

INSTITUT DE LA NUTRITION, DE L'ALIMENTATION ET
DES TECHNOLOGIES AGROALIMENTAIRES

I.N.A.T.A-A.

Département de Technologie Alimentaire

N° d'ordre:

N° de série:

Mémoire présenté en vue de l'obtention,
du diplôme de Magister en Sciences Alimentaires,
Option: Technologies Alimentaires

Thème:

**Aptitudes technologiques et culinaires de pâtes
alimentaires enrichies au germe de blé**

Par : **DIB Ahlem**

Soutenu le 27 / 06/ 2013

Devant le Jury :

| | | | |
|---------------------|--------------|------------|------------------------------------|
| Présidente : | L. AMOURACHE | MC/A | (I.N.A.T.A-A.- Univ. Constantine1) |
| Encadreur : | M.N. ZIDOUNE | Professeur | (I.N.A.T.A-A.- Univ. Constantine1) |
| Examineurs : | R. MERGHEM | Professeur | (Fac.S.N.V. Univ. Constantine1) |
| | H. OULAMARA | MC/A | (I.N.A.T.A-A.- Univ. Constantine1) |

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu le tout puissant, miséricordieux et clément, pour nous avoir donné santé, patience, volonté et courage.

Sincères remerciements,

A mon enseignant et Directeur de thèse, Monsieur ZIDOUNE Mohammed Nassereddine, Professeur à l'université de Constantine et Chef de l'équipe Transformation et Elaboration des Produits Agro-alimentaires (T.E.P.A). du laboratoire de Recherche en Nutrition et Technologie Alimentaire (I.N.T.A.A.) qui non seulement a contribué à ma formation scientifique, à l'instar des autres enseignants en technologie agro-alimentaire, aussi de m'avoir initié la recherche scientifique avec beaucoup de patience, pour m'avoir prodigué de précieux conseils tout au long de ce travail, mais de plus m'a fait le grand honneur en acceptant de m'encadrer pour cette étude Qu'il trouve ici l'expression de ma très profonde gratitude, de ma sincères remerciements et de notre estime pour toujours.

A Madame BENATALLAH Leïla, Maître de conférences à l'I.N.A.T.A.A. en qualité de co-promotrice, de m'avoir aussi initiée et conseillée pour la concrétisation pratique de ce travail. Son savoir, son expérience et son art de dégager les faits essentiels m'ont été d'un inestimable secours et d'un exemple que je garde constamment à l'esprit. Nul doute que je ne peux lui exprimer en quelques mots ni ma profonde reconnaissance, ni mon attachement. Qu'elle soit assurée de ma profonde reconnaissance.

Hommage respectueux

*A notre maître et présidente du jury, Docteur L. AMOURACHE
Maître de conférences à l' I.N.A.T.A.A, Université Mentouri
Constantine pour l' honneur qu'elle m'a fait en acceptant la
présidence de jury de ce travail.*

Sincères remerciements,

*A Madame Docteur H.OULAMARA, Maître de conférences à
l' I.N.A.T.A.A, Université Mentouri Constantine pour avoir accepté
d'évaluer mon travail et de m'honorer par sa participation au jury de
ce mémoire.*

Vifs remerciements

*A Monsieur R. MERGHEM, Professeur au département de Biochimie
et de Microbiologie à l'université de Constantine, pour son acceptation
de jurer mon travail et de me faire l'honneur de siéger au sein du jury
de ce mémoire.*

*Je me montrerais très reconnaissant à l'égard du Docteur
BOUKERROU Abderrahmane, Docteur Spécialiste et Directeur du
laboratoire L.V.R. de Constantine, j'ai trouvé une ambiance amicale et
enthousiaste qui me fut d'un précieux appui ; pour son aide matériel et
moral et surtout efficacité et encouragement qu'il a bien voulu
m'apporter tout au long de ces recherches. Qu'il soit assuré de ma très
profonde gratitude, je lui adresse mes vifs remerciements.*

*J'exprime ma gratitude à tous les membres du corps enseignants et
magisters de l'année 2009 (Option technologie alimentaire) de
l'I.N.T.A.A. en particulier Mme HIMED Luiza, Melle GHOUASSE*

Souheila, Mr BOUASLA Abdallah, Mr BENSALÈME Adel, Mr CHEMACHE Loucif, Mr MAZROUA Lyamine, Mr CHIKHOUNE Anis, Mme BENSALÈME Ghada, Melle LAIB Iman, Mme BRAHIMI Fatima, Mme KADRI Fouzia, Melle BOUZZA Samira, Mme GHÉRAÏRIA Nessrine, pour leurs dévouements lors de notre formation et leurs conseils et suggestions. Chaleureux remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire et à tous les amies, collègues, magisters, ainsi que les personnels administratifs et techniques de l'I.N.A.T.A-A. pour leurs encouragements et leur amitié. Je ne saurais oublier le dévouement dont ont fait preuve les membres du panel de dégustation (Hayette, Rima, Farida, Hadjer, Asma, Souad, Abdallah) pour leur précieuse contribution. Je leurs exprime mes vifs et sincères remerciements.

Des remerciements très particuliers sont présentés à Mme BELLAL Karima, Mme BOUKERROU Hafida, Melle BENDJAZIA Leila, Mme BENGÉUSMIA Wafa et Melle ATROUS Rbiha pour leurs soutiens et encouragements depuis mon arrivée à l'laboratoire LVRC.

Je dédie cette thèse :

Amon très cher père :

Pour m'avoir soutenu moralement et matériellement jusqu'à ce jour, pour leur amour, leur encouragement. Que ce travail soit pour vous un faible témoignage de ma profonde affection et tendresse. Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et te protège de tout mal.

A ma très chère mère :

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

A mon très chère frère Mohammed Cherif (Bahí), mes sœurs Imen et Djihane, ma grande mère Meriem pour toute l'ambiance, amours dont ils m'ont entouré, pour toutes leurs spontanéités et leurs élans, pour leurs patiences, pour leurs aides précieux, pour leurs encouragements durant toutes les phases de mes études. Dieu leurs garde et leurs montre le droit chemin.

Sommaire

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Liste des Abréviations

INTRODUCTION..... 1

Etude bibliographique

| | |
|--|-----------|
| 1. Grain de blé | 3 |
| 1.1. Définition | 3 |
| 1.2. Composition histologique | 3 |
| 1.3. Composition chimique et valeur nutritionnelle | 4 |
| 2. Germe de blé | 5 |
| 2.1. Description | 5 |
| 2.2. Composition chimique et valeur nutritionnelle | 6 |
| 2.3. Récupération du germe de blé | 9 |
| 2.4. Différentes formes d'utilisation de germe de blé | 10 |
| 2.5. Méthodes de préparation et de traitement de germe de blé | 12 |
| 3. Pâtes alimentaires | 13 |
| 3.1. Définition | 13 |
| 3.2. Classification | 14 |
| 3.3. Constituants de la pâte | 14 |
| 3.4. Rôle des constituants de la semoule en pastification | 15 |
| 3.4.1. Rôle des protéines | 15 |
| 3.4.2. Rôle des glucides et polyosides | 16 |
| 3.4.3. Rôle des lipides | 17 |
| 3.5. Processus de fabrication des pâtes alimentaires | 18 |
| 3.5.1. L'hydratation et le malaxage | 18 |
| 3.5.2. Formage | 18 |
| 3.5.3. Séchage | 19 |
| 3.6. Structuration des constituants des pâtes au cours de procédé de fabrication | 20 |
| 3.6.1. Phase d'hydratation et de malaxage | 20 |
| 3.6.2. Phase façonnage | 20 |
| 3.6.3. Phase de séchage | 22 |

| | |
|---|----|
| 3.7. Cuisson des pâtes alimentaires | 23 |
| 3.8. Pâtes enrichies | 25 |

Etude expérimentale

| | |
|--|-----------|
| 1. Matériels et méthodes | 27 |
| 1.1. Matières premières | 27 |
| 1.1.1. La semoule de blé dur | 27 |
| 1.1.2. Le germe de blé | 27 |
| 1.1.3. L'eau de fabrication | 27 |
| 1.1.4. Le sel | 27 |
| 1.2. La préparation du germe de blé | 27 |
| 1.2.1. L'épuration | 29 |
| 1.2.2. Le traitement thermique | 29 |
| 1.2.3. Le broyage | 30 |
| 1.2.4. Estimation du rendement | 30 |
| 1.3. Caractérisation physico-chimiques des matières premières | 31 |
| 1.3.1. Détermination de la composition globale des matières premières | 31 |
| 1.3.2. Granulométrie | 35 |
| 1.4. Formule de l'étude | 35 |
| 1.5. Plan d'expériences | 35 |
| 1.5.1. Modèle mathématique | 36 |
| 1.5.2. Niveaux des variables | 36 |
| 1.5.3. Détermination des variables réelles | 37 |
| 1.6. Essai de pastification | 39 |
| 1.6.1. Matériels utilisés dans la fabrication des pâtes | 40 |
| 1.6.2. Les étapes du diagramme de fabrication | 40 |
| 1.7. Appréciation de la qualité des pâtes | 43 |
| 1.7.1. Qualité culinaire | 43 |
| 1.7.2. Couleur des pâtes | 45 |
| 1.7.3. Détermination de l'acidité de l'eau de cuisson des pâtes cuites | 46 |
| 1.7.4. Analyse sensorielle | 47 |
| 1.8. Analyse statistique | 52 |

| | |
|--|------------|
| 2. Résultats et discussion | 53 |
| 2.1. Caractéristiques physico-chimiques des matières premières | 53 |
| 2.1.1. Détermination de la composition globale des matières premières | 53 |
| 2.1.2. Répartition granulométrique et rendement | 56 |
| 2.2. Essai de pastification | 58 |
| 2.2.1. Détermination du taux optimum d'hydratation..... | 58 |
| 2.2.2. Description du comportement des pâtes..... | 59 |
| 2.2.3. Description visuelle des pâtes sèches des 13 points du plan d'expérience... | 60 |
| 2.3. Détermination du temps de cuisson des pâtes fabriquées | 63 |
| 2.4. Exploitation des surfaces de réponses | 64 |
| 2.4.1. Surface de réponse du degré de délitescence des pâtes | 65 |
| 2.4.2. Surface de réponse des indices de couleur des pâtes | 67 |
| 2.5. Optimisation | 73 |
| 2.5.1. Validation des résultats de l'optimisation | 77 |
| 2.5.1.1. Test de pastification des points de vérification | 78 |
| 2.5.1.2. Qualité culinaires des points de vérification | 78 |
| 2.5.1.3. Imagerie des pâtes | 87 |
| 2.5.1.4. Acidité des points de vérification | 90 |
| 2.5.1.5. Analyse sensorielle | 92 |
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES | 98 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 100 |
| ANNEXES | |
| RESUMES | |

LISTE DES TABLEAUX

Etude bibliographique

| | |
|---|-----------|
| Tableau 1. Composition chimique du germe de blé (en g pour 100 g de matière digestible).. | 6 |
| Tableau 2. Composition en acides gras du germe (g pour 100 g de matière sèche)..... | 7 |
| Tableau 3. Proportion des vitamines en mg pour 100 g de germe de blé brut..... | 8 |
| Tableau 4. Eléments minéraux du germe (mg pour 100 g de germe) | 8 |
| Tableau 5. Activité lipolytique des différentes parties du grain de blé | 8 |
| Tableau 6. Activité lipoxygénasique du blé | 9 |
| Tableau 7. Effet de teneur en protéines sur les qualités des pâtes à base de blé dur | 16 |

Etude expérimentale

1. Matériel et méthodes

| | |
|---|-----------|
| Tableau 8. Traitements thermiques testés sur le germe de blé | 29 |
| Tableau 9. Matrice d'expérience du plan composite orthogonal centré à deux variables | 37 |
| Tableau 10. Valeurs calculées du variable codée correspondant aux niveaux attribués..... | 37 |
| Tableau 11. Essais préliminaires pour le choix des taux d'hydratations | 38 |
| Tableau 12. Valeurs réelles des couples germe de blé-hydratations utilisés pour la réalisation du plan d'expérience..... | 39 |
| Tableau 13. Six Ordres possibles pour servir les échantillons dans un test triangulaire..... | 49 |

2. Résultats et discussion

| | |
|---|-----------|
| Tableau 14. Composition globale en g pour 100 g de masse sèche..... | 53 |
| Tableau 15. Rendement de germe de blé épuré en g pour 100 g de germe de blé brut | 56 |
| Tableau 16. Granulométrie des semoules utilisées dans la fabrication des pâtes alimentaires en pourcentage massique..... | 57 |
| Tableau 17. Appréciation visuelle des pâtes sèches fabriquées en fonction des 13 points du plan d'expérience (cas de germe de blé traité à 90°C)..... | 61 |
| Tableau 18. Appréciation visuelle des pâtes sèches fabriquées en fonction des 13 points du plan d'expérience (cas de germe de blé traité à 121°C)..... | 61 |
| Tableau 19. Temps optimal de cuisson des 13 essais réalisés avec incorporation du germe de blé traité à 90°C et à 121 °C..... | 64 |
| Tableau 20. Données de littératures de degré de délitescence et les indices de couleurs... | 73 |

| | |
|---|-----------|
| Tableau 21. Couples Germe de blé-Hydratations représentatifs des domaines optima et hors domaines optima après optimisation..... | 78 |
| Tableau 22. Description visuelle des pâtes témoins sèches de blé dur fabriquées et pâtes du commerce..... | 87 |
| Tableau 23. Description visuelle des pâtes optima enrichies par le germe de blé et pâtes témoins de blé dur fabriquées (types laminées et coudées) | 89 |

LISTE DES FIGURES

Etude bibliographique

| | |
|--|-----------|
| Figure 1. Composition histologique du grain de blé | 4 |
| Figure 2. Microscopie à balayage électronique de semoule, pâtes extrudées fraîches et surface des spaghettis secs | 22 |

Etude expérimentale

1. Matériel et méthodes

| | |
|--|-----------|
| Figure 3. Diagramme adopté pour la préparation de germe de blé | 28 |
| Figure 4. Diagramme adopté pour la fabrication des pâtes alimentaires | 42 |
| Figure 5. Bulletin du test triangulaire | 48 |
| Figure 6. Bulletin du test de classement par rang | 50 |
| Figure 7. Bulletin pour le test hédonique des pâtes sèches avec un barème de notation allant de 1 à 9 | 51 |
| Figure 8. Bulletin pour le test hédonique des pâtes cuites avec un barème de notation allant de 1 à 9 | 51 |

2. Résultats et discussion

| | |
|---|-----------|
| Figure 9. Illustration du test de la ligne blanche utilisé pour la détermination du temps de Optimal de cuisson | 63 |
| Figure 10. Surface de réponse du degré de délitescence (DD) % des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 90 °C- Hydratations) | 65 |
| Figure 11. Surface de réponse du degré de délitescence (DD) % des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 121 °C- Hydratations) | 66 |
| Figure 12. Surface de réponse de l'indice de rouge (a^*) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 90 °C- Hydratations) | 67 |
| Figure 13. Surface de réponse de l'indice de rouge (a^*) des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 121 °C- Hydratations) | 68 |
| Figure 14. Surface de réponse de l'indice de jaune (b^*) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 90°C - Hydratations) | 69 |
| Figure 15. Surface de réponse de l'indice de jaune (b^*) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 121°C - Hydratations) | 70 |
| Figure 16. Surface de réponse de l'indice de brun (100-L*) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 90°C - Hydratations) | 71 |

| | |
|--|-----------|
| Figure 17. Surface de réponse de l'indice de brun (100-L*) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 121°C - Hydratations) | 72 |
| Figure 18. Courbes de niveaux des pâtes de la formule semoule additionnées du germe de blé traité à 90°C coupées au même niveau que le témoin de blé dur | 74 |
| Figure 19. Courbes de niveaux des pâtes de la formule semoule additionnées du germe de blé traité à 121°C coupées au même niveau que le témoin de blé dur | 75 |
| Figure 20. Délimitation du domaine optimum Germe de blé traité à 90 °C- Eau des pâtes de la formule semoule incorporée du germe de blé | 76 |
| Figure 21. Délimitation du domaine optimum Germe de blé traité à 121 °C- Eau des pâtes de la formule semoule incorporée du germe de blé | 77 |
| Figure 22. Temps Optimal de Cuisson (TOC) des pâtes optimales additionnées de germe de blé et pâtes témoins à base de semoule de blé dur | 79 |
| Figure 23. Temps de surcuisson (TOC + 6 min) des pâtes optimales additionnées de germe de blé et pâtes témoins à base de semoule de blé dur | 79 |
| Figure 24. Degré de délitescence à temps optimum de cuisson des pâtes optimales et des pâtes témoins de semoule de blé dur fabriquées | 81 |
| Figure 25. Degré de délitescence à temps de surcuisson des pâtes optimales et des pâtes témoins de semoule de blé dur fabriquées | 81 |
| Figure 26. Indice de gonflement (% ms) à Temps Optimum de Cuisson (TOC) des pâtes optimales et des pâtes témoins de semoule de blé dur fabriquées | 84 |
| Figure 27. Indice de gonflement (% ms) à temps de surcuisson des pâtes optimales et des pâtes témoins de semoule de blé dur fabriquées | 84 |
| Figure 28. Imagerie des pâtes témoins sèches de blé dur fabriquées (type laminées) et pâtes du commerce | 87 |
| Figure 29. Imagerie des pâtes optimales enrichies par le germe de blé traité à 90°C, 121°C et celles témoins sans germe (types laminées et coudées) | 88 |
| Figure 30. Imagerie des pâtes optimales enrichies par le germe de blé traité à 90 °C, 121 °C et celles témoins sans germe (types laminées cuites) | 90 |
| Figure 31. Cinétique de l'acidité de l'eau à temps de surcuisson des pâtes optimales (germe-hydratations) et des pâtes témoins fabriqués (LA % : En p. cent d'acide lactique | 91 |
| Figure 32. Profil sensoriel des pâtes sèches étudiées | 94 |
| Figure 33. Profil sensoriel des pâtes cuites étudiées | 96 |

Liste des Abréviations

MBCL : Microscopie Confocale à balayage Laser

ms : Matière sèche

LDL: Low densité lipoprotéine

SG-HPM: Sous Unité Gluténique de Haut Poids Moléculaire

SG-FPM: Sous Unité Gluténique de Faible Poids Moléculaire

SDS: Sodium dodecyl sulfate

HPLC: High performance liquid chromatography

THT: Très hautes températures

FT: Faibles températures

HT: Hautes températures

FS: Formule semoule

FSG : Formule semoule enrichies au germe de blé

K: Coefficient de conversion

MSR : Méthodologie de surface de réponse

N : Teneur en azote totale

P : Teneur en protéine

ANOVA : Analyse de la variance

C : Taux de cendres totales

FAO : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GT : Teneur en glucides totaux

TOC: Temps optimal de cuisson

DD: Degré de délitescence

IG: Indice de gonflement

LA: Acide lactique

POGT 90°C : Pâte optimale enrichie par le germe de blé traité à 90°C.

