

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté Agro-Vétérinaire

Département d'Agronomie

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Nutrition et transformation des aliments

**FORMULATION DE PAINS COMPOSITES A BASES DE MELANGES
DE FARINES DE DIFFERENTES CEREALES**

Par

Samira BENLEMMANE

Devant le jury composé de

L. BENHADJA	Maitre de conférences A, U. de Blida	Président
A. DOUMANDJI	Maitre de conférences A, U. de Blida	Examinatrice
A. HADJ ZIANE	Maitre de conférences A, U. de Blida	Examinatrice
D. AMALOU	Chargé de cours, U. de Blida	Invité
F. HANNANE	Professeur, U. de Blida	Invité
D. EL HADI	Maitre de conférences A, U. de Blida	Rapporteur

Blida, Janvier 2012

RESUME

Les propriétés boulangères de farines composites orge-blé, maïs-blé et orge-maïs-blé à différents pourcentages ont été étudiées. Des pains de bonnes qualités (texture, aspect extérieur, cohésion de la mie) et comparables au pain 100 % blé peuvent être obtenus jusqu'à 10 % d'incorporation d'orge et 20% de maïs pour les mélanges binaires et pour les mélanges ternaires composés jusque 10% de farine de maïs et 5% de farine d'orge donnent de très bons pains alors que les mélanges ternaires composés jusque 10% de farine d'orge et 5% de farine de maïs donneraient des pains de bonne qualité .

L'optimisation avec la méthode des plans d'expérience a fait ressortir les points qui un travail W intéressant pour les mélanges binaires : (95% blé tendre - 5% d'orge, $W=135.10^{-4}$), (95% blé tendre - 5% de maïs, $W=174.10^{-4}$), et pour les mélanges ternaires (90% blé tendre- 0,4% orge - 9.96% maïs, $W=158.10^{-4}$).

L'étude économique a démontré qu'une baisse de 3,3 % du prix de revient de la farine panifiable est relevée suite à l'incorporation de 0.4% de farine d'orge et 9.96% de farine de maïs.

Mots-clés. Orge, maïs, blé, plan d'expérience, mélanges, pain.

ABSTRACT

The properties composite bakers of flours barley-wheat, corn- wheat and barley-corn-wheat with various percentages were studied. Breads of good qualities (texture, appearance, cohesion of the crumb) and comparable with the bread 100% wheat can be obtained up to 10% of incorporation of barley and corn 20% for the binary mixtures and the ternary mixtures composed until 10% of cornstarch and 5% of barley flour give very good breads whereas the ternary mixtures composed until 10% of barley flour and 5% of cornstarch would give breads of good quality. Optimization with the method of the experimental designs emphasized the points which a work W interesting for the binary mixtures: (95% wheat - barley 5%, $W= 135.10^{-4}$), (95% wheat - 5% of corn, $W= 174.10^{-4}$), and for the ternary mixtures: (90% wheat -0, 4% barley - 9.96% corn, $W= 158.10^{-4}$). The economic study showed that a fall of 3,3% of the cost price of the flour suitable for making bread is raised following incorporation of 0.4% of flour of barley and 9.96% of cornstarch.

Key words. Barley, corn, wheat, experimental designs, mixtures, bread.

ملخص

خصائص عجينة الفريينة المتكونة من الشعير – القمح ، الذرى–القمح و الشعير –الذرى–القمح بنسب مختلفة هي موضوع هذه الدراسة . خبز بنوعية جيدة (الملمس،المظهر الخارجي ، تماسك اللب) و مماثلة لخبز 100% قمح تتحصل عليها حتى 10% من إضافة الشعير و 20% من إضافة الذرى في الخليط الثنائي و بنسبة للخليط الثلاثي المتكون من 10% من فريينه الذرى و 5% من فريينه الشعير يؤدي إلى خبز ذا نوعية جيدة في حين أن الخليط الثلاثي المتكون من 10% من فريينه الشعير و 5% من فريينه الشعير يؤدي إلى خبز ذا نوعية حسنة. إستعمال المخططات التجريبية سمحت لنا باستخراج نقاط ذات عمل (W) مهم بنسبة للخليط الثنائي (95%القمح-5% الشعير, $W=10.135-4$) (95%القمح-5%الذرى, $W=10.174-4$) و بنسبة للخليط الثلاثي (90القمح-4,0% الشعير-9,96% فريينه الذرى, $W=10.158-4$) . الدراسة الاقتصادية أظهرت إنخفاض بنسبة 3,3% من سعر تكلفة فريينه الخبز عند إضافة 0,4% فريينه الشعير و 9,96% فريينه الذرى.

الكلمات الأساسية : الشعير، الذرى،قمح، المخططات التجريبية ، المخططات التجريبية ، الخبز

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement mon promoteur, le Docteur D. EL HADI pour m'avoir encadré et guidé tout le long de ce travail et pour les nombreux conseils, les informations et la bibliographie qu'il m'a fournies.

Je suis très sensible à l'honneur que me fait Mme. L. BOUTEKRABT maître de conférences au département d'agronomie, en acceptant de présider le jury.

Je remercie chaleureusement Mme .A. DOUMANDJI maître de conférences au département d'agronomie pour avoir accepté d'être parmi les membres de jury.

J'exprime aussi ma profonde gratitude à Mme A. Hadj Ziane, pour avoir accepté de faire partie du jury.

J'adresse mes sincères remerciements à M J. Amalou, chargé de cours au département d'agronomie pour son aide et ses orientations et M. F. HANNANE professeur au département de mathématique pour avoir accepté d'être présents dans ma soutenance.

Mes vifs, et sincères remerciements s'adressent aux responsables de l'OAIC et les cadres de la société MOLITELL.

J'adresse mes salutations à tout le staff administratif, pédagogique, technique et sécuritaire du département d'agronomie de l'université de Blida.

Je tiens enfin à présenter mes remerciements les plus chaleureux à ma famille, mes amis et mes collègues pour leur soutien moral.

TABLE DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION	
1. LES CEREALES	13
1.1. Introduction	16
1.2. Importance des céréales	16
1.3. Evolution du taux de dépendance	19
1.4. Le blé ou froment (<i>triticum aestivum</i>)	20
1.5. L'orge	26
1.6. Le maïs	35
2. LA PANIFICATION	44
2.1. Introduction	44
2.2. Définition du pain de consommation courante	44
2.3. Ingrédients de base de pain	45
2.4. L'usage des améliorants	46
2.5. Procédé de panification	47
2.6. Produit fini	56
3. PLANS D'EXPERIENCES	60
3. METHODES ET MATERIELS	67
3.1. Objectif de cette étude	67
3.2. Démarche expérimentale	67
3.3. Matériels	67
3.4. Méthodes	69
4. RESULTATS ET DISCUSSIONS	79
4.1. Résultats et interprétations des analyses physico-chimiques des	79

grains de blé tendre, orge et maïs	
4.2. Résultats et interprétations des analyses physico-chimiques	84
des	
farines	90
4.3. Résultats et interprétations des analyses microbiologiques	92
des	100
farines	105
4.4. Résultats et interprétations des analyses des mélanges	112
binaires	113
4.5. Résultats et interprétations des analyses des mélanges	127
ternaires	
4.6. Test de panification	
4.7. Etude économique	
4.8. Plan d'expérience	
4.9. Optimisation	
CONCLUSION	
APPENDICE	
A. Liste des symboles et des abréviations	
B. Protocoles expérimentaux	
C. Grilles de notation, Tableaux de structure de prix de revient des farines	
REFERENCES	

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Evolution de la production des céréales (blés et orge) en Algérie par période quinquennale (U=1000 Tonne)	19
Figure 1.2	Les différents tissus du grain de blé	21
Figure 1.3	Les protéines de réserve du grain de blé	22
Figure 1.4	Schéma générale de la mouture de blé tendre	24
Figure 1.5	Coupe transversale d'un grain d'orge	28
Figure 1.6	Le bilan mondial du maïs (MT)	36
Figure 1.7	Répartition mondiale de la production de maïs grain (MT) en 2008	37
Figure 1.8	Coupe longitudinale de grain de maïs	40
Figure 2.1	Les échanges de liaisons –S-S- à partir des groupes –SH libres	49
Figure 2.2	Pétrin à axe oblique VMI	50
Figure 2.3	Pétrin à axe spirale VMI	50
Figure 2.4	Schéma de dégradation de l'amidon	52
Figure 2.5	Transformation pendant la cuisson du pain	55
Figure 3.1	Le domaine de variation d'un facteur	61
Figure 3.2	Représentation d'un espace expérimental	62
Figure 4.1	Les étapes du diagramme de panification	72
Figure 5.1	Appréciation manuelle de la qualité d'une pâte lors du pétrissage	106
Figure 5.2	comparaison des pains composites à différents pourcentage de (blé tendre, orge et maïs)	111
Figure 5.3	Structure de la mie des pains composites à différents pourcentage de (blé tendre, orge et maïs)	111

Figure 5.4	Position des mélanges pour l'indice de chute dans le domaine expérimental	114
Figure 5.5	Position des mélanges pour le travail dans le domaine expérimental	114
Figure 5.6	Variation du travail en fonction du pourcentage massique du Blé tendre pour le mélange binaire Blé tendre - Orge	117
Figure 5.7	Variation du travail en fonction du pourcentage massique de l'Orge pour le mélange binaire Blé tendre - Orge	118
Figure 5.8	Variation du travail en fonction du pourcentage massique de Blé tendre pour le mélange binaire Blé tendre – Maïs	118
Figure 5.9	Variation du travail en fonction du pourcentage massique de Maïs	119
Figure 5.10	Variation de l'indice de chute en fonction du pourcentage massique de Blé tendre pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs	119
Figure 5.11	Variation de l'indice de chute en fonction du pourcentage massique d'Orge pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge – Maïs	120
Figure 5.12	Variation de l'indice de chute en fonction du pourcentage massique de Maïs pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs	120
Figure 5.13	Variation du travail en fonction du pourcentage massique de blé tendre pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs	121
Figure 5.14	Variation du travail en fonction du pourcentage massique d'orge pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs	121
Figure 5.15	Variation du travail en fonction du pourcentage massique Maïs pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs	122

Figure 5.17	Variation des valeurs du travail prédites en fonction des valeurs observées pour le mélange binaire Blé tendre- Orge	124
Figure 5.18	Variation des valeurs du travail prédites en fonction des valeurs observées pour le mélange binaires Blé tendre- - Maïs	124
Figure 5.19	Variation des valeurs du travail prédites en fonction des valeurs observées pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge- Maïs	125
Figure 5.20	Variation des valeurs du travail prédites en fonction des valeurs observées pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge- Maïs	125
Figure 5.21	Variation du travail en fonction du pourcentage massique de farine de blé tendre et la farine d'orge	126
Figure 5.22	Variation du travail en fonction du pourcentage massique de farine de blé tendre et la farine de Maïs Courbes d'isoréponses de l'indice de chute pour le mélange ternaire blé tendre et la farine de Maïs	126
Figure 5.23	Courbes d'isoréponses de travail pour le mélange ternaire blé tendre et la farine de Maïs	127
Figure 5.24	Comparaison de quelques pains composites et des pains correspondants à un W optimum	129
Figure 5.25	Comparaison entre la structure des mies de quelques pains composites et celles des pains correspondants à un W optimum	129

Tableau 1.1	Classification des farines	25
Tableau 1.2	La composition biochimique de l'endosperme	29
Tableau 1.3	Comparaison entre composition biochimique des farines de blé et d'orge	32
Tableau 1.4	Quantité de nutriments dans la couche à aleurone de l'orge	35
Tableau 1.5	Composition chimique approchée des principales parties des grains de maïs (en pourcentage)	41
Tableau 4.1	Les caractéristiques techniques du principal matériel utilisé en panification	73
Tableau 4.2	La matrice d'expérience du plan D-optimal pour les mélanges binaire farine de Blé tendre-farine d'Orge. Le travail	76
Tableau 4.3	La matrice d'expérience du plan D-optimal pour les mélanges binaire farine de Blé tendre-farine de Maïs. Le travail	76
Tableau 4.4	La matrice d'expérience du plan D-optimal pour les mélanges ternaire. L'indice de chute	77
Tableau 4.5	La matrice d'expérience du plan D-optimal pour les mélanges ternaire. Le travail	77
Tableau 4.6	Les contraintes de la modélisation	78
Tableau 5.1	Résultats de recherche des impuretés des grains de blé tendre, d'orge et de maïs.	79
Tableau 5.2	Résultats des analyses physico-chimiques des grains de blé tendre, l'orge et de maïs	81
Tableau 5.3	Résultats des analyses physico-chimiques des farines de blé tendre, d'orge et de maïs	84
Tableau 5.4	Résultats des analyses microbiologiques effectuées sur les farines blé tendre, orge et maïs	90
Tableau 5.5	Résultats des analyses physicochimiques des mélanges binaires blé –orge	92

Tableau 5.6	Résultats des analyses physico-chimiques de mélanges binaires blé -maïs	93
Tableau 5.7	Résultats des analyses alvéographiques des mélanges binaires blé – orge	96
Tableau 5.8	Les résultats des analyses alvéographiques des mélanges binaires blé- maïs	96
Tableau 5.9	Résultats des analyses physico-chimiques des mélanges ternaires	100
Tableau 5.10	Les résultats d'analyse de l'indice de chute des mélanges ternaires	101
Tableau 5.11	Résultats du travail de déformation de la pâte (W) en (joules) des mélanges ternaires	102
Tableau 5.12	Résultats du gonflement (G) de la pâte en (cm ³) des mélanges ternaires	103
Tableau 5.13	Résultats de la ténacité de la pâte (P) en (mm) d'eau des mélanges ternaires	103
Tableau 5.14	Résultats l'extensibilité de la pâte (L) en (mm) des mélanges ternaires	104
Tableau 5.15	Les principaux critères d'appréciation de la pâte	105
Tableau 5.16	Essai de panification CNERNA, Appréciations des résultats	108
Tableau 5.17	Les appréciations des résultats des pains	109
Tableau 5.18	Les valeurs des coefficients des modèles	115
Tableau 5.19	Les valeurs de R ² et R ² ajusté	116
Tableau 5.20	Les appréciations des résultats des pains à un W optimum	128

INTRODUCTION

Le pain est l'aliment de base de nombreuses sociétés il apporte le tiers des calories dont l'homme a besoin, sa préparation met en œuvre des actions mécaniques, fermentaires et thermiques dans un ordre bien précis .

La place essentielle qu'occupe le pain dans une alimentation équilibrée a été démontrée et documentée par plusieurs études.

Les données obtenues encouragent une consommation variée de pains et plus importante qu'elle ne l'est actuellement. Consommer du pain permet d'augmenter la consommation de fibres et de glucides.

La farine provient principalement de céréales panifiables : blé et seigle. On peut y adjoindre, en quantité modérée des farines d'autre provenance : orge, maïs, châtaigne, noix... La qualité de la farine, dont les constituants majoritaires sont les protéines et l'amidon, joue un rôle déterminant dans les propriétés rhéologiques des pâtes et sur la qualité des produits céréaliers alvéolaires .

A coté des composants biochimiques, l'incorporation des ingrédients modifie considérablement les propriétés rhéologiques et technologiques des pâtes [1].

D'importants espoirs ont été placés dans l'utilisation des farines composites en boulangerie durant ces vingt dernières années dans les pays en développement. En effet, une substitution partielle de la farine de blé par celle de céréales locales telles l'orge et le maïs peut constituer une alternative intéressante en termes de coûts par rapport aux grains importés [2].

Plusieurs auteurs ont en effet travaillé sur le développement des farines composites dans lesquelles une partie de la farine de blé est remplacée par d'autres sources amylacées (Dendy *et al.*, 1973 ; Berthelot, 1990 ; Defloor, 1995). C'est dans cette optique que se situe ce travail qui a pour objectif la mise au point de pains à partir d'un mélange de farines de blé, d'orge et de maïs [2].

Céréale aux multiples usages l'orge fait partie de l'alimentation humaine depuis plusieurs milliers d'années, bien qu'elle soit relativement peu consommée dans notre quotidien. Aujourd'hui, elle a conservé certains de ces usages alimentaires, notamment en Afrique du Nord et dans certaines parties de l'Asie où l'on s'en sert pour faire un pain plat et une bouillie. En 2005, la FDA a ajouté l'orge à sa liste de sources éligibles de fibres solubles de type bêta-glucane [3].

Le maïs est l'un des suppléments potentiels pour la diète humaine. A côté de la richesse de ses grains en amidon, et protéines ainsi que les teneurs élevées en antioxydants naturels, la farine de maïs présente des caractéristiques rhéologiques acceptables [4].

Nos essais visent à formuler des pains à base de farine composée présentant des aspects nutritionnels et organoleptiques comparables avec ceux produits avec à base de farine de blé avec un prix de la baguette inférieur à celui de la baguette produite avec la farine de blé.

La finalité de notre travail est d'atténuer la dépendance vis-à-vis de l'extérieur et permettre de trouver des débouchés pour les céréales locales.

Dans ce contexte, les propriétés boulangères des farines composites orge-blé, maïs- blé et orge-maïs-blé seront étudiés afin d'obtenir des pains de bonne qualité, en utilisant la méthode des plans d'expériences. Cette méthode offre une meilleure organisation du travail, et une meilleure exploitation des résultats. Les essais réalisés sont ainsi de nombre limité, et choisis de façon à respecter certains critères de

qualité dans la modélisation. Le recours aux logiciels de plans d'expériences permet le choix judicieux de la séquence d'essais à réaliser et surtout un traitement plus exhaustif des résultats.

.

CHAPITRE 1 LES CEREALES

1.1. Introduction

Graminées cultivées, les céréales apparaissent à l'origine même de l'agriculture, plusieurs millénaires avant notre ère. Actuellement dans le monde, le blé est la céréale la plus cultivée et la plus consommée. En 1960, les pays industrialisés consommaient 63 % du blé produit dans le monde ; on prévoyait pour l'année 2000, que 60 % de cette production soient consommés par l'Afrique et l'Asie [5].

Les céréales appartiennent à la famille des poacées (Graminées). Cette famille regroupe l'avoine, le blé, le maïs, le millet, l'orge, le riz, le seigle et le sorgho. Le malt est de l'orge germé artificiellement, puis séché et transformé en farine ; il peut aussi être produit à partir du sorgho [6]. Bien que le terme « blé noir » s'applique au sarrasin, dont les grains sont très riches en amidon, celui-ci n'est pas une céréale : il fait partie de la famille des Polygonacées. Les Triticées regroupent le blé (*Triticum aestivum*), le blé dur (*Triticum durum*), le seigle (*Secale cereale*) et l'orge (*Hordeum leporinum*). Les Avénées comprennent entre autre l'avoine (*Avena sativa*). Le riz (*Oryza sativa*) représente la sous-famille des Oryzoidées. Enfin le maïs (*Zea mays*) fait partie des Tripsacées de la sous-famille des Panicoidées [7].

Les céréales sont des protéines végétales alimentaires. Les graines représentent la source essentielle des protéines de la farine de blé [8].

1.2. Importance des céréales

En Algérie, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Cette caractéristique est perçue d'une manière claire à travers toutes les phases de la filière.

La production des céréales, jachère comprise, occupe environ 80% de la superficie agricole utile (SAU) du pays, La superficie emblavée annuellement en céréales se situe entre 3 et 3,5 millions d'hectares. Les superficies annuellement récoltées représentent 63% des emblavures. Elle apparaît donc comme une spéculation dominante.

La Spéculation pratiquée par la majorité des exploitations 60% de l'effectif global, associé à la jachère dans la majorité des exploitations. Cette spéculation est présente dans tous les étages bioclimatiques, y compris dans les zones sahariennes.

En matière d'emploi, plus de 500 000 emplois permanents et saisonniers sont procurés par le système céréalier.

L'industrie de transformation occupe une place « leader » dans le secteur des industries agroalimentaires, en raison des capacités importantes de triturations dont elle dispose, (+230%) par rapport à la taille du marché domestique, réparties entre les moulins publics (95%) et privés (135%), soit respectivement une capacité de trituration de l'ordre de 19000 et de 27000 T/jour.

L'industrie céréalière privée compte actuellement 253 PME privés qui contrôlent 80% du marché domestique en 2005 [9].

Le Chiffre d'affaire des ERIAD en 1998 est évalué à 86 milliards de DA soit 1,03 milliard de dollars.

La consommation des produits céréaliers se situe à un niveau d'environ 205 kg /hab/an [9].

Les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien, et elles fournissent plus de 60% de l'apport calorifique et 75 à 80% de l'apport protéique de la ration alimentaire. C'est ainsi, au cours de la période 2001-2003, les disponibilités des blés représentent un apport équivalent à 1505,5Kcal/personne/j, 45,533 gr de protéine /personne/j et 5,43 gr de lipide/personne /J.

En relation avec le marché mondial, les produits céréaliers représentent plus de 40% de la valeur des importations des produits alimentaires. Les produits céréaliers occupent le premier rang (39,22 %), devant les produits laitiers (20,6%), le sucre et sucreries (10%) et les huiles et corps gras (10%).

De 1995 à 2005, le marché Algérien a absorbé, en moyenne annuelle, 4244903 tonnes de blés dont 70,44% de blé dur, soit 2990265 tonnes représentant une valeur de 858 millions de dollars, dont 60,36% de blé dur, soit 578 millions [9].

L'examen de l'évolution de la production céréalière permet de mettre en évidence des fluctuations inter annuelles très importantes fortement liées aux conditions climatiques. Les fortes amplitudes de production observées ces dernières années (49 millions de quintaux en 1996, 8 millions de quintaux en 1997 et 30 millions de quintaux en 1998) illustrent parfaitement cette variabilité.

Le graphique suivant retrace l'évolution quinquennale de la production des céréales ; il en résulte une augmentation de la production des blés de 77,8 % en moyenne entre 1961-65 et 2001-2005, passant de 1,257 à 2,687 millions de tonnes. Cette augmentation est imputable surtout à l'amélioration des rendements. Cependant la superficie réservée aux blés a connu une chute de l'ordre de -9,64% en passant de 1,969 à 1,779 millions d'hectares en moyenne durant la même période [10].

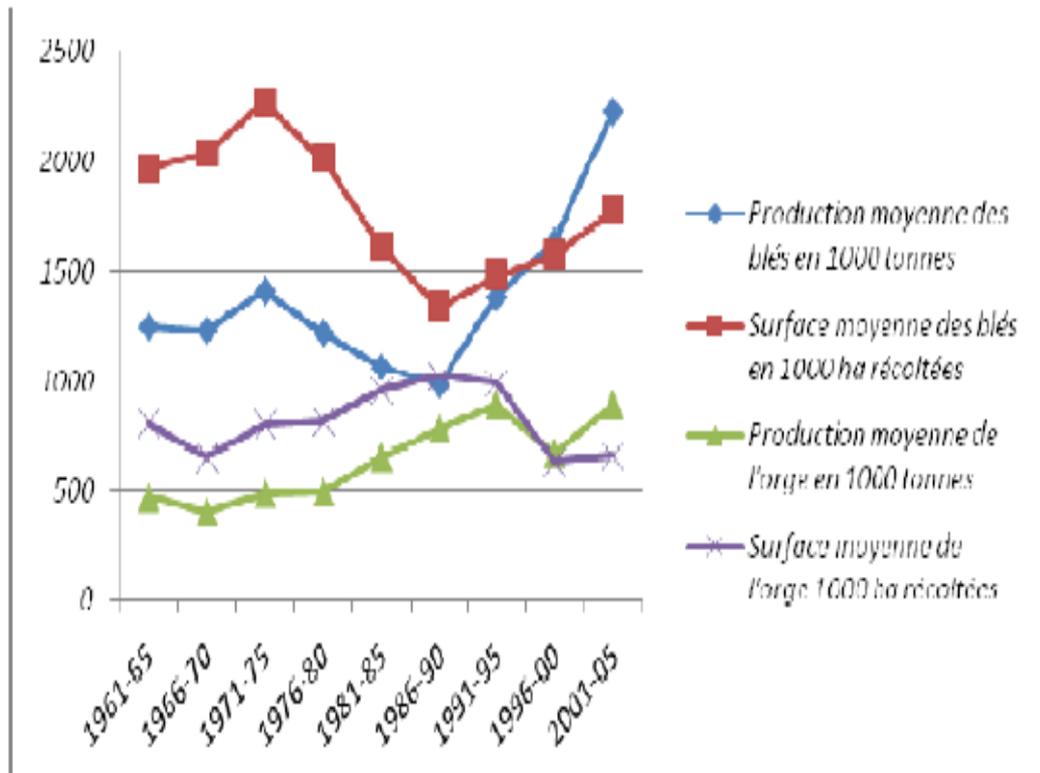


Figure 1.1 : Evolution de la production des céréales (blés et orge) en Algérie par période quinquennale (U=1000 Tonne) [10].

Cependant, la production moyenne de l'orge a enregistré une augmentation de l'ordre de 87,58%, passant de 0,475 à 0,891 million de tonnes explicable aussi par une relative élévation des rendements, du moment que la superficie réservée à l'orge a connu aussi une chute de l'ordre de -18,64% durant la période considérée [10].

1.3. Evolution du taux de dépendance

La mise en œuvre des réformes économiques, depuis 1988, ne s'est pas accompagnée d'une modification profonde des politiques céréalières, en ce sens que les interventions de l'Etat ont continué à s'exercer sur la filière « blés » même si elles ont eu tendance à se recentrer sur les sphères de la production agricole proprement dite.

Mais au plan du fonctionnement concret de cette filière, celle-ci reste soumise à deux logiques, antagonistes :

- une logique étatique qui privilégie la distribution et la disponibilité des produits, à des prix fixés d'avance, qui se fait au détriment de la production locale.
- une logique « marchande » émanant, notamment, des maillons d'aval contrôlés par le capital privé (boulangeries).

Ainsi, la couverture des besoins de consommations des céréales (blés et orge) est assurée à hauteur de 37,7 % par la production nationale au cours de la période 1995-2004. L'offre domestique demeure encore faible, le taux d'autosuffisance se situe au environ de 28,4 % pour les blés (moyenne de 1995 /2004). La satisfaction de la demande intérieure est assurée alors essentiellement par les importations, à la hauteur de 72% environ pour les blés et à 30,4 % en moyenne pour l'orge.

La moyenne de la production en 2005/2007 est estimée à 2,650 M de tonnes, cependant les importations devaient atteindre 5 M de tonnes, ce qui représente un taux d'autosuffisance de 34,64 % et un niveau des importations de l'ordre de 65,36% des besoins [10].

1.4. Le blé ou froment (*triticum aestivum*)

1.4.1. Structure et composition d'un grain de blé

Le grain de blé est un élément complexe, qui permet le développement de la future plante (germe) grâce aux substances de réserve de nature glucidique (amidon) et protéique de l'albumen. Les cellules de l'albumen sont délimitées par une paroi de nature essentiellement glucidique. Ces parois constituent également l'essentiel des différents tissus de protection du grain - L'amidon qui représente environ 70% du grain à maturité est le biopolymère majoritaire du grain avec les protéines de réserve et les polysaccharides des parois. L'étude de la biosynthèse et des propriétés de ces biopolymères a pour but d'améliorer la qualité des aliments.

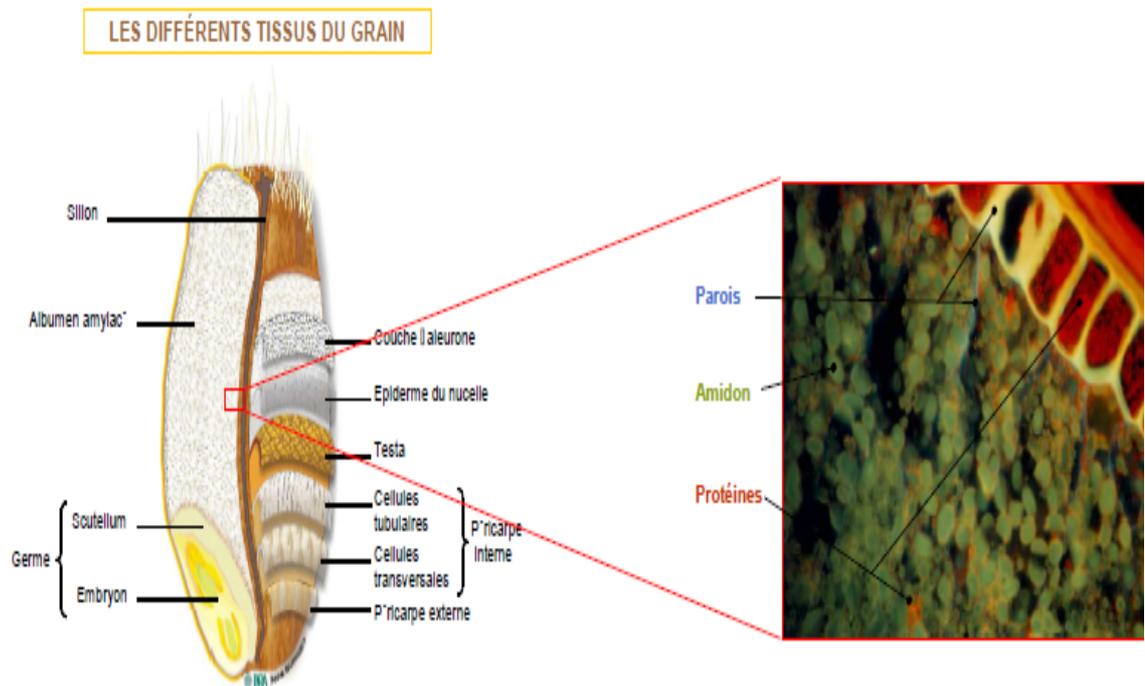


Figure 1.2 : Les différents tissus du grain de blé [11]

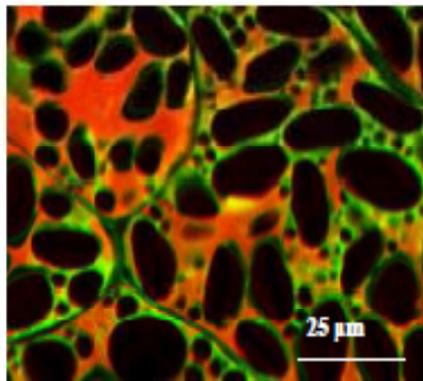
L'amidon (du latin *amylum*, fleur de farine) est un glucide de réserve utilisé par les végétaux supérieurs pour stocker de l'énergie. Aussi appelé sucre lent ou complexe. Son organisation complexe en structures cristallines et amorphes conduit à un grain dense permettant le stockage de millions d'unités glucose dans un volume extrêmement réduit .

Ces molécules sont constituées d'unités de glucoses formant une chaîne linéaire par des liaisons $\alpha(1,4)$ ou ramifiée par des liaisons $\alpha(1,6)$.

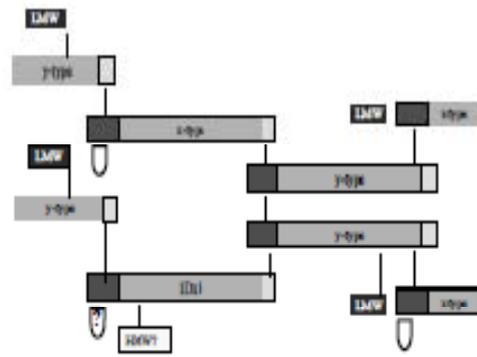
Au sein des cellules de l'albumen délimitées par les parois cellulaires (bleu et jaune), l'amidon forme des grains individuels (vert) enchâssés dans une matrice protéique (orange). Ces différents constituants sont retrouvés dans tous les aliments à base de blé : pain, pâtes, semoules, biscuits...

Les protéines de réserve ou prolamines sont les réserves azotées du grain de blé en vue de la germination. Leur composition et leur structure sont particulières; elles peuvent être monomériques (gliadines) ou se présenter sous

forme de polymères de gluténines de taille très importante. Ces protéines sont auto-associées de manière complexe dans le grain, autour des grains d'amidon. Ce réseau de protéines (gluten) confère des propriétés viscoélastiques à la pâte, ce qui permet le façonnage et la réalisation du pain.



Visualisation du réseau protéique (en rouge) dans le grain par marquage chimique



Hypothèse de structure d'un polymère de gluténines représentant le mode d'assemblage des différents monomères entre eux, par l'intermédiaire de ponts di-sulfures.

Figure 1.3 : Les protéines de réserve du grain de blé [11]

Les parois délimitent les cellules des tissus de réserve et de protection du grain. C'est un assemblage complexe de polymères constitués de différents sucres (arabinose, xylose, glucose). Dans les aliments à base de blé les parois de l'albumen et des tissus de protection constituent l'essentiel des fibres alimentaires [11].

1.4.2. Les critères de qualité du blé tendre

Tous les utilisateurs du blé recherchent de la protéine, mis à part les malteurs et les biscuitiers : de 11 à 12 % pour la plupart des produits de la panification, de 13 à 15 % pour les panifications spéciales (pain de mie, burger...). Un poids spécifique inférieur à 73 kg/hl constitue la limite en dessous de laquelle un lot de blé n'est plus accepté à l'intervention. Les contrats commerciaux exigent classiquement un PS d'au moins 76 kg/hl.

Les blés doivent donner de bons résultats en panification avec une force boulangère $W > 120$ et un indice de Hagberg > 220 .

La Teneur en mycotoxines est réglementairement limitée depuis la récolte à 1 250 microgrammes de DON par kg pour les produits destinés à l'alimentation humaine [12].

1. 4.3. Mouture de blé et techniques d'obtention de Farines

L'objectif technologique de la mouture consiste à séparer l'amande farineuse du son et du germe, puis à réduire l'amande en farine. Pour obtenir ce résultat, il faut que le blé soit industriellement pur (nécessité d'un nettoyage) et préparé d'une façon optimale (incorporation d'eau suivie d'un temps de repos adéquat et différenciation à faire pour le blé tendre : blé soft, medium, hard).

L'assise protéique du grain de blé constitue la première assise de l'endosperme, mais par la nature cellulosique de ses parois, elle s'apparente beaucoup plus aux enveloppes, auxquelles elle est intimement soudée, qu'à l'amande farineuse.

Le procédé classique de la mouture par cylindres permet d'ouvrir le grain pour réduire l'amande de l'intérieur vers l'extérieur. Un autre procédé par abrasion (appelé procédé « Trigotec » ou « Peritec ») permet, après incorporation d'eau (3 à 4 %) et un temps de repos court, de travailler ou usiner le grain de l'extérieur vers l'intérieur.

Sachant que la matière première représente environ 65 à 70 % du coût de production, l'objectif économique est d'obtenir de la farine dans les conditions économiques les plus favorables, avec un investissement minimal et une consommation énergétique minimale. En conséquence, il faut, dans une certaine mesure, acheter le blé au bon moment, même s'il est vrai que le gain d'énergie peut augmenter ou diminuer le coût de production.

Le rendement technique d'une farine (type 55), par rapport au premier broyeur (blé exempt d'impuretés + eau), se situe dans la fourchette de 75 % à 80 %, avec une moyenne à 78 % (figure 1.7).

Les gros sons représentent environ 7 %, les fins sons 6 %, les remoulages bis 5 %, les remoulages blancs 2 %, avec une freinte de 2 % (représentée par une évaporation d'eau) [13].

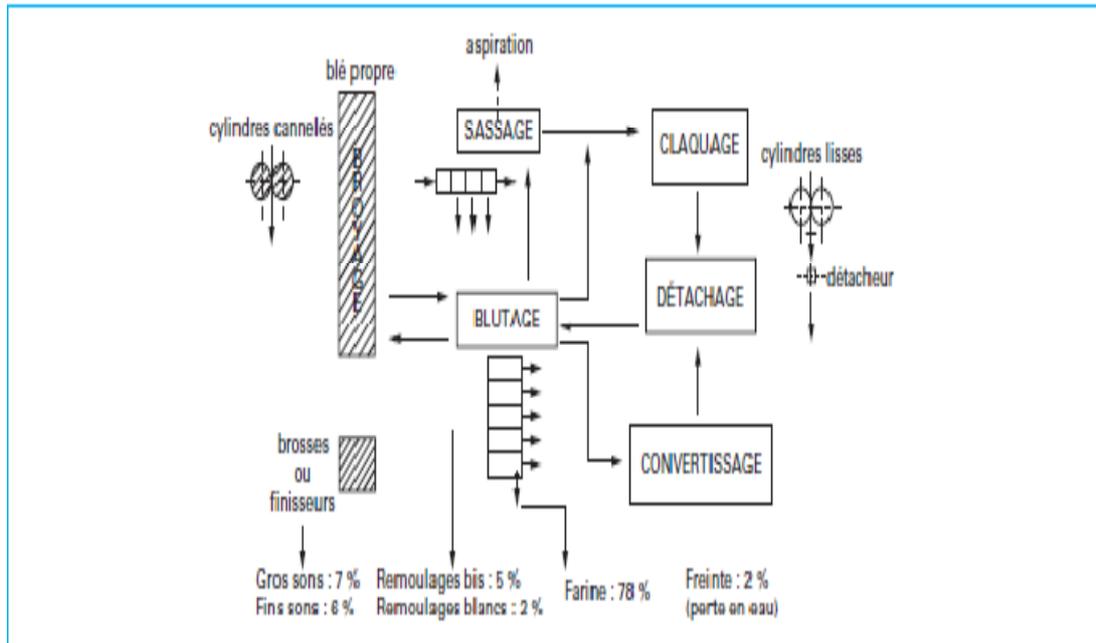


Figure 1.4 : Schéma générale de la mouture de blé tendre [13]

1.4.4. La farine

1.4.4.1. Définition

Le mot farine par l'indication de la céréale dont, elle est extraite, désigne la poudre obtenue par broyage des grains des différents céréales connues mais si on parle de farine sans préciser l'espèce de grain broyé on désigne cette fois exclusivement le produit obtenu par la mouture de l'amande de grain de blé nettoyée industriellement pur.

Généralement la farine est constituée de morceaux de cellules de l'albumen de granules d'amidon, de protéines, de parois cellulaires et de fragment d'enveloppes de grain [13].

1.4.4.2. Les types de farines

Ils existent deux types de farines produites en Algérie :

- Farine de type courant
- Farine supérieure

Ces deux farines sont précisées dans le journal officiel de la république Algérienne № 2 du 08 janvier 1992, au niveau du décret exécutif № 91-572 du 31 décembre 1991 relatif à la farine de panification et au pain.

La farine de panification peut être de type courant ou supérieure, cette dernière distinction étant en relation avec la pureté de la farine, c'est ainsi que d'après le décret précédemment cité la farine de type courant est extraite d'un point au dessus de point spécifique (PS-1) tandis que la farine de type supérieur est extraite de (Ps-8) à (Ps-5). [14].

La vente des farines doit faire apparaître leur type. La classification des farines est fonction de leurs teneurs en cendres. Elle prend en compte la notion de pureté des farines, qui peut être assimilée à la proportion d'enveloppes dans la farine ou taux d'extraction [15].

La classification des farines selon le taux de cendres en % de la matière sèche est donnée par le tableau 1.1.

Tableau 1.1: Classification des farines [15]

Dénomination	Taux de cendres de la farine en % de la matière sèche
-type 45	au dessous de 0,50
-type 55	-de 0,50 à 0,60
-type 65	-de 0,62 à 0,75
-type 80	-de 0,75 à 0,90
-type 110	-de 1 à 1,20
-type 150	-au dessus de 1,40

1.4.4.3. La qualité technologique des farines

La qualité boulangère d'un blé recouvre deux aspects :

- Les qualités fermentaires : lors de la fermentation de la pâte, pour produire du gaz, les levures doivent disposer de sucres simples (glucose ou saccharose). la farine possède peu de sucres simples mais beaucoup d'amidon qui ne peut être utilisé tel quel par les levures. L'amidon peut être hydrolysé en sucres simples par des enzymes (α amylase) naturellement présentes dans le grain. Il faut connaître l'activité de ces enzymes pour connaître la capacité de production de gaz par les levures.

L'amidon, dans le grain, se présente sous forme de granules. L'attaque des enzymes est facilitée si on endommage ces granules lors de la mouture. il est donc intéressant de déterminer l'endommagement des grains d'amidon après mouture.

- Les qualités rhéologiques : pour donner une pâte de bonne qualité, la farine doit pouvoir absorber une certaine quantité d'eau et conserver ses propriétés lors de pétrissage. il faut déterminer la capacité d'absorption d'eau de la farine et la résistance de la pâte au travail mécanique. La pâte formée doit pouvoir retenir correctement un maximum de gaz produit lors de la fermentation. On mesurera ses propriétés rhéologiques (ténacité, extensibilité, élasticité), ces propriétés sont dépendantes de certaines protéines. Il faut donc déterminé la quantité et la qualité des protéines [16].

1.5. L'orge

1.5.1. Introduction

Depuis l'antiquité l'orge (*Hordum vulgare vulgare* L) représente une récolte importante de grains de céréales. Aujourd'hui l'orge occupe le cinquième rang à l'échelle mondiale dans la production végétale (129 millions de tonnes, en moyenne entre 2002 - 2005), classé derrière le maïs (*Zeamays*, 605 millions de tonnes), le blé (*triticum*spp, 549 millions de tonnes), Le riz (*Oryzasativa*, 424 millions de tonnes) et le soja (*glycine max*, 175 millions de tonnes) et classé devant la canne à sucre (*saccharum*spp, 92millions de tonnes), la pomme de terre (*Solanumtuberosum*, 60millions de tonnes), le sorgho (*Sorghumbicolour*, 50 millions de tonnes) [17].

Dés les premiers temps, l'orge a été utilisé dans l'alimentation humaine, par la suite, il a été orienté notamment vers la brasserie et la production de farine de malt, ceci est dû en partie à la très forte consommation du blé et du riz. Actuellement la consommation mondiale du l'orge répartis comme suit : deux-tiers utilisés en alimentation et un tiers par le maltage. A travers l'histoire, l'orge demeure une source alimentaire importante dans la région d'Asie et l'Afrique du nord [18].

