calcul des notes	
	1	4	7	10	7	4	1			
Lissage									× 0,5 / 5	
Collant de la pâte									× 0,5 / 5	
Consistance										
Extensibilité									× 0,5 / 5	
Elasticité									× 0,5 / 5	
Relâchement									× 0,5 / 5	
PETRISSAGE									total= / 25 × coef (*) = / 25	
Pousse en cuve										
Détente : relâchement									× 1	
POINTAGE									total= / 10 / 10	
Allongement									× 0,5 / 5	
Déchirement									× 0,5 / 5	
Elasticité									× 0,5 / 5	
Collant de la pâte									× 1 / 10	
FACONNAGE									total= / 25 × coef (*) = / 25	
Activité fermentative									× 0,5 / 5	
Déchirement									× 0,5 / 5	
APPRET									total= / 10 / 10	
Collant de la pâte									× 1 / 10	
Tenue									× 2 / 20	
MISE AU FOUR									total= / 30 × coef (*) = / 30	
									total pâte / 100	
Volume des pains									total= / 30 / 30	
Section									× 1 / 10	
Couleur									× 2 / 20	
Epaisseur									× 0,5 / 5	
Croustillant									× 0,5 / 5	
Coup : Développement									× 1 / 10	
de : Régularité									× 1 / 10	
lame : Déchirement									× 1 / 10	
ASPECT DU PAIN									total = / 70 × coef (*) / 70 =	
									total pain / 100	
Couleur									× 1 / 10	
Texture : souplesse									× 1 / 10	
Elasticité									× 1 / 10	
Collant									× 1 / 10	
Alvéolage : régularité									× 1 / 10	
Epaisseur									× 1 / 10	
Flaveur									× 4 / 40	
ASPECT MIE									total mie / 100	
									Valeur boulangère / 300	

Annexe 5

Essai de panification

			
V₂N₀	V₂N₁	V₂N₂	V₂N₃
			
V₂N₀	V₃N₀	V₃N₁	V₃N₂
			
V₃N₀	V₃N₁	V₃N₂	V₃N₃

			
V₃N₁	V₄N₂	V₄N₃	V₄N₁
			
Pétrin	Division	V₄N₀	Pétrissage
			
Apprêt	V₂N₀	Aspect de la mie	V₃N₀
			
V₃N₃	Four	Cuisson	Mise en forme