A, B, C : Couples (Germe de blé traité à 90 °C –Eau) à l'intérieur du domaine optimum

POGT 121°C : Pâte optimale enrichie par le germe de blé traité à 121°C.

A' : Couple (Germe de blé traité à 121°C –Eau) à l'intérieur du domaine optimum

T : Pâte témoin fabriquée à base de semoule sans addition de germe de blé.

INTRODUCTION

L'alimentation des pays méditerranéens est un modèle pour la santé. En effet, selon des études épidémiologiques, elle participerait à la prévention de diverses maladies telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète de type 2, le cancer et l'obésité (JONES, 2006; HEMERY *et al.*, 2007). Parmi les aliments que composent le régime méditerranéen on note les céréales représentées par les blés et aussi des légumineuses (PETITOT *et al.*, 2009a).

Aujourd'hui, face à la forte demande mondiale en céréales consécutive à l'augmentation de la population et à la régression des productions suite au changement climatique et aux sécheresses sévères, il s'avère que de nombreux spécialistes dans la nutrition humaine s'intéressent de plus en plus à la diversification et à l'emploi combiné de produits et même de sous-produits dans les nouvelles formulations alimentaires, sans pour autant changer leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques voir parfois les enrichir (BRENNAN *et al.*, 2003 ; CHILLO *et al.*, 2008b). Il ya donc lieu de considérer désormais que les aliments ne doivent plus être regardés comme une simple source de nutriments mais comme un assemblage de macromolécules au sein d'une matrice alimentaire complexe en raison de l'importance que représentent leurs structures ainsi que leurs compositions en macronutriments et micronutriments qui régissent les propriétés nutritionnelles (PETITOT *et al.*, 2010).

Ainsi, l'incorporation ou l'ajout d'ingrédients et de sous produits (germe de blé, farine de légumineuse ou de soja) dans un aliment facile à préparer et économiquement plus rentable touche aujourd'hui une grande partie de la population dont les raisons de leurs utilisations relèvent de nombreux facteurs qui sont à la fois d'ordre culinaire, économique et de santé (ZHAO *et al.*, 2005 ; DURANTI, 2006 ; WOOD, 2009 ; HOWARD *et al.*, 2011).

Le germe de blé représente une source précieuse qui n'a jamais été utilisée de façon rationnelle et efficace. Sa valeur nutritionnelle et thérapeutique excellente le rendent un sous produit idéal et un supplément alimentaire d'enrichissement important dans différents produits. Il est considéré comme l'une des sources potentielles de protéines d'excellente valeur nutritionnelle semblable à celle des protéines animales dont le coût est relativement moindre (FATMA *et al.*, 2010). Il est riche en tocophérols (BILGIÇLI *et al.*, 2006 ; SRIVASTAVA *et al.*, 2007 ; KUMAR *et al.*, 2011), en vitamines du groupe B et en huile contenant une grande proportion d'acides gras insaturés (ZACCHI *et al.*, 2006).

Le germe de blé est commercialisé sous divers formes : farines composées, pâtes au germe de blé, pain au germe de blé (PINARLI *et al.*, 2004 ; FATMA *et al.*, 2010;

MEGAHED, 2011). Les composants bioactifs qu'il renferme permettent de l'utiliser aussi dans d'autres domaines que celui de l'agro-alimentaire (UMAIR URSHAD *et al.*, 2008; PIRAS *et al.*, 2009). Ainsi, plusieurs travaux réalisés à l'I.N.A.T.A.A de MERROUCHE, 2008 ; SENOUSSE, 2009 ; ZITARI, 2010 ; LEMOUCHI et OUGHIDINI, 2011 ; DJAMAA et NASRI, 2011 ont pu corroborer la possibilité de l'utilisation et la valorisation du germe de blé dans la fabrication des pâtes alimentaires à base de semoule de blé dur.

Aujourd'hui, il est admis que l'Algérie, de par ses coutumes culinaires, demeure un pays grand consommateur de blé dur pour la confection et la fabrication de coucous, galette, pâtes diversifiées. Les nombreuses meuneries implantées à travers l'ensemble du pays emploient et transforment annuellement de grosses quantités de blé dur et dégagent en conséquence entre 30 et 35 p. 100 sous forme de déchets appelés communément issues de meunerie (sons gros -et-fins) y compris une part en germe de blé (source ERIAD, 1987). En général, ces sous-produits de meunerie sont utilisés exclusivement dans l'alimentation du bétail. La séparation à l'avenir du germe de blé et son utilisation dans l'enrichissement des pâtes destinées dans l'alimentation humaine pourraient être envisagées et encouragées.

L'incorporation du germe de blé à différents taux dans la semoule de blé dur en vue de la fabrication de pâtes alimentaires constitue le principal thème de notre étude. Ce travail s'insère dans les programmes de recherche développés par l'équipe de Transformation et Elaboration de Produits Agro-Alimentaires (T.E.P.A.) et représente un des objectifs principaux d'un Projet National de Recherche. Les objectifs visés sont les suivants :

- Offrir une possibilité de valorisation de germe de blé qui est un sous produit des minoteries et semoulerie algériennes ;
- Etudier la faisabilité technologique sur des exemples de pâtes alimentaires ;
- Envisager l'enrichissement et l'amélioration de la valeur nutritionnelle en pastification ;
- Caractérisation culinaire et organoleptique des pâtes enrichies.

Ce travail est structuré en deux parties :

- o une étude bibliographique sur les pâtes alimentaires et les caractéristiques générales du germe de blé ;
- o une étude expérimentale où sont présentés le matériel et méthodes employés, les résultats exploités.

Etude bibliographique

1. Grain de blé

1.1. Définition

Le blé est une monocotylédone qui appartient au genre de *Triticum* de la famille des Gramineae. C'est une céréale dont le grain est un fruit sec et indéhiscent, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments (ŠRAMKOVA *et al.*, 2009). On distingue deux espèces de blé : le blé tendre et le blé dur. Ils se différencient par la friabilité de l'amande, qui est plus importante pour le blé tendre et permet sa transformation en farine, alors que pour le blé dur la transformation se fait en semoules.

Le blé tendre (*Triticum aestivum*) est utilisé pour la panification, la pâtisserie, la biscuiterie car il est panifiable. Le blé dur (*Triticum durum*) est utilisé pour le roulage de couscous, la fabrication de galette, de certains pains traditionnels et des pâtes alimentaires. Il est pastifiable et panifiable (CALVEL, 1984).

1.2. Composition histologique

Les grains de blé sont de forme ovoïde, possédant sur l'une de leur face un sillon et à l'extrémité opposée de l'embryon des touffes de poils : la brosse (GODON *et al.*, 1991; HEMERY *et al.*, 2007). La longueur du grain de blé est comprise entre 5 et 8 mm, sa largeur entre 2 et 4 mm, son épaisseur entre 2.5 et 3.5 mm, sa section longitudinale entre 10 et 16 mm², sa section transversale entre 4 et 7.5 mm², son poids entre 20 et 50 mg et sa densité entre 1.3 et 1.4 (ŠRAMKOVA *et al.*, 2009). Le grain de blé comprend trois parties essentielles : les enveloppes, l'amande et le germe (figure n° 1).

Les enveloppes représentent 13 -17 % du grain et donnent le son en semoulerie, elles sont d'épaisseurs variables et sont formées de six tissus différents : épiderme du nucelle, tégument séminal ou testa, cellules tubulaires, cellules croisées, mésocarpes, péricarpes (BARRON *et al.*, 2007). Le son contient de faibles quantités de protéines, de grandes quantités des vitamines du groupe B, des traces de minéraux et il contient aussi des fibres cellulosiques dites diététiques (BLECH *et al.*, 2007).

L'amande (albumen) 80- 85 % du grain principalement amylicé et vitreux, possède à sa périphérie une couche à aleurone (BELDEROK *et al.*, 2000). L'endosperme est une source des farines blanches contenant la plus grande part des protéines du grain, des carbohydrates et

aussi riche en fer et en certaines vitamines du groupe B tels : riboflavine, niacine et thiamine (UAUY *et al.*, 2006).

Selon, GODON et WILLM (1991), FEILLET (2000), ADAMS *et al.* (2002), SRIVASTAVA *et al.* (2007), HASSAN *et al.* (2010) et KUMAR *et al.* (2011), le germe du grain de blé est riche en lipides, en protéines, en vitamines et en éléments minéraux. Celui-ci représente environ 3% du grain. Il est éliminé à la mouture pour éviter le rancissement et permettre d'augmenter la durée de conservation. Il est aussi composé d'un embryon, lui-même formé des coléoptiles, de la gemmule, de la radicule, du coléorhise, de la coiffe et du scutellum (JEANTET *et al.*, 2007). La composition histologique du grain de blé est représentée dans la figure n° 1.

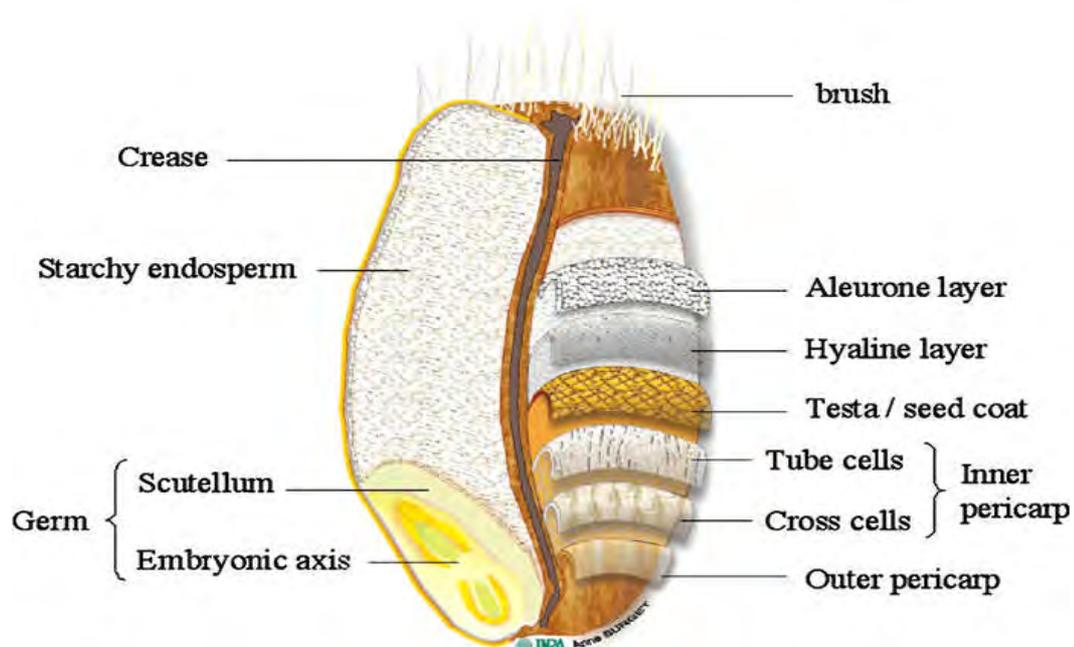


Figure 1. Composition histologique du grain de blé (SURGET and BARRON, 2005).

1.3. Composition chimique et valeur nutritionnelle

Les grains de blé se composent principalement d'hydrates de carbones entre amidon et fibres (65-75 %), de protéines (7 à 14 % selon les variétés et les conditions de culture), des lipides (2-6 %), d'eau (12-14 %) et des micronutriments (HEMERY *et al.*, 2007) tels les minéraux (particulièrement magnésium), les vitamines du groupe B et des composés bioactifs: vitamine E, composants antioxydants (acides phénoliques, caroténoïdes) et des substances à activités hormonales (lignanes) (SLAVIN *et al.*, 1999 ; SHEWRY, 2009).

Les composés qui ont une bonne valeur nutritionnelle sont présents en quantité appréciable dans le grain de blé et au niveau de quelques tissus particuliers. Certains de ces composés (vitamines, acides phénoliques, lignanes, ...) jouent un rôle important au plan nutritionnel (SHEWRY, 2009), technologique conduisant à la production d'une gamme de produits comme le pain, les pâtes alimentaires, biscuits et autres. Les produits ainsi fabriqués dépendent de la structure, des interactions entre les différents constituants du grain (protéines, amidon, ...), de leurs propriétés physico-chimiques et rhéologiques. Ces grains sont utilisés pour l'alimentation des animaux, pour la production de l'éthanol et ils constituent une matière première pour les produits cosmétiques (KUMAR *et al.*, 2011). Ces substrats représentent aussi un aliment idéal pour les régimes destinés au traitement thérapeutique (JONES, 2006). En effet, le germe et le son de blé par exemple constituent une bonne source de fibres diététiques pour la prévention et le traitement de certains problèmes digestifs (SIMMOND, 1989 ; HARIPRIYA *et al.*, 2010) et les maladies de civilisation (le diabète, l'obésité, les maladies cardiovasculaires et le cancer...) (BETA *et al.*, 2005) et ce en raison de leur richesse en composés phytochimiques et de par leurs activités antioxydantes (KUMAR *et al.*, 2011).

Selon HEMRY *et al.* (2007), il existe des procédés de fractionnement et de séparation qui permettent l'élimination des éléments nuisibles et entraînant ainsi la récupération des composants cibles de bonne valeur nutritionnelle et technologique qui pourrait servir dans l'amélioration de la qualité des différents produits alimentaires.

2. Le germe de blé

2.1. Description

Le germe de blé est situé à la base du grain, du côté opposé à la brosse. Il est formé de deux parties : l'embryon ou plantule qui donnera naissance à une nouvelle plante et scutellum, sorte de coquille elliptique qui entoure la plantule et qui la sépare de l'amande farineuse (FATMA *et al.*, 2010). Il représente environ 2-3 % du poids du grain de blé, éliminé dans les farines courantes par les techniques actuelles de mouture sur cylindre et se trouvant dans les issues de meunerie sous forme de sons et remoulages (DUNFORD, 2005).

Le germe de blé se présente sous forme de plaquettes écrasées minces de teinte jaune vif légère à reflet verdâtre, de 3 à 6 mm de dimension, de forme irrégulière et légèrement allongée. Sa saveur est sucrée et grasse, rappelant la noix fraîche incomplètement mûre (KIGER et KIGER, 1967).

2.2. Composition chimique et valeur nutritionnelle

Le germe de blé est la composante principale de grain de blé. La plupart des nutriments à l'exception de l'amidon sont concentrés dans le germe (UMAIR ARSHAD *et al.*, 2008 ; HASSAN *et al.*, 2010).

Plusieurs travaux ont montré l'intérêt que représente ce noble composant comme un élément d'enrichissement et de supplémentation souvent très apprécié. Le germe de blé est l'une des sources potentielles des protéines d'excellente valeur nutritionnelle semblable à celle des protéines animales (FATMA *et al.*, 2010) ; il est riche en tocophérols (BILGIÇLI *et al.*, 2006), en vitamines du groupe B et en l'huile composée d'une grande proportion d'acides gras insaturés (ZACCHI *et al.*, 2006). Le germe de blé constitue aussi une source potentielle de minéraux et il fournit trois fois plus de protéines, sept fois plus quantités de matières grasses, quinze fois plus de sucres, et six fois plus de teneur en minéraux par rapport à la farine de blé (ZHU *et al.*, 2005 ; ZHU *et al.*, 2009). Les stérols qui ont un rôle de diminution du niveau de cholestérol dans le sérum sont aussi concentrés dans le germe de blé (NYSTROM *et al.*, 2007). La composition chimique du germe de blé est représentée dans le tableau n°1.

Tableau 1. Composition biochimique du germe de blé (en g pour 100 g de matière digestible)

(SRIVASTAVA *et al.*, 2007; KUMAR *et al.*, 2011).

| Paramètres | Humidité (%) | Protéine Totaux (%) | Lipides totaux (%) | Cendre (%) | Fibres (%) | | Vitamine E mg/100g | Carbo-hydrate (%) |
|--------------|--------------|---------------------|--------------------|------------|------------|-----------|--------------------|-------------------|
| | | | | | Soluble | Insoluble | | |
| Germe de blé | 11.4 ±0.2 | 25.11-31.4± 0.5 | 7.3- 9±0.2 | 4.2±0.1 | 2.8± 0.1 | 15.6± 0.2 | 15.80-22.0 | 51.99±1.0 |

Les valeurs sont des moyennes ± écarts types (n = 4), sur base de la matière sèche (ms)

2.2.1. Carbohydrates

2.2.1.1. Polysaccharides

a – Amidon : Il se trouve en petites quantités dans les cellules de l'embryon mais non dans le scutellum (KIGER *et* KIGER 1967).

b – Fibres : Les fibres insolubles représentent environs 15-16 % sur base sèche (ms) (SRIVASTAVA *et al.*, 2007).