En se basant sur les données actuelles, l'avantage principal d'incorporer l'orge dans divers produits alimentaires réside dans les effets très bénéfiques de l'orge sur la santé. Le β -glucane présent dans l'orge et les divers produits à base d'orge s'est avéré efficace pour l'abaissement du cholestérol du sang et l'index glycémique [19] [20] [21] [22] [23] et [24].

De Nombreuses recherches ont été publiées et accepter concernant les vertus de l'orge.

Selon les différentes classes de l'orge les propriétés physiques et biochimiques peuvent varier et par conséquent les traitements technologiques et l'orientation finale du produit peuvent être différents. Dans la partie suivante, nous décrivons les caractéristiques physiques et chimiques du grain d'orge. Une considération particulière sera donnée aux aspects moins connus tels que la dureté et la couleur du grain d'orge [25].

1.5.2. Définition

L'orge est une céréale à paille, plante herbacée annuelle de la famille des *poacées*. Elle est cultivée et appartient à la famille des graminées, tribu des hordes, genre *Hordeum*.

Les orges cultivées dériveraient toutes d'*Hordeum spontaneum* (orge sauvage à 2 rangs), *H.agriocrithon* ne serait qu'un hybride récent dérivant de croisements naturels entre *H.spontaneum* et des orges cultivées à 6 rangs.

Ainsi, on distingue 3 types d'orge :

- Les orges à 6 rangs ou escourgeons : *H. hexastichum* L.
- Les orges à 4 rangs ou escourgeons d'Afrique : *H. tetrastichum*. Korn.
- Les orges à 2 rangs : *H. distichum* L [26] .

1.5.3. Structure et composition biochimique du grain d'orge

L'orge est une graine vêtue, les glumelles adhèrent au grain et ne s'en séparent pas au battage. La figure 1.8 présente une coupe transversale d'un grain d'orge [27].

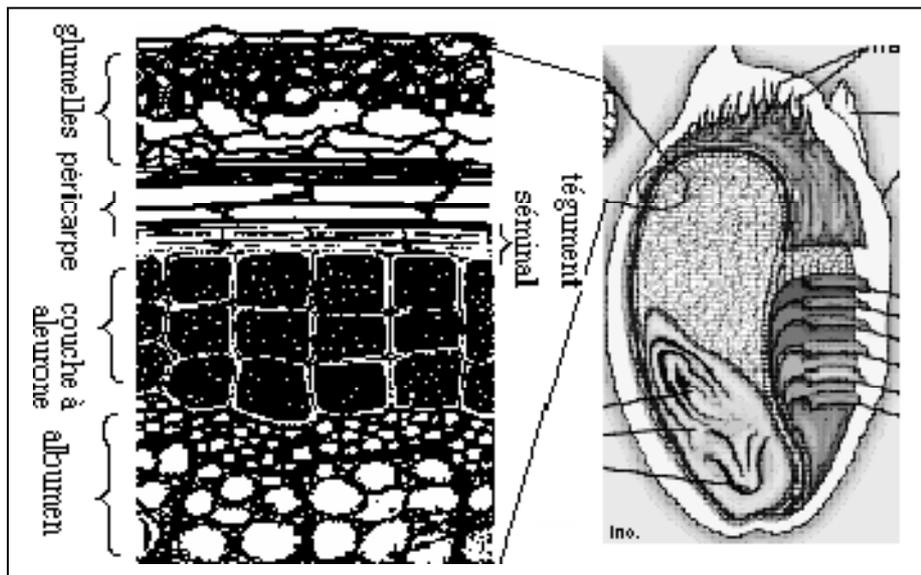


Figure 1.5 : coupe transversale d'un grain d'orge [28]

Les principales parties constituantes d'un grain d'orge sont de l'intérieur vers l'extérieur :

- L'embryon (plantule complète),
- L'endosperme (réserve de matières nutritives),
- La couche à aleurone périphérique (réservoir enzymatique),
- Le péricarpe-testa (membre semi-perméable),
- Et la paroi externe [27].

1.5.3.1. L'embryon

L'embryon est formé principalement par une radicule, une tigelle et une plumule. Situé principalement sur la face dorsale du grain, il est séparé de l'endosperme par le scutellum qui a une fonction de sécrétion et permet la diffusion des enzymes hydrolytiques de l'embryon vers l'endosperme. L'embryon

et l'endosperme se développant indépendamment l'un de l'autre, ils ont des compositions chimiques différentes. Les principaux sucres de l'embryon sont le saccharose et le raffinose. Ils représentent 25% du poids sec de l'embryon.

Les principales protéines de l'embryon d'un grain d'orge sont des albumines et des globulines [29].

1.5.3.2. L'endosperme

L'albumen (endosperme) représente l'organe de réserve de l'orge. Les graines d'orge sont caractérisées par des différences structurelles au niveau de l'endosperme, où on peut trouver des secteurs farineux, contenant des cellules lâchement condensées avec la présence d'un espace aérien entre les granules d'amidon, et des secteurs durs densément condensés de petits granules d'amidon dans une matrice de protéines dense [30].

Tableau 1.2: composition biochimique de l'endosperme [30]

Constituants biochimiques	Teneurs dans l'endosperme
Amidon	65%
Protéines	7 à 12%
Parois cellulaires :	
Gommes et matériels celluloseux	6 à 8%
B-glucanes	70%
Pentosanes	20%
Protéines	5%
Glucomannanes	2%
Cellulose	2%
Acides phénoliques	0,5%
Acides uroniques	0,5%
Lipides	2 à 3%

L'amidon est le constituant majeur de l'endosperme de l'orge, il représente 50 à 70% du poids sec du grain. Il est constitué de deux polymères : l'amylose 25% et l'amylopectine.

On trouve au niveau des parois cellulaires de l'endosperme d'autres polysaccharides : les B-glucanes et les pentosanes.

On trouve aussi des protéines au niveau de l'endosperme. La composition protéique dépend des particularités génétiques et des conditions environnementales de culture.

Il ya 4 types de protéines d'orge :

- L'albumine ou leucosine (4% des protéines totales) soluble dans l'eau,
- La globuline ou édestine (31% des protéines totales) soluble dans les solutions salines,
- Prolamine ou hordéine (36% des protéines totales) soluble dans l'alcool à 70%,
- Et la glutéline (29% des protéines totales) soluble dans la soude.

Enfin on trouve des lipides de quatre types : triglycérides (69%), lipides polaires (27%), diglycérides (2%) et acides gras libres (2%) [29].

1.5.3.3. La couche à aleurones

La couche à aleurones renferme, dans sa partie la plus externe, de l'amidon et des protéines, et dans sa partie interne, des lipides (30%), des protéines (20%), de l'acide phytique, des vitamines du groupe B, de la cellulose, des pentosanes, des B-glucanes dans les parois cellulaires, mais pas d'amidon. La couche à aleurones est constituée de 3 ou 4 assises de cellules vivantes riches en matières azotées et en globules lipidiques [31].

1.5.3.4. Péricarpe-testa

Le péricarpe est composé majoritairement de cellulose (20%) mais contient également 6% de protéines ,2% de cendres, 0,5% de lipides et de pentosanes.

La testa est constituée de deux bandes superposées composées de matériaux cireux et lipidiques. L'ensemble péricarpe-testa est semi –perméable : il est perméable à l'eau mais constitue une barrière pour de nombreux soluté [29].

1.5.3.5. La paroi externe

La paroi externe entoure complètement le grain sauf aux 2 extrémités, elle représente environ 3% du poids du grain. Elle possède une fonction protectrice, et assure par capillarité la distribution d'eau sur la surface. La graine est sélectivement perméable, elle empêche non seulement la sortie des sucres et des acides aminés du grain mais aussi l'entrée des microorganismes [29].

1.5.4. Les caractéristiques physiques du grain d'orge

Le grain d'orge est caractérisé par une couleur Jaune-blanc brillante, une dureté moyenne et une taille uniforme. Le sillon peu profond du grain d'orge permet d'avoir des perles d'orges semblables au riz. Une bonne dureté de l'endosperme présente un avantage pendant le décorticage et le perlage, cependant une dureté plus forte de l'endosperme nécessite une grande énergie mécanique pour la mouture et peut produire un taux de grain cassé pendant le décorticage. Le son d'orge se brise facilement pendant le procédé de mouture par des rouleaux à cylindre contrairement au son de blé, ceci augmente la difficulté de produire des farines d'orge blanche exempte de piqures de son. En conséquence, la farine d'orge contient toujours et inévitablement des particules de son [32].

Le grain d'orge doit être obligatoirement perlé pour enlever la coque et la couche du son avant d'entamer tous les traitements. En conclusion, la dureté de l'endosperme et la couleur du grain d'orge sont considérés comme des facteurs déterminants de qualité et d'usage final d'orge [33]. Les recherches ont montré que le degré d'adhérence entre les granules d'amidon et la matrice protéique dans l'endosperme est directement lié à la dureté du grain. En outre, les études ont montré qu'il n'existe pas une bonne corrélation entre le taux d'hordéine et la texture du grain [34]. Les caractéristiques structurales et compositionnelles des protéines de l'amidon et du β -glucane contribuent à la dureté du grain d'orge [35] [36] [37].

1.5.5. Processus de transformation de grain d'orge

La transformation du grain d'orge se fait comme suit : le grain d'orge est d'abord décortiqué, ensuite perlé, poli en écaille ou moulu à des granulations de farine avant d'être consommée. Les opérations de décorticage et polissage sont réalisés par l'abrasion grâce au passage par une surface abrasive tournante. Le

décorticage permet d'enlever la coque les couche d'enveloppe extérieures et le germe. Les grains perlés peuvent être cuites à la vapeur d'eau et fractionnée pour être transformées en flacons d'orges. Compte tenues des propriétés très intéressantes d'orge, il est très accepté par le consommateur et peut présenter une alternative au grain de riz, la farine de l'orge est obtenue grâce au passage du grain perlé par un marteau à friction. Il demeure difficile de produire des farines d'orge pures et blanches à cause d'une séparation incomplète entre les enveloppes et le grain perlée. En 1986 Bhattya, a mis en œuvre la production de farine d'orge par des appareils à cylindre de modèles Buhler, et ont un rendement de farine de 74% [38].

Une comparaison entre la composition biochimique des farines de blé et d'orge est représentée dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 : Comparaison entre composition biochimique des farines de blé et d'orge [39].

		Farine de blé tendre	Farine d'orge
Valeurs calorifiques	Calories	353	344
	Joules	84,33	82,18
Principes énergétiques (en grammes)	protides	9,5	11,5
	glucides	75	72
	lipides	1,2	2
Eléments minéraux (en mg)	Sodium	3	/
	Potassium	135	245
	Magnésium	20	37
	Calcium	16	28
vitamines (en mg)	B1	0,1	0,1
	B2	0,8	0,1
	PP	0,6	3,1

1.5.6. L'utilisation de l'orge dans l'alimentation

Dans l'histoire l'orge a constitué une base d'alimentation pour plusieurs régions du monde y compris le Moyen –orient, l'Afrique du nord, le nord et l'est de

l'Europe et l'Asie [40] [18] [41]. Dans les pays occidentaux, les perles d'orges entières sont employées comme céréales de petit déjeuner, ragoûts, potages, aliments pour bébé, et mélanges de farines de boulangerie [42]. Dans les pays Africains les perles d'orges sont utilisées en potage, plat et pain de gruau [42] [21]. La farine d'orge obtenue à partir de la mouture du grain ou de la perle d'orge en utilisant des rouleaux à cylindres ou des marteaux à frictions peut être incorporée dans le pain, les gâteaux les biscuits et les nouilles [43].

La farine de blé supplémentée de 15-20% de farine d'orge a donné des pains ayant une texture, aspect et saveur généralement acceptable, mais cependant l'incorporation d'une plus grande quantité de farine d'orge aura pour conséquence la diminution du volume du pain, une coloration brune du pain et l'endurcissement de la mie [44] [45]. Une étude a montré que l'incorporation de 40% de farine d'orge dans le pain turc traditionnel provoque une diminution des propriétés sensorielles (la couleur, la texture, le goût et l'arôme, néanmoins, la qualité globale du pain a été jugée acceptable. D'autres études ont rapporté que le pain fabriqué à base de blé de variété balady et de farine d'orge à des taux de 15 à 30%, était acceptable, mais sont devenus plus durs, plus foncés et non-uniforme dans la forme après l'addition supplémentaire de la farine d'orge. La farine de blé incorporée de farine d'orge à des taux de 20 à 30 % des nouilles a des caractéristiques acceptables [46] [47].

Des auteurs ont constaté que les nouilles contenant la farine d'orge nécessitent un temps de cuisson plus court que les nouilles fabriquées à base de farine de blé. Newman et al. [49] ont préparé des petits pains de qualité acceptable mais légèrement inférieurs de point de vue volume densité et humidité par rapport aux petits pains de farine de blé. Quelques formulations de biscuits de Brownie ont été réalisées avec 100% de farine d'orge tout en maintenant une qualité et une saveur acceptable. Il a été également rapporté que la tortillas préparée par 100% de farine d'orge a été bien perçue par le consommateur par rapport à la tortillas de farine de blé, notamment de point de vue texture et compte tenu de ces résultats, ils ont suggéré que la mise en vente des tortillas de farine d'orge [48].

1.5.7. Les différents impacts résultant de l'usage de la farine d'orge en panification

Sur le plan culturel en ALGERIE, la consommation de l'orge est très importante, cette céréale occupant la première place dans céréaliculture nationale. Par conséquent, l'incorporation de la farine d'orge dans le processus de panification renforcerait encore plus l'identité culturelle algérienne.

Ce serait identiquement à d'autres contrées du monde, des sociétés (Chinois, Indiens du Brésil, les Peuls africains, les Malgaches, les Japonais de la Scandinavie, etc.....) attachés encore à leurs traditions fabriquent bien leur pain à base de farine tirée de riz, du manioc, du mil, de la panza, du millet... [51]

- Sur le plan social actuellement, au niveau mondial, le tissu de transformation de l'orge se résume à quelques moulins traditionnels et artisanaux répartis pour la plupart dans les contrées rurales.

Aussi, compte tenu de cette situation, l'industrie d'orgerie si elle arrivait à se développer pourrait générer des emplois et résorber le chômage.

- Sur le plan économique en ALGERIE, le recours à la confection et à la consommation du pain à base de farine d'orge atténuerait les coûts économiques d'alimentation et permettrait, c'est sûr, de redynamiser la consommation des produits céréaliers.
- Sur le plan sanitaire, que ce soit le blé tendre, le blé dur, ou l'orge, chacun des grains de ces céréales, en sa périphérie, est doté d'une couche à aleurones utile à la protection et à l'approvisionnement de l'embryon au cours de la germination. Cette même couche à aleurones est riche aussi en métabolites et en minéraux d'intérêt potentiel en nutrition [52].

La farine issue de l'orge, pour peu qu'elle connaisse, lors de la mouture, une séparabilité optimale entre l'amande et l'enveloppe, permet la conservation partielle de cette couche à aleurones (d'épaisseur très fine : 2 à 4 μm) et diffuse dans l'organisme humain les nutriments dont elle est la source [53].

La composition de la couche à aleurone est représentée dans le tableau 1.4 ci-après :

Tableau 1.4: Quantité de nutriments dans la couche à aleurone de l'orge [53]

Désignation des nutriments	Quantités (mg/100gr)
- <u>Vitamines</u> :	
Thiamine B1	16
Riboflavine B2	03
Niacine PP ou B3	24
Pyridoxine B6	03
Folates B9	08
Vitamine E	02
- <u>Minéraux</u> :	
Magnésium	530
Phosphate	1140
Fer	22 ,7

1.6. Le maïs

1.6.1.Introduction

Le maïs est la plante la plus cultivée au monde et la 1ère céréale produite devant le blé. Il occupe 160 millions d'hectares environ pour une production qui se situe autour de 770 millions de tonnes, soit un rendement moyen d'environ 50 q/ha. En 2007/08, la production s'est même hissée à près de 800 millions de tonnes du fait notamment d'une récolte américaine record à plus de 330 millions de tonnes. En 2008, elle a fléchi très légèrement.

La figure 1.9 représente l'évolution de la production et la consommation mondiale du maïs de 1998 à 2008 [54].

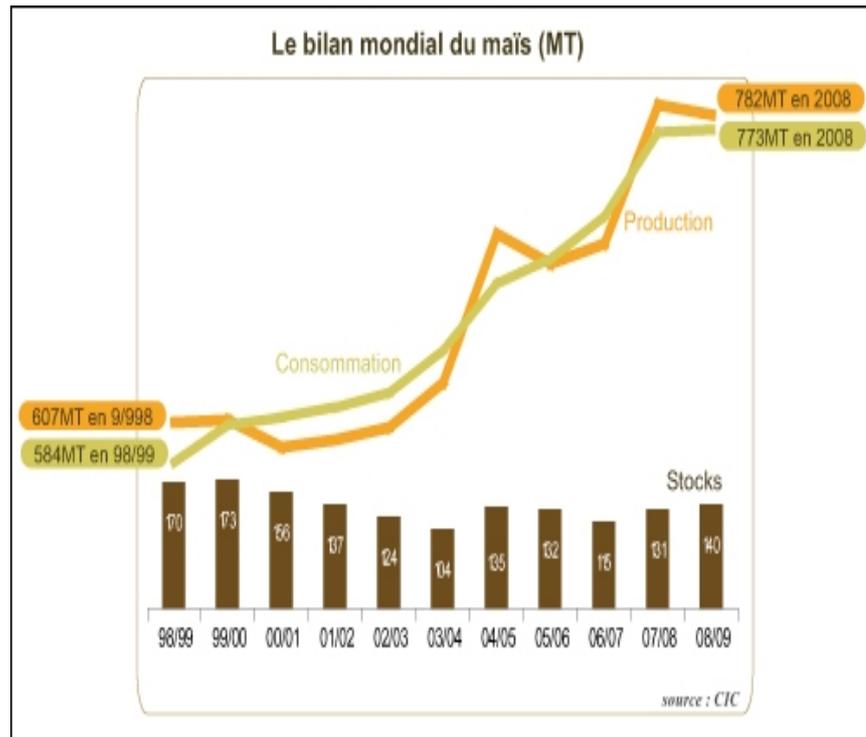


Figure 1.6 : Le bilan mondial du maïs (MT) [54]

La figure 1.7 donne la répartition mondiale de la production de maïs grain (MT) en 2008.

Les USA réalisent 40% environ des volumes mondiaux avec une production qui oscille au gré des aléas climatiques autour de 300 millions de tonnes. Avec une surface d'environ 35 millions d'hectares, ils détiennent près de $\frac{1}{4}$ des surfaces mondiales de maïs. En 2007, ils ont engrangé une récolte record de 332 millions de tonnes suite à une augmentation des surfaces à 37 millions d'hectares environ et un rendement moyen de 90 q/ha environ [54].

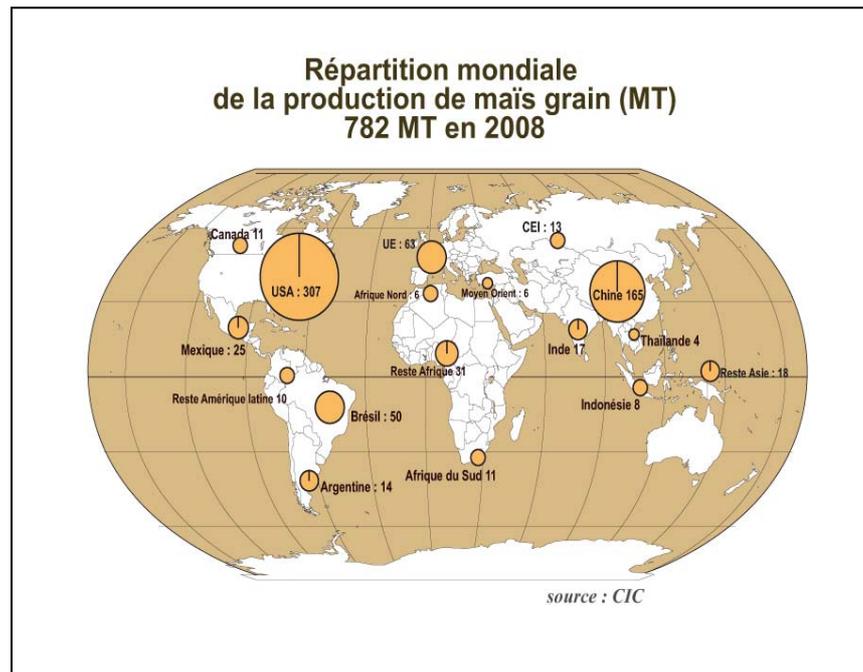


Figure 1.7 : Répartition mondiale de la production de maïs grain (MT) en 2008 [54].

La Chine est le second pays producteur mondial de maïs avec des volumes importants également, même si bien en-deçà des volumes américains, de l'ordre de 150 millions de tonnes et ce, sur une surface d'environ 25 millions d'hectares. Les volumes réalisés ailleurs sur la planète (40% au total) sont beaucoup plus modestes et sont principalement le fait du Brésil et de l'UE qui produisent l'un et l'autre 50 à 60 millions de tonnes sauf aléas climatiques (2007 pour l'UE notamment). Suivent enfin, le Mexique, l'Argentine, l'Inde, l'Indonésie ou encore l'Afrique du Sud, parmi les plus significatifs [54].

1.6.2. Place actuelle du maïs dans l'alimentation humaine

S'il est reconnu que l'augmentation d'une consommation de céréales permet un meilleur équilibre alimentaire, force est de constater que les utilisations du maïs grain en alimentation humaine directe sont encore restreintes. La très grande majorité du maïs est en effet destinée à l'alimentation humaine plus en moins directe concerne le maïs doux, la semoule de maïs, et les produits de la deuxième transformation (céréales petit, déjeuner, snacks), l'huile de germe de maïs, et l'amidon de maïs entrant dans la préparation de nombreux produits alimentaires.

Si le maïs doux est systématiquement mis en avant lorsqu'on parle de maïs pour l'alimentation humaine, le maïs qui nous intéresse ici est le maïs grain,

associé aux céréales et produits céréaliers, dont le profil nutritionnel repose sur la richesse en protéines, en sucres lents (glucides complexes lentement digestibles), fibres et minéraux, le maïs doux présente quant à lui les bénéfices essentiellement liés aux fruits et légumes-vitamines, sels minéraux, fibres alimentaires.

La consommation limitée de maïs grain-céréale peut s'expliquer par la prévalence de certains freins, le plus visible étant un frein culturel (c'est à dire l'absence de culture alimentaire maïs dans notre pays comme dans la majorité des pays d'Europe), qui se traduit lui-même, sur le marché, par l'absence de produit phare à base de, à l'image du pain pour le blé tendre ou pâtes pour le blé dur. Or, les recommandations du PNNS pourraient permettre à la fois d'augmenter la consommation d'aliments existants à base blé (pain, pâtes, semoules etc.) et de développer les produits alimentaires issus du maïs (polenta, pain au maïs, nouveaux produits) [55].

1.6.3. Grain de maïs

1.6.3.1. Classification

Le nom scientifique de l'espèce est *Zea mays* subsp. *mays*. Le nom binomial lui a été délivré par Linné en 1753 qui créa un nouveau genre pour cette plante particulièrement différente des autres graminées connues à l'époque. Le nom générique, *Zea*, vient d'un nom grec, *zeia*, qui désignait dans l'Antiquité une sorte de blé, certainement l'épeautre [56].

Elle appartient à la famille des *Poaceæ* ainsi qu'à la sous-famille des *Panicoideæ* (comme le sorgho et la canne à sucre ainsi qu'à la différence des autres grandes céréales, blé, riz, orge, seigle, etc., qui relèvent de la sous-famille des *Pooideæ*).

La classification actuelle de l'espèce et des espèces voisines résulte des travaux de Døbley et Iltis publiés en 1980. Elles sont regroupées dans la tribu des *Maydeæ* (quelquefois regroupée dans la tribu des *Andropogoneæ*) qui se distingue par la monoécie, c'est-à-dire que quoique les plantes soient bisexuées, les sexes sont scindés dans des fleurs et fréquemment dans des inflorescences différentes. On y trouve sept genres [56].

1.6.3.2. Structure et composition

Le grain de maïs est en fait un caryopse, constitué de trois parties d'origines différentes :

- l'embryon, fréquemment nommé «germe», localisé à la base du grain qui comprend l'embryon lui-même ou «gemma» et le *scutellum*, c'est-à-dire le cotylédon, organe de réserve dans lequel la plantule puise son énergie initiale ; l'embryon est issu de l'œuf constitué suite à la fusion du noyau d'un spermatozoïde et de l'oosphère ;
- l'albumen, tissu de réserve, principalement composé de grains d'amidon, sauf la couche périphérique localisée sous le péricarpe qui contient des grains d'aleurone riches en protéines ; ce tissu est issu de la fusion du noyau d'un spermatozoïde et des deux noyaux de la cellule centrale (c'est par conséquent un tissu à 3n chromosomes) ;
- l'enveloppe extérieure, fine membrane translucide et fibreuse, issue du péricarpe de l'ovaire (donc en réalité une partie du fruit et non pas de la graine) [57].

L'amidon de l'albumen se présente sous deux formes : l'amylose, polymère linéaire du glucose, et l'amylopectine, polymère formant une molécule ramifiée. Selon le mode d'assemblage de ces molécules, il se forme de l'amidon farineux, à structure friable, localisé plutôt au centre, ou de l'amidon corné, ou vitreux, à structure dense et compacte, localisé en périphérie et qui contribue à maintenir la forme extérieure du grain. La proportion variable de ces deux formes d'amidon sert à distinguer diverses races. C'est l'amidon corné qui donne sa couleur au grain de maïs, le plus souvent jaune, mais également blanc, rouge, noir, tandis que l'amidon farineux est toujours blanc [58].

Une coupe longitudinale de grain de maïs est représentée par la Figure 1.8

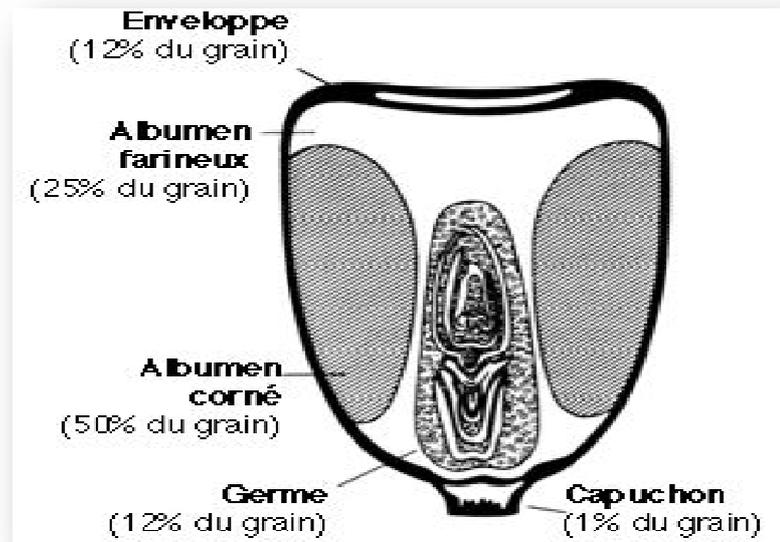


Figure 1.8 : Coupe longitudinale de grain de maïs [15]

La composition chimique des principales parties du grain de maïs présente des différences importantes. Le tégument séminal ou péricarpe se caractérise par une forte teneur en fibres brutes environ 87 %, constituées principalement d'hémicellulose (67 %) de cellulose (23 %) et de lignine (0,1 %). D'autre part, l'albumen présente une haute teneur en amidon (87,6 %) et des niveaux de protéines d'environ 8 %. La teneur en graisses brutes de l'albumen est relativement faible. Enfin, le germe se caractérise par une forte teneur en graisses brutes, de 33 % en moyenne; il a également une teneur relativement élevée en protéines (18,4%) et en sels minéraux. la couche à aleurone est une partie relativement riche en protéines (19% environ) et en fibres brutes. (Voir le tableau 1.5 et la figure 1.11) [15].

Tableau 1.5 : Composition chimique approchée des principales parties des grains de maïs (en pourcentage) [15]

Composant chimique (%)	Péricarpe	Albumen	Germe
Protéines (%)	3,7	8,0	18,4
Extrait à l'éther (%)	1,0	0,8	33,2
Fibres brutes (%)	86,7	2,7	8,8
Cendres (%)	0,8	0,3	10,5
Amidon (%)	7,3	87,6	8,3
Sucre (%)	0,34	0,62	10,8

1.6.3.3. Propriétés nutritionnelles du maïs grain

Chaque fraction anatomique du grain de maïs possède des atouts nutritionnels (figure 1.10)

- L'amande contient l'amidon (constituant majoritaire), source de glucides complexes, qui est absorbé plus lentement dans l'intestin que la plupart des glucides simples tels que le sucre et qui représente le nutriment énergétique principal essentiel au fonctionnement des muscles et du cerveau. L'amidon contient également des protéines, présentes en quantités intéressantes. Les caroténoïdes, aux propriétés anti-oxydantes, sont également concentrés dans l'amande du grain.
- Le germe est riche en lipides insaturés, qui sont à privilégier par rapport aux autres classes d'acides gras (les acides gras insaturés, ne représentant que 13% des acides gras totaux, en vitamine E et oligo-éléments (fer, zinc, magnésium, potassium)).
- Les parties périphériques, péricarpe et couche à aleurone, contiennent des fibres alimentaires, facteurs de régulation du transit intestinal, ainsi que des phytostérols qui limitent l'absorption intestinale du cholestérol, et des acides phénoliques aux vertus anti-oxydantes

Le maïs présente ainsi une combinaison d'un grand nombre de nutriments connus pour avoir des effets potentiels sur la réduction de certaines pathologies. Au sein des céréales, le maïs a la particularité d'être très riche en micronutriments antioxydants, qui neutralisent les effets néfastes des radicaux libres. Les caroténoïdes, la vitamine, les composés phénoliques ou encore le zinc contribuent à protéger notre organisme des agressions externes (pollution, stress, tabac, UV, etc.). Le maïs peut également contribuer, de par sa variabilité de teneur et de composition en amidon, à une meilleure gestion de la glycémie. L'amidon est constitué de chaînes d'amylopectine et d'amylose. Certaines variétés de maïs ont l'avantage d'être riche en amylose, chaîne linéaire plus difficile d'accès aux enzymes digestives que l'amylopectine. Cet amidon résistant permet ainsi de limiter les pics de glycémie faisant suite à son ingestion, lesquels peuvent contribuer à terme l'apparition de diabète dit gras des personnes de plus de 50 ans.

La consommation de maïs permet enfin plus globalement de profiter des bienfaits naturels des céréales en participant à la diversification alimentaire.

La commission Maïs et Nutrition est constituée d'expert acteurs de la filière maïs, technologues et nutritionnistes et sélectionneurs, des structures et organismes suivants : Arvalis, Maiz'europ', Seproma, Inra. Dans le cadre des travaux conduits par cette commission, l'évaluation de la contribution du maïs à l'équilibre nutritionnel s'est traduit par l'identification des nutriments à effet santé, et l'étude de la variabilité de la composition des grains en certains micronutriments.

Ainsi, le magnésium, qui joue de nombreux rôles physiologiques, puisqu'il intervient notamment dans la synthèse des protéines, la transmission de l'influx nerveux ou encore la contraction musculaire, est présent dans le maïs à des concentrations déjà intéressantes sur le plan nutrition-santé. Des investigations ont conduit à identifier, parmi les nombreux lots analysés, un pool génétique qui présente des teneurs au moins deux fois plus élevées que celles couramment rencontrées, ce qui permettrait de couvrir jusqu'à 75% des apports nutritionnels conseillés pour ce minéral. Parmi ce pool, des variétés ont également montré des teneurs accrues en caroténoïdes, environ 3,5 fois supérieures à la valeur moyenne mesurée sur une cinquantaine d'échantillons de diverses origines.

L'acquisition de références scientifiques contribue ainsi à la valorisation, au travers de programmes d'études liées à la sélection variétale ou encore à la conception d'aliments à effet santé, et à la promotion des qualités nutritionnels du maïs et des produits du grain [55].

1.6.4. Processus de fabrication de farine de maïs

La farine de maïs est une poudre jaune obtenue par le broyage et le décortilage de grains de maïs (*Zea mays*) dégermés et nettoyés. Selon le degré de finesse de la mouture on obtient des farines ou des semoules plus ou moins fines.

Pour la transformation primaire du maïs, il s'agit des opérations suivantes :

- ✓ Nettoyage qui permet d'éliminer les impuretés qui peuvent être à l'origine de goût et de texture désagréable ;
- ✓ Calibrage qui permet d'avoir des lots de céréales homogène et un décortilage efficace ;
- ✓ Epierrage qui permet d'éliminer les pierres de même taille que les grains par séparation densimétrique ;
- ✓ Dégermage qui permet d'éliminer le germe qui peut compromettre la conservation des farines ;
- ✓ Décortilage qui permet d'éliminer l'enveloppe indigeste ;
- ✓ Mouture à l'aide d'un moulin à marteaux équipé d'un tamis de mailles de 0,5mm ou d'un moulin à cylindre pour obtenir des farines ayant une granulométrie avoisinant celle des farines de blé pour éviter la ségrégation entre les particules au moment du transport et du stockage ;
- ✓ Ensachage [59].

CHAPITRE 2

LA PANIFICATION

2.1. Introduction

Le pain, le blé et le boulanger : c'est une histoire presque aussi vieille que le monde. À l'origine, il y a le besoin de vivre et survivre en se nourrissant. De ce besoin est née l'élaboration des aliments. C'est une histoire simple, car, quoi de plus facile en effet que de fabriquer du pain, puisqu'il suffit de céréales et d'eau. Or ces matières premières se trouvent aujourd'hui presque partout dans le monde. L'ajout de sel, les méthodes de fermentation dépendent des goûts et du savoir-faire.

Près de 5 000 ans avant Jésus-Christ, les Sumériens et les Égyptiens fabriquent plusieurs sortes de pains. Les Grecs feront fermenter la pâte en y ajoutant de la soude ou du jus de raisin. Comme les boulangers actuels, ils diversifient leur production pour proposer des pains aux arômes variés : pain au miel, à l'anis... Au début du second millénaire, apparaissent les premiers textes qui réglementent la profession. En 1217, le boulanger doit obtenir une autorisation royale pour exercer. Quelques années plus tard, un autre décret détermine le nombre d'années d'apprentissage. Sous Louis XIV, le pain s'allonge et devient plus blanc. Il faut attendre le XXe siècle pour voir la mécanisation du métier et les nouvelles techniques de fabrication se généraliser [60].

Mélanger quelques ingrédients de base : quoi de plus facile, non ? Maîtriser le produit et les fabrications est un métier ; un métier beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît au premier abord [60].

2.2. Définition du pain de consommation courante

Les usages définissent le pain de consommation comme le produit obtenu par la cuisson d'une pâte composée de farines panifiables, de levure ou de levain,

d'eau et de sel. Des additifs autorisés peuvent aussi être employés dans son élaboration.

Le « pain », sans autre qualificatif, est élaboré à l'aide de farines de blé panifiables, de type T 45, T 55 ou T 65. Il peut être vendu sous les formes traditionnelles : « baguette, flûte, bâtard... » Qui valent dénomination générique de vente.

Selon la céréale et le type de farine mise en œuvre, la dénomination « pain » peut être, par exemple, déclinée :

- en pain de seigle : produit élaboré à l'aide d'un mélange de farines de blé et de seigle (voir définitions ci-après). La farine de seigle doit alors représenter au minimum 65 % du mélange ;
- en pain complet : produit élaboré à l'aide d'une farine de blé dite « complète » classée en type T 150 (plus de 1,40 % de cendres sur la matière sèche) [60].

2.3. Ingrédients de base de pain

L'eau et la farine sont les ingrédients de pain les plus significatifs, car ils affectent la texture du pain. La farine (14,5% d'humidité, 13% de protéines, 0,55% de taux de cendre et pH = 5,7 – 6,1) [61].

L'eau contribue à 50% dans la texture fine et légère du pain. La majorité des pains artisanaux contiennent 60 à 70% d'eau. Dans les pains de levure, les pourcentages d'eau sont plus élevés, la production de CO₂ est importante et la mie n'est plus alvéolée. Le reste des ingrédients du pain sont la levure 2%, le sucre 4%, le sel 2%, et la matière grasse (la margarine 3%).

Le pain est considéré comme un aliment différent des autres produits, il est obtenu grâce à la fermentation des sucres de la farine de blé libérés à partir de l'amidon suite à l'activité des enzymes naturelles de la farine. La fermentation est provoquée par la levure boulangère (*saccharomyces cerevisiae*). La fermentation convertit les sucres en H₂O et CO₂. Le sucre est ajouté pour initier le déclenchement de la fermentation. Le rôle du sel est de renforcer les qualités plastiques du gluten et agit sur l'activité de la fermentation, qu'il freine un peu et

joue dans ce domaine le rôle de régulateur. La matière grasse est ajoutée en panification pour renforcer la machinabilité de la pâte et joue un rôle dans la qualité organoleptique du pain [62].

Habituellement, un pain frais doit posséder une croûte croquante de couleur brunâtre, un bon arôme, il peut être découpé en fines tranches avec une mie de texture légère et élastique et un effet moelleux dans la bouche [63]. Actuellement, avec la production du pain à grande échelle, le consommateur est devenu de plus en plus exigeant en matière de qualité et souhaite des pains qui ont une longue durée de conservation, c'est pourquoi on fait recours aux agents émulsifiants contre le phénomène de rancissement du pain. Conjointement, ils améliorent légèrement la force, la tenue, la rétention gazeuse et la tolérance des pâtes, ils favorisent l'augmentation du volume des pains, la finesse de la mie et sa conservation sans pratiquement pénaliser la saveur du pain [64].

2.4. L'usage des améliorants

Pour ce qui est de l'usage des améliorants, l'éminent professeur en boulangerie Monsieur Raymond CALVEL le justifie lors de la journée sur le pain de qualité tenue au niveau du CRIAA en 1995 et à laquelle il a participé en soulignant que : « ... c'est ainsi, qu'au niveau des améliorants, l'on peut avoir recours à :

- ✓ des additifs amylasiques,
- ✓ des additifs oxydants,
- ✓ des additifs émulsifiants,
- ✓ des additifs réducteurs ».

Les additifs amylasiques sont employés lorsque les farines mises en œuvre sont hypodiastasiques.

Les additifs oxydants interviennent dans le travail mécanique de pétrissage pour permettre, plus tard, le blanchiment de mie.

Les additifs émulsifiants interviennent lorsqu'il y a un dysfonctionnement entre les différents composants de la pâte (farine, eau, protéines), ce qui entraîne une porosité de cette pâte, favorisant une légère augmentation de volume des pains, notamment en phase retardée.

Les additifs réducteurs interviennent surtout pour tempérer et corriger l'excès d'élasticité et de ténacité d'une pâte.

2.5. Procédé de panification

Tout pain fabriqué, résulte de la cuisson d'une pâte, préparée avec un mélange de farine panifiable, d'eau potable et de sel, etensemencée avec un agent de fermentation (levure et/ou levain). A ces ingrédients de base, sont ajoutés ou non, selon la variété de pain, le type et la qualité des farines utilisées, et le procédé de fabrication choisi, des additifs et/ou auxiliaires de fabrication autorisés par la législation française. Ils sont principalement destinés à améliorer les propriétés rhéologiques (ténacité, extensibilité, élasticité), structurales (microalvéolage) et fermentaires des pâtes [65] [66].

La fabrication du pain demande de nos jours en moyenne 4 à 5 heures, alors qu'au début du XX siècle, elle nécessitait 15 à 16 heures. Elle comprend les opérations suivantes : pétrissage, pointage (fermentation initiale ou fermentation en masse), divisage, pesage, boulage (début de la mise en forme), détente (fermentation intermédiaire), façonnage (fin de la mise en forme), apprêt (fermentation finale), enfournement, cuisson, défournement et ressuage.

La fabrication se résume en fait à une succession d'étapes "actives" (pétrissage, mise en forme) entrecoupées de phases "passives" (fermentation, cuisson, ressuage). Il est intéressant de noter qu'il en a toujours été ainsi, tout du moins depuis le XVIII siècle. La mécanisation et l'automatisation ont permis de rendre le travail beaucoup moins pénible et plus hygiénique. Et même si cela a pu être au détriment de l'aspect et de la flaveur pain, beaucoup d'efforts ont été réalisés et se poursuivent encore pour concilier mécanisation et maintien des qualités organoleptiques du pain, dans un but primordial, satisfaire le consommateur [65].

2.5.1. Le pétrissage

La bonne conduite de cette première étape conditionne, en grande partie, la qualité du produit fini.

Le pétrissage assure :

- le mélange des matières premières,
- la formation d'une pâte viscoélastique homogène à partir des deux constituants principaux que sont l'eau et la farine,

- l'incorporation d'air, indispensable notamment à l'action de l'agent de fermentation utilisé [65] [67] [68].

Entièrement manuel jusqu'au début du ce siècle, le pétrissage se faisait en un peu plus de 30 minutes et comprenait 4 phases bien distinctes, phases "actives", entrecoupées de phases de repos.

Après la mise en planche, la pâte devait présenter une surface légèrement convexe, lisse et sans crevasse. Aujourd'hui encore, le pétrissage à la main se fait en suivant ces étapes (la fabrication maison, par exemple). Cela permet d'obtenir une pâte qui se développera et se travaillera bien lors des étapes suivantes.

2.5.1.1. La formation de la pâte : aspects biochimiques et physico-chimiques

Le pétrissage développe la structure initiale de la pâte nécessaire aux transformations ultérieures. Tous les constituants de la farine, et tout particulièrement les protéines du gluten, participent à cette structure où l'eau joue un rôle prépondérant [69] [70].