2.2.1.2. Di et monosaccharides

Ils sont sous forme de glucose, de saccharose et de raffinose, dont leurs proportions sont respectivement 5 g, 7 g et 5 g pour 100 g de la matière brute (KIGER *et* KIGER 1967).

2.2.2. Protéines

Le germe de blé renferme 30-40 % (ms) de protéines lesquelles sont représentées majoritairement par des globulines 18.9 % et des albumines 30.2 % (DUNFOROD, 2005 ; SRIVASTAVA *et al.*, 2007). Ces protéines contiennent des teneurs élevés d'acides aminés essentiels d'excellentes valeurs biologiques telles que la lysine, la méthionine et la thréonine qui sont absents dans de nombreuses protéines d'autres céréales (CORNELL, 2003). Selon SOUCI *et al.* (1994), Les matières azotées non protéiques représentent entre 11.3 à 15.3 % et sont constituées de l'asparagine, l'allantoïne, la lécithine et le glutathion ainsi que les polyamines et l'hémoprotéines.

2.2.3. Lipides

La teneur en lipides du germe se trouve comprise dans l'intervalle 9 - 15 % ms (PIRAS *et al.*, 2009). Ces corps gras sont constitués de lipides polaires et non polaires dans des proportions respectives de l'ordre de 4.88 % et de 23.97 % des lipides totaux du grain de blé. Les lipides polaires contiennent surtout des glycolipides et phospholipides dans des valeurs respectives 0.53 % et 4.35 % des lipides du germe du blé. Par contre, les lipides non polaires sont représentés surtout par des triglycérides (BERGER, 1982). Les lipides du germe comportent des acides gras dont les proportions sont indiquées dans le tableau n° 2.

Tableau 2. Composition en acides gras du germe brut (g pour 100 g de matière sèche)
(MEGAHED, 2011)

| Acides gras | Teneurs (%) |
|---------------------|-------------|
| Acide palmitique | 18.5 |
| Acide stéarique | 0.40 |
| Acide palmitoleique | 0.70 |
| Acide oleique | 17.3 |
| Acide linoleique | 57.0 |
| Acide linoléinique | 5.20 |

2.2.4. Vitamines

Les vitamines liposolubles sont majoritaires dans le germe de blé en raison de sa teneur élevée en lipides. Le germe de blé est surtout riche en vitamine E (SOUCI *et al.*, 1994; EISENMENGER *et al.*, 2008). Le tableau n° 3 comporte les données relatives aux vitamines que renferme le germe de blé.

Tableau 3. Proportion des vitamines en mg pour 100 g de germe de blé brut (SOUCI *et al.*, 1995)

| B1 | B2 | B6 | E | Niacine | B5 | Caroténoïdes |
|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|-----------|---------------------|
| 2.01 | 0.720 | 0,492 | 31.06 | 4.52 | 1.00 | 0.062 |

2.2.5. Minéraux

La composition en matières minérales du germe de blé est indiquée dans le tableau n° 4.

Tableau 4. Eléments minéraux du germe (mg pour 100 g de germe) (FAVIER *et al.*, 1995)

| Sodium | Magnésium | Phosphore | Potassium | Calcium | Fer |
|---------------|------------------|------------------|------------------|----------------|------------|
| 9 | 250 | 971 | 871 | 55 | 7.6 |

Ce tableau met clairement en évidence que les minéraux majeurs les plus importants que contient le germe de blé sont le phosphore et le potassium.

2.2.6 Enzymes

2.2.6.1. Lipase

Elle se localise dans les couches périphériques probablement dans la couche à aleurones et dans le germe de blé (SONNTAGE, 1979 ; DEVIN *et al.*, 2006). Son activité lipolytique est indiquée dans le tableau n° 5.

Tableau 5. Activité lipolytique des différentes parties du grain de blé (DRAPRON *et al.*, 1979)

| Parties | Blé | Germe | Son | Farine panifiable |
|-----------------------------|------------|--------------|------------|--------------------------|
| Activité lipolytique | 3-9 | 7 | 14 | 2-3 |

Les valeurs indiquées correspondent à la quantité d'acide gras en mg libéré par 2 g de produit. La lipase hydrolyse les liaisons esters des triglycérides en libérant des monoglycérides, des diglycérides et des acides gras libres (FAO, 1980).

2.2.6.2. Lipoxygénase

Cette enzyme se trouve localisée dans le germe de blé. Elle provoque l'oxydation des acides gras surtout insaturés à l'état libre. Son activité est liée à celle de la lipase. Elle est indiquée dans le tableau n° 6.

Tableau 6. Activité lipoxygénasique du blé (BERGER, 1982)

| Parties | Blé | Farine | Germe |
|--------------------------|------------|---------------|--------------|
| Activité lipoxygénasique | 2-5 | 1-3 | 100-150 |

L'activité lipoxygénasique correspond à la quantité d'enzymes provoquant l'oxydation d'une micro-mole de linoléate par minute (BERGER, 1982). Selon CRAPLET (1971), le germe de blé contient aussi des protéases et des phytases.

2.2.7. Stérols végétaux

Comme le germe de soja, le germe de blé est une matrice très compacte. Il ne représente que 2 à 3 % du poids de la graine entière mais contient à lui seul de 15 à 20 % des isoflavones totales de la graine et présente aussi une plus forte concentration en saponines, phytostérols que les cotylédons (GODON *et al.*, 1991 ; FEILLET, 2000 ; HUBERT, 2006).

Les phytostérols végétaux ont une structure chimique similaire à celle du cholestérol, comportant un noyau stéroïdien 3- β -hydroxylé. Les principaux stérols végétaux du germe de blé sont le β -sitostérol (24- α -éthylcholesterol), le campestérol (24- α -méthylcholesterol) et le stigmastérol (Δ 22, 24- α -éthylcholesterol) (HUBERT, 2006 ; HEMERY *et al.*, 2007).

2.3. Récupération du germe de blé

Les débris fins du germe se trouvent en majeure partie dans les remoulages et les sons fins, en revanche les gros débris sont rencontrés dans les sons moyens et gros écrasés et aplatis en flocons (KIGER et KIGER, 1967). L'embryon passe avec les grosses semoules aux cylindres de réduction et se trouvant sous forme de flocon. Le scutellum est relativement friable et difficile de le séparer des autres fractions de mouture. Dans le processus de

fabrication de la farine, un tiers de scutellum se trouve attaché au son (BARNES, 1983). Au niveau de l'ERAD Sidi Reghiss d'Oum El Bouaghi, le germe se trouve dans le refus du tamis n°18 du planchister qui est alimenté par le convertisseur n°4 qui reçoit le produit du sasseur n°3 (alimenté par broyeur n°1 et le broyeur n°3) et du sasseur n°4 (alimenté par le broyeur n°3). Au niveau de cette unité, le germe passe avec le son fin, où il est récupéré séparément en cas de besoin. La séparation de germe des autres fractions du grain de blé est difficile en raison d'une part de l'aspect structural du grain et d'autre part au manque des moyens et des équipements de séparation appropriés. En général, la séparation se fait sur la base des propriétés physiques du germe dont sa densité est un paramètre d'appréciation. Dans les moulins qui disposent de bons équipements de séparation, le rendement d'appréciation en germe de catégorie alimentaire est élevé (DUNFORD, 2005).

Le germe commercial n'est jamais pur, il contient toujours une proportion variable de fractions de son et d'endosperme (BOLTE et FINNEY, 1977).

2.4. Différentes formes d'utilisation de germe de blé

Les données statistiques sur la production de germe de blé ne sont pas disponibles mais une estimation de 10 millions de tonnes est obtenue au cours des étapes de broyage et de séparation des différentes fractions du grain de blé (DUNFORD, 2005). Le germe de blé est une source précieuse qui n'a jamais été utilisée de façon rationnelle et efficace. Sa valeur nutritionnelle et thérapeutiques excellente le rendent un sous produit idéal et un supplément alimentaire d'enrichissement important dans différents produits. Les composants bioactifs qu'il renferme permettent de l'utiliser dans d'autres domaines autre que l'agro-alimentaire (UMAIR URSHAD *et al.*, 2008 ; PIRAS *et al.*, 2009).

Les produits alimentaires enrichis devraient avoir les caractéristiques suivantes : peu coûteux, économique, nutritif et satisfaisant pour les consommateurs. Néanmoins, l'enrichissement ne devrait pas poser des modifications importantes dans les propriétés sensorielles et fonctionnelles du produit final (HASSAN *et al.*, 2010).

2.4.1. Utilisation de germe de blé entier

Le germe de blé est commercialisé soit en farine en paillettes soit sous forme incorporée pour permettre l'enrichissement de certains produits (PINARLI *et al.*, 2004; BILGIÇLI *et al.*, 2006 ; SRIVASTAVA *et al.*, 2007 ; UMAIR URSHAD *et al.*, 2008; FATMA *et al.*, 2010 ; MEGAHED, 2011) tels que :

- Farines composées
- Pâtes au germe de blé et potage
- Pain au germe de blé
- Biscuits au germe de blé et galettes.

2.4.2. Utilisation des protéines de germe de blé

L'utilisation des protéines de germe de blé ne peut se justifier que grâce à l'emploi d'une technologie appropriée. Le matériel employé doit présenter au moins trois caractéristiques principales (STARON, 1985) :

- Qu'il soit produit en quantité importante.
- Qu'il possède une haute teneur en protéines.
- Que l'équilibre de ses protéines en acides aminés soit convenable et leur valeur biologique soit élevée. En ce sens, le germe de blé répond donc à ces objectifs et son utilisation comme supplément alimentaire se justement amplement.

Les propriétés fonctionnelles des protéines du germe en l'occurrence une solubilité élevée, de bonnes propriétés émulsifiantes, des capacités moussantes et hydrophobicités, un pouvoir moussant, une légère texture et une saveur propre favorise donc la fabrication des protéines isolées à partir du germe de blé pour les utiliser comme ingrédient pour plusieurs produits alimentaires y compris les viandes transformées, les céréales et les produits de boulangerie et dans les boissons (FATMA *et al.*, 2010). Les isolats de protéine de germe de blé peuvent également être utiles dans des formulations alimentaires pour les personnes allergiques au gluten. De ce fait, les isolats de protéines présentent actuellement un intérêt particulier pour les transformateurs et les consommateurs en raison de leur faible teneur en gras et en tant que substitut pour les protéines de l'œuf et les produits laitiers (HASSAN *et al.*, 2010).

2.4.3 .Utilisation de l'huile de germe de blé

Afin de répondre aux besoins nutritionnels, de nouvelles ressources d'huiles végétales sont recherchées en tant que sources de vitamines et acides gras essentiels. L'extraction de l'huile à partir du germe de blé peut ouvrir de nouvelles opportunités pour son utilisation plus large à l'avenir. L'huile de germe de blé est connu pour son utilisation multiple notamment dans les aliments comme ingrédient de préparation, des exploitations biologiques comme

agents de contrôle des insectes, dans les produits pharmaceutiques et dans le domaine de la cosmétique (NARA *et al.*, 1983 ; PIRAS *et al.*, 2009).

Il est admis que le germe de blé renferme une forte présence d'huile, et sachant par ailleurs, l'intérêt que représente les antioxydants naturels (tocophérols) dans notre alimentation, nous amène à utiliser celui-ci pour son aptitude dans la fabrication des biscuits améliorés au plan nutritionnel et de le substituer désormais aux oxydants de synthèse selon (UMAIR URSHAD *et al.*, 2008). La qualité sensorielle des biscuits contenant ce composant jusqu'à 50 % a été aussi acceptable que les échantillons de contrôle, au delà duquel les caractéristiques sensorielles des biscuits ont été affectées négativement.

Les résultats enregistrées à partir des différentes études ont confirmés les effets bénéfiques de ces huiles végétales essentiellement en raison de leur teneur élevée en acides gras insaturés et de leurs composants bioactifs précieux qui ont été générés pour réduire les risques de maladie cardiovasculaire (LEENHARDT *et al.*, 2008). Par sa teneur appréciée en tocophérols antioxydant liposoluble transportés dans des LDL qui inhibe la prolifération des cellules musculaires lisses *in vitro* et lorsqu'il est ajouté au plasma, augmente ainsi la résistance des LDL à l'oxydation. MILLER *et al.* (2005) a également enquêté et montré que la supplémentation en α -tocophérol a été bénéfique pour la réduction des concentrations de peroxyde de sang-lipidique sans affecter les activités antioxydantes chez les patients atteints de diabète de type 2. L'huile de germe de blé est aussi très appréciée pour sa haute teneur en acides gras insaturés constitués principalement de l'acide linoléique (18:2) et linoléique (18:3), ce sont des acides qui ont une grande importance dans le métabolisme humain et qui ne sont pas synthétisés par l'organisme (YULDASHEVA *et al.*, 2010). Ils constituent les précurseurs d'un groupe d'hormones appelées prostaglandines, qui jouent un rôle important dans la contraction musculaire et dans la guérison de processus inflammatoires. En outre, l'acide linoléique permet de diminuer le cholestérol et est aussi un précurseur des phospholipides des membranes cellulaires (PIRAS *et al.*, 2009). Egaleme nt, l'huile a la capacité de promouvoir l'endurance physique et retarde le vieillissement (CHANG *et al.*, 2007; LEENHARDT *et al.*, 2008).

2.5. Méthodes de préparation et de traitement de germe de blé

Le germe de blé cru développe un goût de rance et une saveur amère dans un temps court en raison de l'activité enzymatique élevée et sa teneur appréciable en acides gras polyinsaturés, ce qui limite ses utilisations (PINARLI *et al.*, 2004). Parmi ces enzymes

présentes dans le germe, la lipase est l'enzyme la plus importante due à son effet dans le développement de la rancidité hydrolytique pendant le stockage du germe ou des produits contenant le germe (ZARRINTAN *et al.*, 2006). Cette activité hydrolytique importante conduit à des mauvaises propriétés de conservation (POMERANZ, 1992 ; SRIVASTAVA *et al.*, 2007), propriétés sensorielles (GALLIARD et GALLAGHER, 1988) et nutritionnelles (POMERANZ 1992 ; MEGAHED, 2011). La lipoxigénase agit sur les acides gras essentiels estérifiés mais a une vitesse considérablement plus rapide lorsqu'ils sont libres. L'abaissement de l'activité de l'eau permet donc de limiter considérablement l'action des lipases et des lipoxigénases (GALLIARD, 1983 ; MUKHERJEE *et al.*, 1994).

En général, la température idéale de la conservation du germe de blé est de 4°C. Pour surmonter le problème de rancissement et d'oxydation, plusieurs tentatives ont été testées pour développer des procédés de stabilisation et d'améliorer la durée de vie du germe et des produits enrichis (SRIVASTAVA *et al.*, 2007). Parmi ces traitements : le grillage, la délipidation, la cuisson à la vapeur, l'emballage dans des sacs en 3-couche de papier composite et le tout recouvert en polyéthylène, l'infrarouge, le séchage à air chaud et le traitement antioxydant. Le traitement thermique apparaît comme la méthode la plus adaptée pour l'inactivation de ces enzymes (DEVIN et OSCAR, 2006) mais toutefois conduit à des réactions de brunissement indésirables (VETRIMANT et HARIDAS, 1990) et la destruction des antioxydants (MUKHERJEE *et al.*, 1994 ; LEHTINEN *et al.*, 2003).

3. Pâtes alimentaires

3.1. Définition

Selon une définition généralement admise, les pâtes alimentaires peuvent être décrites comme des produits prêts à l'emploi culinaire, préparés par pétrissage sans fermentation de semoule de blé dur additionnée d'eau potable et éventuellement d'œufs (140 à 350 g d'œufs frais par kg de semoule), et soumis à des traitements physiques appropriés tels que le tréfilage, le laminage et le séchage, ce qui leur donnent l'aspect souhaité par les usagers. L'ajout de gluten, des légumes et des aromates est également autorisé (FEILLET, 2000).

Les pâtes alimentaires sont universellement consommées et appréciées : la simplicité de leur fabrication, leur facilité de transport, leur excellente aptitude à la conservation et au stockage, leur bonne qualité nutritionnelle et hygiénique, la diversité des modes de préparations sont autant d'atouts qui favorisent leur utilisation et leur consommation (PETITOT *et al.*, 2009 a).

3.2. Classification

Selon TREMOLIERE *et al.*, (1984), les pâtes alimentaires sont classées en deux groupes selon les machines utilisées pour fabrication.

3.2.1. Pâtes pressées ou tréfilées

C'est une pâte comprimée par une presse à travers une filière qui sert de moule dont on obtient les formes classiques telles que le spaghetti, macaroni, coquillettes ou coupées à volonté de manière à obtenir des pâtes longues ou courtes.

3.2.2. Pâtes laminées

Ce type de produit est abaissé par laminage entre deux cylindres et est réduit en feuilles larges et minces. Celles-ci sont soit divisées en rubans, soit amenées sur des machines munies d'emporte-pièces ce qui donne la forme désirée.

3.3. Constituants de la pâte

3.3.1. Semoule

La semoule de blé dur est considérée comme le témoin auxquels sont comparées les autres matières premières. Elle est reconnue comme substrat principal pour la fabrication des pâtes alimentaires en raison de sa teneur en gluten qui confère aux pâtes (couscous, pâtes alimentaires, ...) des propriétés technologiques et rhéologiques spécifiques, de sa dureté, sa couleur unique, sa saveur et sa qualité de cuisson (GODON *et al.*, 1991 ; FEILLET *et al.*, 1996 ; PETITOT, 2009). Après conversion en pâte, elle donne des produits avec des bonnes qualités culinaires et une stabilité à la cuisson (SISSONS, 2008). L'Amidon (74 – 76 %) et les protéines (12 – 15 %) sont des constituants majeurs de la semoule de blé dur (TURNBULL, 2001 ; DURANTI, 2006). La qualité technologique d'une semoule pour la fabrication des pâtes alimentaires est définie par son aptitude à donner des produits finis dont l'aspect et la qualité culinaire répondent aux désirs des consommateurs. Ces deux caractéristiques sont influencées par la composition biochimique et l'état physique (granulométrie) des semoules, eux même liés à l'origine histologique des produits (ABECASSIS, 1991).

3.3.2. L'eau

Selon de nombreuses observations faites par les industriels, il ressort que la qualité de l'eau utilisée au cours de l'embâtage peut exercer une influence non négligeable sur l'aspect et le comportement des produits finis au cours de la cuisson. Des eaux de faible dureté hydrotimétrique sont généralement recommandées (FEILLET, 2000).

3. 4. Rôle des constituants de la semoule en pastification

3.4.1. Rôle des protéines

Les gliadines et les gluténines forment le réseau de gluten dont le comportement affecte considérablement les propriétés rhéologiques des pâtes (BLOKSMA, 1990 b). Très extensibles quand elles sont hydratées, les gliadines (qui posséderaient des propriétés plastifiantes) confèrent à la pâte son extensibilité, sa viscosité et sa plasticité. La ténacité et l'élasticité de la pâte s'expliquent par les propriétés très particulières des gluténines pour maintenir les granules d'amidons gélatinisés au cours de la cuisson (WRIGLEY *et al.*, 2006).

Des études ont montré qu'il y a une forte corrélation entre le rapport des gluténines / gliadines et la force de la pâte (WASIK et BUSHUK, 1975 ; DEXTER et MASTUO, 1978; SISSONS *et al.*, 2005 b). EDWARDS *et al.* (2003) trouve que l'addition d'une fraction riche en gluténines (constituée de SG-HPM et SG-FPM) à une semoule basse augmente la force des pâtes. Les propriétés fonctionnelles du gluten lui permettent au cours de la pastification, de former un réseau tridimensionnel imperméable, la quantité de gluten et la qualité de ses protéines sont des facteurs prédéterminant de la valeur pastière de la semoule (FEILLET et DEXTER, 1996 ; FEILLET, 2000) et de la texture de la pâte (SISSONS *et al.*, 2007).

La teneur en protéine affecte considérablement la qualité culinaire des pâtes produites (tableau n° 7). La matrice de protéines tient les granules d'amidon pendant la cuisson pour diminuer les pertes à la cuisson et par conséquent diminué la viscosité. Avec des teneurs élevées de protéines, les brins des spaghetti gonflent et tiennent leurs fermeté au cours de la cuisson avec moins de pertes à la cuisson (DEXTER *et al.*, 1983).

Le contenu en protéines et la force du gluten jouent un rôle prépondérant dans la détermination de la qualité des pâtes en association avec les températures de séchage (MASTUO *et al.*, 1982 ; AUTRAN *et al.*, 1986 ; D'EGIDIO *et al.*, 1990 ; EDWARDS *et al.*, 1993). À des températures basses de séchage, les différences intrinsèques de la qualité sont reflétées par les caractéristiques des surfaces associées par la viscosité et la fermeté des échantillons, alors qu'à des températures élevées, la différence de fermeté apparaît (D'EGIDIO *et al.*, 1993).

Tableau 7. Effet de teneur en protéines sur la qualité des pâtes à base de blé dur (pertes à la cuisson, fermeté) (EDWARDS *et al.*, 1993).

| | Protéines (%) | | |
|-------------------------|----------------------|------|------|
| | 10.3 | 13.5 | 17.6 |
| Cuisson optimum | | | |
| Pertes à la cuisson (%) | 9.4 | 8.1 | 7.1 |
| Fermeté (kg/mm) | 1.10 | 1.44 | 2.02 |
| Surcuisson | | | |
| Pertes à la cuisson (%) | 15.5 | 13.7 | 13.3 |
| Fermeté (kg/mm) | 0.83 | 0.97 | 1.32 |

3.4.2. Rôle des glucides et polysides

L'amidon et ses composants interviennent de différentes manières au cours de la fabrication des pâtes :

- C'est un fixateur d'eau : On admet que l'amidon absorbe environ 45 % de l'eau ajoutée à la semoule. Par son pouvoir fixateur d'eau, variable selon le degré d'endommagement des granules et sa capacité à former des liaisons non covalentes avec les protéines, l'amidon contribue de manière active à la formation de la pâte (FEILLET, 2000).
- Les carbohydrates solubles comme l'amylose exsudé à partir des granules d'amidon au cours de la cuisson peut être responsable de la viscosité des pâtes (GRANT *et al.*, 1993). Egalement la teneur en amylose influence les propriétés d'élasticité et extensibilité de la pâte qui traduit les modifications et le comportement à la cuisson : avec l'augmentation de niveau d'amylose, la pâte a des grandeurs d'extensibilité et d'élasticité réduits (HUNG *et al.*, 2005) et donc une tendance à l'augmentation de la fermeté de la pâte. Ceux-ci sont expliqués par l'effet de forte liaison et gonflement des granules en fonction de la teneur en amylose et par conséquent une grande résistance à la rupture et à la déformation d'une part. d'autre part, une réduction des pourcentages d'absorption d'eau et donc de faible pertes à la cuisson (SOH *et al.*, 2006). La capacité de l'amylose de limiter le gonflement peut contribuer la baisse de la

prise d'eau à la cuisson et l'augmentation de la délitescence est la résultante de l'augmentation de la disponibilité de lixiviation de l'amylose au cours de la cuisson (SISSONS, 2008).

Les pentosanes jouent un rôle important dans l'établissement des propriétés rhéologiques des pâtes, d'une part participant à la compétition vis-à-vis de l'eau avec les protéines du gluten et l'amidon endommagé et d'autre part en modifiant la viscosité de la phase aqueuse de la pâte lors de réaction de gélification oxydative (IZYDORCZYK *et al.*, 1991). Dans la pâte, la forte capacité d'adsorption d'eau des pentosanes influence la répartition de celle-ci. A faible dose, les arabinoxylanes solubles favorisent la répartition homogène de l'eau et l'établissement de liaisons hydrogènes avec l'amidon et les protéines. Par ailleurs, l'effet de la fraction insoluble des arabinoxylanes est plutôt négatif en pastification provoquant une baisse de la machabilité de la pâte (ROUAU *et al.*, 1994; TURNER *et al.*, 2008). De plus, la forte capacité d'adsorption d'eau des pentosanes insolubles modifie le développement du gluten en entrant en compétition avec ce dernier pour la fixation de l'eau (WANG *et al.*, 2003).

3.4.3. Rôle des lipides

Bien que leur teneur dans les semoules ne dépasse pas 2 à 3 %, les lipides jouent un rôle important en pastification, du moins ceux qui ne sont pas liés à l'amidon. Les lipides constituent un facteur déterminant de la couleur de la pâte. Elle est établit au cours de la période de fabrication des pâtes en raison de l'oxydation des pigments jaunes sous l'action des lipoxygénases principalement au cours de l'hydratation, malaxage, extrusion et pendant l'étape de séchage (SISSONS, 2008).

MASTUO *et al.*, 1986 et SISSON, 2008 prouvent que ces lipides essentiellement non polaires ont des effets sur la qualité des pâtes en terme de viscosité et la délitescence. Elimination des lipides totales et lipides non polaires augmentent le caractère collant des pâtes et les pertes à la cuisson (SISSONS, 2008). Au cours de l'étape de malaxage de la pâte, les lipides libres interagissent avec les composants de la semoule essentiellement les protéines ce qui conduit à l'amélioration de la force du gluten. Le processus de mélange accélère la formation des liaisons hydrophobes des lipides non polaire avec les composants solubles dans l'acide comme le glutenine, gliadine, albumines et les composants non azotés (CHUNG, 1986). Tandis que les lipides polaires interagissent principalement avec les glutenines. Les lipides polaires libres peuvent également se lier à la gliadine par des liaisons hydrophiles. Ces

liaisons améliorent les interactions de protéines ce qui fournissent un meilleur support structural pour le réseau du gluten (CHUNG *et al.*, 1978). FEILLET (2000) attribue leur mode d'action à un phénomène physico-chimique suivant : L'oxydation des acides gras polyinsaturés, catalysé par la lipoxygénase provoque un réarrangement des liaisons disulfures au sein du réseau protéique et par conséquence améliore la qualité du gluten.

3.5. Processus de fabrication des pâtes alimentaires

Aujourd'hui, le procédé de fabrication continu est réalisé à l'aide de l'automatisation. Il donnant lieu à une productivité haute (2-5 tonnes/h). Il comporte trois étapes fondamentales (FEILLET, 2000 ; PETITOT *et al.*, 2010) :

1. L'hydratation/ malaxage de la semoule ;
2. Formage ou façonnage (extrusion/ laminage) ;
3. Séchage

3.5.1. Hydratation et malaxage

La quantité d'eau ajoutée pour l'hydratation est environ 25 à 34 kg/100 kg de semoule, de manière à ce que la teneur en eau final soit voisine de 44 à 49 % de la matière sèche. Cette quantité d'eau compte tenu de l'humidité initiale de la semoule qui se situe généralement aux environs de 14 % (ms) (ABECASSIS *et al.*, 1994) et la forme finale de la pâte (DALBON *et al.*, 1996). Le mélange des constituants de la pâte s'effectue dans un malaxeur qui tourne à 120 tours /min pendant 20 minutes (PETITOT *et al.*, 2010).

3.5.2. Formage

Le façonnage de la pâte est assuré soit sous l'effet de laminage, soit par le principe d'extrusion (le plus couramment utilisé).

3.5.2.1. Extrusion

La semoule hydratée est reprise par une vis sans fin dont la fonction est d'assurer l'avancement des pâtes tout en les comprimant de manière à provoquer leur extrusion à travers un moule situé en tête de vis. Les pressions auxquelles est soumise la pâte au cours de cette opération peuvent dépasser 100 kg/cm² et semble être essentielle pour donner la compacité nécessaire au produit final pour une meilleure tenue à la cuisson (KRUGER *et al.*, 1996). Un système de refroidissement à circulation d'eau situé autour du cylindre d'extrusion et de la tête de presse permet d'éviter un accroissement excessif de la température qui doit

rester inférieur à 45- 50°C afin d'éviter une dégradation des constituants de la semoule (PETITOT *et al.*, 2009c). La forme des filières, la vitesse d'extrusion et les conditions de découpe déterminent le format des produits finis (spaghetti, macaroni, pâtes courtes, papillons).

3.5.2.2. Laminage

Dans le processus de laminage, la pâte est pétrie et laminée en feuille entre deux cylindres rotatifs. Trois à cinq paires de rouleaux, avec une diminution des lacunes des rouleaux sont utilisés jusqu'à ce que la feuille atteigne l'épaisseur désirée. La feuille est ensuite coupée en brins de largeur et de longueur souhaitée. Les deux techniques utilisées sont différents au niveau de l'énergie mécanique dont elle employée pour le formage de la pâte (ABECASSIS *et al.*, 1994). L'énergie transférée à la pâte est plus élevée avec le procédé d'extrusion qu'à celui de laminage et une partie de celle-ci est dissipée sous forme de chaleur. En outre, lors de l'extrusion, la pâte est soumise à un stress de cisaillement alors pendant le laminage, un stress élongationnelle a été appliqué. Ces différences de ces paramètres (le stress, la chaleur et la pression) peuvent entraîner la formation des pâtes de structures différentes (PETITOT *et al.*, 2010).

3.5.3. Séchage

L'étape suivante l'extrusion et la découpe des pâtes est le séchage. Celui-ci est conduit de manière à ce que l'humidité finale des produits ne dépasse pas 12. 5% de la matière humide (FEILLET, 2000). Cette opération est particulièrement délicate dans le cas des pâtes longues, et doit être conduite de manière très contrôlée afin d'éviter une rupture dans le gradient d'humidité qui s'installe progressivement, au cours du séchage, entre les parties internes et périphériques des pâtes, et qui conduirait à l'apparition de gerçures. Dans la pratique, la différence entre les températures sèches et humides ne doit pas dépasser 5 °C. Pendant longtemps, les pâtes alimentaires ont été séchées à des températures inférieures à 60°C dans des séchoirs réglés pour respecter l'intégrité physique et biochimique des produits et pour prévenir la formation de gerçures ou de brisures (FEILLET, 2000 ; PETITOT, 2009; PETITOT *et al.*, 2009a). Les températures étaient maintenues suffisamment basses pour éviter la dénaturation des protéines et la gélatinisation de l'amidon. Le séchage devenait une opération active ayant non seulement pour objectif de ramener les produits finis à leur teneur en eau requise mais également de provoquer une profonde transformation des caractéristiques physico-chimiques des pâtes pour en améliorer l'aspect et le comportement durant la cuisson. En outre, des températures élevées de séchage conduisent à la meilleure qualité culinaire du

produit final avec une fermeté élevée, une diminution des pertes à la cuisson et le caractère collant (AKTAN *et al.*, 1992 ; ZWEIFEL *et al.*, 2003).

3.6. Structuration des constituants des pâtes au blé dur au cours du procédé de fabrication

La semoule de blé dur contient deux composés majeurs, l'amidon et les protéines (gluténines et gliadines principalement) qui sont structurés au cours du procédé de fabrication des pâtes et pendant la cuisson.

3.6.1. Phase d'hydratation et de malaxage

Au cours du malaxage, certains grumeaux hydratés hétérogènes sont formés, les particules non hydratées restent présentes dans certaines régions de mélange. Une vue sous un microscope à balayage électronique, la semoule est représentée par des particules de forme irrégulière avec des dimensions variables. Une structure compacte avec des granules d'amidons piégés dans une matrice protéique (MASTUO *et al.*, 1978 ; AALAMI *et al.*, 2007) a été observée (figure 2A). L'hydratation limitée de la semoule et une faible énergie apportée lors du malaxage (ICARD-VERNIERE, 1999) empêcheraient le développement d'un réseau protéique (MASTUO *et al.*, 1978).

3.6.2. Phase façonnage

3.6.2.1. Extrusion

La pâte est soumise à des forces de pression et de cisaillement conduisant à la formation d'une structure compacte avec des granules d'amidon profondément concentrée dans une matrice protéique et alignée le long de la direction d'écoulement (MASTUO *et al.*, 1978). Les granules d'amidon ont des formes et des tailles irrégulières et semblaient être légèrement enflés (TUDORICA *et al.*, 2002) (figure 2B). Le réseau protéique commence à se développer entraînant l'agrégation des polymères de gluténines, probablement à travers la formation de ponts disulfures, et conduisant à une perte de solubilité des protéines dans le SDS. Cette insolubilisation des protéines a déjà été observée par DEXTER *et al.* (1977) et ICARD-VERNIERE (1999). Selon ces auteurs, différentes fractions protéiques sont affectées par l'extrusion.

Selon DEXTER *et* MASTUO (1977), l'extrusion a conduit à une perte de solubilité de la fraction globuline sans affecter l'albumine, fractions gliadine et gluténine. Cette perte de solubilité ne pouvait pas être expliquée par polymérisation, car aucun changement n'induit

dans les ponts disulfures et aucun changement dans la distribution moléculaire des protéines ont été détecté.

Contrairement, ICARD-VERNIERE (1999) a observé une diminution de la solubilité des protéines dans SDS principalement due à une diminution de la solubilité des agrégats gluténines, qui est concomitant avec une augmentation dans la fraction insoluble. Ce qui signifie que plus agrégats de gluténines insolubles ont été formés lors de l'extrusion. Toutefois, que la pâte est transférée dans le vis sans fin d'extrusion, la pression s'accumule et la température de la pâte monte localement. Les transformations structurales sont donc une conséquence des forces mécaniques (contrainte de cisaillement) et thermiques impliqués lors de l'extrusion (KRUGER *et al.*, 1996 ; PETITOT *et al.*, 2009c). Egalement, ces forces mécaniques peuvent atténuer l'endommagement des granules d'amidon (LINTAS *et al.*, 1973; ICARD-VERNIERE, 1999). Une augmentation locale de la température (> 60 °C) due à ces forces mécaniques peuvent aussi conduire à la gélatinisation de l'amidon (VANSTEELANDT *et al.*, 1998 ; ZWEIFEL *et al.*, 2000).

3.6.2.2. Laminage

L'augmentation des niveaux de passage à travers les rouleaux de laminoir (de 3 à 45 passes) résulte une distribution uniforme et homogène des protéines et des granules d'amidon dans la pâte. A l'échelle moléculaire, il a induit une plus grande solubilité de gluténine dans le SDS qui due à la désagrégation et la dépolymérisation des protéines (KIM *et al.*, 2008). Ainsi un endommagement de l'amidon modéré a été observé (ZARADETTO *et al.*, 2005).

3.6.2.3. Comparaison : Extrusion-Laminage

Dans les pâtes fraîches extrudées, la matrice protéique est discontinue avec des agrégats protéiques inégalement réparties entre les granules d'amidons. Tandis que dans les pâtes laminées, un réseau protéique continue et compacte a été observé (PAGANI *et al.*, 1989). Les lasagnes cuites sont représentées par un réseau protéique/ amidon ouvert, plus de pores et des granules d'amidons complètement gélatinisés au centre de brin. En revanche, des spaghettis ont été caractérisés par une structure plus compacte avec des granules d'amidon non gélatinisé dans la région centrale des brins (FARDET *et al.*, 1998b). A échelle plus petite, dans le cas du processus de laminage, les granules d'amidons ont été endommagé dans une moindre mesure par rapport à l'extrusion (ZARADETTO *et al.*, 2005). Ce comportement est due au faible effet de stress intrinsèque (des températures et pressions plus basses, temps de traitement plus court) (CARINI *et al.*, 2009).