Le pétrissage commence par un malaxage (frassage) juste après l'addition d'eau à la farine. L'eau se répartit peu à peu dans les constituants les plus hydrophiles (pentosanes, amidon endommagé, protéines) alors que les lipides commencent à modifier leur structure pour présenter des surfaces hydrophobes les plus restreintes possibles dans ce milieu hydraté. Au cours du pétrissage, la multiplication des contacts favorise l'établissement des liaisons des molécules d'eau avec les divers groupements des constituants, de l'amidon et des protéines notamment. Avec l'amidon, il y a formation de liaisons hydrogène avec les groupements -OH et les ponts -O- des chaînes polysaccharidiques. Avec les protéines, il se forme également des liaisons -H au niveau des liaisons peptidiques et des liaisons polaires ou ioniques avec les groupements latéraux libres des chaînes polypeptidiques. Entre les lipides et les protéines, s'établissent des interactions hydrophobes dues aux forces de répulsion des chaînes carbonées vis à vis des molécules d'eau. Simultanément, une phase continue protéique se développe, principalement par l'intermédiaire des protéines du gluten. Aux tous premiers stades, elles s'hydratent, voient leur configuration spatiale modifiée et s'associent pour former une masse souple. Soumises aux forces de cisaillement du pétrin dans une direction répétée, elles s'étirent, s'orientent et s'ordonnent

progressivement en lamelles minces pour former finalement en fin de pétrissage un film protéique homogène et imperméable, régulièrement distribué autour des granules d'amidon. Quant aux lipides, ils s'associeraient aux protéines du réseau par leur pôle hydrophobe et à l'amidon par leur pôle hydrophile [68] [69] [71].

Ainsi, amidons, protéines et lipides sont maintenus en phase dans un état relativement stable mais fragile. Les protéines plus ou moins dénaturées (déplissées) jouent le rôle d'émulsifiant naturel. Des émulsifiants (additifs) peuvent être ajoutés pour la fabrication de certains types de pains [68] [69] [71].

La formation du film protéique en lui-même est due aux possibilités qu'ont les gluténines et les gliadines de s'associer entre elles par des liaisons covalentes : des ponts disulfures (-S-S-), à l'intérieur d'une même chaîne (liaisons intrachaines) mais surtout entre deux chaînes voisines (liaisons interchaînes) pour permettre l'agrégation des protéines et contribuer à l'allongement et à la complexification du réseau protéique. Ces liaisons s'établissent à partir de deux groupements sulfhydryles (-SH) de deux cystéines (acide aminé sulfuré) et en milieu oxydant [68] [69].

La figure 2.1 représente les échanges de liaisons -S-S- à partir des groupes -SH libres.

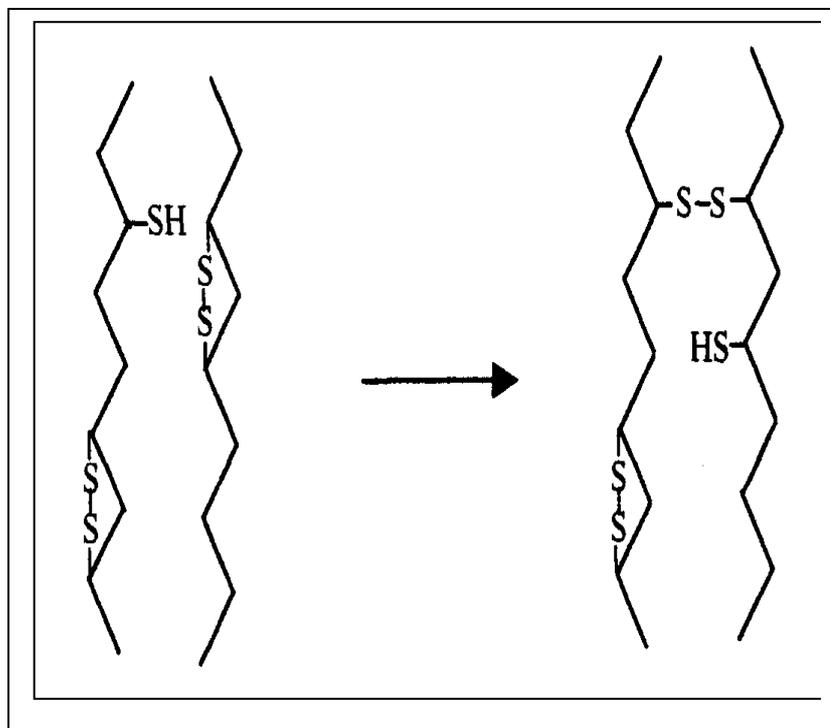


Figure 2.1 : Les échanges de liaisons -S-S- à partir des groupes -SH libres [68]

2.5.1.2. Les pétrins

Aujourd'hui, les pétrins sont donc devenus plus sûrs mais également plus pratiques (cuve amovible pour certains, roulettes pour la plupart.. .) et plus simples d'utilisation (programmation possible du temps et des vitesses de pétrissage, système de contrôle des températures intégré.. .).

Les pétrins peuvent être classés en trois catégories : ceux qui fonctionnent en discontinu ; dans ce cas, leur cuve doit être vidée avant de pouvoir les réalimenter et démarrer un nouveau pétrissage, ceux qui fonctionnent en semi-continu ; ils permettent de programmer et d'automatiser la chaîne de pétrissage, ceux qui fonctionnent en continu. Ils sont alors intégrés dans un système de production en continu.

Parmi les pétrins fonctionnant en discontinu et utilisés actuellement, on distingue :

- les pétrins à axe oblique,
- les pétrins à spirale,
- les pétrins à bras plongeants (ou bras mécaniques),
- les pétrins rapides à axe fixe pour les pétrissages à très haute vitesse [68] [72].

Les figures 2.2 et 2.3 représentent des modèles de pétrins VMI.



Figure 2.2 : Pétrin à axe oblique
VMI



Figure 2.3 : Pétrin à axe spirale
VMI

2.5.2. Le pointage ou fermentation initiale

Cette première période de fermentation commence immédiatement après l'arrêt du pétrin. La pâte repose avant d'être divisée. Le plus souvent, elle est laissée dans le pétrin, ce qui explique que l'on parle aussi de fermentation en cuve ou de fermentation en masse.

Idéalement, la pâte doit être à 25°C (température optimale de fermentation), mais il est possible de jouer sur la température pour accélérer ou diminuer la vitesse de fermentation et ainsi le développement de la pâte. Une température de 23 à 25°C est généralement adoptée [73].

Le temps de pointage est très variable. Il peut durer de quelques minutes à 3-4 heures. Il est plus long lorsque la pâte est douce (très hydratée), en l'absence d'additif, en présence de quantités de levures réduites ou de temps de pétrissage raccourci.

Les effets de la fermentation panair ne se résument pas, comme pour le commun des mortels, à un simple gonflement de la pâte. En effet, au cours du pointage, trois phénomènes importants se produisent simultanément [73].

Les propriétés rhéologiques de la pâte se modifient. Elle voit ses propriétés viscoélastiques se transformer tout au long de la fermentation, mais c'est au cours du pointage que ces phénomènes sont les plus remarquables. Ils correspondent à une prise de force, de ténacité de la pâte, due à une modification physique du gluten qui devient plus ferme (il se renforce), plus élastique et moins extensible. Si une certaine ténacité de la pâte est nécessaire pour le bon déroulement des opérations suivantes, particulièrement si elles sont mécanisées, une prise de force excessive est néfaste. La pâte se travaillera alors moins bien. Les caractéristiques mécaniques de la pâte sont donc largement dépendantes de cette étape [70] [74]. L'augmentation du volume de la pâte résulte de l'activité fermentaire des levures, et dépend à la fois de la capacité de rétention du CO₂ produit et de la faculté d'extensibilité du réseau glutineux. La fermentation débute immédiatement après l'arrêt du pétrin : pendant la durée du pétrissage, l'air incorporé à la pâte a permis aux levures de se multiplier [70] [74].

La fermentation principale, au cours du pointage, se déroule en deux phases. Les levures assurent d'abord la fermentation des sucres préexistants

dans la farine (glucose, fructose, saccharose), directement fermentescibles. C'est ensuite la très faible quantité de maltose présente dans la farine, mais surtout celui libéré par l'action conjuguée des amylases α et β de la farine (issues de la dégradation des granules d'amidon endommagés par la mouture), qui sont utilisés [70] [74].

La Figure 2.4 représente le schéma de dégradation de l'amidon au cours de la fermentation.

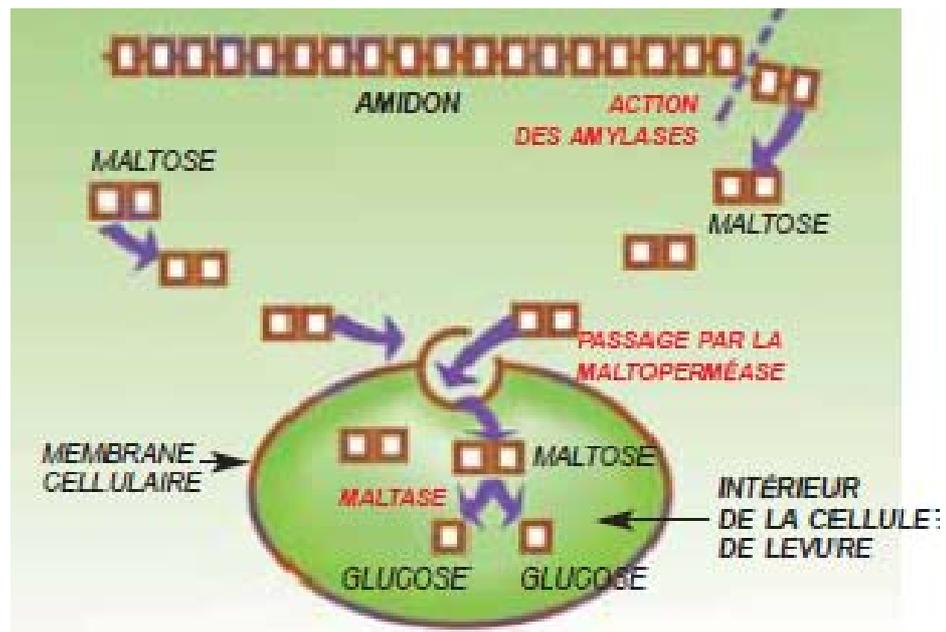


Figure 2.4 : Schéma de dégradation de l'amidon [75]

De nombreux composés volatils, précurseurs d'arômes responsables de la saveur du pain apparaissent. En effet, la plus grande part des arômes du pain est traditionnellement attribuée à la fermentation initiale, car la réduction de sa durée sans compensation par ailleurs, conduit à un goût de pain différent [70] [74].

2.5.3. Division et boulage

La masse de pâte initiale doit alors être divisée en pâtons de masse déterminée en fonction du produit fini désiré (baguette, bâtard, pain...). Par exemple, pour un pain de 400 g cuit, il faut un pâton de 550 g de pâte crue.

Le boulanger peut effectuer cette opération manuellement. Il dispose aussi de machines : les diviseuses. Ces appareils sont de deux types : les diviseuses hydrauliques à couteaux et les diviseuses volumétriques à piston. Le premier type est le plus répandu en France. Le second type est utilisé dès que le boulanger veut automatiser une partie de sa fabrication.

Après la division, les pâtons sont remis en forme de petites boules de pâte. On dit qu'ils sont boulés et l'opération s'appelle le boulage. Cela peut être réalisé à la main ou en machine, dans des bouleuses. On trouve sur le marché des bouleuses à bandes et des bouleuses coniques [60].

2.5.4. La détente

Elle correspond à une nouvelle période de repos (10 à 30 mn), associée à une reprise de pousse. Elle permet de redonner de l'extensibilité à la pâte et un meilleur aspect des pâtons dont la surface devient moins collante et plus lisse. Cela est nécessaire à une bonne "machinabilité" de la pâte avant un nouveau passage en machine. Même si l'étape suivante (façonnage) est réalisée manuellement, une extensibilité suffisante est nécessaire pour travailler les pâtons et leur donner leur forme définitive [76].

Cette étape intermédiaire de fermentation n'était pas nécessaire lorsque le travail de la pâte était manuel, la pâte étant alors beaucoup moins "agressée". La mécanisation des différentes étapes l'a rendue indispensable. Elle doit être d'autant plus prolongée que la division aura été brutale. Elle se fait le plus souvent dans des armoires ou chambres de repos dites à *balancelle*. Les pâtons sont soit alignés côte à côte manuellement (chez les artisans) ou automatiquement (dispositif d'alimentation et de répartition) dans des nacelles en forme de gouttières (en industrie), soit distribués (à la main ou automatiquement) dans des poches individuelles. Les matériaux utilisés pour les nacelles ou les poches sont très divers : bois ou métal, tissus de coton ou textiles artificiels, feutre . . . [68] [76].

2.5.5. Façonnage ou la tourne

C'est la dernière fois que le boulanger travaille sa pâte. Il donne sa forme définitive au pâton et permet de corriger certains défauts. Il se pratique

manuellement ou avec l'aide de machines. Il existe des façonneuses horizontales ou obliques. À l'intérieur, la pâte est laminée, enroulée puis allongée.

Dans le cas d'un façonnage manuel, chaque pâton est repris un par un par le boulanger. Selon le degré de fermentation et la consistance de la pâte, le serrage des pâtons est plus ou moins fort. Si une pâte manque de force, le serrage sera plus important. Le façonnage manuel exige de la part du boulanger un bon doigté. C'est notamment là que l'on reconnaît la qualification d'un boulanger [60].

2.5.6. L'apprêt

L'apprêt correspond à la dernière période de fermentation (fermentation finale) des pâtons après le façonnage et avant l'enfournement. C'est la dernière phase de repos pendant laquelle ils se développent pour atteindre un volume jugé optimal : environ trois fois leur volume initial au moment de la mise au four. A ce stade, les levures jouent pleinement leur rôle d'agent de levée de la pâte. La production de CO₂ l'emporte sur celle de l'alcool [69] [77].

Comme pour le pointage, la durée de l'apprêt est très variable (1h à 3h30) et dépend pour beaucoup du mode de pétrissage choisi. En règle générale, lorsque le temps de pointage est long (pétrissage lent), le temps d'apprêt est diminué et vice versa (pétrissage rapide). Elle va également dépendre : de la quantité de levures présente et de leur pouvoir fermentaire, du pouvoir enzymatique de la farine (activité amylolytique) [77].

2.5.7. Cuisson

La température idéale de cuisson du pain français est de 250 °C. Le four doit être préchauffé, car une certaine quantité de chaleur est perdue à l'introduction des pâtons. Avant d'enfourner les pâtons, le boulanger introduit de la buée dans son four. Cette opération a plusieurs objectifs :

- ✓ entourer le pâton d'une mince pellicule d'eau qui assouplit la pâte et permet son dernier développement ;
- ✓ limiter l'évaporation de l'eau du pâton lui-même ;
- ✓ accentuer la finesse de la croûte et enfin lui donner une belle couleur dorée.

Ensuite, on distingue trois étapes, en fonction des températures observées à l'intérieur même du pain (figure 2.5) :

- ✓ jusqu'à 50 °C, la fermentation est accélérée puis arrêtée ;
- ✓ de 50 à 80 °C, il y a formation d'un empis d'amidon et coagulation du gluten. Le développement du pain est terminé ;
- ✓ de 80 à 100 °C, il y a caramélisation et réaction de Maillard [60] [61] [62].

La Figure 2.5 démontre la transformation du pain pendant la cuisson.

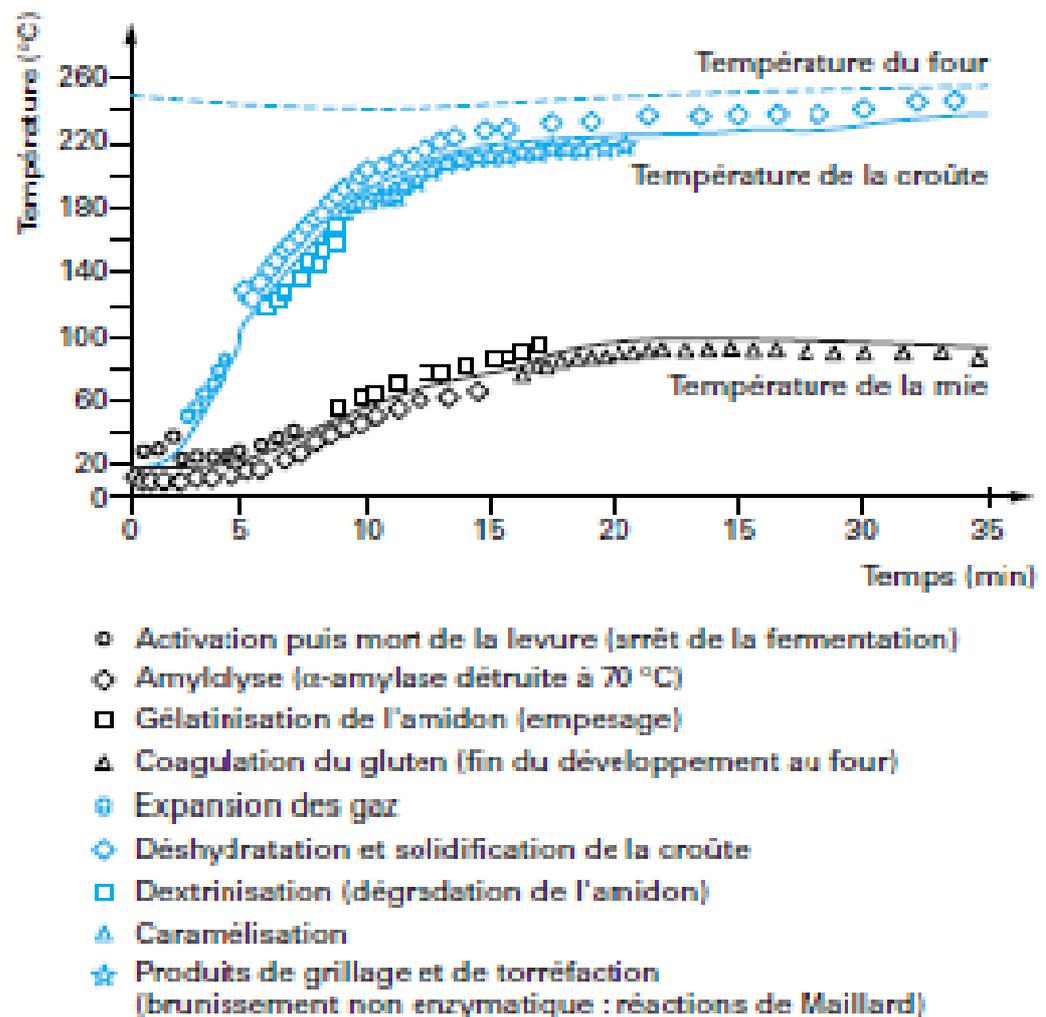


Figure 2.5 : Transformation pendant la cuisson du pain [60]

Cette réaction correspond à un brunissement du pain en surface. Le type de four a une incidence directe sur la qualité du pain. La cuisson sur sole traditionnelle se distingue nettement de la cuisson sur filet ou sur plaque. On peut

classer les fours selon trois critères : les sources de chaleurs, le mode de transmission de la chaleur et le mode d'introduction des pâtons.

Les sources d'énergies utilisées sont : le bois, le gaz, le fioul et l'électricité.

La transmission de chaleur peut être directe ou indirecte. En chauffe directe, on peut trouver des fours chauffés exclusivement au bois ou au gaz. Les gaz de combustion traversent directement la chambre de cuisson. Les fours électriques sont à classer dans cette catégorie, car la chaleur est transmise sans intermédiaire. Les fours à chauffage indirect ne laissent pas communiquer les gaz de combustion et les produits à cuire dans l'enceinte de cuisson. Il y a seulement circulation de l'air chaud autour.

L'introduction des pâtons dans le four se fait à la pelle ou à l'aide d'un tapis enfourneur pour les fours à soles fixes. Elle est réalisée par le chariot entier dans les fours à chariot, que ce dernier soit rotatif ou non [60].

2.5.8. Ressuage

Le ressuage correspond au refroidissement du pain. Il commence dès la sortie du four. À ce moment, la mie est à une température d'environ 100 °C. Dans un premier temps, elle baisse rapidement en température, puis plus lentement. Au bout d'une heure, la température est stabilisée. Le ressuage se caractérise par un dégagement de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone. Le pain perd alors environ 1 à 2 % de sa masse. Son volume diminue également. Des fêlures au niveau de la croûte peuvent être constatées [60] [61] [62].

2.6. Produit fini

2.6.1. La valeur nutritionnelle du pain

En s'appuyant sur les bases du fonctionnement énergétique de l'organisme humain, les spécialistes en nutrition recommandent que la fourniture d'énergie soit assurée à raison de 55% par les glucides, 15% par les protéines et 30% par les lipides .

En Europe, et depuis 1995, la tendance à la reprise de la consommation des produits céréaliers (dont le pain) devrait en principe contribuer à rééquilibrer le rapport glucides/lipides.

C'est pourquoi, sur cet aspect, le pain devrait obligatoirement contribuer à élever la densité nutritionnelle des régimes car le pain idéale devrait avoir un meilleur index glycémique, un taux protéique suffisamment élevé, et être riche en fibres alimentaires bien tolérées [60] [61] [62].

2.6.2. Aspects sensoriels

Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, les consommateurs ont plébiscité des pains développés, à la mie fine et blanche. Depuis quelques années de nombreuses méthodes, anciennes pour la plupart, ont été remises au goût du jour. Elles aboutissent toutes à l'obtention d'un pain moins développé, à la mie moins blanche et plus alvéolée et ayant surtout plus de goût. Ces pains répondent à un souhait des consommateurs pour des produits rustiques, plus naturels et avec un caractère gustatif supérieur [60].

On a identifié 250 composés volatils dans l'arôme du pain. Toutefois, seules quelques substances aromatiques importantes engendrent un arôme typique, même à de très faibles concentrations. Deux processus fondamentaux interviennent dans l'élaboration de l'arôme caractéristique du pain : la fermentation de la pâte et le processus de cuisson [60] [61] [62].

Quant au goût du pain, l'appréciation est souvent subjective. On dispose en effet de peu de mesures systématiques de la perception des qualités organoleptiques des différents pains, qui peuvent varier d'une fabrication à une autre.

Un bon goût de pain fait la promotion et la vulgarisation de ce dernier dans les différents marchés où il évolue. Un sondage réalisé auprès des français à la fin 2000, indique que 54% parmi les sondés ont considéré que le pain n'a plus de goût [62].

Les effets sur le goût liés à la variation d'un certain nombre de paramètres, comme le degré de pétrissage, sont assez bien contrôlés. D'autres influences, comme la réduction ou la suppression des temps de pointage, le sont beaucoup moins. Et une partie de ces facteurs, comme l'emploi de levain naturel, le sont très rarement [60] [61] [62].

En l'absence d'étude exhaustive, l'expérience permet de lister les facteurs et de rappeler leur influence relative [60].

- la farine est le premier facteur, selon ses caractéristiques de taux de cendres et de teneur en protéines ;
- le levain et la pâte fermentée peuvent avoir différents niveaux d'acidité, qui donnent dans l'ensemble des pains plus goûteux, le levain apportant très spécifiquement le goût acide ;
- le type de levure et la dose utilisée ont un effet direct sur la fermentation, donc sur le goût. On observe généralement que la note aromatique n'est détectée qu'entre 3 et 6 % de levure ;
- le chlore freine l'action de la levure, tandis que le calcium favorise la tenue de la pâte en aidant le gluten à mieux se conformer. Ces deux éléments se trouvent en quantités variables dans l'eau ;
- la pureté du sel ne semble pas entrer significativement en ligne de compte. En revanche, son dosage et le moment de son incorporation sont importants. Rappelons que le sel freine l'action des lipoxygénases et par conséquent, son incorporation tardive favorise l'oxydation de la pâte en dénaturant le goût ;
- l'acide ascorbique a en soi peu d'influence sur le goût du pain ;
- la fermentation est nécessaire à la constitution des stades primaires de l'arôme et du goût. Le temps et la température jouent un rôle important en la matière ;
- le pointage, trop négligé dans les diagrammes de fabrication actuels, permet de démarrer très tôt le processus de fermentation. Il favorise l'élaboration de pains ayant du goût ;
- la mécanisation du travail des pâtes a pour conséquence un endommagement du réseau glutineux et un dégazage parfois excessif des

pâtons, d'où une structure de mie régulière et serrée ayant une incidence sur la texture et la mâche finale du pain. Dans les qualités organoleptiques d'un pain, celles de la mie sont souvent mises en avant.

Les substances aromatiques, elles, se développent généralement sous l'action de la chaleur, lors de la cuisson et surtout dans la partie qui forme la croûte (caramélisation, réaction de Maillard) [60].

CHAPITRE 3

PLANS D'EXPERIENCES

3.1. Introduction

Dans de nombreuses industries, un grand nombre de produits sont obtenus en mélangeant deux ou plusieurs composants ou ingrédients. Citons par exemple :

- ❖ Le vin qui est généralement produit à partir de différents cépages (sergent, Mathieu et Phan- Tan Luu [1985];
- ❖ Le brassin de brasserie obtenue à partir de différentes variétés de malts (Moll et al. [1982].

Dans chacun des exemples ci-dessus, nous sommes intéressés par la connaissance d'une ou plusieurs propriétés : qualités organoleptiques pour les vins, rendement de brassage et composition chimique en malterie. Ces propriétés dépendent de la proportion de chaque constituant dans le mélange étudié.

Afin de pouvoir établir une formulation adéquate, il s'avère indispensable de suivre la méthode des plans d'expériences qui permet de structurer les démarches expérimentales entreprises et donner ainsi de la crédibilité aux informations et résultats prélevés [78].

3.2. Définition de la méthode des plans d'expériences

Le terme "Plan d'expériences " vient de l'anglais *Design of Experiments* qui se traduit par "conception des expériences" .En fait, la méthode englobe aussi bien la définition de la séquence d'essais à réaliser pour étudier un problème donné que l'analyse, algébrique et statistique, des résultats de ces essais.

Selon la définition donnée par Fisher, les plans d'expériences constituent "un essai technologique d'utilisation maximale des données". L'efficacité d'un plan d'expériences en termes d'information acquises et de fiabilité de ces informations est supérieure à celle de toute séquence d'essais non structurée de même volume. La méthode des plans d'expériences permet de tirer d'un nombre d'essais donné un maximum d'informations concernant l'influence des facteurs. Elle permet notamment de maximiser le ratio informations recueillies/ nombre d'essais réalisées. Elle offre ainsi la possibilité de quantifier et de hiérarchiser les effets d'un grand nombre de facteurs du système étudié, et cela avec un nombre d'essais relativement faible, c'est-à-dire dans le minimum de temps et de coûts [79].

3.3. Notions de base

3.3.1. Quelques terminologies

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées. Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (voir figure 3.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en générale, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut [80].

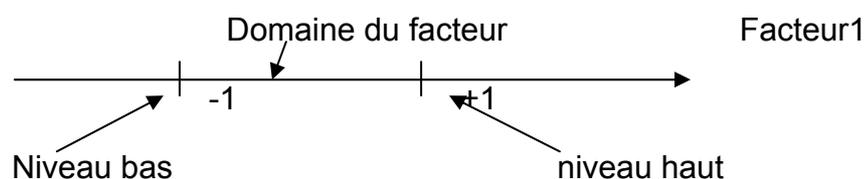


Figure 3.1: Le domaine de variation d'un facteur

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut +1. S'il y a un second facteur, son niveau haut et son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (voir figure 3.2).

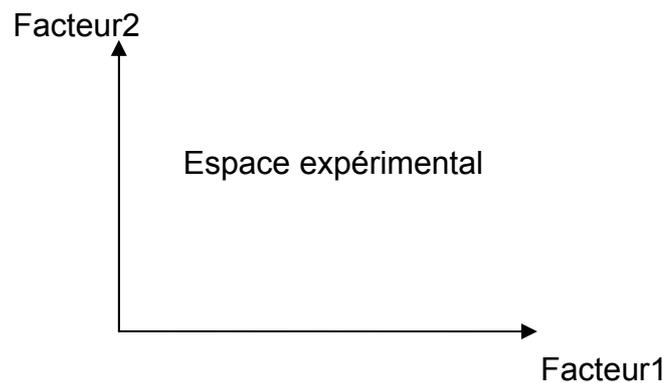


Figure 3.2 : Représentation d'un espace expérimental

3.3.2. Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs [78].

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse.

Le nombre et l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

3.3.3. Matrice d'expériences

La représentation géométrique d'un plan d'expériences est commode pour imaginer la position des points expérimentaux dans le domaine d'étude. Mais elle ne peut plus être employée dès que le nombre de facteurs est supérieur à trois [81].

Pour les espaces multidimensionnels, nous adopterons une représentation en forme de tableau ou matrice d'expériences. Cette dernière comprend une première colonne qui identifie les essais. Les colonnes suivantes indiquent les coordonnées des points représentatifs des expériences prévues. Les expériences géométriques et matricielles sont équivalentes. Les matrices d'expériences présentent l'avantage d'être utilisables quelque soit le nombre de facteurs, c'est-à-dire quel que soit le nombre de dimensions de l'espace expérimental.

3.3.4. Types de plan d'expériences

Afin de subvenir aux besoins que peut rencontrer l'expérimentateur pour mener à bien son étude ; différents types de plans d'expériences peuvent être utilisés [78]:

*Plans factoriels complets.

*Plans centrés composites.

*Plans fractionnaires.

*Plans de mélanges.

Chaque plan possède des particularités qui lui sont propre. Nous ne traiterons ici que le plan correspondant à notre étude, il s'agit des plans de mélange.

3.4. Mélanges

Dans le cas de mélanges, les facteurs sont les proportions de chaque composant. Ils ont donc deux particularités importantes [81] :

- Leur somme est égale à l'unité, ils ne sont donc pas indépendants ;
- Leurs valeurs sont des nombres sans dimension, parfaitement comparables ; une valeur de 0,1 à la même signification, quelle représente la proportion d'un antioxydant dans une crème dessert, ou la proportion d'un cépage dans un vin.

On représente généralement le nombre de composants d'un mélange par q et la proportion du composant i par x_i . Nous avons donc les contraintes suivantes

$$x_i \gg 0 \text{ et } \sum_i x_i = 1 \quad i = 1, 2, \dots, q$$

Ces contraintes sur les valeurs que peut prendre x_i font que les mélanges ne peuvent pas être traités de la même façon que dans le cas générale, dans lequel les valeurs prises par les variables codées ne sont pas soumises à ces contraintes. Compte tenu de celles-ci, toute variation de la proportion d'un composant entraîne une variation de la proportion des autres composants.

3.4.1. Domaine expérimental

Le domaine expérimentale possible est un simplexe régulier de dimension $q - 1$ pour $q = 3$, le domaine expérimental est un triangle équilatéral, pour $q = 4$, ce domaine est un tétraèdre régulier. Les coordonnées représentant les valeurs de x_i , $i = 1, 2, 3 \dots, q$, sont appelées : coordonnées du simplexe. Les sommets du simplexe représentent les composants purs : ($x_i = 1, x_j = 0 \ j \neq i$). Les points intérieurs représentent des mélanges dans lesquels tous les composants sont présents $x_i > 0 \ i = 1, 2, \dots, q$.

3.4.2. Choix des expériences (mélanges)

Nous désirons connaître pour tous les mélanges possibles situés dans le domaine expérimental d'intérêt, la valeur de (ou des) propriété(s) étudiée(s). Pour obtenir les informations désirées, il faut effectuer des mesures sur des mélanges.

Mais peut-on choisir au hasard ces mélanges ?

Nous devons, après avoir établi la loi de mélange, pouvoir calculer pour l'ensemble des mélanges possibles, la valeur de la propriété étudiée. Considérons un mélange quelconque M_i , connaissant la composition de ce mélange et la loi de mélange, nous pouvons calculer la valeur d'une propriété Q_i . Cette valeur calculée que nous appelons valeur prévisionnelle, ne devra pas être trop éloignée de la propriété (ou réponse) que nous trouverions si nous effectuions réellement la mesure de ce mélange. Nous disons que la prévision doit être de bonne qualité.

On démontre que la réponse prévisionnelle dépend de la forme de la loi de mélange et du choix de l'ensemble de mélanges soumis à l'expérimentation. Elle est indépendante des résultats des expériences. On peut choisir au hasard ces mélanges et parmi l'ensemble de tous les mélanges possibles, certains d'entre eux apportent plus d'information que d'autres. On aura donc intérêt à choisir ces mélanges préférentiellement. On désigne sous le terme mélanges informatifs. Le choix de ces mélanges se fait en appliquant la Méthodologie de la Recherche Expérimentales (Mathieu et Phan- Tan-Luu [1995] [78]).

Mais comment choisir cet ensemble optimal?

- Pour des raisons de coût d'expérimentation et d'efficacité, on peut chercher à minimiser le nombre de mélanges nécessaires. L'expérimentation pouvant être coûteuse ou même limitée, le nombre de mélanges devra être réduit ;
- La propriété de séquentialité est souvent très recherchée dans les problèmes de mélanges. Elle consiste, lorsque la complexité du problème va en augmentant à effectuer les expérimentations en plusieurs étapes. Le choix des mélanges informatifs à chaque étape doit tenir compte des mélanges déjà mesurés

Comment représenter les résultats ?

Quand la loi du mélange est établie, nous pouvons calculer pour n'importe quel mélange possible, appartenant au domaine d'intérêt, la valeur de la réponse étudiée et ceci avec une bonne précision. L'objectif poursuivi : connaître pour tous les mélanges possibles situés dans le domaine expérimental d'intérêt, la valeur de la réponse étudiée est donc atteinte.

3.5. Modèles de surfaces de réponses

Les premiers travaux portent sur cette approche méthodologique datent d'une quarantaine d'années ; Claringbold [1955] a publié la première matrice

d'expérience raisonnée dans un travail portant sur l'étude des effets d'un mélange d'hormones en 1955. Mais c'est en 1958, que Scheffé [1958] a publié les bases de la stratégie expérimentale optimale appliquée aux mélanges. Les travaux de Scheffé peuvent être considérées comme étant ceux qui ont apporté les fondements dans ce mélange et sont restés (et restent encore) à l'origine de beaucoup d'applications (Scheffé [1958, 1963], Cornell [1990]) [81]

CHAPITRE 4

METHODES ET MATERIELS

4.1. Objectifs de l'étude

L'objectif de ce travail est de développer des farines composites dans lesquelles une partie de la farine de blé est remplacée par d'autres sources amylacées. Dans cette optique nous voulons réaliser des formulations de pains à partir d'un mélange de farines de blé, orge et de maïs.

Une substitution partielle de la farine de blé par celles des céréales locales peut constituer une alternative intéressante en termes de coûts par rapport aux grains importés et constitue une valorisation de ces céréales qui ont connu une bonne production ces dernières années afin d'enrichir le pain par leurs composants bénéfiques notamment (les protéines, les fibres, les vitamines...etc.).

4.2. Démarche expérimentale

Notre travail consiste à incorporer des pourcentages de farine d'orge et de maïs dans la farine propre de blé tendre en vue de réaliser des formulations de pain composites de bonne qualité comparable au pain 100% blé .

Après acquisition d'une quantité de 50 kg de grains d'orge variété (orge de SAIDA) et de 50 kg de maïs variété (Maïs jaune) au niveau de l'OAIC de BLIDA et mouture des grains dans un moulin semi industriel dans la région de BENI TAMOU. Nous avons commencé nos essais expérimentaux en mois de septembre 2010 au niveau du laboratoire de la société MOLITELL de BLIDA, où nous avons réalisé l'ensemble des analyses physico-chimiques et technologiques sur les grains de céréales et les farines composites.

Les essais de panifications ont été menés au niveau d'une boulangerie industrielle dans la région de SOUMAA BLIDA.

Toute expérience devrait être l'objet d'une planification précise qui se concrétise sous la forme d'un plan d'expérience ou protocole expérimentale.

Les travaux de SCHEFFE (1958) sont les bases de la stratégie expérimentale appliquée aux mélanges, ils sont et restent l'origine de beaucoup d'applications.

Les réseaux de SCHEFFE présentent de nombreux avantages :

- Construction facile et nombre d'expériences minimales.
- Ils contiennent autant de points qu'il y'a de coefficients dans le polynôme correspondant.
- Test de validité du modèle par l'induction de points tests.
- Modèle prévisionnel permettant d'obtenir une prévision de la réponse avec variance minimale.

Au début de notre expérimentation, nous avons tenté de formuler des mélanges avec des pourcentages allant de 0 à 100% pour les 03 composants en se basant sur le réseau de SCHEFFE où les constituants ne sont soumis à aucune contrainte

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad (4.1)$$

mais nous avons constaté une altération des propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines mélanges au delà de 20% d'incorporation, pour cette raison une contrainte relative au pourcentage d'incorporation doit être imposée, elle est de type :

$$0 < a_i \leq x_i \leq 1 \quad (4.2)$$

$$0 \leq x_i < b_i < 1 \quad (4.3)$$

Pour résoudre les problèmes posés dans le cas des mélanges avec contraintes et pour conserver cette approche méthodologique, nous devons utiliser les logiciels modernes de construction des matrices d'expériences optimales.

4.3. Matériels

L'étude a été réalisée à partir d'une quantité de 50 kg de grains d'orge de variété (orge de SAIDA) et de 50 kg de maïs de variété (Maïs jaune), fournis par l'OAIC (l'office Algérien interprofessionnel des céréales), ces grains ont été choisis compte tenu de leurs caractéristiques agronomiques et technologiques.

Pour obtenir une granulométrie fine et uniforme, voisine de celle de la farine de blé (environ 130 microns), nous avons réalisé un blutage manuel, les taux d'extraction sont respectivement : 61% pour la farine d'orge et 70% pour la farine de maïs.

Une farine de blé de type commerciale sans additifs, fournie par les moulins de MOLITELL, a été utilisée pour réaliser la farine composite.

4.4. Méthodes d'analyses

4.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des grains et farines

Les analyses effectuées sur les grains de blé, orge et maïs sont :

- La détermination du taux d'impuretés selon la norme Algérienne NA.2739-1992.
- La détermination La masse à l'hectolitre est réalisée selon la norme Algérienne NA.1613-1990.
- La détermination du taux d'humidité des grains et des farines est réalisée selon la norme NE.1.1-27-1985.
- La détermination du taux de cendre des grains et des farines est réalisée selon la norme Algérienne NA.733-1990.
- La détermination taux d'affleurement des farines est réalisée selon l'arrêté interministériel du 25.05.1997.
- La détermination du taux acidité grasse des farines est réalisée selon la norme Algérienne : N° 80 du 26/12/2007.
- La détermination la teneur de gluten des farines est réalisée selon la norme NE.1.1.25-1985.

4.4.2. Les analyses microbiologiques des farines

- La recherche des moisissures est effectuée selon la norme ISO 7698 – Août 1991.
- La recherche de clostridium sulfite –réducteur est réalisée selon l'arrêté du journal officiel de la république algérienne : N° 35 du 27/05/1998.

4.4.3. Analyses technologiques

- La détermination de l'indice de chute des farines est réalisée selon la norme NA.1176/ ISO 3093.
- Les données Alvéographiques des farines ont été déterminées à l'alvéographe Chopin selon la norme NA.1188/1990.

4.4.4. Essai de panification

L'essai de panification a été réalisé dans une boulangerie industrielle privée. La formulation utilisée au cours du test de panification est la suivante : 5kg de farine composée préparée à l'avance selon les pourcentages indiqués pour chaque mélange figurant dans la matrice d'expérience du plan D- optimal pour les mélanges binaire et ternaire, 100g de sel de table, 75g de levure sèche instantanée et 20g d'acide ascorbique, les ingrédients sont mélangés ensemble en une seule fois, le taux d'hydratation varie de 65% à 68% selon la consistance de la pâte recherchée. Après pétrissage dans un pétrin à axe oblique, et un pointage en cuve pendant 20 minutes à 27°C, la pâte est divisée et pesée en pâtons de 280 g et ceux-ci sont mis en boule, puis laissés lever à la température ambiante pendant 10 minutes. Les pâtons sont ensuite façonnés puis l'étape de l'apprêt, deuxième fermentation sur couches (2 heures à 27°C) est entamée. La cuisson a lieu à 250°C pendant 25 minutes dans un four rotatif.

À la sortie du four, les pains sont laissés ressuyer pendant 2- 4 heures avant de procéder au pesage. La détermination du volume est effectuée La densité des pains est donnée par le rapport entre le poids du pain après ressuyage et son volume. Les tests d'appréciation générale de la qualité des pains composites sont réalisés à l'aide de la grille de notation mise au point par BIPEA dans le cadre de la norme NF V03-716.

Les modes opératoires suivis lors des tests de panification, sont différents de ceux qui sont appliqués par l'artisan boulanger. Ils permettent toutefois d'apporter un jugement objectif sur la farine testée. Le boulanger d'essai n'a pas pour vocation de faire du beau pain, mais il a pour impératif de respecter un protocole à la lettre. L'artisan boulanger, lui, apporte au cours de la fabrication son savoir-faire et adapte ses processus, si besoin est. En production, le temps de

pointage n'est pas strictement défini ; il l'est, à la minute près, lors des tests de panification.

Nous avons opté de réaliser quelques des tests panification sur des farines composées (que nous avons jugés les plus représentatives) plus la farine 100% blé tendre comme farine témoin.

Le processus de fabrication du pain s'étend environ sur 3h15mn. Tout au long de cette fabrication, les paramètres qualitatifs et quantitatifs sont appréciés et mesurés. Ces paramètres sont très déterminants dans le jugement final d'un test de panification.

Les paramètres les plus exploités sont :

- Le niveau d'hydratation de la farine : paramètre quantitatif, l'hydratation en panification est très cruciale et influence énormément l'aspect « collant » des pâtes au cours du pétrissage. Pour les pains de type baguettes auxquels nous nous sommes intéressés, l'hydratation doit être comprise entre 65 et 68%. le rendement en pâte, est la quantité d'eau que peut absorber la farine pour une consistance donnée.
- Le volume du pain : second paramètre quantitatif, le volume de pain est l'un des paramètres qui prédominent dans l'acceptation d'un ingrédient testé. Il est mesuré selon la méthode décrite dans l'annexe.
- L'élasticité : c'est la propriété que possède la pâte à reprendre plus au moins rapidement sa position initiale après de faible déformation. Un retour rapide est jugé en « excès » et un retour lent en « insuffisant », c'est un paramètre qualitatif.