3.6.3. Phase de séchage

Une observation sous un microscope à balayage électronique montre que la surface des pâtes sèches est représentée par de nombreux granules d'amidon de différentes tailles associés avec un film protéique (figure 2C) (CUNIN *et al.*, 1995 ; SADEGHI *et al.*, 2008). LAMACCHIA *et al.* (2007) ont analysé les protéines des pâtes sèches par HPLC, ils ont observé une diminution progressive des petites et grandes protéines monomériques avec une augmentation de la taille moléculaire des protéines polymériques en parallèle avec l'augmentation de la température de séchage de 60 à 90 °C. Les ponts disulfures sont les principales liaisons formées au cours de séchage des pâtes. Selon FAVIER *et al.* (1996), les gluténines sont très sensibles à la chaleur, à 80°C, ils forment des ponts disulfures intermoléculaires et deviennent insolubles. Egalement, les gliadines sont impliqués et forment des ponts disulfures avec le complexe gluténine (SINGH *et al.*, 2004). Sous une vue par microscopie en lumière polarisée, les granules d'amidons sont représentées par des différentes niveaux de croix de biréfringence : des pâtes séchés à des faibles températures, la plupart des granules d'amidons conservent leur biréfringence (ALTAN *et al.*, 2005), alors environ 20% des granules d'amidon de pâtes séchés à des hautes températures et très hautes températures sont partiellement ou complètement perdu leur biréfringence (GÜLER *et al.*, 2002).

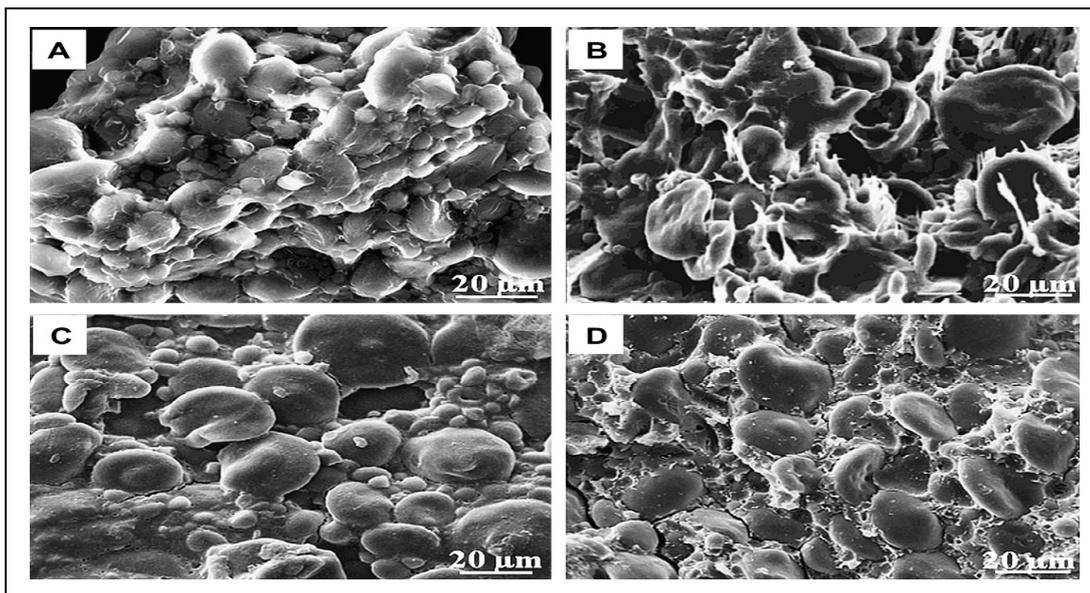


Figure 2. Microscopie à balayage électronique de
A) Semoule (PETITOT *et al.*, 2009c), **B)** Pâte extrudée fraîche (TUDORICA *et al.*, 2002),
C) et **D)** Surface des spaghettis sèches (85 °C) (SADEGHI *et al.*, 2008).

3.7. Cuisson des pâtes alimentaires

Dans les pâtes de blé dur, la gélatinisation de l'amidon et la coagulation des protéines sont les principales réactions produisant dans la structure de la pâte pendant la cuisson. Les espaces entre les granules d'amidon, la coagulation des protéines, l'interaction de ces composants conduisent à la formation d'un réseau protéique continu et fort piégeant ces granules (PETITOT *et al.*, 2009a ; PETITOT *et al.*, 2010 ; PURNIMA *et al.*, 2011). Au cours de la gélatinisation et le gonflement des granules d'amidons, ces espaces sont obturés. Les transformations structurales des protéines et de l'amidon dépendent des conditions température/humidité ; les protéines réagissent à un niveau faible d'humidité (CUQ *et al.*, 2003). Les deux transformations sont compétitives (le gonflement des granules d'amidons s'oppose à la formation du réseau protéique) (PAGANI *et al.*, 1986). Elles sont contrôlées par la pénétration d'eau à l'intérieur du brin de pâte lors de la cuisson. Le taux d'absorption d'eau dépend de la capacité d'eau de diffuser dans la matrice et de la cinétique de fusion des domaines cristallins (DEL NOBILE *et al.*, 2005). L'eau agit comme un plastifiant et augmente la mobilité des polymères. Elle pénètre de manière concentrique vers le centre du spaghetti avec le temps de cuisson. La présence d'un gradient d'humidité à l'intérieur du brin peut être révélée par l'imagerie de la Résonance Magnétique (IRM) (HORIGANE *et al.*, 2006). La teneur faible en eau dans le noyau de brin peut conduire à une forte compétition entre les protéines et les granules d'amidon. Une grande hydratation des protéines peut induire la formation du réseau protéique avant le gonflement des granules d'amidon. Il résulte de ce gradient d'humidité, un changement continu de la structure de la pâte à partir de la surface externe jusqu'à le corps du brin (HENEEN *et al.*, 2003 ; PETITOT *et al.*, 2010).

Les observations microscopiques sur les surfaces des pâtes cuites ont révélé que des particules de protéines et amidon ne sont plus distinguées les uns des autres formant un film mince d'environ 1 µm d'épaisseur avec des petites fissures et des zones ouvertes (FARDET *et al.*, 1998b). Après la cuisson des pâtes à leur temps optimal, la structure interne peut être divisée en trois régions concentriques : une région externe, une région intermédiaire et une région centrale (CUNIN *et al.*, 1995 ; HENEEN *et al.*, 2003 ; PETITOT *et al.*, 2009c).

la région externe : les granules d'amidons sont largement déformés, gonflés et ils sont encore difficile de les différencier des protéines lorsqu'on les examine sous un microscope électronique à balayage (FARDET *et al.*, 1998b). Quel que soit le profil de séchage, la région externe de pâtes cuites se distingue nettement des régions intermédiaires et centrales

(PETITOT *et al.*, 2009c). Il est caractérisé par une grande quantité de films de protéines minces entourant les granules d'amidon (PETITOT *et al.*, 2010).

La région intermédiaire : contient partiellement des granules gonflés dans un réseau de protéines dense et coagulé (FARDET *et al.*, 1998b ; HENEEN *et al.*, 2003).

La région centrale : des brins présentent des granules d'amidons avec un degré de gélatinisation limitée qui due à l'absorption limitée d'eau (CUNIN *et al.*, 1995).

À une échelle plus petite, les conditions d'eau et température lors de la cuisson sont favorables à la dénaturation et l'agrégation des protéines. En effet, une diminution de la solubilité des protéines dans l'acide acétique dilué (DEXTER *et al.*, 1979) ou dans SDS (PETITOT *et al.*, 2009a) a été observée pendant la cuisson. En fonction du profil de séchage appliquée précédemment, la perte de protéines due à la solubilité pendant la cuisson peut être plus ou moins accentuée. La comparaison de la solubilité des protéines des pâtes séchées à des températures différentes, il est apparu que les pâtes séchées à THT subissent de moindre changements en cours de la cuisson par rapport aux pâtes séchées à FT et HT parce que la plupart des protéines ont été déjà regroupées au cours de l'étape de séchage (PETITOT *et al.*, 2009c). En ce qui concerne la fraction d'amidon, la perte totale de la biréfringence est enregistrée.

Ces transformations produites au cours de la phase de cuisson dépendent de celles qui se produisent au cours des étapes de fabrication (SUMAN, 2008). En effet, les effets de certains paramètres du processus tels que la mise en forme et le séchage sont encore détectés après cuisson. Par exemple, le formage semble principalement affecter la porosité des pâtes. Les spaghetti extrudés présentent peu de pores et moins de réseau protéine/amidon ouvert que les lasagnes laminées fabriquées à partir de semoule de blé dur (FARDET *et al.*, 1998b). Le séchage semble être essentiel pour maintenir la structure de pâtes, surtout pendant la surcuisson : une vue par MBCL images du réseau protéique des pâtes séchées à des faibles températures de 55°C et les pâtes cuites montre une perte de son continuité. L'application de THT (100°C) à une faible teneur en humidité préserve la microstructure des pâtes, même après une cuisson longue (ZWEIFEL *et al.*, 2003). En outre, le gonflement de l'amidon des pâtes séchées à THT (100°C) est faible et l'effet étant plus marqué pour ces pâtes lorsque la phase THT est appliquée à un faible taux d'humidité (ZWEIFEL *et al.*, 2003).

3.8. Pâtes enrichies

Les traditions culinaires de la plupart des civilisations montrent que depuis l'antiquité les hommes ont empiriquement rééquilibré la valeur protéique d'une alimentation carencée en protéines animales en associant céréales et légumineuses (LAPPE, 1982 ; FAO, 1990). L'équilibre en acides aminés apportés par cette supplémentation devra permettre une meilleure assimilation de ceux-ci par l'organisme (BENATALLAH, 2009).

De nombreuses études ont été entreprises afin d'améliorer la qualité nutritionnelle des pâtes alimentaires sans altérer leur qualité organoleptique (BAHNASSEY *et al.*, 1986a; EDWARDS *et al.*, 1995 ; INGELBRECHT *et al.*, 2001 ; MANTHEY *et al.*, 2002; BRENNAN *et al.*, 2003 ; GALLAGHER *et al.*, 2004 ; PINARLI *et al.*, 2004 ; CLEARY *et al.*, 2006 ; SHORGEN *et al.*, 2006 ; MANTHEY *et al.*, 2007 ; SADEGHI *et al.*, 2008; PETITOT *et al.*, 2010 ; NASEHI *et al.*, 2011).

La fabrication des pâtes diététiques-hypoglucidiques pour les diabétiques, des pâtes sans gluten pour les enfants souffrant de maladie cœliaque et celles à faible teneur en protéines pour les personnes atteintes de maladies rénales connaissent une grande importance. De même, l'enrichissement en protéines pour améliorer simultanément la teneur en protéines (jusqu'à 25-30 %) et la qualité de celles-ci (teneur en acides aminés indispensables) a fait l'objet de nombreux travaux (incorporation de germe de blé délipidés, de lactosérum, de caséine, de protéines de soja ou autres légumineuses, de protéines de poisson). L'insuffisance des propriétés organoleptiques des produits obtenus, que ce soit leur tenue à la cuisson, leur arôme ou leur goût (développement d'amertume notamment), s'est opposée à la commercialisation de ces produits.

Un des travaux d'enrichissement des pâtes était d'étudier et de déterminer la faisabilité technologique de pâtes enrichies avec des quantités élevées de farine de fève ou de pois cassé et de caractériser leurs propriétés culinaires (PETITOT *et al.*, 2010). Bien que le développement de produits mixtes blé dur/légumineuse et notamment de pâtes enrichies en farine de légumineuse, connaisse depuis quelques années un intérêt croissant, les farines de fève et de pois cassé ont été peu étudiées. Les farines de lupin et de pois chiche figurent parmi les légumineuses les plus étudiées pour enrichir les pâtes (RAYAS-DUARTE *et al.*, 1996; LAMPART-SZCZAPA *et al.*, 1997 ; GONI *et al.*, 2003 ; SABANIS *et al.*, 2006 ; TORRES *et al.*, 2007a ; WOOD, 2009), devant le pois et la lentille (NIELSEN *et al.*, 1980; BAHNASSEY *et al.*, 1986a ; ZHAO *et al.*, 2005). Le taux d'enrichissement varie

généralement de 5 à 30 %. Une seule étude a été conduite sur des pâtes enrichies avec 50% de farine de pois chiche (SABANIS *et al.*, 2006). Les pâtes alimentaires enrichies en protéines d'œufs sont aujourd'hui les seules à occuper une place significative sur le marché.

Etude Expérimentale

1- Matériel et méthodes

1.1. Matières premières

1.1.1. La semoule de blé dur

La semoule de blé dur (*Triticum durum*) est l'ingrédient de base des produits de pastification. Elle constitue la base de référence de comparaison de notre travail. L'essai a porté sur un échantillon de semoule supérieure issue de blés dont nous ignorons les variétés. Cette semoule est issue de la mouture de Juin 2011 de l'unité de transformation BENAMOR (Guelma). L'échantillon est conditionné dans des sacs en fibres synthétiques de 25 kg et conservé à température ambiante dans un endroit sec. L'ensemble des essais relatifs aux pâtes ont été réalisés avec le même lot de semoule.

1.1.2. Le germe de blé

Le germe de blé utilisé est fourni par la minoterie d'Oum El Bouaghi et issu de la mouture de lots de blé dur. Il se présente sous forme de flocons irréguliers de couleur jaune vif, ayant une odeur de noisette avec un goût sucré. Pour éviter une éventuelle altération, il a été conservé au réfrigérateur dans des sacs en plastique à une température de + 4°C jusqu'à son emploi.

1.1.3. L'eau de fabrication

L'eau utilisée pour la fabrication des pâtes alimentaires est une eau distillée de pH = 5.9 ± 0.3 .

1.1.4. Le sel

Le sel iodé employé provient de l'entreprise nationale du sel (ENA sel) et est commercialisé pour les usages culinaires.

1.2. La préparation du germe de blé

La préparation de germe passe par quatre étapes successives (figure n° 3) :

- l'épuration du germe qui contient des débris de farine et de son.
- le traitement thermique pour stabiliser le germe et lui permettre une durée de conservation plus longue.
- le broyage à pour but d'obtenir des particules fines permettant le mélange avec la semoule et pour l'homogénéisation des échantillons.

- le tamisage qui consiste à purifier le germe de blé et élimination du son après broyage.

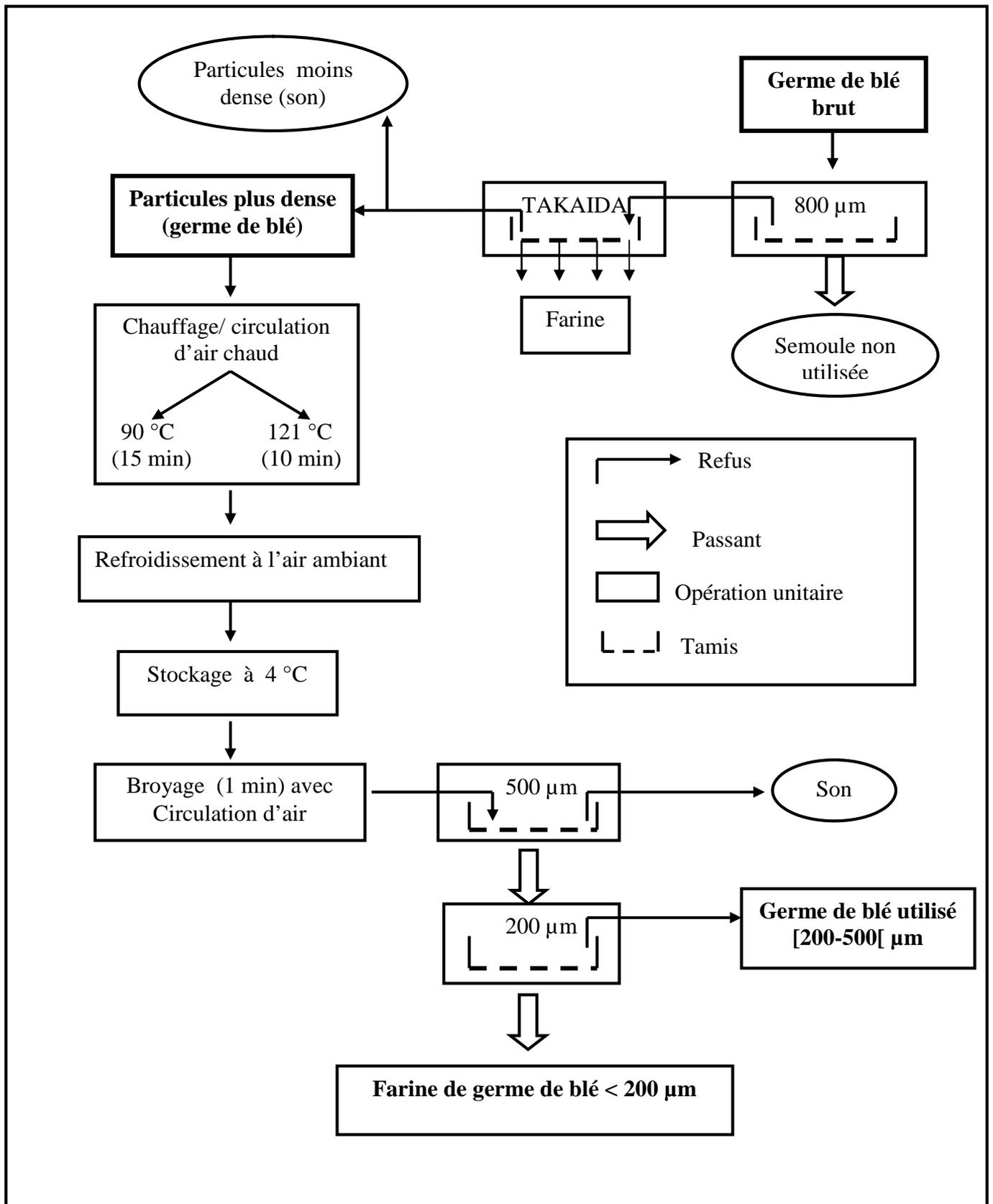


Figure 3. Diagramme adopté pour la préparation du germe de blé

1.2.1. L'épuration

Cette opération comporte différentes phases et se base sur des tamisages et aussi sur des mouvements de vibrations (BOLTE *et al.*, 1977) :

- le premier tamisage est réalisé à l'aide d'un tamis d'ouverture de maille 800 µm qui permet la séparation et l'élimination de la semoule ;
- le deuxième tamisage par TAKIEDA (tamis traditionnel) utilisé pour séparer le son du germe par différence de densité sous l'effet de vibration (NATRASS, 1975) et ce compte tenu du fait que les deux ingrédients ont pratiquement la même taille.