Les étapes du diagramme de panification sont représentées dans la figure 4.1

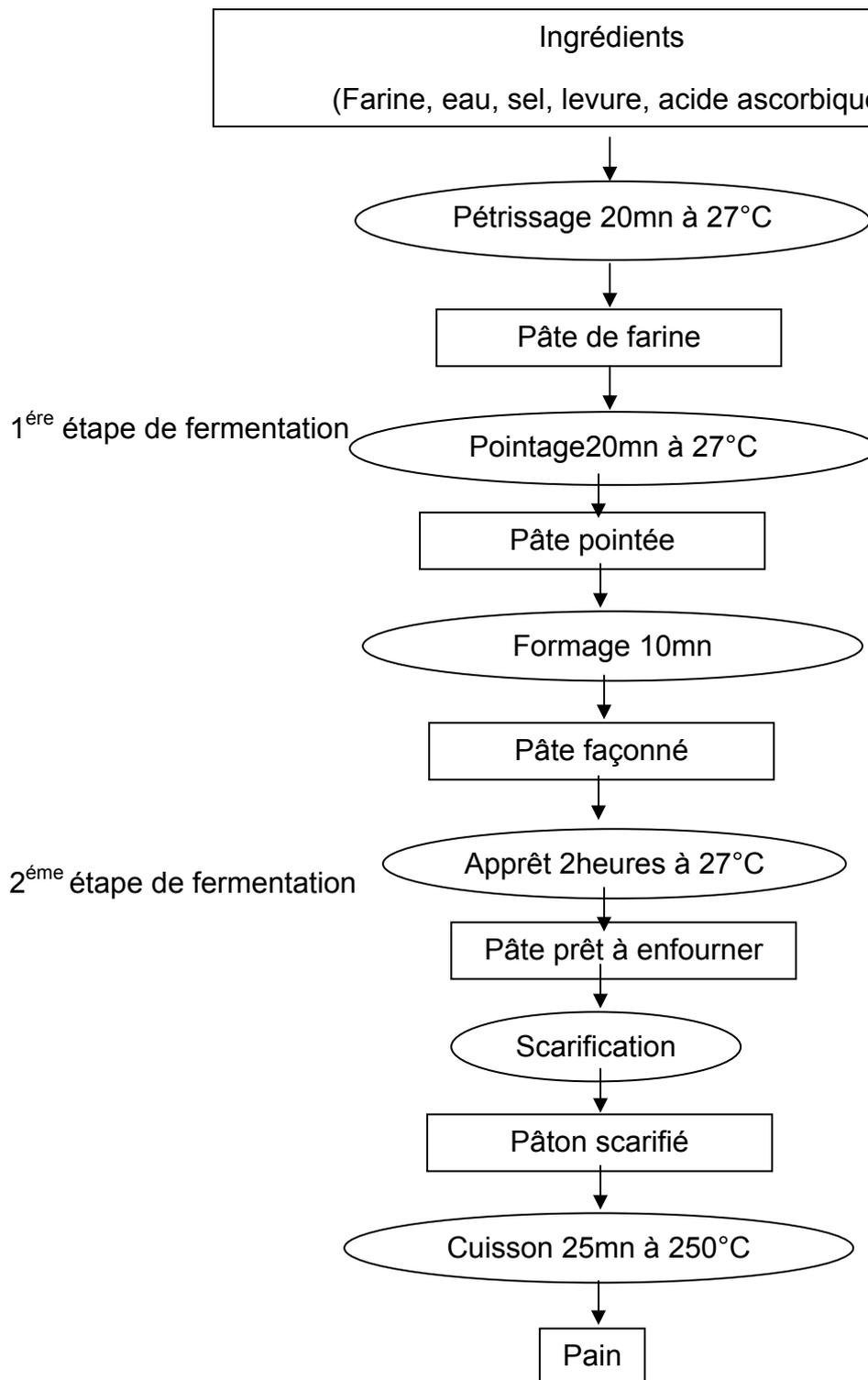


Figure 4.1 Les étapes du diagramme de panification

Les caractéristiques techniques du principal matériel utilisé en panification sont données dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 : Les caractéristiques techniques du principal matériel utilisé en panification

Matériels	Caractéristiques
Pétrins à axe oblique (marque MIXER)	<ul style="list-style-type: none"> • Fourche +/- inclinée par rapport à la cuve • 2 vitesses : 40 et 80 tours/mn. • Pétrissage améliorée ou intensifié • Tête de l'appareil fixe • Cuve entraînée (motorisée)
Diviseuse hydrauliques (marque JAG)	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite une pesée préalable • Repos 10- 20 mn en bac • Plateau animé d'un mouvement vertical par un vérin hydraulique
Bouleuse à bandes	<ul style="list-style-type: none"> • Les pâtons cheminent entre deux tapis se déplaçant horizontalement et à des vitesses différentes, en sens opposé.
four à chariot rotatif (marque GDM FORNI)	<ul style="list-style-type: none"> • contiennent deux enceintes : la chambre de cuisson où sont introduits les chariots (supports des plaques ou filets de cuisson contenant les pâtons), et accolée à celle-ci, une enceinte contenant l'équipement de chauffe

La notation est globalisée en une note totale sur 300 points résultant d'une note de pâte sur 100, de pain sur 100 et d'une note de mie sur 100 points.

Les critères retenus sont annotés de la façon suivante sur un total de 100 :

- Les caractéristiques de la pâte sont notées sur 25 au pétrissage, sur 10 au pointage, sur 25 au façonnage, sur 10 à l'apprêt, et sur 30 à la mise en four.
- Pour l'aspect du pain les 70 points sont réparties entre la section, la couleur, l'épaisseur, le croustillant, le coup de lame, le développement, le volume a une pondération de 30 points.
- Les notes de la mie sont réparties entre la couleur, la texture, les alvéoles, et la flaveur.

4.4.5. Plans d'expériences

4.4.5.1. Objectif de l'étude

Les propriétés d'un mélange dépendent généralement de sa composition, et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants.

Soit un mélange de k constituants en proportions x_1, x_2, \dots, x_k et Y , la propriété qui nous intéresse. Le problème se pose souvent en ces termes : quelle composition donner au mélange pour que Y satisfasse une spécification (par exemple, $Y > Y_{min}$) ?

Une première démarche consiste à réaliser différents mélanges, à les tester jusqu'à ce que certains répondent au problème. Il faudra ensuite réaliser d'autres mélanges de compositions voisines pour voir dans quelle mesure nous pouvons faire varier les compositions sans sortir des spécifications.

Une autre démarche plus sûre et dans l'ensemble plus économe en nombre d'essais à faire, revient à traduire les variations de Y en fonction de la composition du mélange par la relation $Y = f(x_i)$. Cette relation devra être valide, c'est-à-dire traduire fidèlement les variations de Y en fonction des x_i , et aussi simple que possible car le nombre des mélanges à réaliser croît avec la complexité de la relation. Lorsque nous disposons de cette équation, le tracé des courbes isoréponses donne la région des mélanges conformes à la spécification.

4.4.5.2. Problème à résoudre

On doit trouver les taux d'incorporation de chaque type de farine qui nous permettent d'avoir une activité α – amylasique convenable pour une farine panifiable et de bonnes propriétés rhéologiques afin d'aboutir à des pains satisfaisants de point de vue organoleptique.

4.4.5.3. Choix des réponses

Les réponses choisies sont le travail (W) et l'indice de chute.

4.4.5.4. Choix des facteurs

Les paramètres susceptibles d'influer sur les réponses sont :

Facteur 1 : le pourcentage massique de la farine blé tendre x_1

Facteur 2 : le pourcentage massique de la farine d'Orge x_2

Facteur 3 : le pourcentage massique de la farine de Maïs x_3

4.4.5.5. Choix du plan expérimental

Les plans de mélanges permettent de choisir les mélanges à tester de façon à avoir les meilleures estimations des coefficients du modèle, ce sont des plans optimaux. Un plan D- optimal permet de couvrir la totalité d'un domaine quelle que soit sa forme. Nous remarquons qu'à l'exception du centre, les points choisis sont situés aux limites du domaine.

4.4.5.6. Le modèle

Scheffé (1958) propose que, dans le domaine expérimental défini par les q composants, la réponse expérimentale étudiée soit représentée par un polynôme de la forme (modèle quadratique) :

$$Y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{23} x_2 x_3 + a_{13} x_1 x_3$$

Les proportions x_i des composants du mélange doivent respecter les contraintes :

$$x_i \geq 0 \quad \text{et} \quad \sum_i x_i = 1 \quad i = 1, 2, \dots, q$$

Le choix du modèle quadratique n'est pas aléatoire, car nous avons d'abord testé le modèle linéaire qui a révélé des écarts importants entre les valeurs observées et les valeurs calculées c'est pour cette raison que ce modèle n'a pas été retenu.

4.4.5.7. Expérimentation

Les tableaux montrent les matrices d'expériences qui résument l'ensemble des données de l'expérimentation et les résultats de chacun des 5 (mélanges binaire) ou 10 (mélanges ternaire) essais.

L'examen des résultats obtenus dans ces tableaux montre que le travail W de certains essais est supérieur à 0,0120 joules, et que l'indice de chute est inférieur à 350 s pour avoir une valeur d'utilisation convenable en boulangerie. On attaque l'interprétation avec optimise.

Tableau 4.2 : la matrice d'expérience du plan D- optimal pour les mélanges binaire farine de Blé tendre – farine d'Orge. Le travail

Numéro d'essai	Farine de Blé tendre	Farine d'Orge	Le travail W (joules)
1	0,8	0,2	0,0100
2	1	0	0,0220
3	0,95	0,05	0,0135
4	0,85	0,15	0,0109
5	0,9	0,1	0,0127

Tableau 4.3 : la matrice d'expérience du plan D- optimal pour les mélanges binaire farine de Blé tendre – farine de Maïs. Le travail

Numéro d'essai	Farine de Blé tendre	Farine de Maïs	Le travail W (joules)
1	0,8	0,2	0,0125
2	1	0	0,0220
3	0,95	0,05	0,0174
4	0,85	0,15	0,0140
5	0,9	0,1	0,0160

Tableau 4.4 : la matrice d'expérience du plan D- optimal pour les mélanges ternaire. L'indice de chute

Numéro d'essai	Farine de Blé tendre	Farine d'Orge	Farine de Maïs	Indice de chute (s)
1	0,850	0,100	0,050	312
2	0,950	0,000	0,050	340
3	0,900	0,050	0,050	326
4	0,800	0,100	0,100	297
5	0,900	0,000	0,100	326
6	1,000	0,000	0,000	355
7	0,950	0,025	0,025	341
8	0,850	0,050	0,100	311
9	0,900	0,100	0,000	326
10	0,950	0,050	0,000	341

Tableau 4.5 : la matrice d'expérience du plan D- optimal pour les mélanges ternaire. Le travail.

Numéro d'essai	Farine de Blé tendre	Farine d'Orge	Farine de Maïs	Le travail (j)
1	0,850	0,100	0,050	0,0103
2	0,950	0,000	0,050	0,0174
3	0,900	0,050	0,050	0,0114
4	0,800	0,100	0,100	0,0110
5	0,900	0,000	0,100	0,0160
6	1,000	0,000	0,000	0,0220
7	0,950	0,025	0,025	0,0115
8	0,850	0,050	0,100	0,0114
9	0,900	0,100	0,000	0,0127
10	0,950	0,050	0,000	0,0135

4.4.5.8. Les contraintes de la modélisation

En réalité, dans de nombreux problèmes, l'étude des constituants purs ne nous intéresse pas. Le domaine expérimental d'intérêt n'est donc pas tout le

domaine expérimental possible ; il est nécessaire de bien le décrire et pour cela, bien spécifier les contraintes sur les proportions des constituants. Pour la formulation du pain, nous estimons qu'une teneur minimale de la farine de Blé tendre est nécessaire pour conférer au mélange une propriété améliorée digne d'un intérêt commercial. Pour ressentir un effet significatif de la farine d'Orge et de la farine de Maïs sur les propriétés du mélange, il faut avoir une teneur maximale pour conserver la force boulangère. Les contraintes de la modélisation sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.6 : les contraintes de la modélisation

Mélange binaire	Mélange ternaire
$0,8 \leq x_1 \leq 1$ $0 \leq x_2 (x_3) \leq 0,2$ $x_1 + x_2 (x_3) = 1$	$0 \leq x_2 + x_3 \leq 0,2$ $0,8 \leq x_1 \leq 1$ $0 \leq x_2 \leq 0,1$ $0 \leq x_3 \leq 0,1$ $x_1 + x_2 + x_3 = 1$

L'ensemble des protocoles expérimentaux cités dans le chapitre 4 sont décrits dans l'appendice B.

CHAPITRE 5

RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Résultats et interprétations des analyses physico-chimiques des grains de blé tendre, orge et maïs.

Le tableau suivant nous donne les résultats de recherche des impuretés en (%) dans le blé tendre, l'orge et maïs.

Tableau 5.1: Résultats de recherche des impuretés des grains de blé tendre, d'orge et de maïs.

Nature des analyses	Désignation	Taux			Normes -JORA, 1998 [82]. - [15].
		Blé tendre	orge	maïs	
Recherche des impuretés (%)	-prise d'essai(g)	100	100	100	-
	-grains sains	98,95	98,79	96,5	-
	-grains mouchetés	0,03	0,01	0,04	
	-grains cassés	0,75	0,2	2,25	<6
	-grains étrangers	0,25	0,98	1,2	-
	-matière inerte (poussière)	0,02	0,02	0,01	<3
Total impuretés		1,05	1,21	3,5	≤12

5.1.1. Les impuretés

La présence d'impuretés dans un lot de grains a des incidences négatives sur la qualité des farines produites, c'est pourquoi le nettoyage doit être effectué avec beaucoup de soin [83]. Les principales impuretés qui doivent être recherchées dans un lot de grains sont données par le tableau 5.1

- Grains mouchetés : ils présentent une tâche à un endroit quelconque de l'enveloppe ou dans le sillon, cette tâche provient du développement de mycélium de différents champignons. Les farines obtenues à partir de grains mouchetés sont tâchées ou piquées et leur aspect est déprécié. D'après les résultats obtenus les taux de grains mouchetés est acceptable pour les 03 types de grains.
- Grains cassés : les grains secs sont sensibles aux chocs au cours du battage et transport. d'un point de vue qualité, la présence de grains cassés altère les rendements meuniers du blé tendre, semoulier de blé dur, maïs et d'orge. La présence de grains cassés pose également des problèmes de conservation. Ils sont plus exposés aux phénomènes d'oxydation ce qui entraîne une accélération de la dégradation biochimique des constituants du grain. Par ailleurs, ils sont plus accessibles aux attaques des insectes et des moisissures. Les résultats montrent que les grains présentent des taux satisfaisants en grains cassés, le taux le plus élevé est de 2,25% pour le maïs est probablement du aux conditions d'abattage.
- grains étrangers : cette catégorie comporte les grains nuisibles et toxiques, et les graines de mauvaises herbes. Les résultats trouvés indiquent une faible présence de ce groupe ceci peut être du aux bonnes conditions culturales. D'après les résultats le total des d'impuretés pour les (03) céréales (blé tendre, orge et maïs) est conforme à la norme.

Le tableau 5.2 montre les résultats physico-chimiques des grains

Tableau 5.2 : Résultats des analyses physico-chimiques des grains de blé tendre, l'orge et de maïs.

Nature des analyses	Blé tendre	Orge	Maïs	Normes -JORA, 1998 [82]. - [15].
Taux d'impuretés (%)	1,05	1,21	3,5	≤12
Humidité (%)	12,05	10,40	13,50	≤14,5
Taux de cendre (%)	1,8	2,64	1,03	BT ≤1,8 Orge≤2,7 Maïs≤1,2
PHL (kg/hl)	79,50	64,05	74,05	B T ≥72 Ogre ≥ 62 Maïs ≥ 72

5.1.2. L'humidité

Le mesurage de la teneur en eau des céréales et produits dérivés est une opération capitale qui présente un quadruple intérêt : technologique, analytique, commercial et réglementaire. Les interactions qui existent au niveau moléculaire entre l'eau et les constituants des produits alimentaires s'expriment macroscopiquement par une relation d'équilibre thermodynamique que traduit graphiquement la courbe isotherme de sorption – désorption [84].

Des études récentes ont montré qu'une activité en eau de 65% à 20°C correspondait à une teneur en humidité maximale du grain de 11,8% pour l'avoine, de 13,7% pour le maïs grains, de 14% pour le blé, le triticale et l'épeautre, de 14,3% pour l'orge et le seigle. La teneur en humidité permettant de ne pas dépasser une activité en eau de 65% dépend du type de céréale, car la composition des grains et ainsi les proportions entre composantes hydrophiles et hydrophobes, varient d'une espèce à l'autre. Pour le maïs, la plus grande taille des grains joue aussi un rôle.

D'après les résultats, le pourcentage d'humidité du blé et de maïs est relativement élevé et leur A.w pourrait dépasser 65% ce qui exige une attention

particulière aux conditions de stockage (température et humidité relative) pour éviter toutes altérations microbiologique ou enzymatique, néanmoins les grains d'orge sont secs et l'activité de l'eau reste faible et inférieure à 65%.

Des études récentes ont montré que la teneur en eau des grains de maïs, les conditions de stockage (humidité et température) peuvent avoir des conséquences capitales sur l'acidité, le pH, la teneur en acides aminés, et la digestibilité des protéines et de l'amidon [85].

5.1.3. Taux de cendre

La teneur des grains en matières minérales ainsi que la composition de ces matières minérales sont relativement fixes quelles que soient les conditions externes dans lesquelles la céréale a été cultivée.

Une étude a révélé le cas d'un blé cultivé dans 05 conditions de fumures différentes, les parcelles ont reçu les mêmes apports de fumure pendant plusieurs années consécutives. Il a été observé que les écarts étaient minimes [86].

Les résultats montrent que le taux de cendre des grains d'orge est le plus élevé, selon des études la composition chimique des grains d'orge en cellulose et minéraux qui est de (10,2, 2,6) , et de (4,9, 1,9) pour le blé et (10,0, 1,0) pour le maïs respectivement et la moyenne de poids d'un grain d'orge est de 40mg, 45mg pour le blé et 67à 273mg pour le maïs d'autre part [86].

5.1.4. PHL

La masse volumique dite masse à l'hectolitre et appelée communément poids spécifique (P.S), présente un intérêt commercial certain, mais de nombreuses études ont mis en évidence les imperfections de cette mesure qui est influencée par différents facteurs comme l'espace vide intercalaire, la teneur en eau du grain , la nature et la quantité des impuretés présentes dans l'échantillon . Néanmoins, le poids à l'hectolitre est toujours pris en compte dans les contrats commerciaux et dans les règlements communautaires [87].

Schuler et al. (1995) ont tiré la conclusion que, bien que le PHL fasse fréquemment office d'indicateur pour la qualité de mouture, aucune des propriétés du grain n'est corrélée avec le rendement en farine. L'affirmation de certaines études reste toujours valable: le blé commercialisé ne doit pas être déclassé uniquement sur la base du PHL, sauf si l'échantillon est très échaudé. Nous n'avons pas trouvé de résultats concernant la relation entre le PHL et les caractéristiques rhéologiques dans la littérature, à l'exception de certains travaux

qui démontrent une perte de consistance de la pâte [87]. D'après les résultats enregistrés le blé a une masse élevée, c'est un blé lourd de bonne valeur meunière, l'orge et le maïs ont des PHL acceptables.

A l'issue de ces résultats, on constate que les grains sont sains, loyaux et marchands et présentent une bonne qualité physico-chimique.

La propreté et la blancheur sont les caractéristiques physiques exigées pour la transformation de la plupart des céréales y compris le blé, l'orge et le maïs [88].

Dans le même contexte des études récentes ont conclu que :

L'utilisation de blé de bonne qualité est la première condition nécessaire pour obtenir du bon pain. Depuis 20 ans, la qualité du blé cultivé a fortement évolué, grâce à un effort de sélection de nombreuses variétés sont devenues plus riches en gluten et plus facilement panifiables.

La connaissance des caractéristiques de sorption du maïs est importante pour contrôler la stabilité pendant le stockage, la modélisation du processus de séchage, l'aération, et le choix d'emballage appropriés pour les produits à base de maïs. Il est suggéré de stocker les grains de maïs à une température de 25°C afin de minimiser la perte des nutriments pendant le stockage [89].

La composition et les caractéristiques physiques du grain d'orge ont une grande influence sur le processus de transformation et la qualité des produits à base d'orge perlé ou farine d'orge [88].

5.2. Résultats et interprétations des analyses physico-chimiques des farines

Le tableau 5.3 donne les résultats physicochimiques des farines de blé tendre, orge et de maïs.

Tableau 5.3: Résultats des analyses physico-chimiques des farines de blé tendre, d'orge et de maïs.

Nature des analyses		Blé tendre	Orge	maïs	Normes -JORA, 1998 [82]. -ICC 104.105-2008 [90]. - CODEX STAN 155-1985 [87].
Humidité(%)		14,00	10,20	13,44	≤14,50
Taux de cendre(%)		0,67	1,64	0,98	-farine panifiable 0,60-0,75 - farine maïs max - farine orge 1,60
Gluten(%)	G H	27	-	-	27-37
	G S	10	-	-	8 à 11
	T H	23,28	-	-	-
Indice de chute(s)		350	67	63	≤350
Taux d'affleurement refus (%)		3	6,90	8	Farine panifiable Max 5
Acidité (g d'acide sulfurique pour 100g MS)		0,032	0,029	0,043	≤0,05

5.2.1. L'humidité

L'humidité est un paramètre très important, influence la conservation des farines en favorisant le développement des moisissures et peut même enclencher le phénomène de fermentation de la farine, ce qui amoindrirait sans aucun doute la qualité de cette dernière, des taux d'humidité inférieures à 15% sont très appréciés.

La détermination de la teneur en eau est importante, puisque elle conditionne d'une part la précision des divers résultats analytiques rapportés à la matière sèche et d'autre part celle de la mise en œuvre des tests technologiques, tel l'essai à l'alvéographe et celui de la panification [92].

Il ressort que la teneur eau des farines varie entre 10,20 et 14%, La teneur la plus faible est retrouvée dans la farine d'orge. Le résultat de la farine de blé tendre corroborent ceux rapportés par CALVEL (1980) qui fixe des intervalles entre 14 et 16% pour les farines boulangères.

Les isothermes de sorption et de désorption de la farine de maïs ont été étudié en utilisant une méthode statistique gravimétrique pour palier les températures allant de 27-40°C et A.W de 0,1-0,8 durant une période de stockage de 06 mois , il a été trouvé que les isothermes sont de forme sigmoïde et le modèle MGAB donne la meilleure prévision d'isotherme d'adsorption aux températures étudiées par rapport aux 04 autres modèles utilisés [89].

5.2.2. Taux de cendre

Le taux de cendre est le moyen officiel utilisé pour caractériser la pureté des farines, la détermination des cendres offre la possibilité de connaître la teneur en matière minérale globale de blé et de ses dérivés [86].

De nombreux facteurs peuvent influencer à la fois la teneur en minéraux du grain et de la farine, les facteurs génétiques, notamment la dureté, la taille, la teneur en enveloppe des grains, les facteurs climatiques, et les traitements technologiques [86].

La teneur en cendre des farines dépend du taux de contamination d'albumen amylicé par les parties périphériques du grain (enveloppes, couche à aleurone) et par le germe lors de la mouture.

Les résultats des analyses montrent que les farines de blé et de maïs ont des taux de cendres conformes aux normes, cependant la farine d'orge est fortement minéralisée, à la différence du blé, le son d'orge se brise facilement

pendant le procédé de mouture, ce qui rend extrêmement difficile de produire la farine blanche exempte des particules de son.

Par conséquence, la farine d'orge contient habituellement des piqûres de particules de son, et apparait plus foncée que la farine de blé. La farine d'orge obtenue avec un taux d'extraction environ de 70% a une teneur supérieure à 1% de cendre, ou deux fois plus élevée que la teneur en cendres de la farine de blé [93].

5.2.3. Taux de gluten

Le gluten est la protéine la plus représentative dans la farine, variant entre 8% et 12%, 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, la qualité du gluten agit sur la fixation d'eau, la tenue, la résistance et la tenue de la pâte, la rétention gazeuse, la croûte du pain qui sont tous des paramètres déterminants dans la panification [94].

La teneur en gluten humide et sec correspond au pourcentage de gluten humide et sec par rapport au poids de la farine. Les farines usuelles ont une teneur de gluten humide de l'ordre de 27-37%. Les farines provenant de blé très fort peuvent présenter des teneurs allant jusqu'à 45%, alors que des pourcentages inférieurs à 25% signalent une farine faible (farine pour biscuit, par exemple). Le gluten sec obtenu en soumettant le gluten humide au séchage présente des valeurs à peu près trois fois inférieures.

D'après les résultats la farine de blé tendre est une farine de panification usuelle.

Le maïs est dépourvu de protéines formatrices de gluten et ne peut donc pas, sous sa forme première, être utilisé pour la panification.

Le maïs est déficient en deux acides aminés, lysine et tryptophane, qui sont essentiels pour les animaux et humains. Les protéines de maïs contiennent 1.81% de lysine et 0.35% de tryptophane ce qui représente moins de la moitié des concentrations recommandées pour la nutrition humaine [95].

L'orge, contient peu de gluten et se prête donc mal aux pâtisseries et pains, mais son endosperme est riche en prolamine (hordéines) 10-17%.

L'orge présente une teneur élevée en lysine 2-3% et peut enrichir les produits déficients en lysine dans les pays en voie de développement.

D'après la littérature aucune tentative n'a été signalée pour améliorer les propriétés fonctionnelles des protéines d'orge ni pour définir la qualité requise des protéines d'orge dans l'usage alimentaire, probablement dû à la faible utilisation de l'orge dans l'alimentation humaine dans les temps modernes et le manque de fonctionnalité des protéines d'orge pour faire lever le pain et d'autres produits de boulangerie[92]. .

Les protéines jouent un rôle important dans le développement de la structure de la pâte, ainsi une diminution de la teneur en protéines suggérerait que les formulations produisent des pâtes de qualité inférieure [92].

5.2.4.L'acidité grasse

L'acidité grasse est un bon indicateur de l'état de conservation des grains et des farines et aussi du bon dégermage, les lipides sont peu représentés dans les grains de céréales. Ceux de l'avoine et de maïs en possèdent 5% de leur matière humide tandis que les autres céréales n'en contiennent que 2% environ. Les acides gras des lipides des le blé, l'orge et le maïs sont riches en acide linoléique (63%, 61% et 60%) respectivement, le maïs est particulièrement riche en acide oléique 26% contre 15% pour le blé et 8% pour l'orge [96].

Les résultats de nos échantillons sont compris entre 0,029 et 0,043% restent acceptables.

Il est préférable d'utiliser des farines de maïs dégermés qui contiennent moins de matières grasses et ont une durée de conservation plus longue [85].

Le taux d'acidité grasse de la farine de maïs est relativement élevé ce qui indique la présence de particules de germe particulièrement riches en lipase dû à la mauvaise maîtrise de la mouture [92].

Les catalyseurs de triglycérides présents dans la farine, libèrent ainsi des acides gras dont leurs produits d'oxydation communiquent l'odeur de rance aux farines.

L'excès d'acides gras modifie la qualité du gluten : sa cohésion, son élasticité, son coefficient d'hydratation sont diminués [72].

Une récente étude a révélé qu'il n'ya pas eu de changement de pH et d'acidité titrable pour la farine de maïs stockée à 10°C pendant une période de 06 mois de stockage, cependant des augmentations significatives ont été enregistrés après un mois de stockage à 25 °C et 40°C. La valeur moyenne de l'acidité de la farine stockée à 25°C était de 4.22 mg NaOH/100 g et 4.45 mg NaOH/100 g à 45 °C après 05 mois de stockage, alors qu'au début du stockage l'acidité de la farine était de 3.32 mg NaOH/100 g [89].

5.2.5. L'indice de chute

L'indice de chute de Hadberg mesure indirectement l'activité des amylases (enzymes dégradant l'amidon) qui peut devenir excessive dans le cas de présence de grains germés ou en voie de germination.

Cette mesure a deux intérêts :

- Evaluer la valeur d'utilisation des blés. Un blé dont l'activité amylasique est trop importante ne convient pas aux industries et doit être orienté vers l'alimentation animale.
- Corriger éventuellement une activité amylasique insuffisante d'une farine en vue de son utilisation en boulangerie par l'ajout de malt ou d'amylases [83].

L'indice de chute est un indicateur de l'activité α -amylasique et rend compte du degré d'hydrolyse de l'amidon en sucres simples fermentescibles.

D'après les résultats l'indice de chute de la farine de blé tendre est élevé ce qui signifie une très faible activité amylasique et une valeur d'utilisation en boulangerie convenable après correction.

Tandis que les farines d'orge et de maïs ont une très forte activité amylasique et ne peuvent donc pas, sous leur forme première, être utilisées pour la panification.

Les farines d'orge et de maïs sont des farines hyperdiastasiques qui donneront des pains plats et très colorés impossible de corriger en panification. Une activité enzymatique optimale correspond à un indice de chute compris entre 200 et 300 secondes est primordial pour l'obtention d'un pain de volume élevé et de mie homogène et appréciable cependant une présence excessive ou insuffisante de l' α -amylase engendre la détérioration de la valeur boulangère [92].

5.2.6. Taux d'affleurement

Le taux d'affleurement est la quantité des farines extraite (ou la quantité de refus) par un tamis choisie selon la granulation. La granulométrie des farines va dépendre de nombreux paramètres liés aux grains (vitrosité, variété) et à la technologie (conditionnement, types d'appareils, types de diagrammes, taux d'extraction).

En boulangerie, la quantité d'eau absorbée, ainsi que la vitesse d'adsorption d'eau, augmentent avec la finesse des particules de farine [84].

La farine de blé tendre est fine et lisse avec une granulométrie satisfaisante, les farines d'orge et de maïs sont légèrement rondes ceci est dû principalement aux conditions de mouture.

Il est à noter aussi qu'une granulométrie très fine confère au pain une meilleure texture [59].

La mouture semi-industrielle des grains d'orge et de maïs a donné des farines de granulométrie relativement hétérogène, c'est pourquoi on a procédé à un blutage manuel avec un tamis d'ouverture de maille de 130 μm , la fraction grossière représentant le refus de ce tamis représente environ 3% a été éliminée. Des études sur l'effet de la granulométrie des farines de maïs incorporées aux pâtes alimentaires ont été menées. Les farines ont été séparées en deux fractions une fraction fine passant au tamis de 130 μm , et une fraction grossière représentant le refus à ce tamis.

Les qualités culinaires des pâtes fabriquées en condition standard avec ces deux farines et la farine entière ont été comparées. Plus les farines de maïs utilisées sont fines (granulométrie médiane faible), meilleure est la note d'état de surface des pâtes cuites. Cette différence n'est pas liée à une moindre désagrégation de ces pâtes, puisque les pertes à la cuisson sont identiques pour les trois échantillons. La mauvaise notation des pâtes fabriquées avec les fractions «grossières» est donc liée uniquement à la taille élevée des particules de farine qui se traduit par l'apparition d'une rugosité de surface des pâtes cuites [97]. Une autre étude sur la valorisation de la farine de maïs en panification a montré que l'incorporation de 20% de La farine de maïs obtenue a une granulométrie de 80 % inférieure à 200 μm donne un pain de qualité comparable au pain 100% de blé tendre [98].

5.3. Résultats et interprétations des analyses microbiologiques des farines

Les résultats des analyses microbiologiques effectuées sur les farines composées sont indiqués dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Résultats des analyses microbiologiques effectuées sur les farines

Germes recherchés	Farine de blé tendre	Farine d'orge	Farine de maïs	Normes JORA, 1998 [99].
Clostridium sulfito – réducteur	Abs	Abs	Abs	10 ² germes/20ml
Moisissures	Abs	Abs	Abs	10 ² germes/ml

Selon les résultats des analyses microbiologiques effectuées sur les farines, on constate l'absence totale des germes clostridium- sulfito -réducteur et les moisissures. Donc on peut affirmer que le stockage des grains et des farines a été fait dans de bonnes conditions.

Les conditions de stockage (durée, température, humidité) sont importantes pour empêcher une prolifération de ces microorganismes. Les études de Beattie (1998) menées sur l'effet de sept mois de stockage d'orge dans des conditions différentes de températures (-20°C, 4°C, 24°C), ont montré que stockage de l'orge à 24°C accompagné d'une bonne aération permet une réduction efficace de la viabilité de *Fusarium* ainsi que de la teneur en déoxynivalenol [29].

Les grains et farines ne constituent pas des milieux très favorables pour les germes pathogènes ou toxigènes comme *salmonella*, *Clostridium* ou *staphylococcus*. par contre , après une contamination accidentelle par des rongeurs ou des insectes par exemple, la meilleure des farines peut parfaitement véhiculer de tels germes, en état de vie ralentie [100].

L'altération des céréales durant le stockage a été largement étudiée dans la littérature. La contamination fongique compte parmi les principales causes de détérioration des grains de céréales. Lors de la contamination du blé ; les Paramètres régulant la croissance fongique et qui permettraient la production de toxines sont nombreux [101].

On cite principalement la charge initiale en microflore, la présence de grains brisés, le taux d'humidité et la température de stockage des grains [102].

Il a été rapporté qu'au cours du stockage et même sans contamination du blé, l'augmentation de la température et/ou de l'humidité, peuvent entraîner des pertes en qualité, en affectant la dureté et la vitrosité du grain, ainsi que son acidité et la qualité de ses protéines. Ceci se traduit par des variations dans les paramètres technologiques du grain et peut engendrer des pertes considérables. La nécessité de contrôles qualitatifs du blé avant, pendant et après stockage s'impose.

5.4. Résultats et interprétations des analyses des mélanges binaires

5.4.1. Les résultats d'analyses physico-chimiques

Tableau 5.5 : Résultats des analyses physicochimiques des mélanges binaires
blé-orge

Détermination des analyses		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6
		100% F.B.	100% F.O	95% F.B 5% F.O	90% F.B 10% F.O	85% F.B 15% F.O	80% F.B 20% F.O
Taux d'humidité (%)		14,65	9,20	14,42	14,02	13,98	13,70
Taux des cendres (%)	MTQ	0,57	1,05	0,61	0,66	0,70	0,75
	MTS	0,67	1,64	0,71	0,75	0,80	0,87
Taux d'affleurement refus (%)		3	6.90	4 ,93	5,20	6,10	6,20
Taux de gluten (%)	GH	27	0	25,65	24,3	22,95	21,85
	GS	10	0	9,5	9	8,5	7,3
	TH	62,96	0	62,96	62,96	62,96	66,59
Indice de chute (S)		350	67	340	326	311	297
Nombre de liquéfactions		20	355	21	22	23	25
Acidité Grasse (gH ₂ SO ₄ /100g MS)		0,032	0,029	0,033	0,035	0,037	0.039

Tableau 5.6 : résultats des analyses physico-chimiques des mélanges binaires blé-maïs

Détermination des analyses		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6
		100% F.B.T	100% F.M	95% F.B 5% F. M	90% F.B 10% F.M	85% F.B 15% F.M	80% F.B 20% F.M
Taux d'humidité (%)		14,65	13,44	14,00	13,70	13,40	13,20
Taux des cendres (%)	MTQ	0,57	0,85	0,72	0,79	0,82	0,85
	MTS	0,67	0,98	0,84	0,92	0,95	0,98
Taux d'affleurement refus (%)		3,00	8,00	4,80	5,20	5,90	6,40
Taux de gluten (%)	GH	27	0	18,2	20,9	19,7	16,3
	GS	10	0	9,6	8,9	8,2	7
	TH	62,96	0	47,25	57,41	58,37	57,07
Indice de chute (S)		350	63	340	325	311	296
Nombre de liquéfactions		20	462	21	22	23	24
Acidité Grasse (gH ₂ SO ₄ /100g MS)		0,032	0,043	0,034	0,036	0,039	0,041

Les farines composées sont des mélanges de farine de blé panifiable et d'autres farines dites non panifiables en plus ou moins grande proportion. Les farines de céréales locales qui sont non panifiables, ont la particularité de ne pas contenir de gluten qui permet la « levée » de la pâte [59].

D'après les résultats obtenus, nous constatons qu'il est possible d'atteindre un taux d'incorporation de 15% de farine d'orge et 20% de maïs tout en

préservant les principaux paramètres de qualité physico- chimique d'une farine panifiable à savoir :

L'humidité ne dépasse pas 14,42 % et reste dans la fourchette des normes algériennes.

Le taux de cendres augmente proportionnellement avec le taux d'incorporation de farine d'orge qui est riche en cellulose. De la même façon le taux de cendre augmente avec l'incorporation de la farine de maïs dont la pureté dépend des conditions de mouture.

Les résultats montrent que le taux d'affleurement du mélange binaire augmente progressivement avec l'ajout des farines d'orge et de maïs qui selon les conditions technologiques de mouture sont composées de particules de dimensions et de composition relativement hétérogènes.

L'ensemble des protéines de la farine composée ne forme pas de masse viscoélastique lors de l'extraction du gluten ce qui confirme l'absence du gluten pour la farine d'orge et de maïs.

La farine d'orge présente une acidité plus faible que celle du blé tendre c'est pourquoi l'acidité du mélange diminue progressivement avec l'incorporation de la farine d'orge. Par contre l'acidité du mélange binaire augmente avec le taux de farine de maïs ce résultat peut être expliqué par la richesse du maïs en acides gras libre.

D'après certaines études les amylases attaquent rapidement l'amidon hydraté. L'analyse de l'activité amylasique permet au meunier de détecter les grains germés (indice de chute de 60-100 secondes), ce qui donne des pâtes et des mies de pain très collantes à cause de la trop grande dégradation de l'amidon endommagé. Une quantité adéquate d'amylases (indice de 250 ± 25 secondes) donne généralement du pain avec une mie juste assez ouverte, surtout à cause du travail de ces enzymes qui prolongent l'expansion de la pâte en retardant la solidification de l'amidon lors de la cuisson. Des blés déficients en amylase donnent quant à eux, un indice supérieur à 400 secondes, la limite de lecture de l'appareil. Un manque d'amylases retarde la fermentation des pâtes non supplémentées de sucre. Cette lacune est partiellement compensée par beaucoup de dommages à l'amidon, ce qui en multiplie les sites d'actions des amylases.

Dans les deux cas, il est nécessaire de mélanger la farine à de l'eau à température ambiante. Cette suspension est très instable car l'amidon n'est pas soluble dans l'eau froide. La montée progressive de la température dans le mélange entraîne le phénomène de solidification de l'amidon; celui-ci devient plus sensible à l'hydrolyse par l'amylase. L'augmentation de l'activité amylique des farines se traduit par une baisse de viscosité de l'empois de l'amidon. Dans le grain d'orge une partie de la β -amylase est "insoluble" car liée aux granules d'amidon, l'autre partie est "libre" car localisée entre les granules d'amidon. D'après les résultats les farines composées ont une valeur d'utilisation convenable en boulangerie après correction par l'ajout du malt.

Globalement les résultats montrent que jusqu'à un taux d'incorporation de 15% d'orge le taux de gluten sec de la farine mélange reste dans les normes d'une farine panifiable, à 20% d'incorporation la valeur boulangère du mélange est dépréciée.

Nous constatons aussi qu'il est possible d'atteindre un taux d'incorporation de 15% de farine de maïs tout en préservant les principaux paramètres de qualité physico- chimique d'une farine panifiable notamment pour le taux de gluten, l'indice de chute et l'acidité grasse.

D'autres études ont rapportés que pour être utilisable en panification, les farines de céréales locales doivent avoir les qualités suivantes:

- une granulométrie fine et uniforme, voisine de celle de la farine de blé (environ 130microns) ;
- une teneur en fibres inférieure à 1% ;
- un taux d'humidité inférieure à 10% ;
- une acidité inférieure à 1% en équivalent acide lactique ;
- une faible teneur en tanin.

Cependant il est important de signaler que les critères qualitatifs des farines locales dépendent largement des conditions culturelles et technologiques [59].

5.4.2. Les analyses Alvéographiques des mélanges binaires

Les résultats des analyses alvéographiques effectuées sur les mélanges binaires sont indiqués dans le tableau 5.7 et 5.8.

Tableau 5.7 : Résultats des analyses alvéographiques des mélanges binaires blé-orge.

		Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	Essai n°5	Essai n°6	Normes [99].
		100% F.B.T	100% F.O	95% F.B 5% F.O	90% F.B 10% F.O	85% F.B 15% F.O	80% F.B 20% F.O	
Détermination Alvéographique	G (cm ³)	22,17	/	18,80	17,90	17,20	17	18-20
	W (10 ⁻⁴ joule)	220	/	135	127	120	102	≥120
	p/L	0,77		0,93	0,94	1,30	1,50	0,3-0,7

Tableau 5.8 : Les résultats des analyses alvéographiques des mélanges binaires blé- maïs

		Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	Essai n°5	Essai n°5	Normes [99].
		100% F.B.T	100% F.M	95% F.B 5% F.M	90% F.B 10% F.M	85% F.B 15% F.M	80% F.B 20% F.M	
Détermination Alvéographique	G (cm ³)	22,17	/	19,8	19,5	18,50	18,10	18-20
	W (10 ⁻⁴ joule)	220	/	174	160	140	125	≥120
	p/L	0,77		0,69	1,04	1,20	1,34	0,3-0,7

Les résultats du test de l'alvéographe Chopin résumé dans le tableau N° 5.7 et 5.8 permettent de prédire la qualité boulangère d'une farine. Il présente un intérêt pratique très apprécié par les professionnels de la seconde transformation, du fait qu'il rend compte par le biais des différents paramètres Alvéographiques mesurés, de l'aptitude d'une farine à être travaillée en fonction de sa force boulangère pour une finalité précise.