A chaque phase de tamisage, on estime les pertes et le pourcentage de refus afin d'estimer le rendement total de l'opération. La quantité de germe de blé tamisé pesée puis répartie en deux quantités égales afin de subir des traitements de stabilisation et aussitôt conservées au réfrigérateur à une température de 4°C.

1.2.2. Le traitement thermique

Il consiste à stabiliser le germe de blé vis-à-vis des activités enzymatiques (lipasiques et lipoxygénasiques principalement) (ZARRINTAN *et al.*, 2006). A cet effet, nous avons testé préalablement différents modes de traitements (tableau n° 8).

Tableau 8. Traitements thermiques testés sur le germe de blé

| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Traitement Paramètres </div> | Cuisson à la vapeur (15min) et séchage (étuve 200°C : 8, 10, 12 min) (SRIVASTAVA <i>et al.</i> , 2007) | Séchage | | | |
|---|---|-------------------|-------|-------------------|-------|
| | | Etuve | | Sécheur | |
| | | 90 °C | 121°C | 90 °C | 121°C |
| | | 5 | 10 | 5 | 10 |
| | | 15 | | 15 | |
| | | (min). | | (min). | |
| Couleur | Brunissement intense | Pas de changement | | Pas de changement | |
| Odeur | Odorat de brûle | Pas de changement | | Pas de changement | |
| Goût | Mauvais | Pas de changement | | Pas de changement | |

Nous avons adoptés deux types de traitements :

- Le premier traitement est effectué à 121°C pendant 10 min sur une quantité de germe de blé;
- Le deuxième traitement est réalisé à 90°C pendant 15 min sur la quantité restante.

Les deux traitements sont réalisés dans un sécheur armoire à air chaud conditionné. Le séchoir de marque MAXEI, type MC-100 est une armoire de séchage fonctionnant en discontinu par ventilation d'air chaud. Les dimensions de cette armoire sont de 1.26×1.44×1.19 m correspondant à un volume utile de 2.16 m³. La température maximale est de 200°C. L'entrée et la sortie de l'air sont dotées de papillons permettant le réglage du débit d'air. La température est mesurée à l'aide d'un thermocouple numérique à sonde mobile de marque HANNA instruments, MINITHER HI 8754. Il permet les mesures des températures de l'air à l'entrée et à la sortie des séchoirs avec mesure de température du thermomètre humide pour approcher l'humidité relative de l'air. L'étuve est de marque MEMMERT à un intervalle de température jusqu'à 200°C.

Après traitement, le germe de blé est immédiatement refroidi à l'air ambiant, puis conservé dans un réfrigérateur à 4°C dans des sacs fermés hermétiquement.

1.2.3. Le broyage

Les échantillons de germe de blé traités sont broyés à l'aide d'un broyeur de laboratoire de type IKA-Universal M20. Il s'agit d'un broyeur muni d'un refroidisseur à eau permettant l'obtention d'un produit uniforme, rapide sans provoquer un échauffement excessif de l'échantillon et peu de contact avec l'air extérieur. Le broyage est effectué en deux phases d'une minute chacune espacées par un temps de repos de 1 min afin d'éviter l'effet thermique qui risque de dénaturer les constituants du substrat.

Après broyage, les échantillons de germe sont épurés à l'aide de deux tamis dont l'ouverture des mailles est de 500 µm et 200 µm respectivement. Le but de cette technique consiste à séparer respectivement les grosses particules et les traces de son en tant que refus durant le premier tamisage et permettre l'obtention de la farine du germe broyé lors du deuxième tamisage. En effet, la fraction de germe de blé relativement pur de granulométrie]200-500] µm est conservé dans un réfrigérateur à 4 °C dans des sacs en plastique sous vide.

1.2.4. Estimation du rendement

Le rendement en germe de blé destiné à la fabrication des pâtes est calculé en rapportant la masse des broyats de particules de granulométrie de [200 -500[µm à la masse totale de la matière première (germe de blé brut) multiplié par 100.

1.3. Caractérisation physico-chimique des matières premières

Les analyses physico-chimiques des matières premières utilisées (semoule, germe de blé) dans le cadre de l'étude ont été effectuées au niveau de laboratoire vétérinaire régional de Constantine (LVRC) et l'unité aliments du bétail (ONAB) Ouled Hamla Wilaya d'Oum El-Bouaghi. Ces analyses ont été réalisées en trois (3) répétitions pour chaque échantillon préparé préalablement.

1.3.1. Détermination de la composition globale des matières premières

1.3.1.1. Teneur en eau (Humidité)

Elle est déterminée par dessiccation dans une étuve (BINDER : chambre de température multifonctionnelle de convection forcée avec régulateur R31) avec circulation d'air à une température de 130-133°C. Pour chaque échantillon étuvé, on pèse $5 \text{ g} \pm 1 \text{ mg}$ de chaque produit jusqu'au poids constant selon la norme AFNOR NF V 03-707 de juin 1989 (AFNOR, 1991). L'humidité est exprimée en pourcentage :

$$H = (m_1 - m_2) \times 100 / (m_1 - m_0)$$

Où

m_0 : la masse en gramme de la boîte vide et de son couvercle ;

m_1 : la masse en gramme de la boîte, de son couvercle et de la prise d'essai avant déshydratation ;

m_2 : la masse en gramme de la boîte, de son couvercle et de la prise d'essai après déshydratation (étuvage).

1.3.1.2. Dosage des cendres

Les cendres sont le résidu obtenu après incinération d'une prise d'essai de 3 g pesée à 1mg près dans un four à moufle type SIRIO model SR 700 jusqu'à obtention d'un résidu minéral ayant un poids constant (méthode 923.23, AOAC 2011). La teneur en cendres est déterminée comme suit :

- à 900°C pour la semoule (NF V 03-720 de décembre 1981 ; AFNOR ,1991) ;
- à 550°C pour le germe de blé (NF V 03-760 de décembre 1981 ; AFNOR, 1991).

Le pourcentage de cendres par rapport à la matière sèche (C) est calculé par la relation suivante :

$$C = Ri \times \frac{100}{Pe} \times \frac{100}{(100 - H)}$$

Où

Ri : résidu après incinération en g ;

Pe : prise d'essai en g ;

H : humidité de l'échantillon en %.

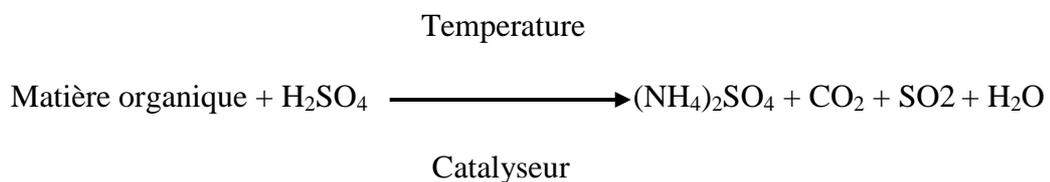
1.3.1.3. Dosage des protéines

La teneur en azote est mesurée par la méthode de Kjeldahl. Elle consiste en la minéralisation de l'échantillon, l'alcalisation des produits de la réaction, la distillation de l'ammoniac libéré et son titrage (méthode 992.23, AOAC 2011). La méthode comporte essentiellement trois étapes :

a. Minéralisation

La minéralisation est effectuée pendant 3 heures à l'aide d'un excès d'acide sulfurique (96 %, d= 1,84) concentré et chaud, en présence d'un mélange de catalyseurs (K₂SO₄, CuSO₄) dans un minéralisateur de type SELECTA model RAT-2. Elle se poursuit jusqu'à la décoloration complète du contenu des matras.

L'azote total est donc obtenu sous la forme minérale type NH₄ :



b. Distillation

Pour transformer les ions ammonium (NH₄⁺) du minéralisat en ammoniac (NH₃), on doit alcaliniser le minéralisat ; pour cela on utilise un excès de base forte la lessive de soude (NaOH) à 30 %. Ainsi, le minéralisat est tout d'abord neutralisé puis alcalinisé. On a alors :



Au cours de la distillation, l'ammoniac est entraîné par la vapeur et récupéré dans l'acide borique H_3BO_4 à 4 % en présence d'indicateur mixte (Tashiro indicateur). L'ammoniac récupéré est titré avec une solution HCl à 0.25 N. L'opération de distillation est réalisée dans un appareil automatique : SELECTA model PRO-NITRO II (unité de distillation automatique), alors que l'opération de titration est réalisée manuellement.

c. Titration

Le titrage ne se fait pas simultanément avec la distillation. Il est effectué aussi rapidement que possible une fois la distillation terminée en s'assurant que la température du distillat ne dépasse pas 25°C pour éviter les pertes d'ammoniac. L'ammoniac récupéré est titré avec une solution HCl à 0.25 N jusqu'au virage de couleur de vert au violet.

La teneur en azote total (N) exprimée en pourcentage en masse du produit, est estimée par l'équation suivante :

$$N = \frac{1.4 \times (V_1 - V_0) \times T}{P_0} \times \frac{100}{(100 - H)}$$

Où

P_0 : Masse de la prise d'essai (g) ;

V_0 : Volume en millilitres de la solution HCl (0.25N) utilisé pour l'essai à blanc ;

V_1 : Volume en millilitres de la solution HCl (0.25N) utilisé pour la détermination ;

T : est la normalité de la solution d'HCl utilisée pour les titrages.

La teneur en protéines (P) est approchée en multipliant la teneur en azote par un facteur de conversion $K= 5.7$ pour la semoule et germe de blé (méthode 992.23, AOAC 2011). Le résultat exprimé en gramme pour 100 g de matière sèche est donné par la formule suivante :

$$P = N \times K$$

1.3.1.4. Dosage des matières grasses brutes

Les lipides sont déterminés selon la norme AFNOR NF V03-713 de février 1984 (AFNOR, 1991). Le dosage se fait en trois étapes :

- **Hydrolyse** : Une hydrolyse à chaud d'une prise d'essai de 30 g de matière première à l'aide de l'acide chlorhydrique (4 mol/l, $d = 1.18$) pendant 1 heure pour libérer les lipides est

réalisée dans un appareil de type BUCHI 411 (unité d'hydrolyse). L'hydrolysats est filtré sur un verre fritté.

- **Extraction** : Après séchage pendant 6 heures à 103°C dans une étuve de type BINDER, une extraction des lipides par l'éther de pétrole (point d'ébullition 40-60°C) et une dessiccation du résidu de matière grasse sont réalisées dans un appareil de type GERHARDT, GMBH/ Co. KG (unité d'extraction).

- **Elimination** : de l'éther de pétrole sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif type ROTAVAPOR HEIDOLPH LABOROTA 4002.

La teneur en matière grasse totale (L) en pourcentage par rapport à la matière sèche, est donnée par la relation ci-après :

$$L = (M_0 - M_1) \times \frac{100}{P_e} \times \frac{100}{(100 - H)}$$

Où

M_0 : masse en gramme du matras avec résidu de matière grasse ;

M_1 : masse en gramme du matras vide ;

P_e : la masse en gramme de la prise d'essai ;

H : teneur en eau de l'échantillon en pour-cent de l'échantillon humide.

1.3.1.5. Glucides totaux

La teneur en glucides totaux (GT) exprimée en gramme pour 100 g de matière sèche (ms) est déterminée par soustraction de la somme des teneurs des précédents composants majeurs à partir de 100 g de matière sèche :

$$GT = 100 - (C + P + L)$$

Où

C : Taux de cendres totales (% de ms) ;

P : Teneur en protéine total (% de ms) ;

L : Teneur en matière grasse totale (% de ms).

1.3.2. Granulométrie

La granulométrie est l'étude de la distribution de la taille des particules. C'est une caractéristique fondamentale en relation directe avec toutes les opérations unitaires de broyage, de séparation, de mélange et de transfert mais aussi avec les phénomènes d'échange et de réactivité, qu'ils soient physiques (migration d'eau, séchage, solubilisation), chimiques (oxydation) ou enzymatique (digestion des aliments) (MELCION, 2000). Les principales techniques utilisées pour la détermination granulométrique sont le tamisage et la diffraction laser. Le tamisage est la méthode la plus fréquente, la plus simple et la moins onéreuse.

Des échantillons de 100 g de matières premières (semoule et germe de blé) sont déposés au sommet d'un plansichter de laboratoire type ROHTEX pendant 10 min. Le tamisage de la semoule et de germe de blé est réalisé par des tamis dont les ouvertures des mailles sont de 500 µm, 400 µm, 355 µm, 300 µm, 250 µm, 200 µm. Les retenues sur chacun des tamis sont ensuite pesées.

1.4. Formule de l'étude

Les formules utilisées sont basées sur l'enrichissement de la semoule de blé dur par des teneurs variables en germe de blé. La supplémentation a été réalisée en fonction d'un plan d'expérience préalablement établi ; ce qui nous a amené à étudier plusieurs formulations.

Du point de vue nutritionnel, la formule proposée est basée sur les avantages connus de la supplémentation pâtes- germe de blé (PINARLI *et al.*, 2004). Du côté technologique, les paramètres les plus importants qui méritent d'être étudiés sont la faisabilité et l'acceptation des produits fabriqués par les consommateurs. En effet, l'ajout du germe blé à la formule de départ (semoule de blé dur) permettrait son enrichissement en éléments nutritifs principalement les protéines en espérant obtenir un produit de meilleurs propriétés technologiques et pastifiables.

La formule semoule- germe de blé proposée est étudiée en comparaison avec la semoule de blé dur (témoin) et les pâtes obtenues seront comparées aux pâtes de blé dur fabriquées dans les mêmes conditions.

1.5. Plan d'expériences

A travers cette étude, l'objectif recherché consiste à trouver une réponse qui pourrait révéler les caractéristiques culinaires et des paramètres de couleur des pâtes issues de mélange qui se rapprocherait le plus de celles des pâtes témoins à base de semoule de blé dur.

A ce sujet, un plan d'expérience central ayant deux variables, teneurs en germe de blé (X_1) et en eau des pâtes (X_2), a été choisi afin d'obtenir une gamme de consistance de pâtes plus ou moins importante. Le modèle étudié étant un modèle à deux facteurs, il permet d'estimer les coefficients de modèle du second degré traduisant la relation de cause à effet entre les facteurs retenus et la réponse souhaitée. Ce plan nécessite la réalisation de huit expériences représentant des combinaisons de trois niveaux attribués à chacun des deux facteurs tout en considérant les réponses correspondantes. Cinq points centraux (00) ont été ajoutés pour appuyer ce plan d'expériences ; ce qui donne un total de 13 essais.

1.5.1. Modèle mathématique

Le modèle mathématique traduisant la dépendance de chaque réponse Y étudié en fonction des deux variables codées (X_1 et X_2) s'écrit :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1X_1 + b_{22}X_2X_2 + b_{12}X_1X_2$$

Où

b_0 est une constante ;

b_1, b_2 , exprimant l'effet principal de chaque variable ;

b_{12} exprime l'interaction entre les deux variables ;

b_{11}, b_{22} indiquant si l'une des deux variables donne un maximum ou un minimum dans le domaine expérimental.

1.5.2. Niveaux des variables

Nous avons attribué pour chaque variable codée (X_i) les niveaux suivant :

$$-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$$

Pour que le plan soit orthogonal, la valeur de α a été fixée à 1,414. Cette valeur qui n'est que le rayon r du cercle sur lequel sont représentés les points expérimentaux permettra le calcul des régresseurs ($b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$) des modèles mathématiques indépendamment les uns des autres. La matrice d'expériences du plan composite orthogonal centré à deux variables est donnée dans le tableau n° 9.

Tableau 9. Matrice d'expérience du plan composite orthogonal centré à deux variables

| Essais | Matrice | |
|--------|-------------------------------|------------------------------|
| | X ₁ (Germe de blé) | X ₂ (Hydratation) |
| 1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 |
| 3 | -1 | +1 |
| 4 | +1 | +1 |
| 5 | -1.414 | 0 |
| 6 | +1.414 | 0 |
| 7 | 0 | -1.414 |
| 8 | 0 | +1.414 |
| 9 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 |

La représentation graphique des 13 points expérimentaux se fait à travers le cercle avec un tracé bidirectionnel.

1.5.3. Détermination des variables réelles

1.5.3.1. Germe de blé

D'après la littérature, les concentrations de germe de blé les plus couramment utilisées en pastification vont de 0 à 20 % (SRIVASTAVA *et al.*, 2007), ou de 0 à 25 % (PINARLI *et al.*, 2004 ; UMAIR ARSHAD *et al.*, 2008). D'après BILGIÇLI *et al.*, (2006), les taux de germe de blé incorporés pour enrichir les dérivés laitiers (type yaourt) peuvent atteindre 50 %. Les bornes de l'intervalle concernant cette variable dans le cadre de notre étude ont été choisies entre 0 et 25 % (tableau n° 10).

Tableau 10. Valeurs calculées du variable codée correspondant aux niveaux attribués

| Variable | Niveau | | | | |
|--|--------|------|------|-------|--------|
| | -1.414 | -1 | 0 | +1 | +1.414 |
| X ₁ : Germe de blé (g pour 100g de semoule) | 0 | 3.66 | 12.5 | 21.34 | 25 |

1.5.3.2. Hydratation

Selon la littérature (ABECASSIS *et al.*, 1994 ; PETITOT, 2009), la quantité d'eau ajoutée pour la préparation de 100 g de pâte à base de semoule de blé dur de façon à obtenir une teneur en eau finale de 44 - 49 % (ms).