L'interprétation d'un alvéographe (illustré par les figures appendice C) expliquée par P.Roussel et al.2005 [94] se fait par l'analyse de ses paramètres dont les valeurs optimales sont consignées dans les tableaux ci-dessus.

L'effet d'une substitution partielle de la farine de blé par celle de l'orge et de maïs induit aussi des modifications des caractéristiques alvéographiques.

Il est bien connu que l'incorporation à la farine de froment des farines ne contenant pas de gluten a des conséquences négatives sur les propriétés rhéologiques et d'hydratation des pâtes obtenues. Le paramètre « W » permet de déterminer la force boulangère d'une farine, il est très utilisé dans les transactions commerciales. Si ce paramètre a de l'importance, sa signification reste limitée si l'on ne tient pas compte des autres caractéristiques alvéographiques [72].

D'après les résultats La farine de panification normale (type 55) présentent des valeurs G et W conforme aux normes on peut dire que c'est un bon blé de panification.

On note une légère diminution de la valeur de la force boulangère pour la farine composite (95%B.T, 5% maïs) W ($174 \cdot 10^{-4}$ Joule) par rapport à la valeur de la farine 100% B.T W ($220 \cdot 10^{-4}$ Joule), mais cette diminution n'est pas très significative car la différence entre les deux valeurs ($46 \cdot 10^{-4}$ Joule) est légèrement supérieure à l'incertitude absolue de $20 \cdot 10^{-4}$ Joule tolérée sur la valeur boulangère.

Cependant on note une diminution significative de la valeur de la force boulangère pour la farine composite (95%B.T, 5% orge) W ($-65 \cdot 10^{-4}$ Joule) par rapport à la valeur de la farine 100% B.T.

La force boulangère est directement corrélée avec le taux et la qualité du gluten présent dans la farine.

Parmi les grains de céréales, l'orge et l'avoine sont riches en fractions solubles de fibre, particulièrement la β -glucane, des études ont montré qu'elle aide à réduire les niveaux de cholestérol dans le sang, et la farine d'orge contient

une haute teneur de β -glucane que l'on peut rajouter à d'autres farines pour créer des produits à fortes teneur en fibres solubles [103].

Cependant d'autres études ont rapportés que l'addition de farine d'orge à la farine de blé tendre entraîne la dilution et l'affaissement du réseau glutineux à cause de la fraction insoluble des fibres présente dans la farine d'orge [88]. Le grain d'orge renferme un taux de 11-34% de la fibre diététique dont 3-20% est une fraction soluble. Le perlage de l'orge permet d'éliminer en grande partie le péricarpe, testa et le germe et réduit ainsi le taux de la fibre insoluble, protéine, cendre, et des lipides libres [88].

Les mesures alvéographiques enregistrées pour 10% et 15% d'incorporation d'orge révèlent que la force boulangère est toujours satisfaisante cependant à 20% d'incorporation d'orge la valeur de W montre que la farine a besoin d'être améliorée.

On constate aussi une baisse de l'indice de gonflement G au fur et à mesure que le taux d'incorporation de l'orge augmente, la valeur G est fonction des capacités d'extension biaxiale de la pâte, elle peut prédire son aptitude à la rétention gazeuse, voire le développement de la pâte en fermentation et ou four.

Il a été aussi démontré qu'il existe une corrélation positive entre le G et la rapidité de lissage à condition que l'indice d'élasticité ne soit pas trop élevé.

Les résultats révèlent aussi que la ténacité maximum à la déformation P augmente parallèlement au taux d'incorporation de la farine d'orge, la ténacité P dépend entre autres de la consistance ou de la viscosité de la pâte qui est influencée par les éléments fixateurs d'eau à savoir les protéines, l'amidon, l'hémicellulose, la valeur de P traduit le potentiel d'hydratation de la pâte en boulangerie.

Le rapport P/L entre la ténacité et l'extensibilité qui reflète l'équilibre physique des différentes caractéristiques d'une pâte augmente avec le taux d'incorporation d'orge, ceci indique que l'extensibilité de la pâte est négativement affectée et l'aptitude du réseau glutineux à retenir le gaz carbonique a diminué.

A 20% d'incorporation d'orge les caractéristiques rhéologiques sont altérés ce qui traduit des mauvaises propriétés de levage de la pâte.

Pour les résultats alvéographique des farines composées (blé tendre, maïs) on remarque qu'à 20% d'incorporation la force boulangère et l'indice de gonflement restent dans normes, mais le rapport P/L dépasse les normes exigées, Donc lorsque le taux de substitution augmente, on obtient des pâtes tenaces et peu extensibles ceci est la conséquence de la mauvaise hydratation de la pâte composite.

En panification où les opérations d'allongements ont plus fréquentes, on privilégiera une farine plus extensible que tenace [104].

Des études ont montré que les farines qui ont un « P/L » élevé (supérieur à 1) donneront des pâtes trop tenaces, peu tolérantes au pétrissage et montrent une tendance à absorber beaucoup d'eau, ainsi qu'un faible gonflement, alors que pour « P/L » faible inférieur à 0.3 les pâtes seront extensibles et difficiles à manier. Le rapport P/L est corrélé négativement avec la teneur en protéines totale ($r = -0,999$ $P < 0,001$), Cependant la dureté, la granulométrie des particules, la teneur en pentosanes et l'amidon endommagé influent considérablement sur la ténacité et l'extensibilité des pâtes. L'augmentation de « L » et « G » est associée à une teneur élevée en protéines notamment de la fraction gliadine par rapport à celle des gluténines.

5.5. Résultats et interprétations des analyses des mélanges ternaires

5.5.1 Les résultats des analyses physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des mélanges ternaires (des farines de blé tendre, orge et maïs) sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 5.9 : résultats des analyses physico-chimiques des mélanges ternaires

Mélanges des farines	Humidité %	Taux de cendres %	Gluten%			Taux d'affaiblissement %	Acidité (g H ₂ SO ₄ /100g MS)
			GH	GS	TH		
Blé tendre 90% - orge 5% - maïs5%	12,90	0,71	14,4	8,9	38,19	3,10	0,051
Blé tendre95% - orge0% - maïs 5%	13,10	0,69	18,2	9,2	49,45	3,25	0,052
Blé tendre95%- orge2.5%- maïs2.5%	12,90	0,70	19,3	9,2	52,33	3,22	0,045
Blé tendre90% - orge0% - maïs10%	13,70	0,69	20,9	8,9	57,41	3,50	0,054
Blé tendre100% - orge0% - maïs0%	14,00	0,67	27	10	62,96	3	0,043
Blé tendre 85% - orge10%- maïs5%	13,20	0,80	10,6	7,5	29,24	3,10	0,049
Blé tendre 95% - orge5% - maïs0%	13,40	0,71	20,2	9,2	54,45	3,40	0,044
Blé tendre90% - orge10% - maïs0%	13,00	0,72	17,7	8,9	49,71	3,89	0,041
Blé tendre80%- orge10% - maïs10%	12,90	0,97	9,8	6,9	29,59	3,80	0,054
Blé tendre 85% - orge5% - maïs10%	13,50	0,98	13	7,5	42,30	3,60	0,054

D'après les résultats on constate que si le taux de farine de blé tendre est $\geq 85\%$ les mélanges ternaires conservent leurs propriétés panifiables du point de vue physico-chimique, au dessous de cette valeur le taux de gluten, le taux de cendres et taux d'acidité ne sont plus conformes aux normes de la farine panifiable.

Les résultats d'analyse de l'indice de chute effectués sur les mélanges ternaires farine sont indiqués dans le tableau 5.10:

Tableau 5.10 : Résultats des analyses de l'indice de chute des mélanges ternaires.

Essais	Farine de Blé %	Farine d'Orge %	Farine de Maïs %	Indice de chute (secondes)
1	0,950	0,000	0,050	340
2	0,950	0,025	0,025	341
3	0,900	0,100	0,000	326
4	0,950	0,050	0,000	341
5	0,800	0,100	0,100	297
6	0,850	0,100	0,050	312
7	1,000	0,000	0,000	355
8	0,850	0,050	0,100	311
9	0,900	0,050	0,050	326
10	0,900	0,000	0,100	326

D'après les résultats on remarque que le temps de chute des mélanges ternaires reste élevé ceci est la conséquence de faible activité amylasique de la farine de blé tendre qui représente minimum 80% de chaque mélange , on parle de farines hypodiastatiques facilement corrigeables en panification par l'ajout de malt.

Si l'on utilise une farine hyperdiastatique (contient trop d'enzymes), on observera :

- une fermentation plus rapide, donnant des pains plats à croûte fine,
- une coloration trop rapide à la cuisson. Ce phénomène est lié à la présence importante de glucose, issu de la dégradation de l'amidon par les enzymes.

Si l'on utilise une farine hypodiastatique, on observera les phénomènes inverses [104].

5.5.2. Les résultats des analyses alvéographiques

Les résultats des analyses alvéographiques des mélanges ternaires sont donnés dans le tableau 5.11.

Tableau 5.11 : Résultats du travail de déformation de la pâte (W) en (joules) des mélanges ternaires.

Essais	Farine de Blé	Farine d'Orge	Farine de Maïs	Le travail W (10 ⁻⁴ Joules)
1	0,950	0,000	0,050	174
2	0,950	0,025	0,025	140
3	0,900	0,100	0,000	127
4	0,950	0,050	0,000	135
5	0,800	0,100	0,100	100
6	0,850	0,100	0,050	110
7	1,000	0,000	0,000	220
8	0,850	0,050	0,100	130
9	0,900	0,050	0,050	114
10	0,900	0,000	0,100	160

Tableau 5.12: Résultats du gonflement (G) de la pâte en (cm³) des mélanges ternaires.

Le gonflement G (cm ³)	Farine de Maïs	Farine d'Orge	Farine de Blé	Essais
19,8	0,050	0,000	0,950	1
18	0,025	0,025	0,950	2
17,90	0,000	0,100	0,900	3
16,6	0,000	0,050	0,950	4
16,3	0,100	0,100	0,800	5
17,6	0,050	0,100	0,850	6
22,17	0,000	0,000	1,000	7
16,9	0,100	0,050	0,850	8
17,2	0,050	0,050	0,900	9
19,5	0,100	0,000	0,900	10

Tableau 5.13: Résultats de la ténacité de la pâte (P) en (mm) d'eau des mélanges ternaires.

Essais	Farine de Blé	Farine d'Orge	Farine de Maïs	La ténacité P (mm d'eau)
1	0,950	0,000	0,050	55
2	0,950	0,025	0,025	49,4
3	0,900	0,100	0,000	56
4	0,950	0,050	0,000	52,2
5	0,800	0,100	0,100	41,4
6	0,850	0,100	0,050	39,8
7	1,000	0,000	0,000	53,8
8	0,850	0,050	0,100	57,4
9	0,900	0,050	0,050	41,14
10	0,900	0,000	0,100	78,8

Tableau 5.14 : Résultats l'extensibilité de la pâte (L) en (mm) des mélanges ternaires.

Essais	Farine de Blé	Farine d'Orge	Farine de Maïs	L'extensibilité L (mm)
1	0,950	0,000	0,050	80
2	0,950	0,025	0,025	66
3	0,900	0,100	0,000	59
4	0,950	0,050	0,000	56
5	0,800	0,100	0,100	51
6	0,850	0,100	0,050	62
7	1,000	0,000	0,000	69
8	0,850	0,050	0,100	57
9	0,900	0,050	0,050	63
10	0,900	0,000	0,100	76

Les résultats alvéographiques des mélanges ternaires révèlent que : D'après l'essai N°(1), N°(3), N°(4) et N°(10) l'incorporation de la farine d'orge a un effet plus négatif sur le (W) et (G) par rapport à la farine de maïs ceci peut être expliqué la faible capacité des protéines d'orge pour faire lever le pain et d'autres produits de cuisson.

Les farines composées qui ont un taux de farine maïs plus important que le taux de farine d'orge donnent des pâtes plus tenaces et moins extensibles. D'après la bibliographie la quantité et la nature des protéines, les quantités et les proportions de pentosanes solubles et insolubles, ainsi que le taux d'amidon endommagé sont autant de paramètres qui doivent être pris en compte.

Les pentosanes (1à2%) font partie de ces composants, qui malgré leur faibles teneur influencent énormément l'aspect final des pains [77].

Des études récentes ont indiqués que les pentosanes servent à l'absorption de l'eau et donne la consistance à la pâte d'où leur importance. On distingue les pentosannes solubles (effet bénéfique, fixateur d'eau de manière uniforme, limite de la diffusion du CO₂), des pentosannes insolubles (absorption d'eau mais hétérogène et trop importante mais retardent le rassissement).

Un rapport élevé solubles/insolubles donne une bonne qualité boulangère. Etant donné que ce sont les pentosanes qui vont déterminer le potentiel de la céréale, les recherches à leur sujet sont de plus en plus nombreuses [77].

5.6. Test de panification

5.6.1. Méthode d'appréciation

L'appréciation de la qualité d'une pâte par un boulanger artisanal est classiquement réalisée au toucher. Dans l'industrie, les caractéristiques dimensionnelles (volume, longueur du pain), les caractéristiques visuelles, les caractéristiques de texture et les qualités de conservations sont particulièrement importantes à maîtriser, les différents langages employés sont regroupés dans un glossaire terminologique [94].

Le tableau 5.15 fait ressortir les principaux critères d'appréciation de la pâte.

Tableau 5.15 : les principaux critères d'appréciation de la pâte.

Critère	Caractère apprécié de la pâte
Consistance (1)	Caractéristiques viscoélastiques
Collant (2)	Adhérence de la pâte au dos de la main
Extensibilité(3)	Capacité d'allongement jusqu'à rupture
Elasticité(4)	Capacité à reprendre et vitesse de retour à la forme initiale
Relâchement	Tenue de la pâte

La figure 5.1 représente la méthode d'appréciation manuelle de la qualité d'une pâte lors du pétrissage.



Figure 5.1 : Appréciation manuelle de la qualité d'une pâte lors du pétrissage.

L'aspect des cinq boulanges confectionnées à partir des mélanges ternaires farines (blé tendre, orge et maïs).

- La première boulangue : présente de bons aspects technologiques.
- La deuxième boulangue présente des aspects comparables à la précédente, cependant on a constaté un défaut peu intense de lissage (aspect légèrement nervuré ceci est dû à une légère diminution d'extensibilité et sous l'action de la pression des gaz de fermentation, on prévoit volume de pain sera moins par rapport à la précédente.
- La troisième boulangue est caractérisée par un défaut peu intense de lissage et un défaut peu intense d'excès de collant qui est le résultat d'une instabilité et d'un manque de résistance du réseau de gluten sous l'action mécanique.
- La quatrième boulangue est caractérisée par un défaut peu intense de lissage et un défaut peu intense d'excès de collant.
- La dernière boulangue est caractérisée aussi par un défaut peu intense de lissage, de collant et de déformation.

5.6.2. Appréciation des résultats

La méthode CNERNA permet une bonne connaissance de la réalité boulangère, d'adapter le jugement à l'essai de panification au comportement de la farine en boulangerie [92].

Le tableau 5.16 donne l'appréciation des résultats de l'essai de panification CNERNA.

Tableau 5.16 : Essai de panification CNERNA, Appréciations des résultats.

Appréciation		ENSMIC	Enquête I.T.C.F
Très bon	Note pâte /100	> 80	>236
	Note pain/100	> 80	
	Note total/300	> 240	
Bon	Note pâte /100	> 70	>197
	Note pain/100	>70	
	Note total/300	>220	
assez bon	Note pâte /100	>60	>158
	Note pain/100	>60	
	Note total/300	>190	
Passable	Note totale		>132
Médiocre	Note pâte /100	>50	>106
	Note pain/100	>50	
	Note total/300	>150	
Mauvais	Note pâte /100	>50	>106
	Note pain/100	>50	
	Note total/300	>150	

En se basant sur le tableau 5.16, les appréciations des tests de panification sont montrées dans le tableau 5.17, les grilles de notations sont annexées dans l'appendice C.

Tableau 5.17 : les appréciations des résultats des pains.

Nature du pain	Note pâte	Note pain	Note totale	Appréciation
100% farine de blé tendre	100	95	295	Très bon
90% farine blé tendre 0% orge 10% maïs	98,5	90,70	283,20	Très bon
85% farine blé tendre 5% orge 10% maïs	97	84,5	272,5	Très bon
85% farine blé tendre 10% orge 5% maïs	63,87	66,62	221,49	Bon
90% farine blé tendre 10% orge 0% maïs	71,75	81,5	244,25	Très bon

Tous les pains à l'essai sont apparus généralement peu différents du pain témoin (100 % blé). Les pains légèrement modifiés se reconnaissent à la couleur (l'orge assombrit la mie et augmente la consistance : le pain «pèse sur la langue»). La présence de maïs passe plus facilement inaperçue que celle de l'orge. Les résultats du Tableau 5.17 les permettent de dégager les éléments suivants :

- le pain 100 % blé est toujours préféré en particulier à cause de sa couleur paramètre important de la qualité du produit.
- l'incorporation du seul l'orge de 5 à 10 % donne de très bons pains , ils ont un volume acceptable avec un bel aspect extérieur de couleur brillante, la croûte est croustillante, la mie est aérée avec un alvéolage régulier, sa couleur est légèrement brunâtre, La texture est souple, et la flaveur est bonne.
- les pains incorporant 5 à 20 % de maïs sont de bonne qualité. Ils ont un volume satisfaisant avec un bel aspect extérieur, la section est normale, La

mie est de couleur légèrement crème avec des petites alvéoles homogènes. La texture est régulière et la flaveur est bonne.

- Comparé au pain de blé pur, les pains contenant du maïs et de l'orge ont un volume légèrement plus réduit et une mie plus friable, le volume du pain est fortement influencé par la quantité de gaz retenue par la pâte. En effet, chaque alvéole d'air est caractérisée par une taille critique au-delà de laquelle la rétention du CO₂ est aléatoire car le plus souvent il diffuse dans l'atmosphère.
- Le mélange ternaire blé (85%), orge (5%), maïs (10%) présente le plus grand intérêt, les pains sont de très bonne qualité, le volume est normal, la section est ronde, la couleur est brillante, la finesse de la croûte est normale, la mie est légèrement crème, la texture est régulière, la flaveur est bonne.

L'ensemble des résultats du Tableau 5.17 permettent aussi de dégager le classement :

- 1^{ier} : blé 100 %,
- 2^e : blé 90%, maïs 10 %,
- 3^e : blé 85%, orge 5%, maïs 10%,
- 4^e : blé 85%, orge 10%, maïs 5%.

Le défaut majeur des pains obtenus au-delà de 20% d'incorporation est le manque de cohésion de la mie. Cette dernière a une structure grossière, non homogène et qui présente une rupture au niveau de sa structure. La dilution du gluten dans la farine composite peut difficilement faire face à l'expansion au four des pâtons, si bien que les grosses alvéoles d'air présentent des déchirures par lesquelles le gaz s'échappe. L'aspect extérieur du pain est passable, il n'apparaît cependant plus lisse, mais fendillé, la mie compacte et humide.

La figure 5.2 montre l'aspect des pains confectionnés à partir des mélanges ternaires.



Figure 5.2 : comparaison des pains composites à différents pourcentage de (blé tendre, orge et maïs)

La figure 5.3 montre l'aspect des mies de pains confectionnés à partir des mélanges ternaires.

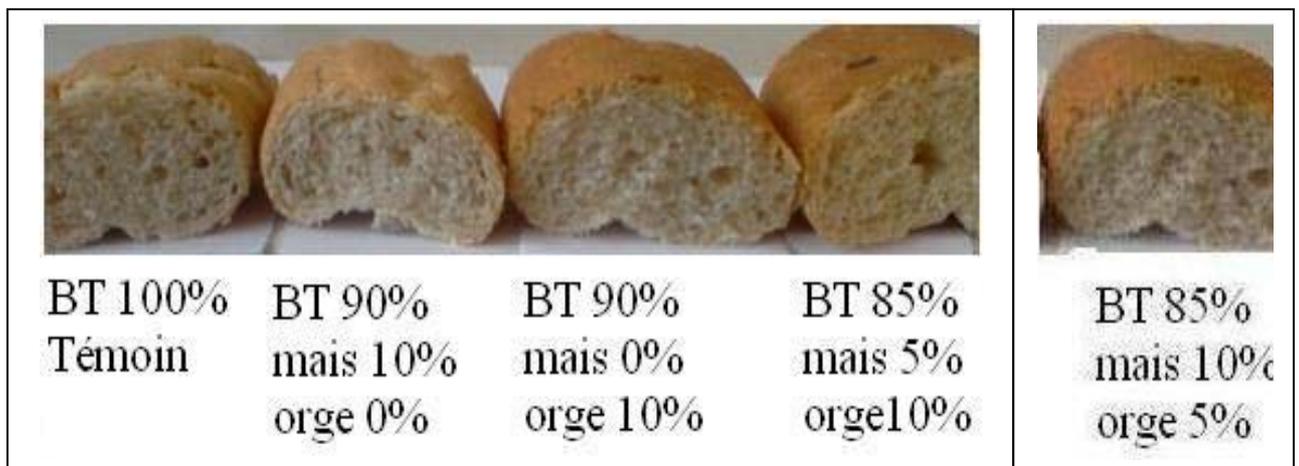


Figure 5.3 : Structure de la mie des pains composites à différents pourcentage de (blé tendre, orge et maïs).

5.7. Etude économique

Le projet de farines composées a pour principal objectif l'utilisation des matières premières locales pour fabriquer des produits alimentaires de haute qualité par des moyens économiques.

Les séries d'essais réalisés laissent donc apparaître la possibilité de réaliser un pain à base de farines composées acceptable par les consommateurs.

Du point de vue économique l'objectif principal fixé est de réaliser une baisse de prix de revient de la farine panifiable en incorporant le maximum de farines locales, il est impératif de jouer sur tous les facteurs permettant de minimiser les coûts :

- optimisation du stockage,
- nécessaire élasticité du fonctionnement en fonction de la demande,
- optimisation des charges fixes,
- simplification au maximum du process.

Les objectifs spécifiques sont :

- assurer l'approvisionnement des unités de transformation en matières premières suffisantes et répondant aux normes de qualité.
- améliorer les technologies de transformation des céréales locales (Maïs et orge).
- Assurer l'appropriation par les boulangers de la technologie d'incorporation de farines de céréales locales dans la panification et faire la promotion du pain et de la viennoiserie à base de farine composée.

Compte tenu des données détaillées dans l'appendice C, nous avons constaté une baisse du prix de revient de la farine panifiable de 3,3% suite à l'incorporation de 0,4% de farine d'orge et 9,96% de farine de maïs.

5.8 .Plans d'expériences

5.8.1. Domaine expérimental

Si le mélange est binaire, la variation de la composition du mélange est donnée par une partie du segment AB en A, le constituant A est seul dans le mélange, en B, le constituants B est seul dans le mélange. Les domaines expérimentaux des mélanges ternaires possibles découlant des relations citées ci-dessus sont représentés sur les figures suivantes. Si l'on veut 10 mélanges pour estimer le modèle quadratique à 6 coefficients le logiciel sélectionne (Figure 5.5, Figure 5.6) :

- ✓ Les 4 sommets,
- ✓ Les milieux des 4 arêtes,
- ✓ Le centre du domaine,
- ✓ Le milieu du segment reliant les 2 milieux des arêtes supérieures.

La sélection de mélanges permet :

- de calculer le modèle quadratique à partir de 3 mélanges et d'utiliser les 2 autres mélanges pour tester la validité du modèle, pour les mélanges binaires,
- d'utiliser les 6 mélanges pour estimer au besoin les coefficients du modèle quadratique, les quatre autres mélanges servent de points tests.

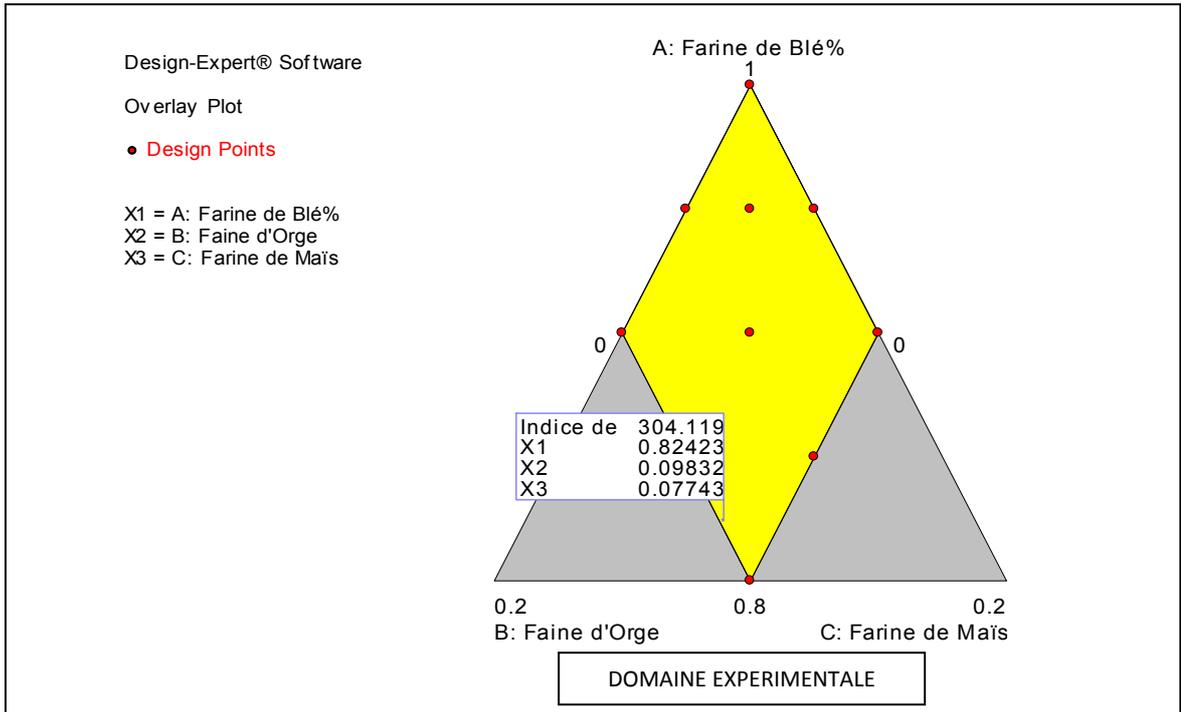


Figure 5.4 : Position des mélanges pour l'indice de chute dans le domaine expérimental

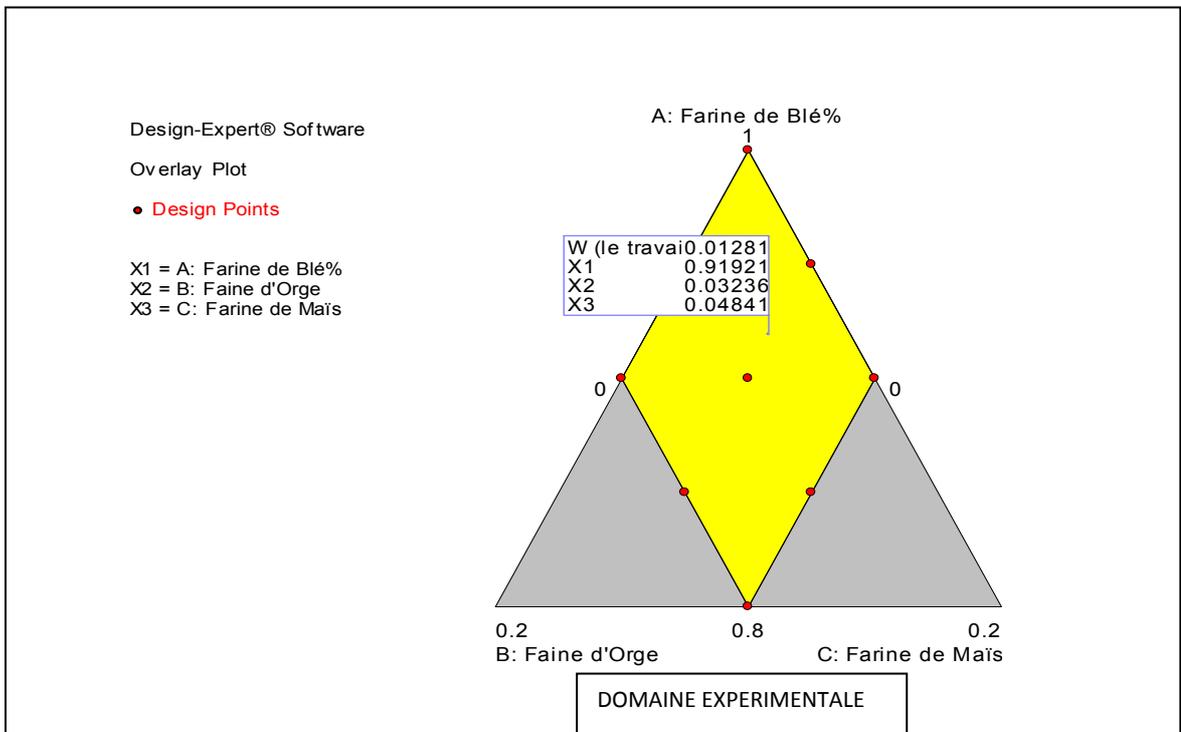


Figure 5.5: Position des mélanges pour le travail dans le domaine expérimental

5.8.2. Modélisation

On étudie le travail W et l'indice de chute qui sont la clef de la formulation du pain. La modélisation mathématiques et sa vérification sont menées selon le schéma suivant :

- tests statistiques (test de validité) : le R^2 , le R^2 ajusté,
- calcul de coefficients du modèle,
- tracés des courbes de la variation de la réponse en fonction de chaque facteur et des courbes isoréponses,
- tracés de la variation des valeurs expérimentaux en fonction de valeurs prédites.

5.8.3. Etablissement des modèles

Les résultats des essais sont entrés dans l'ordinateur, et c'est grâce au logiciel Design Expert 7 qu'on peut obtenir les valeurs des coefficients du modèle. Ces coefficients permettent d'établir les modèles prédictifs. Les valeurs de ces coefficients sont données par le tableau suivant :

Tableau 5.18 : Les valeurs des coefficients des modèles

Coefficients	Le travail de la farine (Blé-Orge)	Le travail de la farine (Blé- Maïs)	Le travail de la farine (Blé-Orge- Maïs)	L'indice de chute de la farine (Blé-Orge- Maïs)
a_1	+ 0,021186	+ 0,021671	+0,021629	+355,07277
a_2	+0,292120	+0,10469	+0,94161	+40,25052
a_3			+0,47627	+33,58386
a_{12}	-0,40533	-0,15989	-1,12514	+30,11292
a_{13}			-0,56514	+30,11292
a_{23}			-1,26183	+69,25972

5.8.4. Evaluation des modèles

Effectuons les tests statistiques qui sont basés sur les valeurs de R^2 , et R^2 ajusté, c'est le logiciel qui donne directement ces valeurs, celles-ci sont données par le tableau suivant :

Tableau 5.19: Les valeurs de R^2 et R^2 ajusté

Les valeurs	Le travail de la farine (Blé-Orge)	Le travail de la farine (Blé- Maïs)	Le travail de la farine (Blé-Orge- Maïs)	L'indice de chute de la farine (Blé-Orge- Maïs)
R^2	0,9336	0,9808	0,9903	0,9997
R^2 ajusté	0,8671	0,9616	0,9782	0,9993

Les valeurs de R^2 signifient que les modèles expliquent bien les résultats, et les valeurs de R^2 ajusté confirment que les modèles expliquent bien les résultats et que l'ajustement est d'une bonne qualité. Les modèles sont donc bien ajustés, seront déclarés globalement significatif.

5.8.5. Tracés des courbes de la variation des réponses en fonctions de chaque facteur

Sur des graphiques, on porte les valeurs des réponses (le travail ou l'indice de chute) en fonction des pourcentages massiques des farines Blé, Orge, Maïs. Les figures montrent une augmentation du travail W en fonction du taux d'incorporation de la farine de Blé tendre, ceci est dû à la forte présence du gluten qui confère à la pâte ses propriétés d'extensibilité, d'élasticité et de ténacité qui ont une influence sur le comportement des pâtes au cours de la fabrication du pain. Cependant le travail W diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation des farines d'Orge ou de Maïs ceci est dû à l'absence du gluten dans la composition de ces farines.

Les figures révèlent que l'indice de chute est directement proportionnel au taux d'incorporation de la farine de blé de tendre, inversement proportionnel au taux d'incorporation des farines de d'Orge ou de Maïs. Ces résultats s'expliquent

par la faible activité amylasique de la farine de blé tendre d'une part et une forte activité amylasique des farines d'Orge ou de Maïs d'autre part. Une activité amylasique importante provoque la liquéfaction rapide de l'empois et la durée de chute de l'agitateur est courte (faible indice de chute).

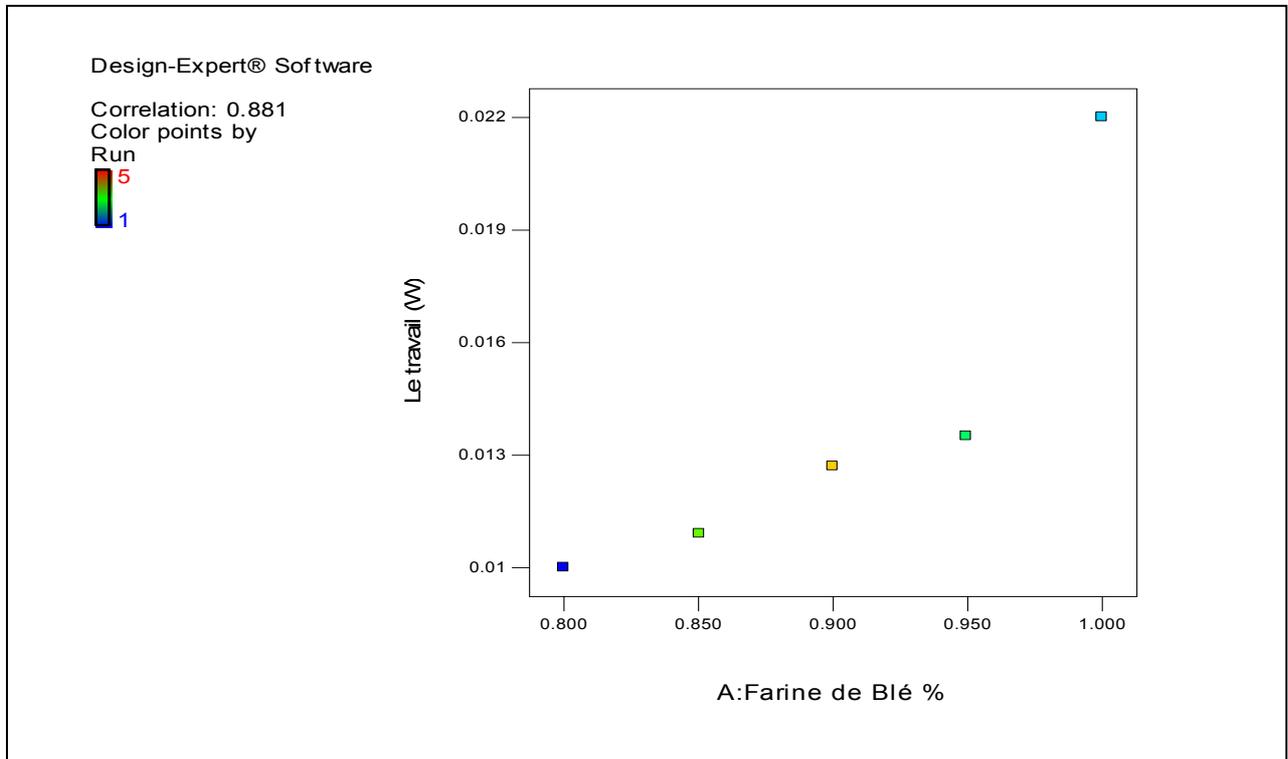


Figure 5.6 : Variation du travail en fonction du pourcentage massique du Blé tendre pour le mélange binaire Blé tendre - Orge

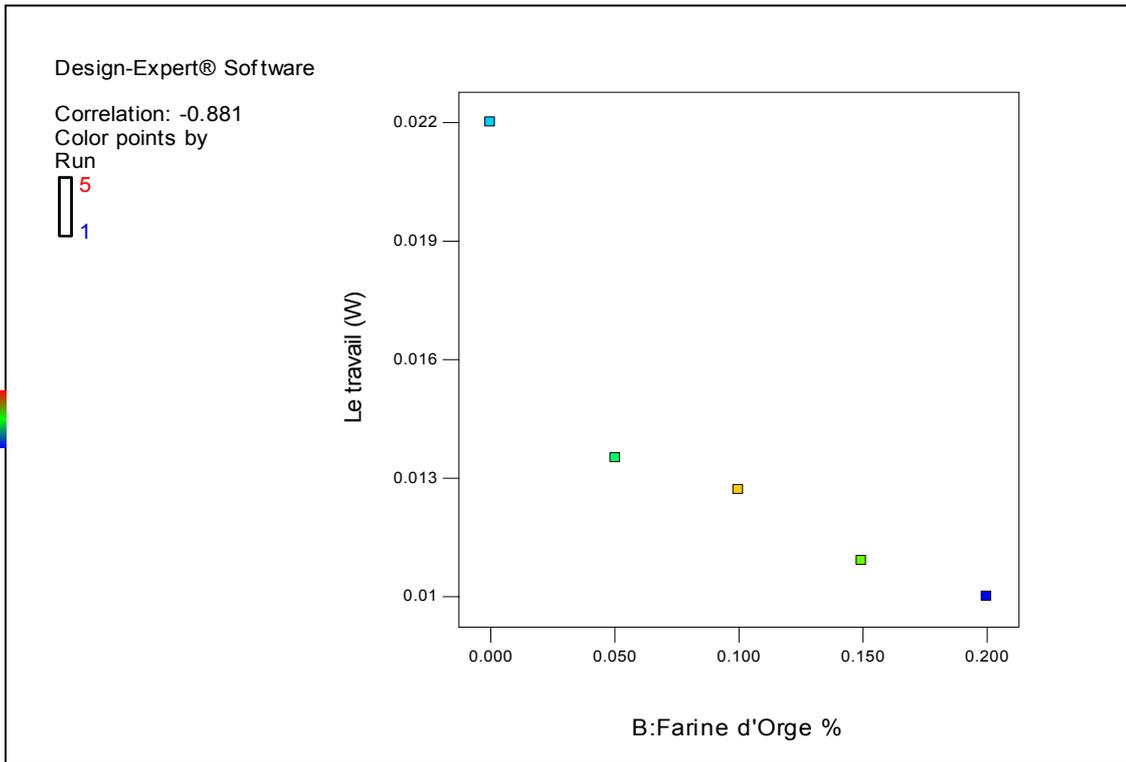


Figure 5.7 : Variation du travail en fonction du pourcentage massique de l'Orge pour le mélange binaire Blé tendre - Orge

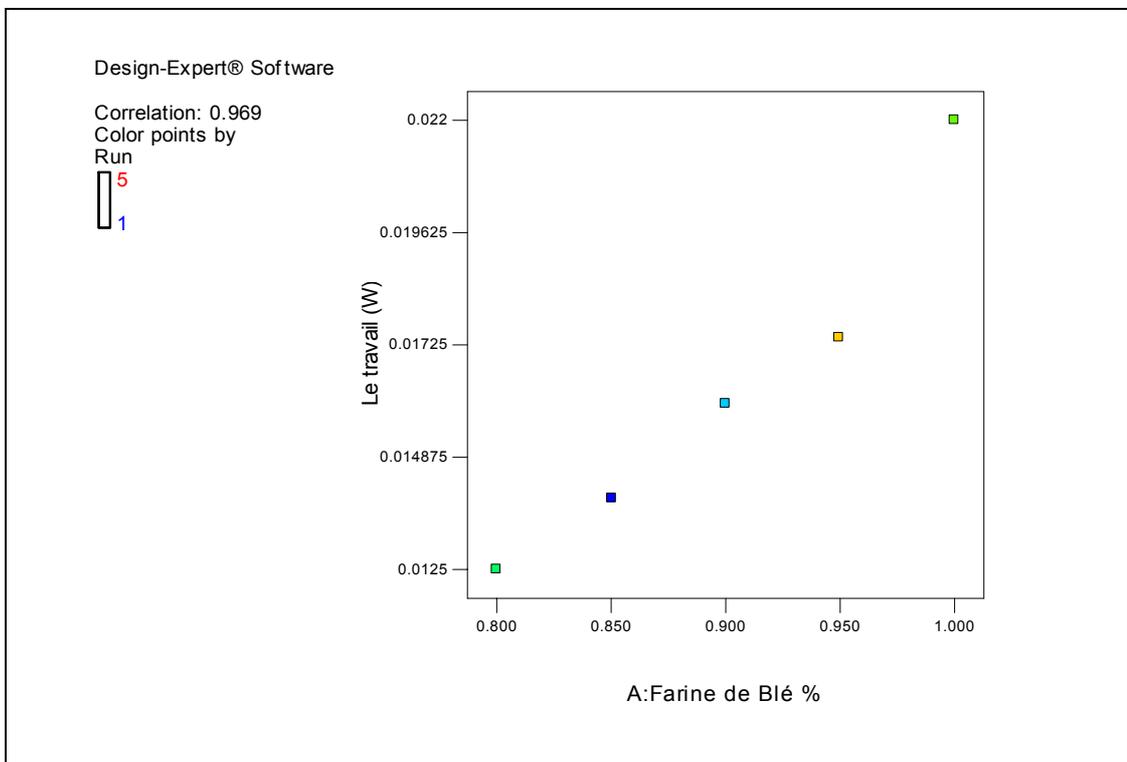


Figure 5.8 : Variation du travail en fonction du pourcentage massique de Blé tendre pour le mélange binaire Blé tendre - Maïs