Concernant le taux d'hydratation des pâtes de notre étude, les quantités d'eau à ajouter ont été déterminées sur la base des essais préliminaires (tableau n° 11). Pour 100g de semoule de blé dur nous avons ajouté 2 g du sel et en faisant varier les taux d'hydratations. Le taux minimal a été déterminé sur la base de l'obtention d'une pâte qui tient dans la main et le taux maximal d'hydratation fixé lorsqu'on obtient des pâtes trop collantes. L'intervalle d'hydratation choisis dans ce travail varie entre 49 et 59 g d'eau pour 100 g de semoule de blé dur.

Tableau 11. Essais préliminaires pour le choix des taux d'hydratations

| Essai | Quantité d'eau à ajouter (g) | Appréciation de la pâte |
|-------|------------------------------|---|
| 1 | 28.99 | pâte qui ne tient pas, manque d'hydratation |
| 2 | 44 | pâte qui ne tient pas, manque d'hydratation |
| 3 | 49 | pâte qui tient demande de pétrissage |
| 3 | 54 | pâte qui tient, bien hydraté |
| 4 | 59 | Pâte collante |
| 5 | 65 | Pâte trop collante, difficile à pétrir |

Pour les 13 couples (Germe de blé- Hydratations), les niveaux d'hydratations ont été imposés par le plan d'expérience (tableau n°12).

Tableau 12. Valeurs réelles des couples germe de blé-hydratations utilisés pour la réalisation du plan d'expérience

| Essais | Germe de blé (g pour 100 g de semoule) | Hydratation (g pour 100 g de semoule) |
|---------------|---|--|
| 01 | 3.66 | 50.47 |
| 02 | 21.34 | 50.47 |
| 03 | 3.66 | 57.53 |
| 04 | 21.34 | 57.53 |
| 05 | 0 | 54 |
| 06 | 25 | 54 |
| 07 | 12.5 | 49 |
| 08 | 12.5 | 59 |
| 09 | 12.5 | 54 |
| 10 | 12.5 | 54 |
| 11 | 12.5 | 54 |
| 12 | 12.5 | 54 |
| 13 | 12.5 | 54 |

1.6. Essai de pastification

Cette opération consiste à procéder au test de pastification qui lui-même réside en la fabrication des pâtes (types laminées, coudées incorporées par le germe de blé). Les principales étapes de fabrication ont été réalisées selon un protocole standard de production des pâtes alimentaires décrit par MESTRES *et al.*, 1989 ; ABECASSIS *et al.*, 1994 et PETITOT *et al.*, 2009a ; PETITOT *et al.*, 2010. Le diagramme et le procédé de fabrication ont été réalisés au niveau du laboratoire LNTA (figure n° 4). Le temps et les nombres de pétrissage ainsi que la durée de repos ont été déterminés à partir d'essais préliminaires.

En raison de l'absence de la chaîne pilote, la fabrication est opérée dans les conditions habituelles avec le même matériel connu et employé dans la production des pâtes alimentaires traditionnelles. Les formules étudiées sont imposées par le plan d'expérience d'ou pour chaque préparation nous avons pesé 100 g de semoule de blé dur, 2 g de sel, X_1 g de germe de blé avec X_2 g d'eau distillée. Trois fabrications ont été réalisées pour le témoin (blé dur) ainsi que pour chaque formule proposée.

1.6.1. Matériels utilisés dans la fabrication des pâtes

Balance : Une balance technique de marque SARTORIUS basic type BA610 d'une portée de 600 g avec une précision de lecture de 10^{-2} .

Le pétrin : Un mélangeur à hélice de marque HEIDOLPH type RZR 2020 (Allemagne) a été utilisé avec des vitesses de 120 et 200 tours/ min pour la préparation des pâtes pour les tests de pastification.

La guessâa : la « *guessâa* » utilisée est un récipient en bois d'un diamètre de près de 60 cm, et d'une profondeur de 9 cm. Elle est utilisée couramment pour le pétrissage des pâtes boulangères ou pastières traditionnelles (*chekhchoukha, trida, etc*). Dans le cas de notre essai, la *guessâa* a été utilisée au cours de la phase d'hydratation et début de malaxage.

Machine à pâte :

✓ *Types laminées* : C'est une machine ménagère de marque MARCATO. Elle comporte différentes parties. Partie laminage avec des rouleaux de passage numéroté de 1 à 9, partie de découpage en différentes formes.

✓ *Types coudées* : C'est une machine ménagère de marque MARCATO. Elle contient quatre moules. Le premier pour la pâte coudée lisse, le second pour la pâte coudée striée de petit diamètre, le troisième pour la pâte coudée striée de grand diamètre et enfin le quatrième pour la fabrication de pâte en forme de ressort.

Couteau : il s'agit d'un bistouri de côté aigu, utilisé pour la découpe des pâtes pendant le laminage et pour la découpe des pâtes coudées à la sortie.

1.6.2. Les étapes du diagramme de fabrication

1.6.2.1. Hydratation/malaxage

Cette opération consiste à incorporer X_1 g de germe de blé pour 100 g de semoule et hydratée avec de l'eau distillée (X_2 g hydratation, ajoutée de façon manuelle) correspondant aux valeurs réelles des couples de germe de blé-hydratations du plan d'expérience. Cette phase de fabrication est réalisée de deux manières :

- Le mélange est malaxé avec un mélangeur HEDOLPH pendant 5 min à 120 tr/ min (phase d'hydratation) puis durant 15 min à 60 tr/ min (phase de malaxage) en changeant le sens de rotation toutes les minutes. Ce traitement nous a permis d'obtenir des pâtes non homogènes avec des surfaces présentant des fissures.

- Le malaxage manuel de la pâte après un premier pétrissage constitué à partir d'un mélange de formulations élaborées pendant 15 minutes suivie d'une phase de repos de 5 minutes et d'un second pétrissage de durée de 10 minutes.

Parmi ces deux traitements, il ressort que la technique manuelle s'avère la plus plausible et la plus efficace car elle permet l'obtention d'une pâte homogène et lisse.

1.6.2.2. Mise en forme

- **Cas des pâtes types laminées** : un laminage grossier est appliqué dans ce type de pâtes au moyen d'un laminoir consacré à la fabrication des pâtes traditionnelles type MARCATO. Les pâtes laminées sont ensuite découpées avec un emporte-pièce attaché au laminoir.

- **Cas des pâtes types coudées** : la pâte est extrudée à travers une vis sans fin comportant des moules de différentes formes. Les échantillons sont collectés à la sortie de filière, coupés à l'aide de ciseaux en morceau et disposées dans des plats.

1.6.2.3. Séchage

Les pâtes obtenues sont étalées en couche sur un drap et laissées à la température ambiante contrôlée de l'ordre de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24 heures dans une pièce aérée. Les échantillons sont ensuite stockés dans des sacs en plastiques à l'abri de l'humidité et à température ambiante.

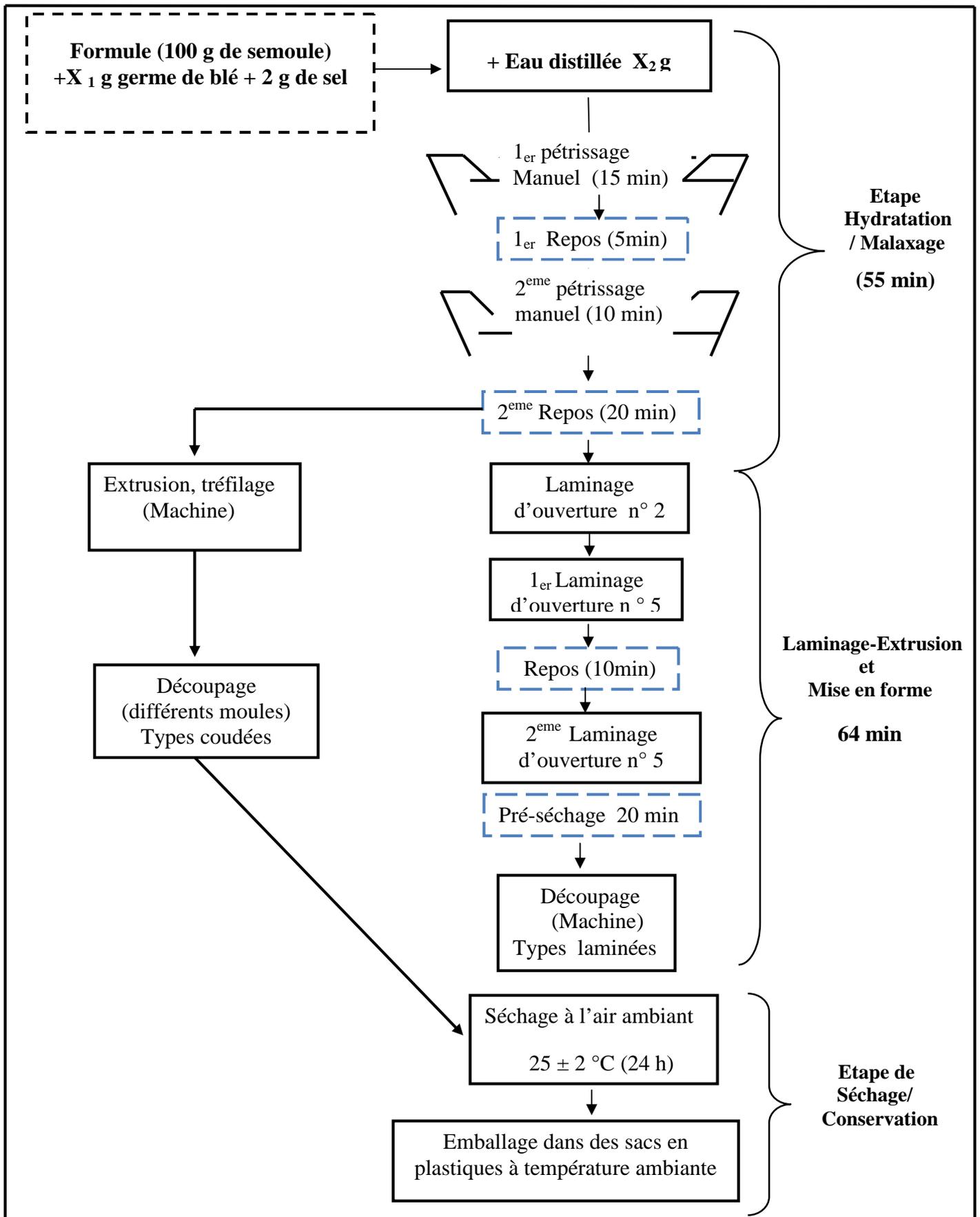


Figure 4. Diagramme adopté pour la fabrication des pâtes alimentaires

1.7. Appréciation de la qualité des pâtes

Les propriétés qui définissent la qualité des pâtes alimentaires sont déterminées à travers leur aspect à l'état cru, leur comportement durant et après la cuisson, leur valeur nutritionnelle et leur état hygiénique (AUTRAN *et al.*, 1986 ; NASEHI *et al.*, 2011).

1.7.1. Qualité culinaire

La qualité culinaire des pâtes alimentaires intègre l'ensemble des caractéristiques suivantes :

- Le temps de cuisson ;
- Propriétés viscoélastiques : la texture des produits cuits qui rend compte de la fermeté et de la masticabilité des pâtes après cuisson et ce à partir duquel on peut déterminer par des mesures à caractère rhéologique (fermeté, viscoélasticité, ténacité) (MARCHYLO *et al.*, 2004 ; ABECASSIS, 2011) ;
- L'état de surface ou de désintégration des produits cuits dépend du degré d'adhésion des brins (notion de collant) et aussi de l'aspect plus ou moins lisse des produits cuits (notion de délitescence) (SUNG *et al.*, 2003 ; ABECASSIS , 2011) ;
- l'absorption d'eau ;
- les pertes à la cuisson ;
- l'arôme, le goût et la couleur (FEILLET, 2000).

La qualité culinaire des pâtes fabriquées dans notre étude a été appréciée par la détermination du Temps Optimum de Cuisson (TOC) et du test du Degré de Délitescence (DD). L'appréciation des propriétés culinaires a été effectuée sur les aspects suivants :

1. La pâte du témoin fabriquée à partir de la semoule de blé dur utilisée dans le cadre de notre essai. Elle est produite dans des conditions de fabrication différentes de celle commercialisée et elle est utilisée comme référence de comparaison avec les pâtes enrichies et fabriquées.
2. La pâte du témoin commercial de semoule de blé dur représentée par différents types de pâtes commerciaux.
3. Les 13 couples (Germe de blé- Hydratations) du plan d'expérience permettent de faire ressortir les meilleures recettes.

4. Les points d'optimisations validées : ces points ont été caractérisés par des tests de pastification suivant les mêmes étapes du diagramme de fabrication (figure n° 4), observées avec des prises de vue effectuées à l'aide un appareil photo du type SONY (modèle de résolution 9M pixels). Egalement, le degré de délitescence, l'indice de gonflement, le dosage de l'acidité de l'eau de cuisson et l'analyse sensorielle sur des pâtes optimales ont fait l'objet d'étude complémentaire.

1.7.1.1. Temps optimal de cuisson

Les temps minimal, optimal et maximal de cuisson ce qui correspond respectivement à la durée à partir duquel l'amidon est gélatinisé, au temps nécessaire pour donner à la pâte la texture recherchée et au temps au-delà duquel les produits se désintègre dans l'eau de cuisson (FRANK *et al.*, 2002 ; ABECASSIS, 2011).

La cuisson des pâtes est réalisée selon un protocole standardisé (ABECASSIS *et al.*, 1994 ; FRANK *et al.*, 2002 ; PETITO *et al.*, 2009c ; méthode 16-50- AACC 1990 in NASEHI *et al.*, 2009). Un échantillon de 100 g de pâtes découpées en brins de 20 cm de long environ est plongé dans 3 litres d'eau distillée bouillie contenant 7 g/ litre de sel. A des intervalles de temps réguliers soit toutes les 30 s, un brin est prélevé puis immédiatement écrasé entre deux plaques de plexiglas afin de visualiser la ligne blanche correspondant à l'amidon non gélatinisé. Le temps optimal de cuisson (TOC) correspond au temps à partir duquel la ligne blanche a totalement disparu (amidon complètement gélatinisé). Le temps de surcuisson est obtenu par addition de 6 min au temps optimum nécessaire à la cuisson des spaghettis (ABECASSIS *et al.*, 1994).

1.7.1.2. Degré de délitescence

La délitescence représente un critère fondamental de la qualité culinaire des pâtes cuites. Ce paramètre est déterminé suivant la méthode AACC (méthode 16-50-AACC 1990) in NASEHI *et al.* (2009) ; ABECASSIS *et al.* (1994).

La préparation des échantillons pour la détermination des pertes à la cuisson (degré de délitescence) s'est faite de la manière suivante : Un échantillon de 100 g de pâtes sèches découpées en brins de 20 cm de long environ est plongé dans un bécher contenant 3 litres d'eau distillée bouillie contenant 7 g/ litre de sel. Les échantillons sont bouillis à des temps optimums de cuisson et de surcuisson (TOC+ 6 min) (ABECASSIS *et al.*, 1994 ; FRANK *et al.*, 2002). Ensuite, les échantillons sont égouttés à travers un passoir pendant 5 min. L'eau de cuisson (25 ml) est séchée dans une étuve à ventilation d'air réglée à 102°C pendant 15h.

Le degré de délitescence est ensuite calculé suivant la formule suivante (ABECASSIS *et al.*, 1994) :

$$DD = (DM - 0.175) \times V_f / 25 \times (100 - W)$$

Où

DM : poids de résidu en g ;

V_f : volume final de l'eau de cuisson (ml) ;

W : humidité des pâtes non cuites (%) :

DD est donc exprimé en gramme de DM (matière sèche) pour 100 g de DM des pâtes non cuites.

1.7.1.3. Gonflement (Poids à la cuisson)

Le gonflement renseigne sur la capacité d'absorption d'eau des pâtes cuites. La procédure de préparation des échantillons pour la détermination de l'indice de gonflement est la même décrite dans la section de détermination du temps optimum de cuisson en 1.7.1.1. Des échantillons de 100 g sont plongées dans 3 litres d'eau distillée bouillie contenant 7g/ litre de sel jusqu' à des temps optimum de cuisson et de surcuisson (TOC+6min) (ABECASSIS *et al.*, 1994 ; FRANK *et al.*, 2002). Ces échantillons sont ensuite drainés et égouttés à travers un passoir pendant 5 min (PURNIMA *et al.*, 2011).

Le poids à la cuisson où l'indice de gonflement (IG) est déterminé par la pesée des pâtes égouttées et calculé selon l'équation (PETITOT *et al.*, 2010) :

$$IG (\% \text{ ms}) = \frac{\text{Masse pâtes cuites (TOC+ 1min)} - \text{Masse pâtes sèches}}{\text{Masse pâtes sèches}} \times 100$$

1.7.2. Couleur des pâtes

La couleur des pâtes est la résultante de trois indicateurs à savoir : la composante jaune désirable (mesuré par l'indice b*) et la composante brun (100- L*) et rouge (a*) indésirable (FEILLET *et al.*, 1974 ; HOULIAROPOULOS *et al.*, 1981).

L'analyse de la couleur a été réalisée sur des pâtes sèches broyées de blé dur témoin, sur celles ayant fait l'objet d'incorporation du germe de blé pour les 13 points imposés par le

plan d'expérience. Celle-ci est mesurée à l'aide du chromamètre Minolta (Modèle CR-400, Minolta Co., Osaka, Japon) en utilisant le système colorimètre Hunter L*, a*, b* international comme indiqué par ABECASSIS *et al.* (1994), INGELBRECHT *et al.* (2001), FRANK *et al.* (2002), PINARLI *et al.* (2004), PETITOT *et al.* (2010), SAWSAN *et al.* (2010) et HOWARD *et al.* (2011).

L* représente la luminance (clarté) allant du noir (valeur : 0) au blanc (valeur : 100). Le brunissement est égal $100 - L^*$ (indice du brun) (FEILLET *et al.*, 1974).

La composante a* (indice de rouge) représente la gamme allant du rouge (+128) au vert (-128).