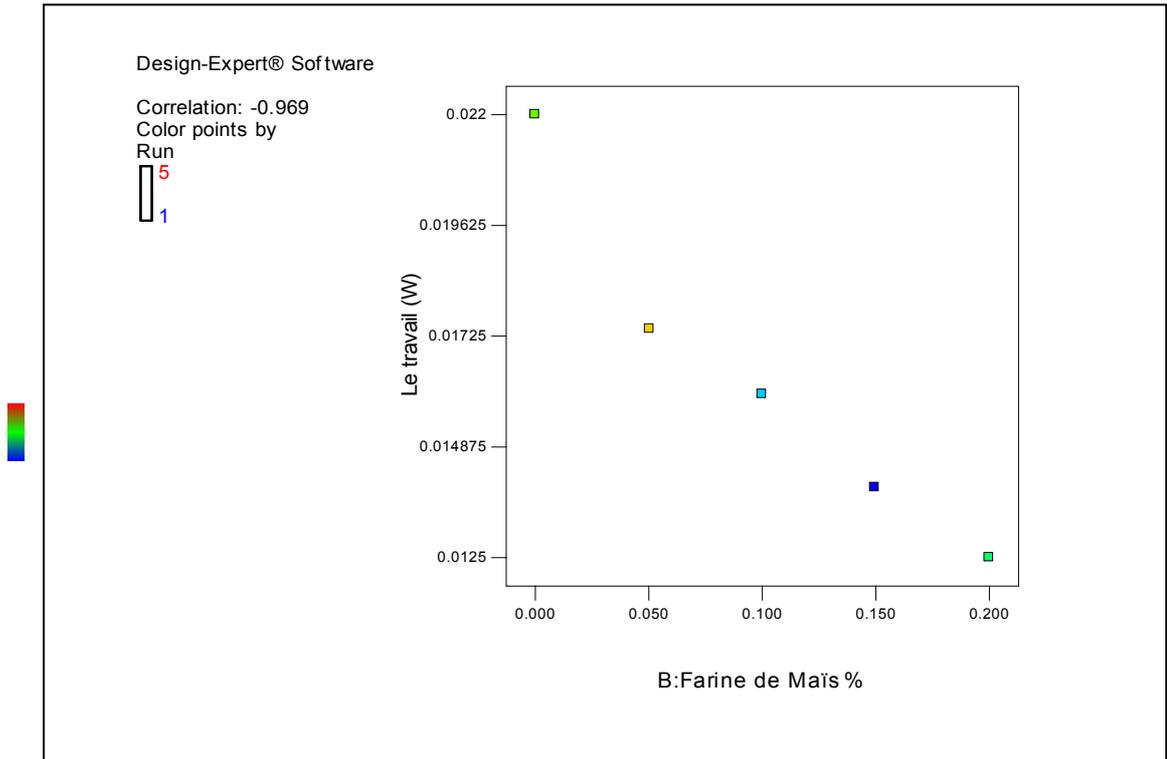


Figure 5.9 : Variation du travail en fonction du pourcentage massique de Maïs

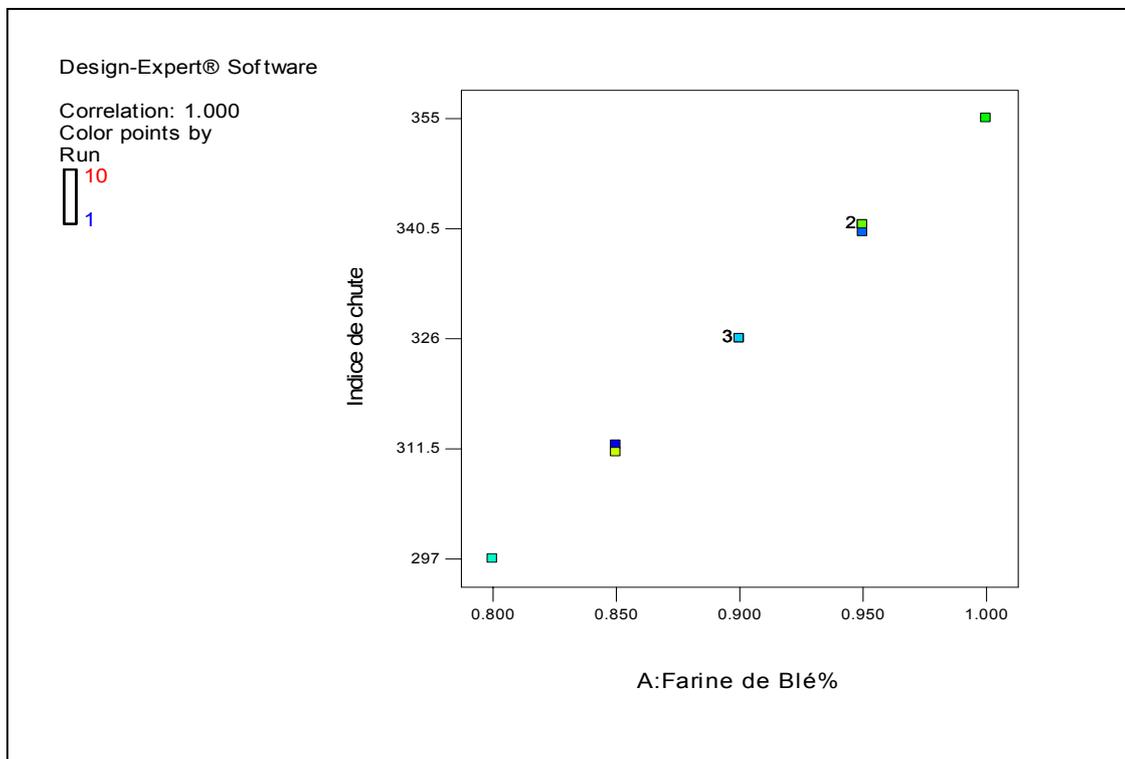


Figure 5.10 : Variation de l'indice de chute en fonction du pourcentage massique de Blé tendre pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

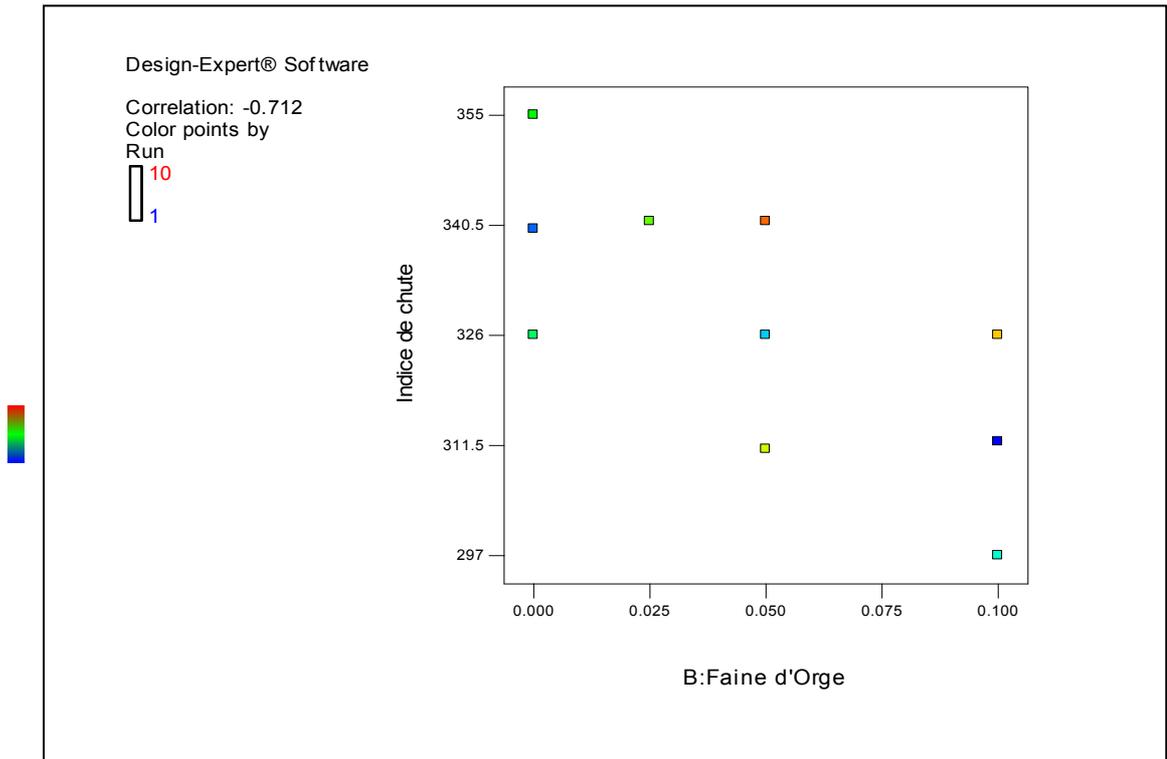


Figure 5.11 : Variation de l'indice de chute en fonction du pourcentage massique d'Orge pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

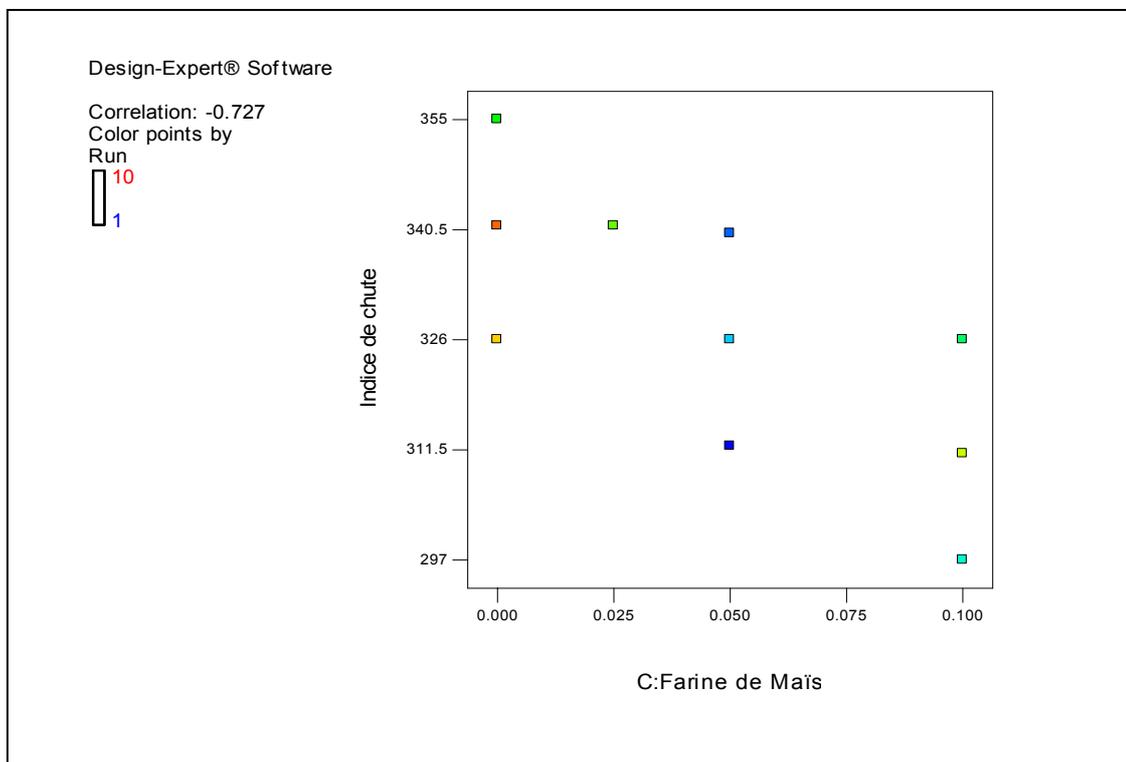


Figure 5.12 : Variation de l'indice de chute en fonction du pourcentage massique de Maïs pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

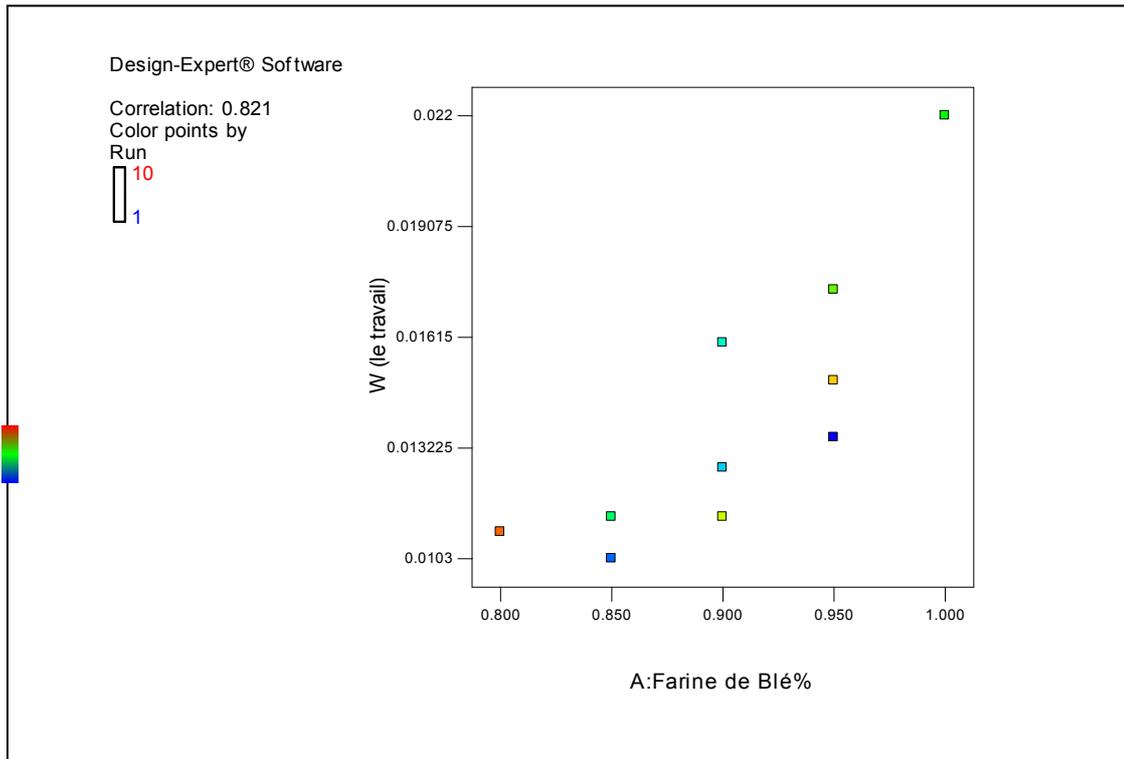


Figure 5.13 : Variation du travail en fonction du pourcentage massique de Blé tendre pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

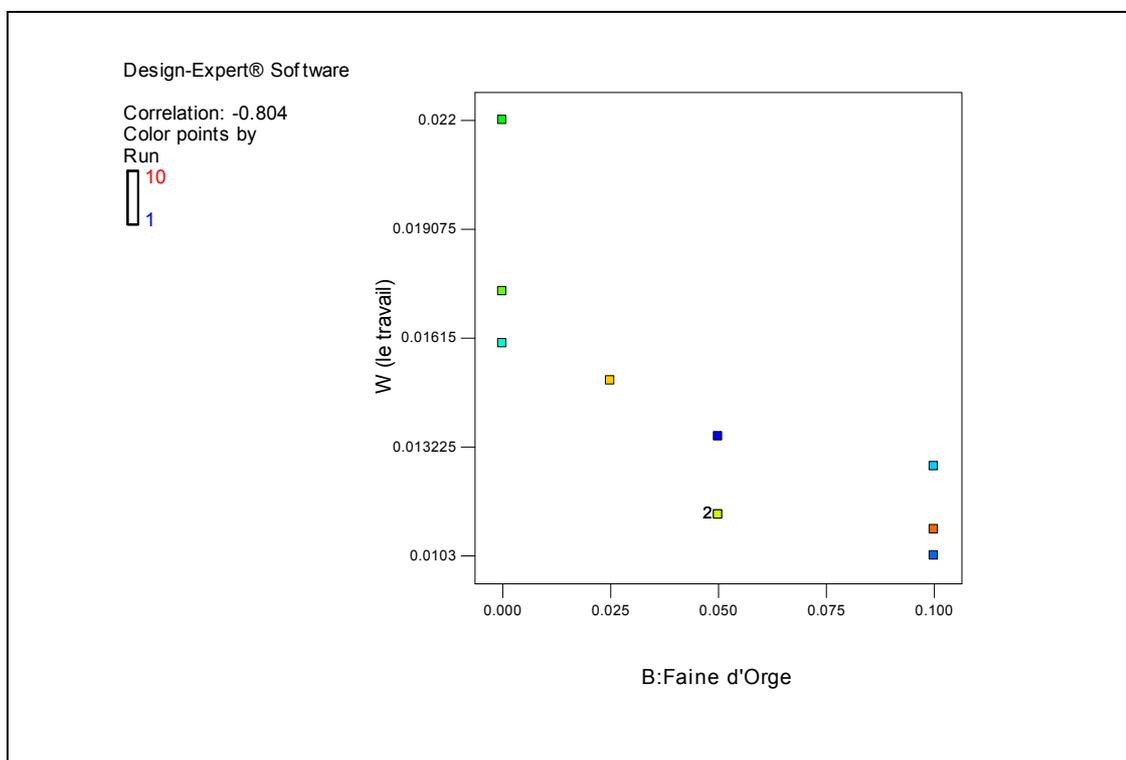


Figure 5.14 : Variation du travail en fonction du pourcentage massique d'Orge pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

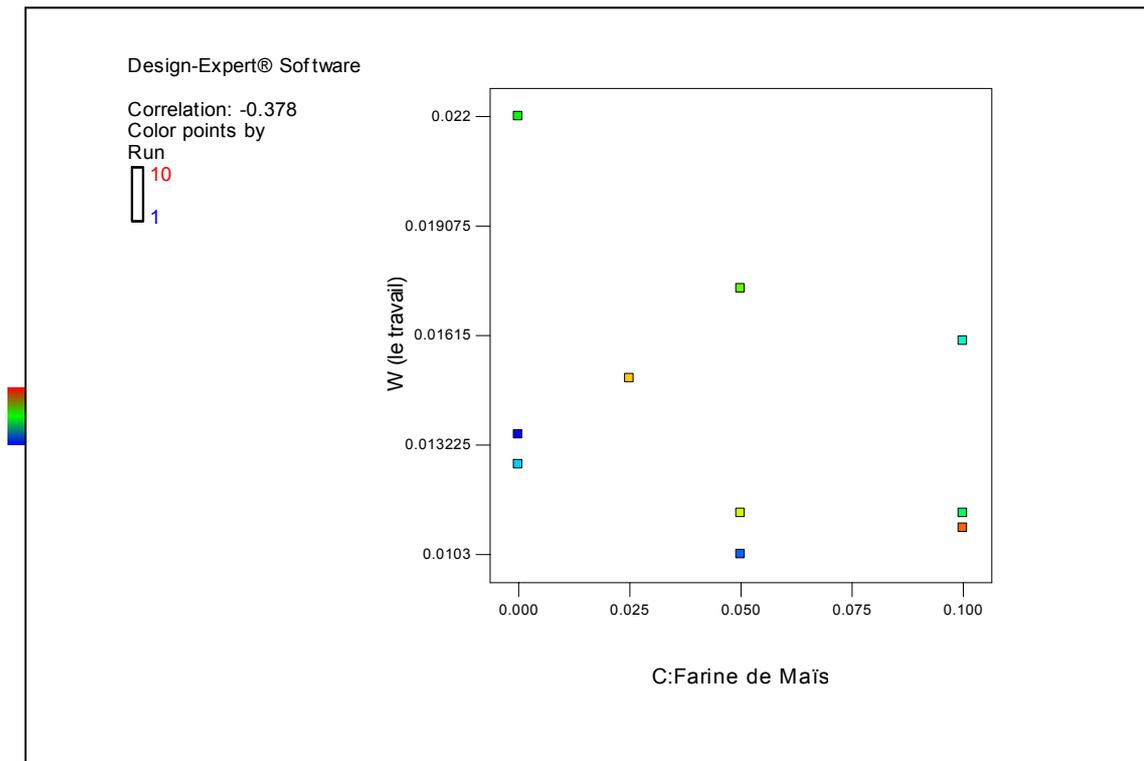


Figure 5.15 : Variation du travail en fonction du pourcentage massique de Maïs pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

5.8.6. Tracés des valeurs prédites en fonction des valeurs observées

Pour se convaincre que le modèle quadratique peut être accepté, traçons la variation des valeurs prédites en fonction des valeurs observées. (Figure 5.17). Considérons comme bonne la concordance entre les valeurs observées et calculées à l'intérieur du domaine, le modèle quadratique est jugé valide.

5.8.7. Tracés des courbes de réponses et des courbes d'isoréponses

Les modèles que nous avons déterminés précédemment nous permettent de tracer les courbes de réponses et les courbes d'isoréponses

D'après les figures 5.19 et 5.20 on a choisi un taux d'incorporation de 5% de farine d'orge pour avoir une grande valeur boulangère de la farine mélange. Pour les mêmes raisons notre choix a été porté sur un taux de 5% de farine de Maïs.

Les points de l'indice de chute varient entre 297s et 355 s et les points du travail varient entre 0,0103 joules et 0,0220 joules. Pour des valeurs intermédiaires, le formulateur dispose de plusieurs solutions et peut ainsi choisir la composition la plus avantageuse. Nous avons choisi au hasard le point optimum correspondant à 0,90% de farine de blé tendre, 0,004% de farine d'Orge et 0,096% de farine de Maïs, les valeurs prédites du travail et de l'indice de chute pour ce mélange sont respectivement 0,01559 joules et 325 s. Les valeurs observées du travail et de l'indice de chute sont respectivement 0,0158 joules et 324 s.

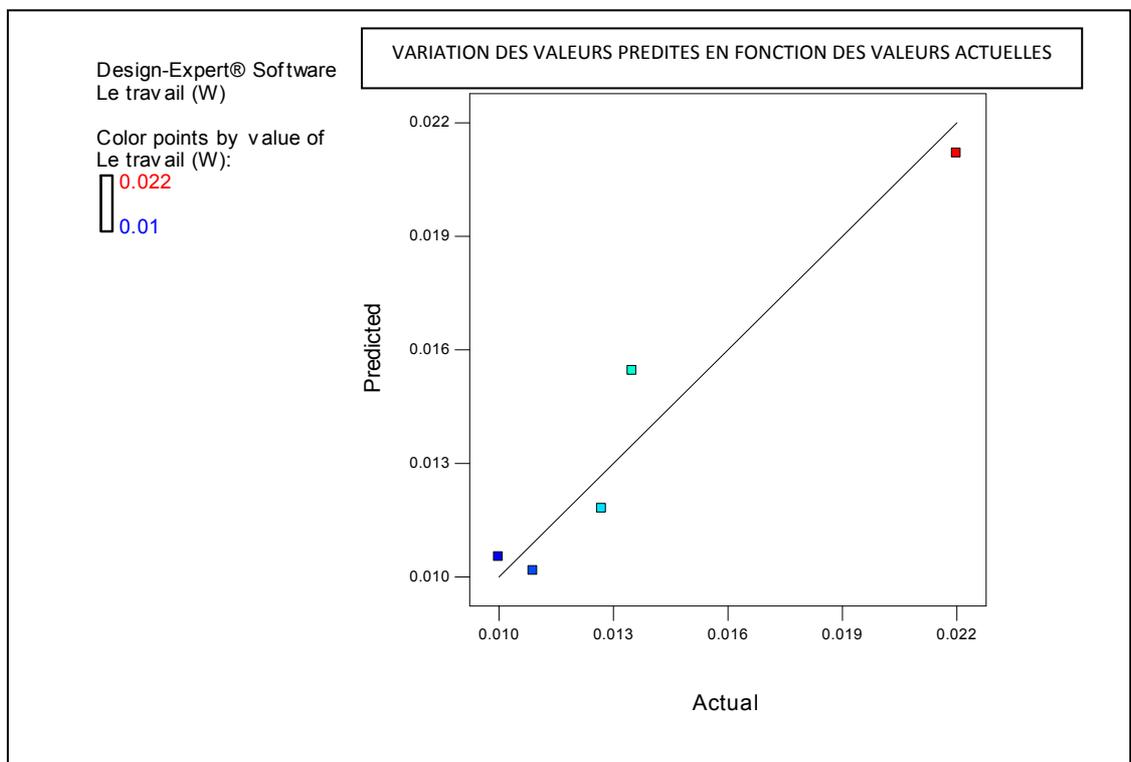


Figure 5.16: Variation des valeurs du travail prédites en fonction des valeurs observées pour le mélange binaire Blé tendre - Orge

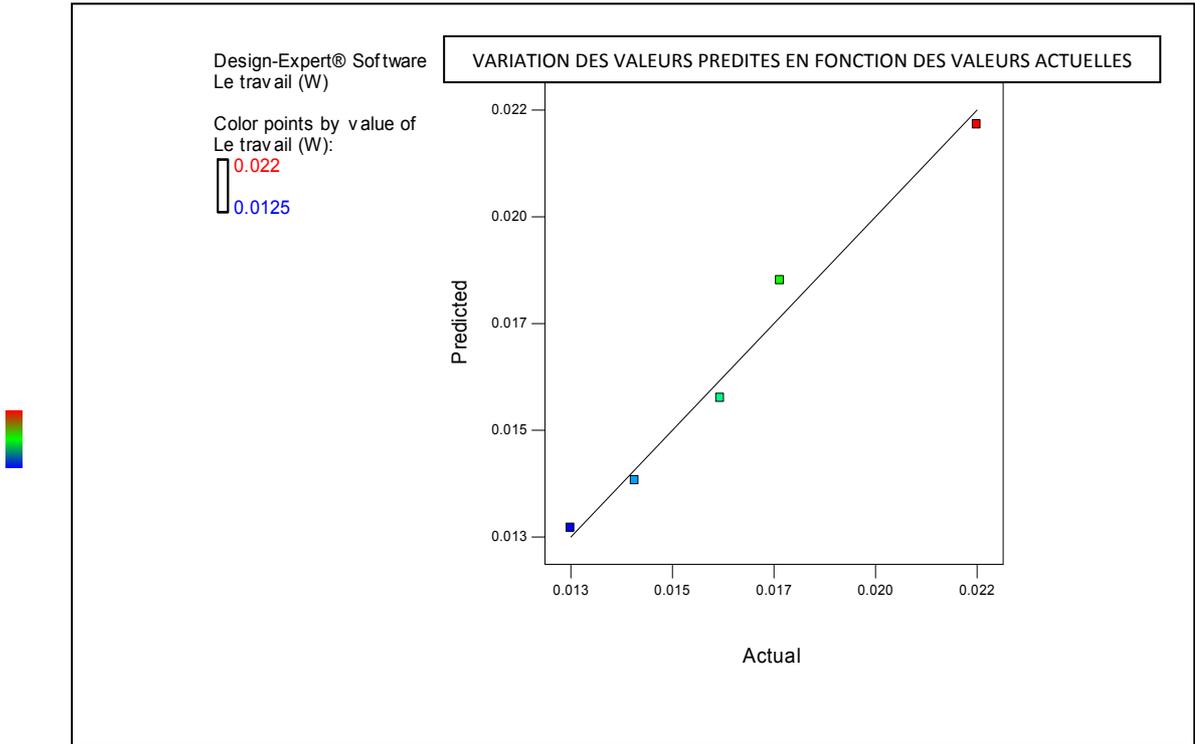


Figure 5.17: Variation des valeurs du travail prédites en fonction des valeurs observées pour le mélange binaire Blé tendre - Maïs

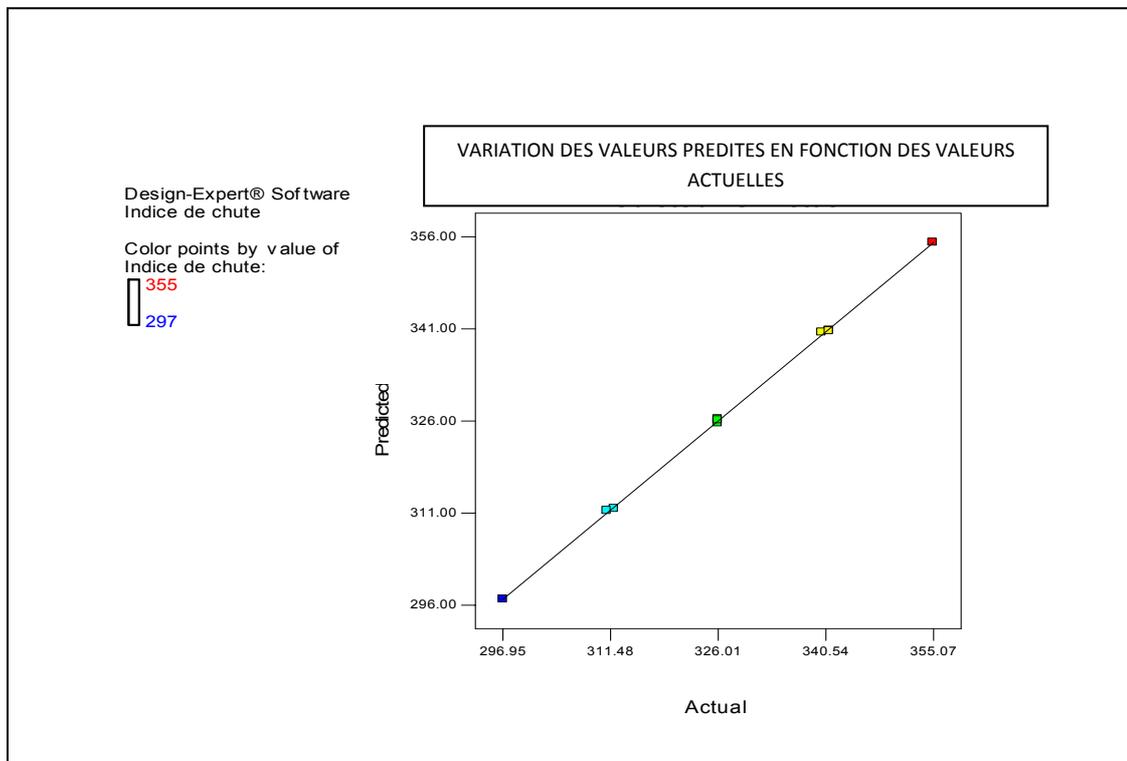


Figure 5.18: Variation des valeurs de l'indice de chute prédites en fonction des valeurs observées pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

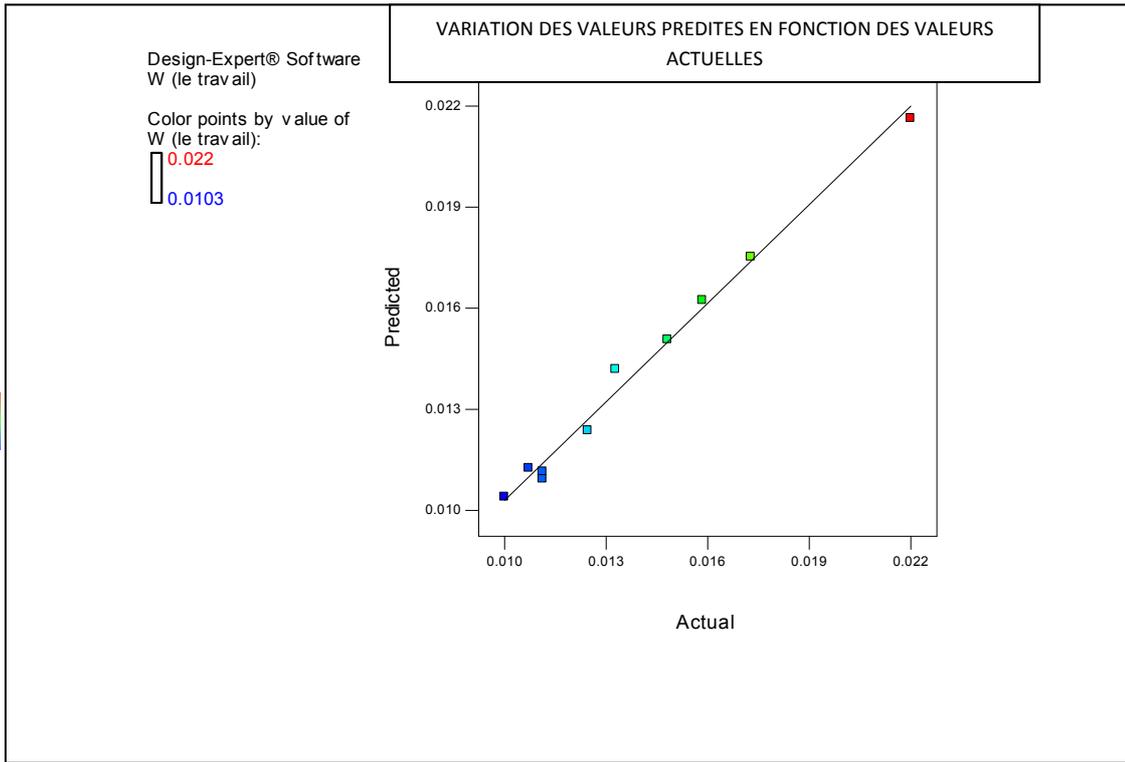


Figure 5.19 : Variation des valeurs du travail prédites en fonction des valeurs observées pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

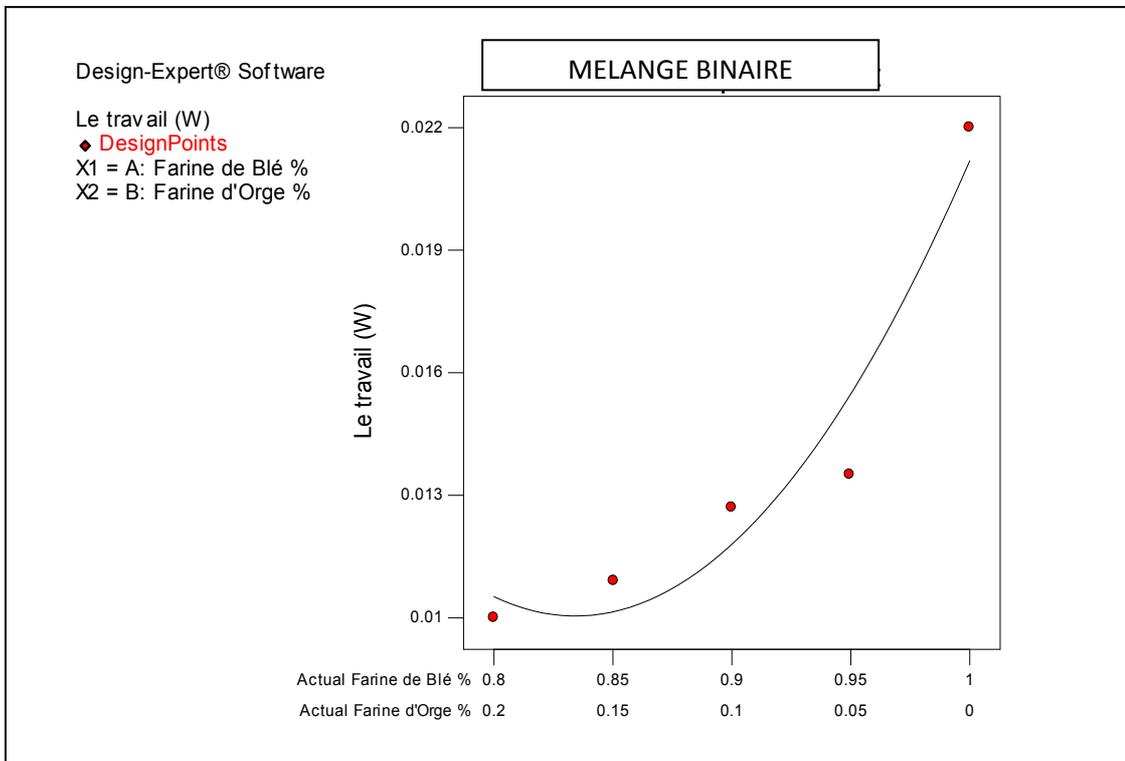


Figure 5.20 : Variation du travail en fonction des pourcentages massiques de farine de Blé tendre et de la farine d'Orge.

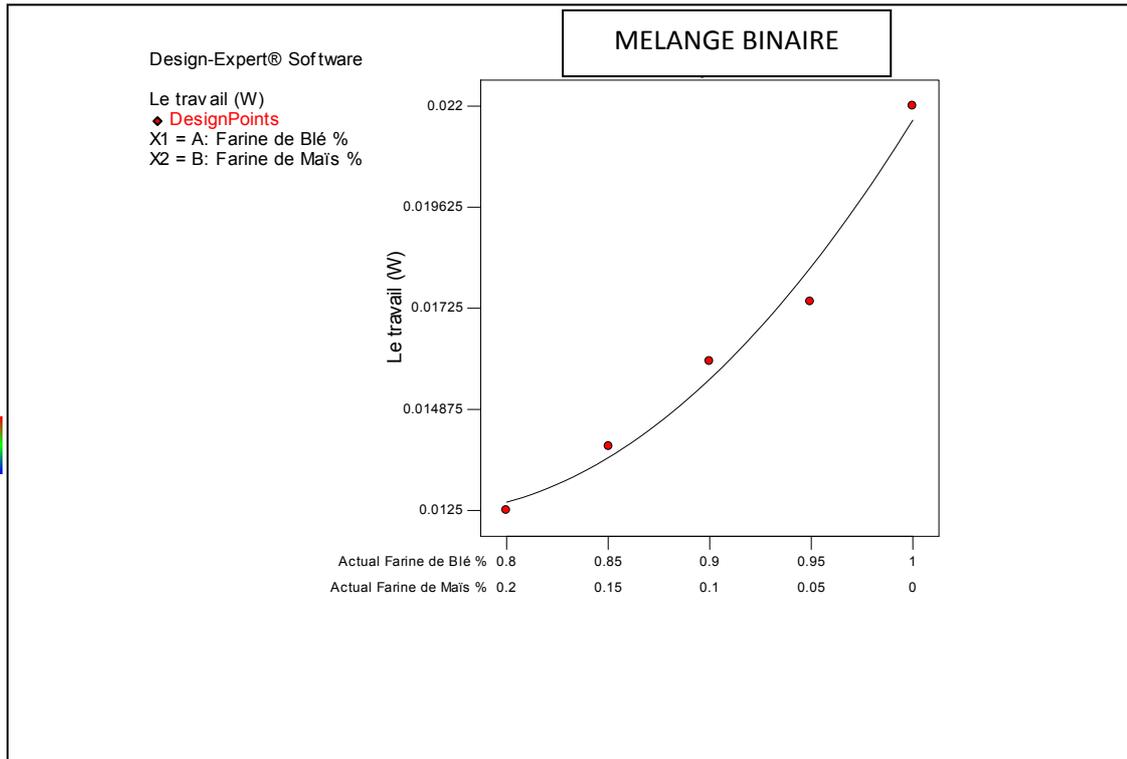


Figure 5.21: Variation du travail en fonction des pourcentages massiques de farine de Blé tendre et de la farine de Maïs.

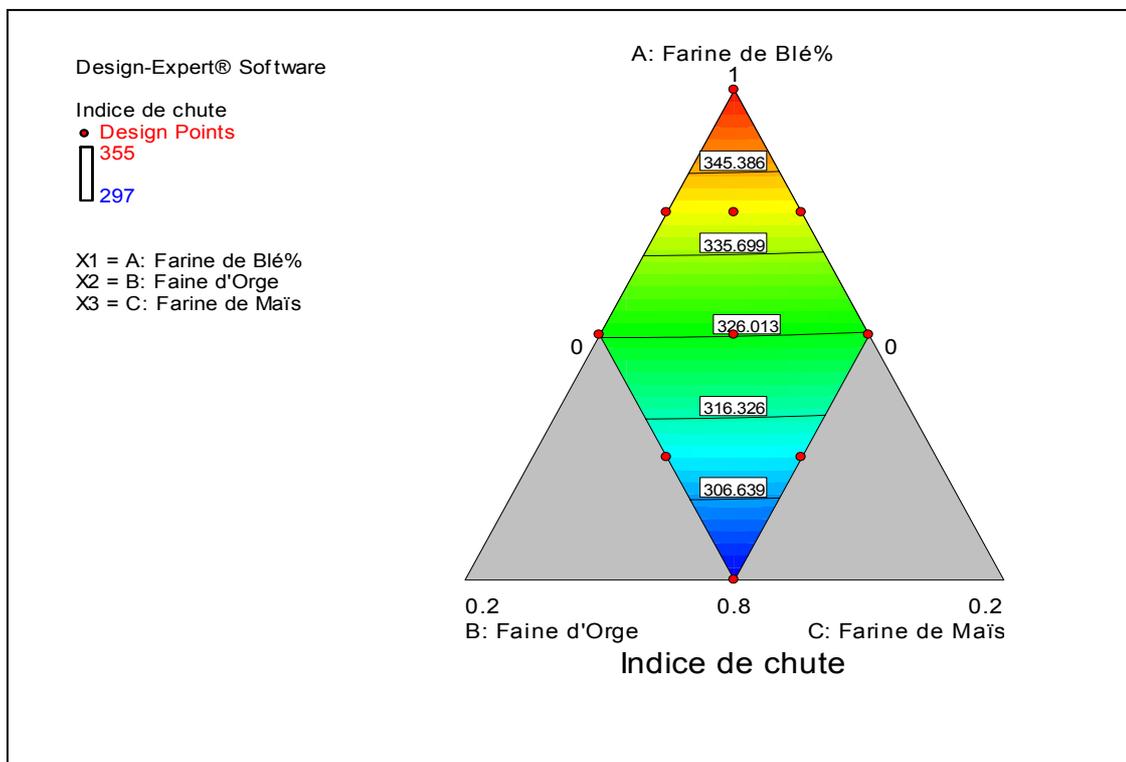


Figure 5.22: Courbes d'isoréponses de l'indice de chute pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

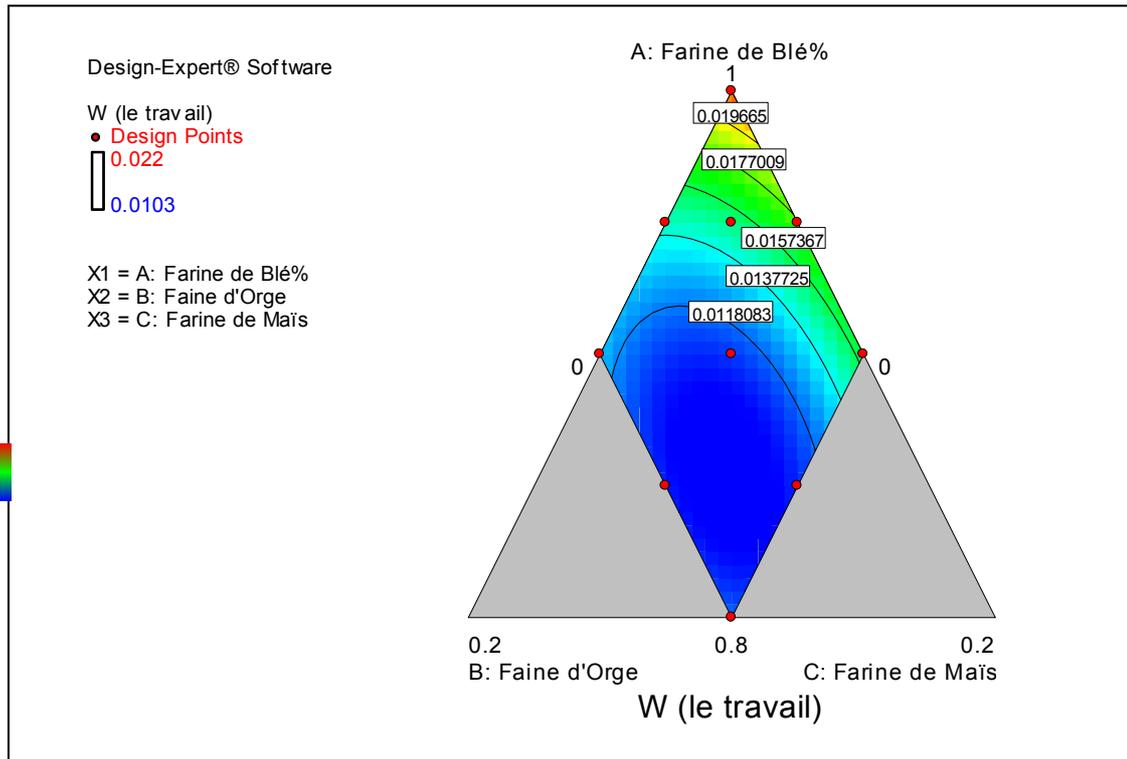


Figure 5.23: Courbes d'isoresponses du travail pour le mélange ternaire Blé tendre- Orge - Maïs

5.9. Optimisation

Dans le but d'une optimisation qualitative, les courbes d'isoresponses nous offrent le choix de plusieurs mélanges binaires et ternaires optimums qui présentent la meilleure valeur alvéographique.

Parmi ces les points qui un travail W intéressant on a :

- les mélanges binaires : (95% blé tendre - 5% d'orge)
- et (95% blé tendre - 5% de maïs).
- les mélanges ternaires : 90% blé tendre- 0,4% orge - 9.96% maïs dont les valeurs expérimentales du W et de l'indice de chute sont : ($158 \cdot 10^{-4}$ J, 324s).

La qualité de ces pains composites correspondant à W optimum est attestée par des notes élevées, comme l'indique le tableau suivant :

Tableau 5.20 : les appréciations des résultats des pains correspondants à un W optimum

Pain composite	Note pâte	Note pain	Note totale	Appréciation
95% blé tendre - 5% d'orge	100	95	289	Très bon
95% blé tendre - 5% de maïs	100	95	292	Très bon
90% blé tendre- 0,4% orge-9,96% maïs	98 ,50	90,70	283,20	Très bon

La différence entre ces pains et le pain de blé 100 % n'est pas toujours perçue significativement. Ces pains une odeur caractéristique. L'aspect est peu modifié, la mie est un peu plus jaune ou brunâtre.

Pour faciliter leur acceptation par le consommateur Algérien : il faut que l'information sur les avantages nutritionnels du pain à base de farine composée soit disponible.

L'étude de la composition du pain obtenu grâce au mélange de plusieurs céréales sont à envisager pour une meilleure connaissance de l'intérêt nutritionnel du pain composé.

Compte tenu des résultats des tests organoleptiques obtenus il a été retenu de vulgariser la formule avec 10 % de farine locale et 90% de Blé.

Les figures 4.25 et 4 .26 nous donnent une comparaison entre l'aspect extérieur et la structure de la mie de quelques pains composites et des pains correspondant à un pourcentage d'incorporation optimum



Figure 5 .24 : Comparaison entre quelques pains composites et un pain correspondant à un pourcentage d'incorporation optimum



Figure 5.25: Comparaison entre la structure des mies de quelques pains composites et celles des pains correspondants à un W optimum.

CONCLUSION

Les farines d'orge et de maïs ne sont pas panifiables. Elles peuvent toutefois être associées à une farine de blé commerciale pour produire des pains de qualité acceptable.

Pour les mélanges binaires nos essais de panification ont montré que jusqu'à 15% de farine d'orge et 20 % de farine maïs pouvaient être incorporées sans dépréciation notable des caractéristiques des pains.

Les essais de panification ont montré que les mélanges ternaires composés jusqu'à 10% de farine de maïs et 5% de farine d'orge donnent de très bons pains alors que les mélanges ternaires composés jusque 10% de farine d'orge et 5% de farine de maïs donneraient des pains de bonne qualité.

Dans un mélange ternaire, au-delà du taux de substitution de 15 %, les propriétés rhéologiques des farines composites sont altérées et les pains composites présenteront certaines imperfections : faible volume, mauvaise cohésion de la mie.

L'addition de quantités supérieures à ces données pourra nécessiter l'usage d'améliorants ou une modification du procédé de panification. Le degré de substitution dépend également de la farine de blé utilisée. Des blés de force admettront un taux de substitution plus élevé que des blés de faible valeur boulangère.

Dans ce cas et comme proposition, l'ajout d'améliorant adéquats pourrait corriger partiellement ces défauts et ralentir le phénomène de rassissement. La perspective de substitution d'une partie de blé par de l'orge et du maïs nous semble intéressante à deux titres.

D'une part, elle s'intègre dans les politiques de valorisation des céréales locales en Algérie afin de produire des pains à moindre coût. D'autre part, vu la forte activité enzymatique des farines d'orge et de maïs, elle pourrait permettre de corriger les activités enzymatiques de certaines farines de blé, difficilement utilisables en boulangerie. Il serait dans tous les cas opportun d'étendre cette étude à d'autres produits céréaliers comme les pâtes alimentaires, le couscous et les biscuits.

Il faut souligner l'apport de l'application de la méthode des plans d'expériences, qui a permis d'affiner l'approche expérimentale, d'optimiser le choix des essais, d'organiser leur exécution, de mieux exploiter les résultats expérimentaux et de juger la qualité des modèles estimés, on espère, par l'utilisation de cette méthode, avoir contribué à sa diffusion et au développement d'une stratégie de travail plus fiable et plus judicieuse.

A l'issus de ce travail, nous sommes parvenu à formuler des pains composites contenant jusqu'à 15 % de farines locales et présentant des aspects nutritionnels et diététiques intéressants grâce à l'apport en fibres et en protéines.

Sur le plan organoleptique les pains obtenus ont généralement un aspect peu différent du pain de blé 100 %. Le volume spécifique diminue sensiblement quelle que soit la farine ajoutée (orge ou maïs). Toutefois, cette diminution ne devient gênante qu'au dessus d'un taux d'incorporation de 20 %.

A partir de l'étude économique on a démontré que le prix de revient des farines d'orge et de maïs est significativement inférieur à celui de la farine de blé tendre importé ce qui implique que le prix de revient de la baguette composée est

aussi inférieur à celui de la baguette produite avec la farine de blé, sur cette base on peut espérer réduire les importations de blé tendre de 15% ce qui représente en moyenne 495 000 Tonnes / an .

REFERENCES

1. Feillet, P., "Le grain de blé, composition et utilisation", Inra, Paris, (2000) ,293p .
2. Balla, A., Blecker , C., Oumarou , M., Paquot , M ., Deroanne , C ., "Mise au point de pains composites à base de mélanges de farines de sorgho-blé et analyse textural ", Biotechnol.Agron.Soc. Environ, (1999), 69-77.
3. Produits sanguins comité consultatif, 86^{ème} réunion, Food and Drug Administration Washington (10 mars 2006).
4. Salvador, R., "*The Maize page*", Iowa State University, (2004), 6-9.
5. Encyclopaedia Universalis France SA Céréales, CD Universalis 4.0, (1998).
6. Dutau, G., "Le dictionnaire des allergènes", Paris, Phase 5, 3e édition (2000) ,239p.
7. Jones, S.M., Magnolfi, C.F., Cooke,S.K., Sampson, H.A., "Immunologiccross-reactivity among cereal grains and grasses in children with food hypersensitivity", J Allergy Clin Immunol (1995),341–51.
8. Moneret-Vautrin, D.A., Kanny, G., Rance, F., Lemerdy, P., "Les allergènes végétaux alimentaires. Allergies associées et réactions croisées",Rev Fr Allergol Immunol clin,V37, (1997),316–24.
9. Chehat,F., " Analyse macroéconomique des filières , la filière blés en Algérie", Projet PAMLIM Perspectives agricoles et agroalimentaires Maghrébines Libéralisation et Mondialisation, Alger, 7-9 avril (2007).
10. Djaouti,M., " renforcement des capacités des acteurs de la filière céréales en Algérie dans le cadre d'un partenariat nord sud cas de la wilaya de Sétif ",thèse de master,(2010),institut agronomique méditerranéen de Montpellier.
11. Bia et service communication, " le grain de blé", Journée portes ouvertes, octobre (2006), INRA.
12. ARVALIS, institut du végétal, juin (2009),6.

13. Bourson, Y., "Mouture de blé tendre et techniques d'obtention de la farine", F 6175, technique de l'ingénieur, (2009), 1-23.
14. Zoubiri, D., "Contribution a l'étude du décret exécutif n°91-7-572 relatif à la farine de panification et au pain", thèse de magister, INA, (1995).
15. Godon, B., Willim, C., "les industries de première transformation des céréales", (1988), 561p.
16. Sinnaeve, G., "Méthodes d'appréciation de la qualité des blés (et épeautres) destinés à la panification", département qualité des productions agricoles, Gembloux, 10 octobre (2007), 1-8.
17. FAO, [http // :www.fao.org](http://www.fao.org), (2007).
18. Newman, N., "A brief history of barley foods", Cereal Foods World 51 (2006), 4–7.
19. Behall, K.M., Hallfrisch, J., "Diets containing barley significantly reduce lipids in mildly hypercholesterolemic men and women", American Journal of Clinical Nutrition 80 (2004), 1185–1193.
20. Fadel, J.G., Fadel, R.K., Newman, C.W., "Hypocholesterolemic effects of β -glucans in different barley diets fed to broiler chicks", Nutrition Reports International 35 (1987), 1049–1058.
21. Newman, N., Lewis, S.E., "Hypocholesterolemic effect of barley foods on healthy men", Nutrition Reports International 39, (1989), 749–760.
22. Braaten, J.T., Wood, P.J., Scott, F.W., "Oat gum lowers glucose and insulin after an oral glucose dose", American Journal of Clinical Nutrition 53 (1991), 1425–1430.
23. Cavallero, A., Empilli S., Brighenti, F., "High (1 \rightarrow 3, 1 \rightarrow 4)- β -glucan barley fractions in bread making and their effects on human glucemic response", Journal of Cereal Science 36, (2002), 59–66.
24. Wood, P.J., Braaten, J.T., Scott, F.W., "Comparisons of viscous properties of oat and guar gum and the effects of these and oat bran on glycemic index", Journal of Agricultural and Food Chemistry 38, (1990), 753–757.
25. Pins, J.J., and Kaur, H., "A review of the effects of barley β -glucan on cardiovascular and diabetic risk", Cereal Foods World 51, (2006), 8–11.
26. Moule, C., "Fourage", Edition lamison Ru, (1971), 189p.

27. Palmer, G.H., "cereals in malting and brewing", cereal science and technology, ed Aberdeen University Press, (1989), p61.
28. El hafid, A., Nuzillard, D., Devaux, M.F., Petrochilos, N., Belloir, F., "Extraction des signatures de composés purs constituant la couche externe du grain d'orge à partir d'images de fluorescence", INRA URPOL, (2005), 1-4.
29. Guida, W., "Identification des inhibiteurs de la germination de l'orge et mise au point d'un procédé de traitement des eaux de trempage en malterie en vue de leur recyclage», thèse de doctorat, école nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires, institut national polytechnique de Lorraine, (2006), 17-22.
30. Chandra, G.S., "the structure of barley endosperm-An important determinant of malt modification", journal of the science of food and agriculture, vol 79, (1999), 37-46.
31. MacLeod, A., "the physiology of malting", food science and technology a series of monographs, (1979), 145-232.
32. Pomeranz, Y., "Food uses of barley", CRC Critical Reviews in Food Technology (1974), 377-394.
33. Edney, M.J., Rosnagel, B.G., Endo, Y., Ozawa, S., Brophy, M., "Pearling quality of Canadian barley varieties and their potential uses as rice extenders", Journal of Cereal Science 36, (2002), 295-305.
34. Darlington, H.F., Rouster, J., Hoffman, L., Halford, N.G., "Identification and molecular characterization of hordoinolines from barley grain", Plant Molecular Biology 47 (2001), 785-794
35. Fincher, G.B., "Morphology and chemical composition of barley endosperm cell walls", Journal of the Institute of Brewing 81 (1975), 116-122.
36. Fincher, G.B., Stone, B.A., "Cell walls and their components in cereal grain technology", Advances in Cereal Science and Technology Vol. 8, American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN (1986), 207-295.
37. Henry, R.J., "Pentosans and (1-3), (1-4)- β -glucan concentrations in endosperm and whole grain of wheat, barley oats and rye", Journal of Cereal Science 6, (1987), 253-258.
38. Bhatti, R.S., "Physicochemical and functional breadmaking properties of hullless barley fractions", Cereal Chemistry 63, (1986), 31-35.
39. Paquet, J., "mon métier boulanger", (1991), 286p.

40. Chatterjee, S.R., Abrol, Y.P., "Protein quality evaluation of popped barley grains Sattu", *Journal of Food Science and Technology* 14, (1977), 247–250.
41. Ryu, S., "Grain quality of barley for human diet", in: *Proceedings of Joint Barley Utilization Seminar*, Korean Science and Engineering Foundation, Suweon, Korea, (1979), 94–108.
42. Bhatti, R.S., "Nonmalting uses of barley", *Chemistry and Technology*, American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, (1993), 355–417.
43. Newman, R.K., Newman, C.W., "Barley as a food grain", *Cereal Foods World* 36, (1991), 800–805.
44. Dhingra, S., Jood, S., "Effect of flour blending on functional, baking and organoleptic characteristics of bread", *International Journal of Food Science & Technology* 39, (2004), 213–222.
45. Swanson, R.B., Penfield, M.P., "Barley flour level and salt level selection for a whole-grain bread formula", *Journal of Food Science* 53, (1988), 896–901.
46. Basman, A., Köksel, H., "Properties and composition of Turkish flat bread (bazlama) supplemented with barley flour and wheat bran", *Cereal Chemistry* 76, (1999), 506–511.
47. Ereifej, K.I., Al-Mahasneh, M.A., Rababah, T.M., "Effect of barley flour on quality of balady bread", *International Journal of Food Properties* 9, (2006), 39–49.
48. Baik, B.K., Czuchajowska, Z., "Barley in udon noodles", *Food Science and Technology International* 3, (1997), 423–435.
49. Newman, R.K., McGuire, C.F., Newman, C.W., "Composition and muffin-baking characteristics of flours from four barley cultivars", *Cereal Foods World* 35, (1990), 563–566.
50. Ames, N., Rhymer, C., Rossnagel, B., Therrien, M., "Utilization of diverse hulless barley properties to maximize food product quality", *Cereal Foods World* 51, (2006), 23–38.
51. Une céréale oubliée le millet, *industrie des céréales n°83*, juillet – Aout – septembre (1994).

52. Antoine,C. , Lullien- Pellerin,V., Abecassis,J.,Rouau,X ., “ Intérêt nutritionnel de la couche à aleurone des céréales” , industrie des céréales 133, juin – juillet (2003),545-556 .
53. La séparabilité amande enveloppe, une nouvelle composante de la valeur semoulière des céréales, industrie des céréales n° 132, avril -mai (2003) ,15-22.
54. Marché des céréales, Conseil international des céréales CIC, 2009.
55. Benetrix, F., “ le maïs en alimentation humaine”, industries des céréales 148, juin-juillet (2006) ,18.
56. Gay, J.P., “Fabuleux maïs”, édition AGPM, (1984) ,295p.
57. Baudricourt, A.G., Hédin, L., “L'homme et les plantes cultivées”, éd A. M Métaillé, (1988),271p.
58. Gay, J.P., “ Maïs, mythe et réalité”, éd. Atlantica, (1999) ,268p.
59. Projet pilote de valorisation des céréales locales en panification, soumis pour financement au FNRAA, République du Sénégal, décembre (2010), 1-41.
60. Langraf,F.,Yvon,B., “Procèdes de panification”, techniques de l'ingénieur, (2009), 1-23.
61. Zaroni, B., Peri, C., “A study of the bread-baking process. I: a a phenomenological model”, Journal of Food Engineering 19, (1993), 389–398.
62. Scanlon, M.G., Zghal, M.C., “Bread properties and crumb structure”, Food Research International 34, (2001), 841–864.
63. Giannou, V., Kessoglou ,V., Tzia, C., “Quality and safety characteristics of bread made from frozen dough”, Trends in Food Science and Technology 14 ,(2003), 99–108.
64. Stampfli, L., Nersten, B., “Emulsifiers in bread making”, Food Chemistry 52 (1995), 353–360.
65. Dandoy, S., “Le rayon boulangerie en libre service du supermarché Match” Rapport d'étude, DESS qualimapa, Lille, (1996), 29 p.
66. Cheftel, J.C., Cheftel, H., “Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments ”,(volume 1), Paris, Tec & Doc Lavoisier, (1992), 381 p.
67. Der, I., “L'homme, la farine, le pain”, Thèse de magister, Lille, 130, (1985).
68. Godon, B., Guinet, R., “La panification française ”, Tec & Doc Lavoisier,

- (1994), 521 p.
69. Bourdet, A., "La biochimie du pain", (1977), 37-46.
 70. Masy, L., " Le pain aspects biochimiques et nutritionnels" Thèse magister Lille, (1989), 123 p.
 71. Godon, B., "Le pain pour la Science", dossier hors série de mars science et gastronomie", (1995), 16-25
 72. Calvel, R., "La Boulangerie Moderne ", Paris, Eyrolles, (1972), 466 p.
 73. Carentino, S., " Pains, brioches et gâteaux ", Bio futur, (1996), 38-40.
 74. Toffalori, N., " Le pain et la santé ", Thèse magister, Pharmacie Lille, (1993), 123 p.
 75. Brochoire, G., " mieux connaître la farine ", supplément technique INBP n°85
 76. Larpent, J.P., "La Microbiologie de la fermentation panair ", In : Agro-alimentaire, (1992), 65 p.
 77. Chiron, H., "L'évolution technologique en boulangerie française méthodes, équipements, adjuvants IAA", (1994), 29-40.
 78. Jean – jacques, D., Jeanne, F., Gibert, S., "plans d'expériences applications à l'entreprise", édition technique 27 Rue Ginaux 75737 Paris cedex, (2000).
 79. Garpy, J., "plans d'expérience pour surface de réponse", Dunod, paris, (1999), 409p.
 80. Sudo, G., Sudo, M.C., "les plans d'expériences "AFNOR, paris, (2000), 405 p.
 81. Atkinson, A.C., Donev, A.N., "Optimum experimental design", oxford clarendon, (1992).
 82. JORA, normes Algériennes du journal officiel n°2 du 10 /08/1998 .
 83. Bar, L., Contrôle de la qualité des céréales et protéagineux, institut technique des céréales et fourrages, paris, (2001), 267p.
 84. Multon, J.L., "les interactions entre l'eau et les constituants des grains, graines et produits dérivés", Ed APRIA, Technique et documentation, paris, (1982), 161-185.
 85. Zia, U., Farzana, H., "Nutritional changes in maize (*Zea mays*) during storage at three temperatures ", PCSIR Labortaries Complex,

Biotechnology and Food Research Centre, Ferozpur Road, Lahore 54600, Pakistan,(2002),Vol.77, n°2,197-201.

86. Godon, B., "Matières minérales du grain de blé et de farine", bulletin des anciens élèves de l'école française de meunerie 283, janvier-février(1978), 33-46.
87. Kleijer, G., "Relation entre le poids à l'hectolitre et plusieurs paramètres de la qualité dans le blé", Revue suisse Agric. 39 (6), (2007) ,305-309.
88. Baik,B.K., Ullrich,S., "Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest", journal of cereal science, Department of Crop and Soil Sciences, Washington State University, Pullman, september (2008), Vol 48, issue 2,233-242.
89. Oyelade , O.J., Tunde-Akintunde , T.Y., Igbeka, J.C., "Modelling moisture sorption isotherms for maize flour", journal of stored products research, Department of Agricultural and Environmental Engineering, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria, (2008),Vol 44, issue 2, 2008,179-185.
90. ICC- Standards, international association for cereal chemistry, (2010).
91. CODEX-STANDARD, norme codex pour la farine du maïs dégermé et le gruau de maïs dégermé n°155, (1985).
92. Godon, B., et Loisel, W., "GUIDE PRATIQUE D'ANALYSES DANS LES INDUSTRIES DES CÉRÉALES", (1997) ,818p.
93. Jadhav, S.J., Lutz, S.E., Ghorpade, V.M., Salunkhe, D.K., " Barley: chemistry and value-added processing" , *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **38** (1998), pp. 123–171.
94. Roussel, P., Chiron, H., Ndiaye, A., Della Valle., G, " Vers une harmonisation du langage sensoriel dans la filière blé-farine-pain. Méthodologie de communication appliquée à un système d'aide à la décision en panification française (AsCoPain). 1re partie Industries des céréales", (2006) , 24-31
95. Musila, R.N., Diallo, A.O., Makumbi, D., "Combining ability of early-maturing quality protein maize inbred lines adapted to Eastern Africa", ,University of Nairobi,(2010), field crops research 119(2010),231-237.
96. Godon, B., Willm,C.," les industries de première transformation des céréales",ed Tec et Doc lavoisier paris, (1998),679p.

97. Mestres, C., Matencio, F., Faure, J., Becassis, J., " Fabrication industrielle de pâtes composées blé-maïs", Laboratoire de Technologie des Céréales, CIRAD/IRAT, (1989) ,337-347.
98. Imbs, G., Bessière, A., Devailly,A., Cousson,T. , Parmentier, M., " Etude de l'acceptabilité de pains à base de farines composées dans le Nord-Cameroun", Département de Science des Procédés ENSIAAC, Centre Universitaire de N'Gaoundéré, BP 455, N'Gaoundéré, Cameroun,(1989),327-336.
99. JORA, normes Algériennes du journal officiel n°35 du 27 /05/1998.
100. Zia-ur-rahman, A., "Storage effect on nutritional quality of commonly consumed cereals, Food and Biotechnology Research Center, Food Chemistry", (2006) , 53-57
101. Atalla, M.M., "Mycotoxin production in wheat grains by different Aspergilli in relation to different relative humidity and storage periods", Nahrung/Food vol. 47, issue 1, (2003), 6-10.
102. Spicher, G., "Considération nouvelles sur la classification de la flore bactérienne du blé ", la meunerie Fr, (1964) ,22-33.
103. Décret exécutif n° 91-372 du 31 décembre 1991 .
104. Skendi,A., Biliaderis,C.G, Papageorgiou,M., " Effects of two barley β -glucan isolates on wheat flour dough and bread properties ", Laboratory of Food Chemistry and Biochemistry, Department of Food Science and Technology, School of Agriculture, Aristotle University,Food Chemistry (2010), 1159-1167.
105. Chene, A., "la farine 1ière partie", Journal de l'ADRIANOR Agro-Jonction 26, Juillet- Août, (2001) ,1-8.

APPENDICE A

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

A.W	: Water activity
BT	: blé tendre
CRIAA	: Centre de recherche en industrie agro-alimentaire Blida
DA	: Dinar algérien
DON	: Déoxynivalénol
ERIID	: Entreprise régionale des industries agro-alimentaires et dérivés
F .B.T	: farine de blé tendre
F .M	: farine maïs
F.O	: farine orge
FAO	: Food and Agriculture Organization
GH	: gluten humide
GS	: gluten sec
Hab	: habitant
ICC	: International association for cereal chemistry
ISO	: International Organization for Standardization
JORA	: Journal Officiel de la République Algérienne
M	: masse
M	: Millions
M.S	: matière sèche
Max	: maximum
MGAB	: Modified Guggenheim Anderson and de Boer equation
MQS	: matière sèche
MT	: millions de tonnes
MTQ	: matière telle quelle
N	: normale
N°	: numéro
NA	: Norme algérienne
NE	: Norme européenne

OAIC : Office Algérien interprofessionnel des céréales

P.E : prise d'essai

PHL : poids à l'hectolitre

PME : petite moyenne entreprise

PNNS : Programme National Nutrition Santé

PS : poids spécifique

R : Coefficient de corrélation

R^2 ajusté : Coefficient de corrélation ajusté

T : type

TH : taux d'hydratation

U : Unité

W : travail de déformation de la pâte

a_0 : Constante d'un modèle

a_i : L'effet du facteur i

$a_{i...k}$: Interaction entre les facteurs i,...et k

h : heure

J : jour

q : Nombre de coefficients d'un modèle mathématique

v/v : volume sur volume

\bar{x}_i : Niveau attribué aux différents facteurs et exprimé en valeurs centrée réduites

y : La réponse observée

y_i : La réponse observée de l'essai n° i

APPENDICE B

PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

1. Echantillonnage des grains

- Les échantillons de blé tendre ont été prélevés au niveau de la trémie de déchargement de la section réception du moulin au moyen de sonde mécanique.
- Les échantillons d'orge et de maïs ont été prélevés à partir des sacs de 50Kg en différentes parties (haut, milieu, fond) au moyen d'une sonde effilée spécialement conçue pour les sacs, de manière à obtenir un prélèvement élémentaire d'environ 1Kg par sac.

Les échantillons sont emballés dans des sacs en plastique, et sont gardés dans un lieu sec et frais.

2. Préparation des échantillons de farines composées pour analyses

- On prélève les échantillons de farines de blé, d'orge, et de maïs à partir des sacs au moyen d'une sonde effilée de manière à obtenir un prélèvement élémentaire d'environ 1Kg par sac.
- La préparation de l'échantillon pour analyse est faite sur la base des pourcentages de mélange (binaire et ternaire) indiqués par les matrices en veillant à bien mélanger les constituants de manière à obtenir un mélange homogène. Par exemple : pour déterminer l'humidité du mélange (90% BT, 5%orge, 5%maïs), on pèse 4,5gr de farine de blé tendre, 0,25gr de farine de blé d'orge et 0,25gr de farine de blé de maïs dans un bocal, qu'on agite énergiquement pendant quelques minutes

pour bien mélanger tous les constituants. Puis on effectue l'analyse selon le protocole indiqué.

3. Analyses physicochimiques des grains et de farines

3.1. Recherche des impuretés

La détermination des impuretés est réalisée selon la norme algérienne NA.2739.199.

• Définition

Les impuretés sont l'ensemble des éléments considérés conventionnellement comme indésirable dans l'échantillon, elles sont constituées de grains de l'espèce cassés, attiré ou attaqués par des déprédateurs de graines étrangères à l'espèce analysée d'élément d'origine organique non organique.

• Principe

Séparation et classement des impuretés des différentes catégories contenues dans l'échantillon.

• Appareillage

- Balance analytique précise centigramme.
- Une table de travail plate et lisse.
- Coupelles, Scalpel, Pinceau.

• Mode opératoire

L'échantillon du laboratoire est homogénéisé et pesé à travers le diviseur conique à l'obtention d'une masse d'environ 100g, pesé à 0.01g près.

Triage manuel de toutes les impuretés après examen visuel de l'échantillon.

Pesé des différentes catégories d'impuretés.

• Expression des résultats

*Le pourcentage A, d'une des catégories d'impuretés identifiée s'obtient ainsi :

$$A = \frac{M_1}{M_e} \times 100 \quad (4.4)$$

Où :

M_e : Prise d'essai

M_1 : Masse de la catégorie d'impuretés.

3.2 Détermination de la masse à l'hectolitre

La détermination de la masse à l'hectolitre est réalisée selon la norme Algérienne_NA.1613-1990.

- Définition

La masse de l'hectolitre correspond à la masse des céréales contenues dans un hectolitre.

- But

La masse à l'hectolitre (PHL) est appelée communément poids spécifique (PS) et appelée encore masse volumique, elle est exprimée en Kg/Hl, elle a pour objet la mesure du blé contenu dans un volume constant qui est un hectolitre, Cette opération permet de déceler certains blés anormaux et peut donner une idée sur le rendement de blé en farine.

- Principe

Écoulement libre d'un échantillon au moyen d'une trémie dans un récipient d'un litre.

- Appareillage

- Appareil « NELIMA – ¼ litre » comprend les pièces suivantes :
 - Une trémie cylindrique
 - Un couteau arasé
 - Une masse cylindrique
 - Un cylindre de remplissage
 - Balance de précision.

- Mode opératoire

- Effectuer deux déterminations par échantillon
- Homogénéiser l'échantillon
- Remplir la trémie jusqu'à la limite, sans tasser les grains.
- Ouvrir le clapet de la trémie et laisser couler le blé dans le cylindre mesureur préalablement taré.
- Pousser le couteau déjà dans la glissière de façon à araser la colonne de grains

- Enlever les grains en excès après avoir arasé
 - Retirer la trémie cylindrique et le couteau araseur
 - Peser immédiatement le contenu dans le cylindre mesureur.
- Expression des résultats
 - Tarer le cylindre mesureur
 - Remplir le cylindre mesureur
 - Peser directement le contenu de cylindre sur la balance de précision
 - Calculer la moyenne des deux essais

$$\begin{array}{l} \text{Ex: Ech1} = 302 \\ \text{Ech 2} = 303 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Ex: Ech1} = 302 \\ \text{Ech 2} = 303 \end{array}} \right\} M = 302.5 \text{ g/l}$$

Se référer au tableau des concordances fourni avec le pèse grains, afin de déterminer les résultats en kg/ hl.

3.3. Détermination du taux d'humidité

- Définition

La teneur en eau est la perte de masse exprimée en pourcentage subie par le produit dans les conditions décrites dans la présente norme.

- Principe

Séchage du produit durant 2 h à une température comprise entre 130 et 133°C, à pression atmosphérique normale après broyage éventuel du produit.

- Appareillage

- Balance analytique
- Broyeur à grain
- Capsules métalliques ou coupelles
- Pince, spatule
- Etuve isotherme à chauffage électrique réglable à 130° et 133°C.
- Thermomètre pour le contrôle de la température interne de l'étuve
- Dessiccateur garni d'un déshydratant.

- Préparation de l'échantillon

L'échantillon de laboratoire est préparé selon le mode opératoire .

- Échantillonnage des grains.

- Préparation de la prise d'essai

Dans le cas des grains de blé et d'orge : prendre la totalité des produits résultant de la mouture :

Comme P.E, afin d'éviter la séparation possible des différents constituants pour cela, Peser une P.E > 5 gr soit 5,100g. Broyer P.E et peser l'intégralité du broyat. Dans le cas des farines: procéder directement à la pesée de la P.E comme décrit dans le mode opératoire.

- Mode opératoire

- Tous les essais sont effectués en double
- Avant l'utilisation les capsules doivent sécher à l'étuve durant 15 mn et refroidir
- Dans le dessiccateur jusqu'à la température ambiante durant 30 à 45 mn :
 - Vérifier la température de l'étuve avant chaque utilisation
 - Peser une capsule vide
 - mettre les capsules au four et à mesure dans le dessiccateur
 - Peser rapidement dans la capsule une quantité de 5g de l'échantillon (grain de blé tendre et d'orge) après broyage, (farine de blé tendre, farine d'orge).
 - Introduire les capsules dans l'étuve et laisser séjourner durant 2h à une température comprise entre 130° et 133°C.
 - Ne jamais introduire un échantillon humide dans une étuve contenant des P.E en fin de déshydratation cela aurait pour effet de réhydrater partiellement ces derniers
 - Retirer rapidement les capsules de l'étuve et les placer dans le dessiccateur pour refroidir jusqu'à température ambiante.
 - Peser les capsules à 1mg près.

- Expression des résultats

La teneur en eau ou l'humidité est donnée par la formule suivante :

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (4.5)$$

Où

m_0 : est le poids de la capsule vide (capsule + couvercle)

m_1 : est le poids de la capsule + la prise d'essai

m_2 : est le poids de la capsule + la prise d'essai après séchage

- Prendre comme résultat la moyenne des deux déterminations si les conditions de répétitivité sont remplies.

3.4. Détermination du taux de cendre

• Définition

Les cendres constituent le résidu obtenu après incinération à 900°C dans les conditions décrites dans la présente méthode et exprimé en pourcentage en masse.

• Principe

Incinération d'une prise d'essai dans une atmosphère oxydante, à une température de 900°C jusqu'à combustion complète de la matière organique et pesée du résidu obtenu.

• Réactifs et appareillage

- Ethanol solution à 95%
- Balance analytique
- Nacelles ou creusets d'incinération
- Four à moufle réglable à la température de $900 \pm 25^\circ\text{C}$.
- Dessiccateur (pour refroidissement) muni d'un robinet.
- agent déshydratant.
- Pince en acier inoxydable.

• Préparation de la prise d'essai

Cas des grains de blé ; il est recommandé de prendre la totalité des produits résultant de la mouture comme P.E, afin d'éviter la séparation possible des différents composants.

Peser une PE = 5 gramme.

• Mode opératoire

Tous les essais sont effectués en double

- Peser dans une nacelle préalablement tarée près 5gr du produit (Farine, grains après broyage)

- Répartir la matière en une couche d'épaisseur uniforme sans la tasser
- Humecter la P.E de quelques gouttes d'éthanol afin d'obtenir une incinération uniforme
- Placer les nacelles et leur contenu à l'entrée du four préalablement chauffé à 900°C+/-25° C
- Dès que le contenu des nacelles a fini de flamber introduire les nacelles à l'intérieur du four à l'aide d'une pince en prenant soin de ne pas toucher le contenu des nacelles.
- Les nacelles ne doivent pas toucher les parois du four.
- Fermer la porte du four et poursuivre l'incinération 1 heure à 1h 30 mn jusqu'à la disparition des particules charbonneuses.
- Retirer progressivement les nacelles du four et les déposer à refroidir 1 minute sur un support thermorésistant puis dans le dessiccateur jusqu'à refroidissement à température ambiante (une heure environ).
- Peser rapidement chaque nacelle afin qu'elle n'absorbe pas l'humidité de l'atmosphère.

• Expression des résultats

Le taux de cendres exprimé en pourcentage (%) est donné par les formules suivantes :

* Taux rapporté à la matière telle quelle est égal à :

$$\frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (4.6)$$

* Taux rapporté à la matière sèche est égal à :

$$\frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \times \frac{100}{100 - H} \quad (4.7)$$

Où

m_0 : Masse en gramme de la nacelle vide.

m_1 : Masse en gramme de la nacelle plus la P.E.

m_2 : Masse en gramme de la nacelle plus le résidu.

H : Teneur en eau de l'échantillon analysé exprimé en %.

- Prendre comme résultat la moyenne des deux déterminations.

- Nettoyage des nacelles

Effectuer un nettoyage des nacelles par immersion complète pendant une heure environ dans une solution d'acide chlorhydrique dilué au 1/10 exempte de nitrates.

- Effectuer un rinçage des nacelles à l'eau.
- Sécher les nacelles dans une étuve à une température > à 100°C
- Changer le bain d'acide lorsqu'il jaunit, c'est à dire tous les 15 jours.
- Chauffer les nacelles durant 15 mn dans le four à 900°C avant leur utilisation et mises ensuite dans le dessiccateur. L'opérateur devra attendre qu'elles prennent la température ambiante pour pouvoir les utiliser.

- Entretien du four à moufle

- Vérifier régulièrement la température du four à l'aide d'une canne pyrométrique en introduisant la sonde dans l'orifice de la porte du four non fermée complètement (espace ouvert d'environ 1,5 cm).
- contrôler la température à chaque début de journée de travail sur le cadran du four
- Un ramonage du four doit être effectué en moins une fois par an (à noter sur la fiche de vie du four).

3.5. Détermination du taux d'affleurement ou la granulométrie

- Définition

Le taux d'affleurement est la quantité de farine extraite ou refusée par un tamis dont la garniture à une ouverture de maille qui est choisie en fonction de la finesse et de la granulométrie désirée.

- Principe

La détermination du taux d'affleurement est réalisée à l'aide d'un plansichter doté d'un tamis dont la garniture à une ouverture de maille égale à 193 microns.

- Appareillage

Plansichter de laboratoire doté d'un tamis dont l'ouverture de ces mailles de 7 XX.

- Mode opératoire

Déverser 100 g de farines sur le tamis supérieur par la suite couvrira le tout après le lancement de moteur. Laisser tourner 5 minutes au terme de ce blutage, retirer la quantité extraite Récupérer dans le fond ramasseur et la peser pour évaluer en pourcentage.

EX : 3,5 g = 3,5 %.

3.6. Détermination de l'acidité grasse

- Définition

L'acidité grasse est l'expression conventionnelle des acides, essentiellement d'acides gras libres, extraits dans les conditions qui suivront. Elle est exprimée en gramme d'acide sulfurique pour 100g de matière sèche.

- Principe

Mise en solution des acides dans l'éthanol à 95% (v/v) à la température de laboratoire, centrifugation et titrage d'une partie aliquote de la solution surnagent par l'hydroxyde de sodium.

- Réactif

Tous les réactifs doivent être de qualité analytique et l'eau utilisée doit être de l'eau distillée.

- Ethanol (alcool éthylique) à 95%(v/v).
- Hydroxyde de sodium (Na OH) 0.05N.
- Phénolphtaléine.

- Appareillage

- balance précise à 0.01g.
- Broyeur.
- Tamis en toile métallique 1mm d'ouvertures de maille (pour les farines).
- Centrifugeuse 5000 à 6000 tour/min.
- Tube de centrifugeuse de 45 ml en verre ou en plastique neutres bouchés

hermétiquement.

-Tubes à essais de 50 ml en verre ou en plastique neutres bouchés hermétiquement.

-Pipettes précise de 10 et 20 ml.

-Fiole conique ou erlen Meyer de 250ml.

-Micro burette graduée en 0.01 ml.

-Agitateur rotatif mécanique 30-60tour/min.

- Mode opératoire

1°/ Extraction de l'acidité grasse

Elle doit se faire à une température voisine de 20°C

-peser 5g de produit (en poudre, donc le broyer s'il y a lieu).

-Ajouter 15ml d'alcool éthylique à 95% et fermer hermétiquement.

-Agiter reposer, durant une heure.

-Centrifuger à deux reprises et successivement pendant 2 min à 5000 à 6000 tours/min.

2°/ titrage

-Prélever à la pipette 20ml du liquide surnageant et verser dans un erlen Meyer- Ajouter 5 gouttes de phénolphtaléine.

-Titrer avec la solution d'hydroxyde de sodium de 0.05N jusqu'à le virage rose pale persistant quelques secondes.

3°/ Essai à blanc

-Se fait par remplacement les 20ml de liquides surnageant au 20ml d'éthanol.

- Expression des résultats

L'acidité grasse est exprimée en gramme d'acide sulfurique pour 100g de matière sèche, est donné par la formule suivante :

$$7.35 (V_1 - V_0) C \times 100 / M \times (100 - H)$$

M : la masse de la prise d'essai.

V₁ : le volume en ml de la solution d'hydroxyde de sodium utilisée pour la détermination.

V₀ : le volume en ml de la solution d'hydroxyde de sodium utilisée pour la détermination pour l'essai à blanc.

H : la teneur en eau en pourcentage de masse d'échantillon pour l'essai.

- Répétabilité

La différence simultanément ou rapidement l'une après l'autre par la même analyse ne doit pas dépasser 0.056g H₂SO₄/100g de matière sèche.

3.7. Détermination de taux de Gluten sec

Le gluten humide d'une farine de blé est la substance plasto-élastique composée principalement de gliadine et de gluténine il constitue l'armature de la pâte et lui communique ses propriétés rhéologiques.

- Intérêt

Apprécier la quantité et la qualité du gluten a un intérêt principalement technique. En effet, le gluten constitué essentiellement la fraction insoluble des protéines, présente la caractéristique de pouvoir former un réseau viscoélastique dont les propriétés d'extensibilité, d'élasticité et de ténacité ont une influence sur le comportement des pâtes en cours de fabrication et sur la qualité du produit fini (galettes, gâteaux, couscous, pâte alimentaire...).

- Principe

Préparation d'une pâte au moyen d'un échantillon des farines (des mélanges) et d'une solution de chlorure de sodium. Isolement du gluten humide par lavage de cette pâte avec la solution de chlorure de sodium, puis essorage et pesée du produit obtenu.

- Réactifs

- L'eau utilisée doit être l'eau distillée.
- Chlorure de sodium, solution à 20g/l.

Préparer la solution fraîche chaque jour et utiliser à une température comprise entre 18 et 22°C.

- Appareillage

- Balance précise à 0,01g
- Mortier en porcelaine, verni à l'intérieur, ou capsule métallique, émaillée, de diamètre 10 à 15 cm.
- Burette de 10ml, graduée en 0,1 ml.
- Spatule de 18 à 20 cm de long.

- Tamis.
- Réservoir d'écoulement réglable pour la solution de chlorure de sodium
- Presse à gluten ouessoreuse par centrifugation.
- Plaque métallique ou plaque en verre thermorésistant de 5 cm x 5 cm.
- Mode opératoire

1- préparation de la pâte

Peser 10 g des farines à 0,01 g près et les introduire dans le mortier ou la capsule métallique. Verser 5,5 ml de la solution de chlorure de sodium en agitant la farine avec la spatule,

Former une boule avec la pâte.

- Extraction : Elle peut être, manuelle.
- Extraction manuelle : Le lavage doit se faire au dessus d'un tamis recouvert de gaze destiné à retenir les fragments. Malaxer le pâton en le plaçant dans la paume de la main tout en versant dessus goutte à goutte la solution de chlorure de sodium, pour suivre cette opération jusqu'à ce que l'eau du lavage ne soit plus trouble.

2- Essorage

Eliminer la plus grande partie de la solution de rinçage adhérent à la boule de gluten, en la comprimant entre les mains, refaire cette opération plusieurs fois.

Expression des résultats.

Le gluten humide exprime en pourcentage en masse du produit tel quel, est égale à :

$$GH = m \times \frac{100}{10} \quad (4.8)$$

Où

m: Est la masse, en gramme de gluten humide.

Prendre comme résultat la moyenne de deux déterminations si les conditions de répétitivité sont remplies.

3.8. Détermination de taux de Gluten humide

Le gluten humide obtenu précédemment est placé dans une étuve Chopin pendant 2 heures ou bien rapidement dans un appareil adéquat Gluterk (4min).

- Expression des résultats

Le gluten sec exprimé en pourcentage en masse du produit tel quel, est égal à :

$$\frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad (4.9)$$

La teneur en eau du gluten humide, exprimée en pourcentage en masse est égale à :

$$\frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_0} \times 100 \quad (4.10)$$

Où :

m : est la masse en gramme de la plaque.

m_1 : est la masse de la plaque et du gluten sec.

m_2 : est la masse en gramme de la plaque et du gluten humide.

Capacité d'hydratation:(exprime en pourcentage)

$$\frac{GH - GS}{GH} \quad (4.11)$$

Où :

GH : est le gluten humide.

GS : est le gluten sec.

4 .Les analyses microbiologiques

4 .1. Recherche et dénombrement des moisissures

- Principe

Ensemencement en surface d'un milieu de culture défini, coulé dans une boîte de pétri, avec une quantité déterminée de l'échantillon pour essai Dans les mêmes conditions, ensemencement des dilutions décimales obtenues à partir de l'échantillon pour essai ou de la suspension-mère, à raison d'une boîte par dilution.

- Appareillage et verrerie

- Etuve pour incubation réglable de 20 à 25°C.
- Etuve pour stérilisation.
- Boîtes de pétri stériles, en verre ou plastique.
- Pipettes pasteur.
- Bain d'eau.
- Tube à essai.

- Flacons de capacité appropriée.
- Bec benzène.
- Milieu de culture gélosé OGA ou Saburraux.
- TSE pour dilution.
- Mode opératoire

Prise d'essai, suspension –mère et dilutions

Préparer une série de dilutions décimales à partir de l'échantillon pour essai si le produit est liquide, ou de la suspension mère dans le cas d'autres produits.

Ensemencement et incubation.

- A partir des dilutions décimales, prélever 1ml de chaque dilution à l'aide d'une pipette pasteur et transférer à la surface de boîte de pétri contenant du milieu gélosé.
- Etaler le substrat sur toute la surface de la boîte.
- Retourner les boîtes et les incuber à l'étuve pendant 03, 04 et 05 jours.
- La première lecture doit se faire à partir de troisième jour.

Comptage des colonies

- Compter les colonies sur chaque boîte après 3 jours, 4 et 5 jours d'incubation.
- Retirer les boîtes de l'étuve après les 5 jours.
- Dénombrer les colonies de levures et les thalles de moisissure.
- Expression des résultats

Calculer le nombre de levures et/ ou moisissures par gr de produit par la formule suivante :

$$N = \frac{\sum C}{(n_1 + 0,1 n_2) d} \quad (4.12)$$

Où

- * $\sum C$: est la somme des colonies comptées sur les deux boîtes retenues
 - * d : est le taux de dilution correspondant à la première dilution retenue
 - * n_1 : est le nombre de boîtes comptées et retenues à la première dilution
 - * n_2 : est le nombre de boîtes comptées et retenues à la seconde dilution
- Arrondir les résultats à deux chiffres significatifs

- Noter comme résultats le nombre des colonies exprimé par un nombre compris entre 1.0 et 9.9 multiplié par 10^x où x est la puissance appropriée de 10 (puissance de dilution).

Ex : Dilution 10^{-2} = 105 et 97 colonies

Dilution 10^{-3} = 18 et 23 colonies

$$N = \frac{\sum C}{(n_1 + 0,1n_2)d} = \frac{105 + 97 + 18 + 23}{[2 + (0,1 \times 2)]10^{-2}} = \frac{243}{0,022}$$

= **110458** $\frac{\text{moisissure}}{\text{gr}}$ (4.13)

En Etale à l'aide d'un râteau stérile et en fait l'incubation à 22C° pendant 5 jours.

4.2. Recherche et dénombrement des clostridium sulfuto réducteurs

• Définition

Les Clostridium Sulfito_reducteur sont des bactéries anaérobies stricts, gram⁺, catalase", mobiles, sporules, appartenant a la famille des bacillacea, hôte habituel du tube digestif de l'homme, leur spores ont une résistance considérablement dans les milieux naturels, ils ont un pouvoir de détruire le sulfite de sodium et donner en présence de fer, du sulfure de fer d'où une coloration noire.

• Principe

Selon la disponibilité de milieux de culture, deux techniques sont recommandes par la recherche de Clostridium Sulfito réducteur à savoir :

- Méthode générale sur gélose Viande foie a 46 C°.
- Méthode sur gélose TSN ou TSC a 46 C°.

➤ Méthode générale

• Mode opératoire

- Préparation de milieu

Au moment de l'emploi faire fondre un flacon de gélose VF dans un bain d'eau à 45C° puis ajouté une ampoule d'Alun de fer et une ampoule de sulfite de sodium mélange soigneusement et aseptiquement.

Le Milieu est ainsi prêt a l'emploi mais il faut maintenir dans une Etuve a 45C° jus qu'au moment de l'utilisation.

- Préparation des dilutions décimales

Dans ce cas le produit est solide. Dans un flacon taré contenant 225 ml d'eau physiologique, on introduit aseptiquement 25g de produit à analyse (farines) après agitation on obtient une solution homogène (Solution mère SM dilution 10^{-1}). Dans un tube en ajoute 1 ml de SM, et remplir par l'eau physiologique jusqu'à 9 ml, après agitation ou obtiens une solution homogène dilution 10^{-2} .

- Ensemencement

Les tubes contenant les dilutions 10^{-1} et 10^{-2} seront soumis :

*D'abord a un chauffage à $80C^{\circ}$ pendant 8 à 10 minutes. Puis à un refroidissement immédiat sous l'eau de robinet dans le but d'éliminé les formes végétatives et garder uniquement les formes sporulés.

* A partir de ces dilutions, portes aseptiquement 1 ml de chaque dilution en double dans deux tubes a vis stériles de 16 mm diamètre, puis ajouter environ 15 ml de gélose VF prêt a l'emploi : dans chaque tube comme indique le schéma laisser solidifier sur paillasse pendant 30 minutes.

- Incubation

Ces tubes seront ainsi incubés à $46 C^{\circ}$ pendant 16 à 24h ou au plus tard 48 heures.

- Lecture

La première lecture doit ce faire impérativement a 16 heures, car :

*D'une part les colonies de Clostridium Sulfito_reducteur sont envahissants, auquel cas se trouve en force d'un tube complètement noire rendant l'interprétation difficile voire impossible et l'analyse est à refaire.

*D'autre parts, il faut absolument repérer toute colonie noire ayant poussé en masse et d'un diamètre supérieur a 0.5 mm dans le cas ou il n'ya pas de colonnes caractéristique vé incuber les tubes et effectuer une deuxième lecture au bout de 24 heures.

*Les résultats sont exprimés en nombre d'anaérobies Sulfito_reducteur par

gramme de produit.

5. Analyses technologiques des farines

5.1. Mesure de l'indice de chute selon Hagberg – Perten

• Intérêt

L'indice de chute de Hagberg mesure indirectement l'activité des amylases (enzymes dégradant l'amidon) qui peut devenir excessive dans le cas de présence de grains germés ou en voie de germination.

Cette mesure a deux intérêts principaux.

- Evaluer la valeur d'utilisation des blés. Un blé dont l'activité amyliasique est trop importante ne convient pas aux industries de cuisson et doit être orienté vers l'alimentation animale. La mesure de l'indice de chute de Hagberg est plus pertinente que le dénombrement des grains germés .en effet l'examen visuel ne peut révéler un état de pré-germination qui induit cependant un développement de l'activité enzymatique dans le grain.
- Corriger éventuellement une activité amyliasique insuffisante d'une farine en vue de son utilisation en boulangerie par l'ajout de malt ou d'amylases fongiques.

• Principe

Le principe de la méthode repose sur la mesure de la viscosité d'un empis formé par la gélatinisation d'une suspension aqueuse de farine ou de mouture complète placée dans un bain d'eau bouillante. L'évolution de sa viscosité, liée à l'activité des enzymes, est appréciée par le temps mis par un agitateur pour traverser la préparation sous l'effet de son propre poids.

Une activité amyliasique importante provoque la liquéfaction rapide de l'empis et la durée de chute de l'agitateur est courte (faible indice de chute de Hagberg).

Inversement, un blé à faible activité enzymatique a un indice de chute de Hagberg élevé.

- Expression des résultats

L'indice de chute de Hagberg s'exprime en secondes. Il globalise la durée d'agitation de la préparation (60 secondes) et celle de chute de l'agitateur. Un indice de chute ne peut donc être inférieur à 60 secondes.

Les limites de répétabilité et de reproductibilité de la méthode dépendent du niveau d'indice de chute de l'échantillon.

- Domaine de validité

- La fiabilité des mesures impose le respect des règles concernant :
 - La maintenance de l'appareillage (contrôle de l'entartrage de bain-marie, du bon état des agitateurs, utilisation de tubes spécifiques à la méthode).
 - Le mode opératoire (granulométrie de la mouture conforme aux prescriptions de la norme et ajustement de la masse de la prise d'essai en fonction de sa teneur en eau sur la base de 7,00 grammes à 15 % de teneur en eau.
- Les valeurs extrêmes d'indice de chute de Hagberg rendent mal compte de la réelle activité enzymatique dans les grains et les farines.
 - Pour les produits fortement diastasiques, leur différenciation peut être améliorée en augmentant la masse de la prise d'essai à 9 grammes (au lieu de 7).
- Un indice de chute de Hagberg n'est pas une valeur additive. En effet, si on mélange deux lots ayant des indices de chute différents, celui du lot résultant ne sera pas la moyenne arithmétique des deux premiers

La prévision de l'indice de chute d'un mélange ou la constitution d'un mélange à indice de chute souhaité à partir de deux lots d'indice de chute connus, est réalisable par la conversion des indices en nombres de liquéfaction au moyen de la formule empirique suivante :

$$\text{NL (Nombre de liquéfaction)} = \frac{6000}{\text{Indice de chute} - 50} \quad (4.14)$$

Ce nombre est additif et on peut ainsi calculer facilement, en faisant la moyenne, celui d'un mélange de deux lots, on obtient l'indice de chute du mélange en utilisant la formule en sens inverse :

$$\text{Hagberg} = \frac{6000}{\text{NL}} + 50 \quad (4.15)$$

5.2. Analyse alvéographique

- Farines de Blé tendre
- Détermination pratique de certaines caractéristiques rhéologiques des pâtes au moyen de l'alvéographe
- Objet et domaine

La présente méthode pour objet de détermination, au moyen de l'alvéographe de certaines caractéristiques rhéologiques des pâtes obtenues à partir de blé tendre (*Triticum aestivum*).

- Détermination de la teneur en eau - Méthode pratique (avec ou sans broyage et sans conditionnement).
- Principe

Préparation d'une pâte à teneur en eau constante, à partir de blé tendre salée dans les conditions de la méthode.

Formation des éprouvettes de pâte sous forme de disques; après un temps de repos déterminé et réglage de l'épaisseur de l'éprouvette, extension biaxiale par gonflement sous forme de bulle; enregistrement graphique des variations de pression à l'intérieur de la bulle en fonction du temps.

Appréciation des caractéristiques de la pâte d'après la surface et la forme des diagrammes obtenus.

- Réactifs

Solution de chlorure de sodium

Dissoudre 25 g de chlorure de sodium pur, pour analyse, dans de l'eau distillée et compléter à 1 litre.

Huile de d'arachide raffinée ou huile de vaseline (dite huile paraffine) à l'exclusion de toutes autres.

Note :

Il est conseillé d'utiliser de l'huile de vaseline ayant un indice d'acide inférieur ou égale à 0,05.

• Appareillage

- Alvéographe (avec régulateur de température) possédant les caractéristiques suivantes :
 - Vitesse de rotation du friseur du pétrin $59 \text{ tr/min} \pm 1 \text{ tr/min}$.
 - Hauteur des guides de laminage $12,0 \text{ mm} \pm 0,1$.
 - Diamètre du rouleau de laminage:
 - Grand diamètre : $40,0 \pm 0,1 \text{ mm}$.
 - Petit diamètre : $33,3 \text{ mm} \pm 1,0 \text{ mm}$.
 - Diamètre intérieur de l'emporte-pièce : $46,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$.
 - Diamètre de l'éprouvette avant gonflement : $55,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.
 - Distance théorique entre les platines fixe et mobile après serrage (égale à l'épaisseur de l'éprouvette avant gonflement): $2,67 \text{ mm} \pm 0,01$.
 - Volume du poire caoutchouc de décollement $18 \text{ ml} \pm 2 \text{ ml}$.
 - Temps d'écoulement dans l'allonge entre les repères 0 et 25 : $23,0 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$.
 - Vitesse linéaire du tambour enregistreur $5,5 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$.
 - Burette à robinet, capacité 160 ml, graduée en 0,25 ml, ou burette à robinet graduée directement en pourcentage de la teneur en eau de 11,6 à 17,8 % (précision 0,1 %).
- Balance précise à 0,5 g près.
- Chronomètre.
- Planimètre et/ou abaque planimétrique.

Note :

Avec l'appareil alvéographe le constructeur fournit une burette graduée en pourcentage de la teneur en eau de la farine, un abaque planimétrique et un abaque permettant de mesurer l'indice de gonflement.

• Mode opératoire

• Vérifications préalables

- Vérifier avant chaque essai que les températures respectives du pétrin et de l'alvéographe sont de $24,0^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ et $25,0^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Régler le thermostat suffisamment de temps avant l'utilisation pour que les températures indiquées ci-dessus soient stabilisées. Les vérifier également lorsque l'appareil est en cours d'utilisation.

S'assurer régulièrement de l'étanchéité de l'appareil (absence de fuite hydraulique, absence de fuite d'air).

- Vérifier que le niveau de l'eau dans l'allonge est bien au repère 0.

- S'assurer régulièrement de la vitesse de montée d'eau dans l'allonge H. La durée d'écoulement de l'eau entre les repères 0 et 25 doit être strictement de $23.0\text{ s} \pm 0,5\text{ s}$.

- Dans le cas où l'alvéographe ne dispose pas de l'allonge H (nouveau modèle) se référer à la notice du constructeur pour les contrôles nécessaires.

- Vérifier au chronomètre la durée de rotation du tambour enregistreur qui doit être de 60 s pour un tour sur courant de fréquence 50 Hz (ou 60 Hz pour les appareils récents ayant un moteur de type (soit 55 s de butée à butée)).

Note:

Ceci correspond à une vitesse de déroulement du diagramme de 302,5 mm en 55s.

- Opérations préliminaires

- Préparation de l'échantillon pour essai

Déterminer la teneur en eau de la farine selon la méthode pratique décrite dans la norme NA.1132/19990.

- Porter si nécessaire la température de la farine à $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. L'appareil doit être utilisé dans une pièce dont la température est comprise entre 18°C et 22°C et dont l'humidité relative est voisine de 70%.

- Dans où la burette à robinet graduée directement en pourcentage de la teneur en eau n'est pas disponible, déterminer à l'aide du tableau de l'annexe A, la quantité de solution de chlorure de sodium à utiliser en pétrissage pour préparer la pâte

Ces valeurs ont été calculées pour obtenir une hydratation constante, celle d'une pâte formée à partir de 50 ml de solution de chlorure de sodium et de 100 g de farine ayant une teneur en eau de 15%.

- Pétrissage

- Mettre dans le pétrin 250 g de farine pesés à 0,5 g près. Fixer le couvercle par les deux vis de serrage.

Accoupler le frasseur au réducteur de vitesse. Mettre en route le moteur et le chronomètre. Verser par le trou du couvercle, la quantité déterminée de solution de chlorure de sodium en 20 s environ.

Laisser la pâte se former durant une minute (y compris les 20 s d'écoulement).

- Au bout de cette minute, arrêter le moteur et enlever le couvercle. Réincorporer avec une spatule, la farine et la pâte qui adhèrent au couvercle ou dans les angles, de manière à respecter l'hydratation de la pâte. Effectuer cette opération en 1 minute et remettre le couvercle.

- A la fin la de le deuxième minute, remettre le moteur en marche. Laisser alors le pétrissage se poursuivre durant 6 minutes.

- A la fin de la huitième minute, arrêter le pétrissage et procéder à l'extraction.

- Préparation des éprouvettes

- Inverser le sens de rotation du frasseur. Dégager la fente d'extraction en relevant le registre de fermeture et placer quelques gouttes d'huiles sur la plaque réceptrice préalablement mise en place.

Éliminer les deux premiers centimètres de pâte.

- Lorsque la bande de pâte extraite atteint le niveau des encoches de la plaque, découper la pâte d'une lame à l'endroit du guide.

Faire glisser le morceau de pâte sur la plaque de verre du système de laminage, préalablement huilée.

- Répéter quatre fois l'opération pour obtenir au total cinq pâtons. Arrêter le moteur du pétrin.

- Laminage: laminier les cinq pâtons à l'aide du rouleau d'acier préalablement huilé, que l'on fait glisser sur ses rails douze fois de suite (trois aller-retour rapides suivis de trois allers-retours lents).

D'un mouvement net, découper dans le pâton une éprouvette avec l'emporte-pièce. Eliminer la pâte excédentaire.

Transporter l'emporte-pièce contenant l'éprouvette de pâte en inclinant celui-ci au dessus de la plaque de repos destinés à la recevoir.

Si la pâte adhère aux parois de l'emporte-pièce, la décoller par dessous. Si l'éprouvette est restée sur le verre, la soulever et glisser la plaque en dessous. Placer immédiatement chaque plaque dans l'enceinte isotherme (25° C) de l'alvéographe. Procéder dans l'ordre d'extraction, la première éprouvette étant placé dans le logement supérieur.

- Essai à l'alvéographe des éprouvettes

Pendant la période de repos placer un diagramme sur le tambour enregistreur. Remplir la plume d'encre, tracer la ligne du zéro de pression et faire revenir le tambour en position de départ.

- Commencer les opérations suivantes 28 min après le début de pétrissage.

1^{ère} opération

- Placer la manette A en position 1.
- Relever la platine supérieure B en la desserrant de deux tours.
- Enlever la bague C et le tampon D.
- Huiler la platine fixe E et la face interne du tampon D.
- Faire glisser l'éprouvette de pâte au centre de E.
- Remettre en place D et C.
- Aplatir l'éprouvette en abaissant lentement B (deux tours en 20 s).
- Retirer D pour libérer l'éprouvette.

2^{ème} opération

- Mettre la manette A en position 2.
- Ouvrir le robinet F.
- Aplatir franchement la poire de caoutchouc entre pouce et index et maintenir la pression.

- L'éprouvette doit se décoller de la platine.
- Fermer le robinet F, lâcher la poire.
- Mettre en place le réservoir à eau H sur sa plate-forme J.

3^{ème} opération

- Placer la manette A en position 3 pour obtenir le gonflement de l'éprouvette et la rotation du tambour enregistreur.
- Placer la manette A en position 4 dès la rupture de la membrane de pâte.
- Replacer le réservoir H sur la table de travail.
- Remettre la manette A en position 1 et le tambour enregistreur en position de départ.
- Recommencer l'opération sur les quatre éprouvettes restantes. On obtient cinq courbes ayant la même origine.

• Expression des résultats

Les résultats sont mesurés ou calculés à partir des cinq courbes. Toutefois si l'une d'entre elles s'écarte notablement des quatre autres, en particulier à la suite d'une rupture prématurée de la bulle, il n'en sera pas tenu compte dans l'expression des résultats.

Surpression maximale P

La moyenne des ordonnées maximales mesurée en millimètres et multipliée par 1,1 représente la valeur de la surpression maximale P, qui est en relation avec la résistance de la pâte à la déformation.

Abscisse moyenne à la rupture L

L'abscisse à la rupture de chaque courbe est mesurée en millimètres sur la ligne de zéro, à partir de l'origine des courbes jusqu'au point correspondant verticalement à la chute nette de pression due à la rupture de la bulle. La moyenne des abscisses à la rupture des courbes représente la longueur L.

Indice de gonflement G

C'est la moyenne des indices de gonflement et correspondant aux abscisses de rupture. Cette valeur est la racine carrée du volume d'air, exprimé en millilitres nécessaire pour développer la bulle jusqu'à rupture (compte non tenu du volume d'air nécessaire au décollement de l'éprouvette).

Rapport P/L.

Ce rapport est conventionnelles appelé rapport de configuration de la courbe.

Travail de déformation W

Un diagramme moyen est établi à partir de la moyenne des ordonnées jusqu'à l'abscisse moyenne à la rupture L; il remplace les courbes réelles dans la suite des calculs. La surface du diagramme en centimètre carrés est mesurée au moyen de l'abaque planimétrique ou du planimètre. Le travail de déformation de la pâte nécessaire au gonflement de la bulle jusqu'à sa rupture, rapporté à 1 g de pâte, représenté par le symbole W, et évalué en 10^{-4} J se calcule de la façon suivante:

• Calcul de référence

$$W = 1,32 \times \frac{V}{L} \times S \quad (4.16)$$

Où

V: Est le volume d'air, en millilitres égal au carré de l'indice de gonflement G;

L: Est l'abscisse moyenne à la rupture, en millilitres;

S: Est la surface de la courbe en centimètres carrés.

• Calcul pratique

Dans le cas des farines les plus courantes ayant des indices G compris entre 12 et 26, indices mesurés au moyen de l'abaque, l'utilisation de la formule simplifiée suivante est conseillée:

$$W = 6,54 \times S \quad (4.16)$$

Ce coefficient est valable pour:

a) une durée de rotation du tambour de 55 s de butée à butée.

b) une durée d'écoulement de l'eau dans l'allonge de 23s entre les repères 0 et 25.

➤ Les résultats doivent être considérés comme le résultat d'un test technologique et exprimés de la façon suivante :

P et L à l'unité près (sans fraction décimale des millimètres).

G à 0,5 unité près (par exemple : 23-23,5-24).

W à 5 unités près pour les farines de W inférieur à 200 (par exemple, échelle des valeurs : 150-155-160-165....).

W à 10 unités près pour les farines de W supérieur à 200 (par exemple, échelle des valeurs : 250-260-270-280...).

- Reproductibilité et répétabilité

- Reproductibilité

La reproductibilité des résultats dépend de trois facteurs essentiels:

- L'exactitude de la teneur en eau de la farine, retenue lors de la préparation de la pâte.
- Le respect strict des modalités expérimentales et des contrôles détaillés dans les instructions d'emploi fournies avec l'appareil.
- Le bon état mécanique des différents organes de celui-ci.

A titre indicatif, dans des conditions normales, la reproductibilité peut être estimée à:

W coefficient de variation 8%.

P coefficient de variation 8%..

G coefficient de variation 5%..

- Répétabilité

La Répétabilité peut atteindre dans les cas les meilleures des valeurs notablement inférieures à celle indiquées ci-dessus.

6. test de panification-type pain français

- Intérêt

Le test de panification permet :

- de déterminer la qualité boulangère des variétés de blé pures ou des mélanges.
- de Rechercher une formulation optimisée pour un process de panification.
- contrôler l'aptitude d'une farine commerciale à être panifiée.
- le relevé précis des caractéristiques de la pâte et du pain au cours du test peut servir à adapter la formulation ou le diagramme de fabrication selon la qualité recherchée.

- Principe

Cette méthode correspond aujourd'hui au procédé utilisé pour la fabrication du pain de tradition française.

Dans le but de réduire les causes de variation entre fournils est pour se rapprocher davantage de réalités boulangères, les travaux effectués dans le cadre du BIPEA ont permis de définir une méthodologie commune d'essai pour tester la qualité boulangère des blés et des farines commerciales. Ce travail a été repris dans le cadre de la norme NF V03-716 éditée en 2001.

Le test BIPEA reproduit, à l'échelle du laboratoire, le diagramme de panification pratiqué par l'artisan boulanger.

- Obtention de la pâte par pétrissage intensifié de farine, d'eau, de levure, de sel, d'acide ascorbique et de malt.
- Pointage, première phase de fermentation en cuve (20mn à 27c°).
- Fractionnement, boulage, dédente et façonnage mécanique de pâtons sous forme de bâtard.
- Apprêt, deuxième fermentation sur couche (2h à 27c°).
- Cuisson des pains (25mn à 250c°).

- Expression des résultats

Les caractéristique de la pâte est des pains son appréciée par le Boulanger a toute les étapes de la fabrication et notamment :

- A la fin de pétrissage
- Avant enfournement des pains.
- Après refroidissements des pains.

La notation des observations se fait sur une grille permettent une présentation graphique pour une interprétation plus aisée. (Voir figure 4.9).

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 du défaut se qualifie à trois niveaux :

7= défaut peu intense

4= défaut intense

1= défaut très intense.

Le système de notation par intensité de défaut a l'avantage d'être simple à utiliser par l'opérateur. Le profil qualité obtenu facilite l'interprétation par les non spécialiste en boulangerie. La notation est globalisée en une note totale sur 300 points résultant d'une note de pâte sur 100 points, de pain sur 100 points et d'une note de mie sur 100 points.

• Répétabilité

Les limites de répétabilité et de reproductibilité ont été calculées lors d'un essai interne de laboratoire mené avec dix fournils d'essais et 4 farines sur une gamme de qualité. (Voir tableau 4.3).

Tableau : Les limites de répétabilité et de reproductibilité

Variabes	Limite de répétabilité	Limite de reproductibilité
Taux d'Hydratation (/15%)	1.4	3.5
Note de pâte (/100)	10	18
Note de pain (/100)	17	28
Volume moyen (cm ³)	158	315
Note de mie (/100)	7	10
Note totale (/300)	25	43

• Domaine de validité

- Les résultats sont variables en raison de différences d'appréciations d'un boulanger à l'autre. En effet, d'une part chaque observation est une analyse sensorielle qui impose un entraînement périodique des boulangers d'essai.
- Il ne faut pas s'attacher uniquement à la note totale de panification obtenue à l'issue du test, mais analyser ses différentes composantes.
- Les conditions dans lesquelles se déroule l'essai (température, hygrométrie, matériel) doivent être standardisées au maximum car elles ont une influence sur les résultats.

Déchirement							× 0,5 / 5	
APPRET							total /	/ 10
							= 10	

Collant de la pâte							× 1 /	
							10	
Tenue							× 2 /	
							20	
MISE AU FOUR							total /	× coef (*) / 30
							= 30	=

		total pâte	/ 100
--	--	------------	-------

Volume des pains		total /	/ 30
		= 30	

Section							× 1 /	
							10	

Couleur							× 2 /	
							20	

Épaisseur							× 0,5 / 5	
-----------	--	--	--	--	--	--	-----------	--

Croustillant							× 0,5 / 5	
--------------	--	--	--	--	--	--	-----------	--

Coup Développement :							× 1 /	
							10	

de Régularité :							× 1 /	
							10	

lame Déchirement :							× 1 /	
							10	

ASPECT DU PAIN		total = /	× coef (*) / 70
		70	=

		total pain	/ 100
--	--	------------	-------

Couleur							× 1 /	
---------	--	--	--	--	--	--	-------	--

6. Méthode de mesure du volume du pain

Pour déterminer le volume du pain, une caissette de forme et de capacité convenables, sans couvercle, à bords nets affleurant au même niveau, est remplie par simple écoulement, sans taper, de graines petites et rondes (millet de préférence, et, à défaut, de céréales, lin, colza, etc.).

Le contenu de la caissette, après arasement à l'aide d'une règle plate, est vidé, sans perte, dans un récipient quelconque. La caissette est à nouveau rempli en y plaçant successivement : un lit de graines récupérées, le pain, puis les graines nécessaires pour qu'elles affleurent jusqu'aux bords.

Le volume des graines restant inutilisées dans le récipient est mesuré, à 5 centimètres cubes près, dans une éprouvette graduée.

L'essai est répété plusieurs fois sur des pains pris au hasard et on retient pour volume la moyenne des résultats obtenus dont les écarts entre eux ne diffèrent pas de plus de 20 centimètres cubes.

Le tableau n°1 grille de notation du test de panification farine 100% Blé tendre

Interprétations	insuffisance				excès			principe de calcul			
observations et notes	1	4	7	10	7	4	1	des notes			
Lissage				x				× 0,5	5		
Collant de la pâte				x				× 0,5	5		
Consistance											
Extensibilité				x				× 0,5	5		
Élasticité				x				× 0,5	5		
Relâchement				x				× 0,5	5		
PETRISSAGE								total=	25	× coef (1) =	25/ 25
Détente : relâchement				x				× 1			
POINTAGE								total=	10		
Allongement				x				× 0,5	5		
Déchirement				x				× 0,5	5		
Élasticité				x				× 0,5	5		
Collant de la pâte				x				× 1	10		
FACONNAGE								total=	25		× coef (1) =
Activité fermentative				x				× 0,5	5		
Déchirement				x				× 0,5	5		
APPRET								total=	10		
Collant de la pâte				x				× 1	10		
Tenue				x				× 2	20		
MISE AU FOUR								total=	30		× coef (1) =
								total pâte			100 / 100
Volume des pains								total=	600 cm ³		25/ 30
Section				x				× 1	10		
Couleur				x				× 2	20		
Épaisseur				x				× 0,5	5		
Croustillant				x				× 0,5	5		
Cp lame: Développement				x				× 1	10		
Régularité				x				× 1	10		
Déchirement				x				× 1	10		
ASPECT DU PAIN								total =	70		× coef (1) =
								total pain			95/ 100
Couleur				x				× 1	10		
Texture : souplesse				x				× 1	10		
Élasticité				x				× 1	10		
Collant				x				× 1	10		
Alvéolage : régularité				x				× 1	10		
Épaisseur				x				× 1	10		
Flaveur				x				× 4	40		
ASPECT MIE								total mie			100/ 100
								Valeur boulangère		295 / 300	

Le tableau n°2 grille de notation du test de panification farine Blé tendre 90%,
orge0%, maïs 10%

Interprétations	insuffisance				excès			principe de calcul	
observations et notes	1	4	7	10	7	4	1	des notes	

Lissage			x					× 0,5	3,5		
Collant de la pâte				x				× 0,5	5		
Consistance											
Extensibilité				x				× 0,5	5		
Élasticité				x				× 0,5	5		
Relâchement				x				× 0,5	5		
PETRISSAGE								total=	25	× coef (1) =	23.5/ 25

Détente : relâchement				x				× 1			
POINTAGE								total=	10		10/ 10

Allongement				x				× 0,5	5		
Déchirement				x				× 0,5	5		
Élasticité				x				× 0,5	5		
Collant de la pâte				x				× 1	10		
FACONNAGE								total=	25	× coef (1) =	25/ 25

Activité fermentative				x				× 0,5	5		
Déchirement				x				× 0,5	5		
APPRET								total=	10		10/ 10

Collant de la pâte				x				× 1	10		
Tenue				x				× 2	20		
MISE AU FOUR								total=	30	× coef (1) =	30/ 30
									total pâte	98,50 / 100	

Volume des pains								total=	545 cm ³		23/ 30
Section				x				× 1	10		
Couleur				x				× 2	20		
Épaisseur			x					× 0,5	3,5		
Croustillant			x					× 0,5	3.5		
Cp de lame : Développement				x				× 1	10		
Régularité				x				× 1	10		
Déchirement				x				× 1	10		
ASPECT DU PAIN								total =	67	× coef (1) =	67.70/ 70
									total pain	90.70/ 100	

Couleur				x				× 1	10	
Texture : souplesse				x				× 1	10	
Élasticité				x				× 1	10	
Collant				x				× 1	10	
Alvéolage : régularité			x					× 1	7	
Épaisseur			x					× 1	7	
Flaveur				x				× 4	40	
ASPECT MIE								total mie		94/ 100
									Valeur boulangère	283.20 / 300

Le tableau n°3 grille de notation du test de panification Blé tendre 85%, orge 5%,
maïs 10%

Interprétations	insuffisance				excès			principe de calcul	
observations et notes	1	4	7	10	7	4	1	des notes	

Lissage			x					× 0,5	3,5		
Collant de la pâte				x				× 0,5	5		
Consistance											
Extensibilité				X				× 0,5	5		
Élasticité				X				× 0,5	5		
Relâchement				x				× 0,5	5		
PETRISSAGE								total=	23,5	× coef (1) =	23,5/ 25

Détente : relâchement				x				× 1			
POINTAGE								total=	10		

Allongement				x				× 0,5	5		
Déchirement				x				× 0,5	5		
Élasticité				x				× 0,5	5		
Collant de la pâte				x				× 1	10		
FACONNAGE								total=	25		× coef (1) =

Activité fermentative			x					× 0,5	3.5		
Déchirement				x				× 0,5	5		
APPRET								total=	8.5		

Collant de la pâte				x				× 1	10		
Tenue				x				× 2	20		
MISE AU FOUR								total=	30		× coef (1) =
									total pâte		97/ 100

Volume des pains								total=	510cm ³		22/ 30
Section				x				× 1	10		
Couleur			x					× 2	14		
Épaisseur			x					× 0,5	3.5		
Croustillant				x				× 0,5	5		
Cp lame : Développement				x				× 1	10		
Régularité				x				× 1	10		
Déchirement				x				× 1	10		
ASPECT DU PAIN								total =	62.5		× coef (1) =
									total pain		84.5/ 100

Couleur			x					× 1	7	
Texture : souplesse				x				× 1	10	
Élasticité				x				× 1	10	
Collant				x				× 1	10	
Alvéolage : régularité			x					× 1	7	
Épaisseur			X					× 1	7	
Flaveur				x				× 4	40	
ASPECT MIE								total mie		
									Valeur boulangère	272,5/ 300

Le tableau n°4 grille de notation du test de panification Blé tendre 85%, orge 10%, maïs 5%

Interprétations	insuffisance				excès			principe de calcul	
observations et notes	1	4	7	10	7	4	1	des notes	

Lissage			x					× 0,5	3.5		
Collant de la pâte			X					× 0,5	3.5		
Consistance											
Extensibilité			X					× 0,5	3.5		
Élasticité			X					× 0,5	3.5		
Relâchement				X				× 0,5	5		
PETRISSAGE								total=	19	× coef (0.75) =	14.25/ 25

Détente : relâchement				X				× 1		
POINTAGE								total=	10	

Allongement				X				× 0,5	5		
Déchirement				X				× 0,5	5		
Élasticité			x					× 0,5	3.5		
Collant de la pâte			x					× 1	7		
FACONNAGE								total=	20.5		× coef (0.75) =

Activité fermentative			x					× 0,5	3.5	
Déchirement				x				× 0,5	5	
APPRET								total=	8.5	

Collant de la pâte			X					× 1	7		
Tenue			x					× 2	14		
MISE AU FOUR								total=	21		× coef (0.5) =
									total pâte	63,87/ 100	

Volume des pains								total=	500 cm ³	22/ 30	
Section				x				× 1	10		
Couleur			x					× 2	14		
Épaisseur			x					× 0,5	3.5		
Croustillant				x				× 0,5	5		
Cp lame : Développement				X				× 1	7		
Régularité				X				× 1	10		
Déchirement				x				× 1	10		
ASPECT DU PAIN								total =	59,5	× coef (0,75)	44,63/ 70
									=		
									total pain	66,62/ 100	

Couleur			X					× 1	4	
Texture : souple				X				× 1	7	
Élasticité				X				× 1	7	
Collant				X				× 1	7	
Alvéolage : régularité			X					× 1	4	
Épaisseur			X					× 1	7	
Flaveur				x				× 4	16	
ASPECT MIE								total mie	91/ 100	
									Valeur boulangère	221,49 / 300

Le tableau n° 5 grille de notation du test de panification Blé tendre 90%, orge 10%, maïs 0%

Interprétations	insuffisance				excès			principe de calcul	
observations et notes	1	4	7	10	7	4	1	des notes	

Lissage			X					× 0,5	3,5		
Collant de la pâte			X					× 0,5	3,5		
Consistance											
Extensibilité				X				× 0,5	5		
Élasticité				x				× 0,5	5		
Relâchement				x				× 0,5	5		
PETRISSAGE								total=	22	× coef (0.75) =	16,5/ 25

Détente : relâchement				x				× 1			
POINTAGE								total=	10		10/ 10

Allongement				x				× 0,5	5		
Déchirement				x				× 0,5	5		
Élasticité				X				× 0,5	5		
Collant de la pâte			x					× 1	7		
FACONNAGE								total=	22	× coef (0.75) =	16,5/ 25

Activité fermentative			x					× 0,5	3.5	
Déchirement				x				× 0,5	5	
APPRET								total=	8.5	

Collant de la pâte			x					× 1	7		
Tenue				X				× 2	20		
MISE AU FOUR								total=	27	× coef (0.75) =	20,25/ 30
									total pâte	71,75 / 100	

Volume des pains								total=	520 cm ³	22/ 30	
Section			x					× 1	7		
Couleur			X					× 2	14		
Épaisseur			X					× 0,5	3.5		
Croustillant				X				× 0,5	5		
Cp de lame				X				× 1	10		
Développement											
Régularité				X				× 1	10		
l: Déchirement				x				× 1	10		
ASPECT DU PAIN								total =	59.5	× coef (1) =	59,5/ 70
									total pain	81,5/ 100	

Couleur			X					× 1	7	
Texture : souple				X				× 1	10	
Élasticité				X				× 1	10	
Collant				X				× 1	10	
Alvéolage : régularité			X					× 1	7	
Épaisseur			X					× 1	7	
Flaveur				x				× 4	40	
ASPECT MIE								total mie		91/ 100
									Valeur boulangère	244,25 / 300

Société MOLITELL SPA

Prix minimum d'importation de blé tendre = (200 € ou 3000 DA/QL).

Tableau 1 : Structure de prix de revient de la farine de blé (capacité initiale de production = 2000QX/ jour, taux d'extraction = 75%).

RUBRIQUE	FARINE
Trituration blé	132 000 000
matières et fourniture	450 000
Cout matière et fourniture	132 450 000
services	16 400
Frais du personnel (76 agents)	2 573 000
Impôts et taxes	601 500
Frais financier	2500
Frais divers	12500
amortissement	0
Cout de transformation	3 193 400
Cout brut de production	135 643 400
Issues à déduire	18 937 600
Cout brut de production	116 705 800
Prix de revient globale	116 705 800
Production (QX)	35 486
Prix de revient d'un quintal en vrac	3288
Cout de conditionnement	10
Cout de revient d'un quintal conditionné	3298

NB : le prix de farine est subventionné par l'état, le prix de vente boulanger est de 2000 DA/ QL.

Donnés OAIC relatives à la production nationale d'orge.

Cout de production = 70 000 DA/HA.

Rendement =35QX/HA.

Cout de production = 2000 DA/QX.

Tableau 2: Calcul prévisionnel de la structure de prix de revient d'un quintal de farine d'orge (capacité initiale de production = 500QX/ jour, taux d'extraction = 61%).

RUBRIQUE	FARINE
Trituration orge	22 000 000
matières et fourniture	112 500
Cout matière et fourniture	22 112 500
services	4100
Frais du personnel (19 agents)	643 250
Impôts et taxes	150 375
Frais financier	625
Frais divers	3125
amortissement	0
Cout de transformation	801 475
Cout brut de production	22 913 975
Issues à déduire	7 042 464
Cout brut de production	15 871 511
Prix de revient globale	15 871 511
Production (QX)	6911
Prix de revient d'un quintal en vrac	2296
Cout de conditionnement	10
Cout de revient d'un quintal conditionné	2306

Données relatives à la production nationale de maïs.

Cout de production = 187 500 DA/HA.

Rendement =91QX/HA.

Cout de production = 1995 DA/QX.

Tableau 3 : Calcul prévisionnel de la structure de prix de revient d'un quintal de farine de maïs (capacité initiale de production = 500QX/ jour, taux d'extraction= 70%).

RUBRIQUE	FARINE
Trituration maïs	21 945 000
matières et fourniture	112 500
Cout matière et fourniture	22 057 500
services	4100
Frais du personnel (19 agents)	643 250
Impôts et taxes	150 375
Frais financier	625
Frais divers	3125
amortissement	0
Cout de transformation	801 475
Cout brut de production	22 858 975
Issues à déduire	5 417 280
Cout brut de production	17 441 695
Prix de revient globale	17 441 695
Production (QX)	7900
Prix de revient d'un quintal en vrac	2207
Cout de conditionnement	10
Cout de revient d'un quintal conditionné	2217

Compte tenu des éléments détaillés plus haut, par exemple une baisse de 3,3 % du prix de revient de la farine panifiable est relevée suite à l'incorporation de 0.4% de farine d'orge et 9.96% de farine de maïs.