La composante b* (indice de jaune) représente la gamme allant du jaune (+128) au bleu (-128). A ce sujet, trois essais ont été réalisés pour chaque paramètre étudié.

1.7.3. Détermination de l'acidité de l'eau de cuisson des pâtes cuites

L'acidité est un paramètre qui exprime l'état de fraîcheurs des échantillons. Elle dépend de nombreux facteurs (conditions d'extrusions et de fabrications des pâtes alimentaires, effet d'enrichissement, qualité de cuisson) (NASEHI *et al.*, 2009 ; NASEHI *et al.*, 2011).

L'objectif de dosage de l'acidité de l'eau de cuisson des pâtes optimales est de vérifier la stabilité des traitements thermiques appliqués sur le germe de blé incorporé. Ces pâtes sont emballées dans des sacs en plastiques et conservées à température ambiante.

Ce paramètre est déterminé suivant la méthode AOAC (méthode titrimétrique 947.05- AOAC 2011) utilisée par de nombreux auteurs (PINARLI *et al.*, 2004 ; NASEHI *et al.*, 2011). Cette méthode consiste à la cuisson des échantillons étudiés selon le protocole standard décrit en section (1.7.1.1) : Un échantillon de 100 g de pâtes découpées en brins de 20 cm de longueur environ est plongé dans 3 litres d'eau distillée bouillie contenant 7 g/ litre de sel. La cuisson est arrêtée à temps de surcuisson (OCT +6 min).

L'acidité titrable est obtenue à partir d'une prise de 10 ml d'eau de cuisson des pâtes qui est titrée avec une solution à base de NaOH 0.01 N après addition de quelques gouttes de phénolphtaléine 1 % comme indicateur. L'acidité titrable est exprimée en % d'acide lactique (% LA)/ poids.

(1 ml 0.01N NaOH = 0.0009 g acide lactique) selon la formule :

$$\% \text{ LA} = V / 10$$

où V : représente la chute de la burette (volume de la solution sodique 0.01N nécessaire pour la neutralisation, en ml).

1.7.4. Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle s'est déroulée en trois étapes. Nous avons réalisé un test triangulaire, un test de classement et un test hédonique. Ces tests sont réalisés sur des pâtes sèches et cuites.

1.7.4.1. Les sujets

Le panel est constitué de 9 sujets de sexes masculins et féminins, enseignants et étudiants en post- graduation de l'Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaire (I.N.A.T.A.A.) de l'Université Constantine 1. Ils sont recrutés selon leur motivation et leur disponibilité pour participer au test. Cinq des 9 sujets constituent un panel déjà entraîné. Il leur est montré la façon dont les bulletins seront remplis après distribution.

Nous avons évité de discuter de l'aliment qui sera soumis aux essais en expliquant la méthode et les protocoles d'analyses utilisées pour réduire la confusion et rendre la tâche plus facile aux dégustateurs. Ils doivent être bien informés préalablement des procédures employées de la manière de remplir les cartes de notation pour qu'ils puissent participer aux essais sur la même base. Il est recommandé aux dégustateurs d'éviter l'utilisation de produits dont l'odeur est prononcée comme par exemple le savon, la lotion et le parfum avant de participer. Les sujets doivent éviter également de manger, de boire ou de fumer au moins 30 minutes avant l'entame du test.

1.7.4.2. Déroulement de l'analyse

L'analyse sensorielle des pâtes optimales, témoin sèches et cuites a été effectuée en trois essais : un test triangulaire, un test de classement par rang et un test hédonique. Les pâtes fabriquées et testées sont préalablement découpées en brins de 10 cm de longueur avant chaque analyse.

a. Test triangulaire

L'essai triangulaire est une forme de test de différence dont on se sert couramment pour déterminer s'il existe des différences perceptibles entre deux échantillons (ISO 4120, 1983 ; WATTS *et al.*, 1991).

- **Description de la tâche des dégustateurs** : On présente aux dégustateurs trois échantillons codés, deux identiques et un différent, on leur demande d'identifier l'échantillon différent et de remplir la fiche donnée dans la figure n° 5. Ils doivent choisir un échantillon, même s'ils ne peuvent pas distinguer de différence entre les échantillons (c'est-à-dire qu'ils doivent choisir au hasard en cas de doute).

| | |
|---|-----------------------|
| FICHE DE TEST TRIANGULAIRE | |
| NOM : | |
| PRENOM : | |
| DATE : | |
| Question : Notez l'échantillon parmi les trois que vous percevez différent? | |
| Code | Echantillon différent |
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |

Figure 5. Bulletin du test triangulaire

- **Présentation des échantillons** : Les deux échantillons distincts (A et B) sont présentés aux dégustateurs par groupes de trois, c'est-à-dire qu'ils reçoivent soit deux échantillons A et un B ou deux échantillons B et un A. Les trois échantillons sont présentés dans des contenants identiques codés avec des numéros aléatoires à 3 chiffres. Les trois numéros de codes des échantillons remis à chaque dégustateur doivent être différents, même si deux échantillons sont identiques. Il y a six possibilités d'ordre de présentation avec le test triangulaire et ils sont indiqués au tableau n° 13. On doit se servir de chaque ordre de présentation un nombre égal de fois pour équilibrer l'ordre de présentation. Cela n'est possible que s'il y a six dégustateurs ou un multiple de six. Les échantillons sont présentés tous ensemble à chaque dégustateur dans l'ordre retenu afin qu'ils puissent évaluer les échantillons de la gauche vers la droite. Ils peuvent les goûter plusieurs fois.

Tableau 13. Six Ordres possibles pour servir les échantillons dans un test triangulaire

| Numéro du dégustateur | Ordre de présentation des échantillons | | |
|--------------------------|--|---------|-----------|
| | Premier | Second | Troisième |
| 1 | 256 (A) | 831 (A) | 349 (B) |
| 2 | 256 (A) | 349 (B) | 831 (A) |
| 3 | 670 (B) | 256 (A) | 831 (A) |
| 4 | 349 (B) | 670 (B) | 256 (A) |
| 5 | 349 (B) | 256 (A) | 670 (B) |
| 6 | 831 (A) | 349 (B) | 670 (B) |

b. Test de classement par rang

Ce test a pour objectif de déterminer la mesure dans laquelle le consommateur accepte un produit. L'acceptation d'un produit alimentaire indique en général la consommation réelle de ce produit (achat et consommation) (WATTS *et al.*, 1991).

- **Description de la tâche des dégustateurs :** On demande aux dégustateurs de classer par rang des échantillons codés en fonction de l'acceptation en allant du moins acceptable au plus acceptable (figure n° 6). En règle générale, on ne permet pas les égalités.

- **Présentation des échantillons :** On présente cinq échantillons dans des contenants identiques, codés avec des numéros aléatoires à 3 chiffres. Chaque échantillon a un numéro distinct. Tous les échantillons sont présentés simultanément à chaque dégustateur dans un ordre prévu à l'avance ou au hasard, et ils ont droit de goûter plusieurs fois les échantillons secs et cuits. La figure n° 6, donne le bulletin à remplir pour le classement par rang de l'acceptation.

| FICHE DE TEST DE CLASSEMENT | |
|---|--------------|
| NOM : | |
| PRENOM : | |
| | DATE : |
| - Veuillez classer les cinq échantillons par ordre de préférence. | |
| Code | Classement |
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |

Figure 6. Bulletin du test de classement par rang

c. Test hédonique

Dans cette étude, nous avons suivi une démarche de réalisation des profils sensoriels et nous nous sommes intéressés à l’analyse réelle des échantillons secs et cuits sur la base de la liste des descripteurs. Une note sur une échelle de 1 à 9 est attribuée pour chaque caractéristique. Le 1 représente une intensité faible et le 9 une intensité élevée. Les essais de dégustation ont été réalisés le matin. Les échantillons sont présentés à chaque juge séparément dans un ordre randomisé dont chaque assiette contenait environ 10 g de pâtes. Les critères de jugement des pâtes sèches portaient essentiellement sur une appréciation visuelle de la forme, l’aspect et la couleur.

Pour les pâtes cuites, les paramètres d’analyse portaient également sur l’aspect, la couleur ainsi que leur fermeté à la dent qui est définie selon la norme *ISO 4120* comme étant la résistance au cisaillement des pâtes entre les dents et à l’écrasement entre la langue et le palais. La prise en masse des brins renseigne sur leur collant (Figure n° 8). Ce dernier est apprécié visuellement par la facilité d’émottage à l’aide d’une fourchette ainsi qu’en bouche (GUEZLANE *et* ABECASSIS, 1991).

FICHE DE TEST HEDONIQUE

NOM :

PRENOM :

DATE :

Veillez examiner et goûter chaque échantillon de pâte sec et donnez une note de 1 à 9 selon l'intensité du caractère.

| | A | B | C | D | E |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Aspect lisse | | | | | |
| Couleur | | | | | |
| Fissures | | | | | |
| Taches blanches | | | | | |
| Piqûres | | | | | |

Figure 7. Bulletin pour le test hédonique des pâtes sèches avec un barème de notation allant de 1 à 9.

FICHE DE TEST HEDONIQUE

NOM :

PRENOM :

DATE :

Veillez examiner et goûter chaque échantillon de pâte cuit et donnez une note de 1 à 9 selon l'intensité du caractère.

| | A | B | C | D | E |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Aspect lisse | | | | | |
| Couleur | | | | | |
| Fermeté | | | | | |
| Collant | | | | | |

Figure 8. Bulletin pour le test hédonique des pâtes cuites avec un barème de notation allant de 1 à 9

1.8. Analyse statistique

Toutes les mesures sont effectuées en triple. La saisie et le traitement statistique des données ont été réalisés à l'aide du logiciel statistique XLSTAT (2008). Les résultats sont exprimés en tant que moyenne \pm écartype. La comparaison entre plusieurs moyennes est effectuée par l'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur. Des tests à posteriori appropriés (TuKey/Kramer de Bufferroni/Dunn) sont utilisés pour la comparaison entre les groupes individuels. Pour le plan d'expérience construit, l'erreur expérimentale "Erreur pure", est estimée à travers les points centraux du plan d'expérience. Pour toutes les réponses étudiées, le nombre de ddl est de 7 pour l'erreur totale, de 4 pour la somme des écarts due à la perte d'ajustement et de 3 pour la somme des écarts de l'erreur pure. Un χ^2 d'ajustement est calculé par l'estimation de la statistique F de Fisher Snedecor. Cette dernière est obtenue par le rapport de la différence des écarts moyens de la variation de perte d'ajustement sur l'erreur pure. Lorsque la variance d'ajustement est négligeable devant la variance de l'erreur expérimentale, le modèle est considéré comme bien ajusté (GOUPY, 1999). L'ANOVA à un facteur a été utilisée pour l'analyse des données du test Hédonique et triangulaire. Dans ce travail, le niveau de significativité est fixé à 0.05.

2- Résultats et discussion

2.1. Caractéristiques physico-chimiques des matières premières

2.1.1. Détermination de la composition globale des matières premières

Les teneurs moyennes des constituants majeurs des matières premières utilisées pour la fabrication des pâtes alimentaires sont exprimées en (% ms) dans le tableau n° 14.

Tableau 14. Composition chimique en g pour 100 g de masse sèche

| | Humidité (%) | Protéines (% ms) | Lipides (% ms) | Cendres (% ms) | Glucides* (%ms) | Total |
|------------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|
| SBD | 14.12±0.28 | 13.52±0.42 | 0.7±0.10 | 0.95±0.13 | 69.84 | 100 |
| GBB | 8.66±0.30 | 31.38±0.53 | 7.2±0.24 | 4.2±0.36 | 52.61 | 100 |
| GBT 90°C/ 15 min | 6.33±0.38 | 29.60±0.42 | 7.02±0.39 | 4.0±0.26 | 47.52 | 100 |
| GBT 121°C/ 10 min | 4.61±0.43 | 28.96±0.79 | 6.9±0.10 | 3.7±0.05 | 43.85 | 100 |

* Glucides totaux déterminés par soustraction,

SBD : Semoule de blé dur ; GBB : Germe de blé brut (non traité), GBT 90°C : Germe de blé traité à 90 °C pendant 15 min, GBT 121°C : Germe de blé traité à 121°C pendant 10 min.

2.1.1.1. Teneur en eau

La détermination de la teneur en eau est importante, puisqu'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 de pastification (CALVEL, 1984).

La semoule de blé dur utilisée pour la fabrication de la pâte témoin représente une humidité de 14.12± 0.28 % (ms). Cette dernière se situe dans l'intervalle rapporté par de nombreux auteurs variant entre 10 % (ms) (FEINBERG *et al.*, 1991) et 13.10 % (ms) (SOUCI *et al.*, 1994). Toutefois, cette teneur en eau est du même ordre que le maximum indiqué par le *Codex Alimentarius* (GODON *et al.*, 1991 ; FAO, 1996). En effet, selon KIGER et KIGER (1967) l'humidité est très variable, elle dépend à la fois de la saison et de la quantité d'eau ajoutée au blé avant mouture.

Les teneurs en eau enregistrées pour le germe de blé varient de 8.66 ± 0.30 % (ms) pour le germe de blé brut contre respectivement 6.33 ± 0.38 % (ms) pour le germe de blé traité à 90°C et 4.61 ± 0.43 % (ms) pour le germe traité à 121°C . Les tendances pour ces teneurs suggèrent l'effet du traitement thermique. Notons que nos résultats sont comparables avec ceux rapportés par SRIVASTAVA *et al.*, (2007).

2.1.1.2. Teneur en cendres

Selon ABECASSIS (1993), le taux des cendres reste le moyen officiel utilisé pour caractériser la pureté des semoules. La détermination de ce paramètre offre la possibilité de connaître la teneur en matière minérale globale des céréales et de leurs sous-produits (GODON *et al.*, 1991).

La teneur en cendres de la semoule utilisée dans le cadre de notre étude est de 0.95 ± 0.13 % (ms) se situe dans l'intervalle des semoules de qualité supérieure (< 1.1 % ms) donné par BAR (1995).

Les quantités en cendres pour les trois formes d'échantillons de préparation du germe de blé se caractérisent respectivement de 4.2 ± 0.36 % (ms) pour le brut contre respectivement 4.0 ± 0.26 % (ms) pour le germe de blé traité à 90°C et 3.7 ± 0.05 % (ms) pour le germe traité à 121°C . D'après l'analyse de l'ANOVA, il ressort qu'il n'existe pas d'effet significatif de traitement sur les teneurs en cendres ce qui concorde avec les résultats des travaux réalisés par SRIVASTAVA *et al.* (2007).

2.1.1.3. Teneur en protéines

La teneur en protéines des semoules exerce une influence considérable sur les propriétés viscoélastiques des pâtes et sur la qualité culinaire du produit fini (MASTUO *et al.*, 1970 ; FEILLET, 2000 ; SISSONS, 2008 ; PETITOT *et al.*, 2010 ; PURNIMA *et al.*, 2011). Elle varie en fonction de la variété, des conditions de culture et le stade de maturité des grains (SELSELET, 1991).

La semoule utilisée dans la fabrication des pâtes alimentaires contient 13.52 ± 0.42 % (ms) de protéines, ce qui est légèrement supérieur soit de 13% (ms) à celle utilisée par LIU *et al.* (1996).

La forte teneur en protéines du germe de blé enregistrée par de nombreux auteurs (IBANOGLU, 2002 ; PINARLI *et al.*, 2004 ; BILGIÇLI *et al.*, 2006 ; SRIVASTAVA *et al.*, 2007 ; HASSAN *et al.*, 2010 ; KUMAR *et al.*, 2011) semble résulter de sa richesse et aussi de

sa valeur nutritionnelle excellente. L'analyse du contenu protéique de germe de blé non traité a montré un niveau de l'ordre de 31.38 ± 0.53 % (ms). En effet, les traitements thermiques du germe de blé n'ont montré aucun effet significatif concernant les teneurs en protéines mesurées soit 29.60 ± 0.40 % (ms) et 28.96 ± 0.79 % (ms) pour respectivement les traitements à 90 °C et 121 °C. Ces résultats se situent dans la limite des valeurs rapportées par SRIVASTAVA *et al.* (2007) dont 31.4 ± 0.5 % (ms) pour le brut contre 28.0 ± 0.5 % (ms) pour le germe traité à la vapeur et séché dans un sécheur à circulation d'air à 100-130 °C pendant 2 à 3 heures.

2.1.1.4. Teneur en lipides

La teneur en lipides des semoules utilisées dans la fabrication des pâtes se situe autour 0.7 ± 0.10 % (ms). Cette valeur demeure sensiblement inférieure aux données rapportées par YESLI (2001) soit une teneur de 1.96 % (ms). Toutefois, elle reste dans l'intervalle comprise entre 0.79 et 3.8 % (ms) soulignée par FAVIER *et al.* (1995).

Le dosage des matières grasses sur les trois types de germe de blé étudiés montrent que les teneurs en lipides sont de 7.2 ± 0.24 % (ms) pour le germe de blé brut, 7.02 ± 0.39 % (ms) pour le germe de blé traité à 90 °C et 6.9 ± 0.10 % (ms) pour le germe de blé traité à 121°C. Nos résultats montrent une grande similitude avec ceux enregistrés par SRIVASTAVA *et al.* (2007). Par ailleurs, aucun effet significatif du traitement thermique n'est noté pour les trois échantillons.

2.1.1.5. Teneur en glucides

La teneur en glucides de la semoule utilisée dans la fabrication des pâtes se situe autour de 69.84 % (ms). Cette dernière se situe dans l'intervalle rapporté par de nombreux auteurs variant entre 68.96 % (ms) (SOUCI *et al.*, 1994) et 70.4 % (ms) (FAVIER *et al.*, 1995).

Les teneurs en glucides pour les trois formes de germe du blé étudiés se caractérisent respectivement de 52.61 % (ms) pour le brut contre respectivement 47.52 % (ms) pour le germe de blé traité à 90°C et de 43.85 % (ms) pour le germe traité à 121°C. Ces valeurs demeurent sensiblement inférieures aux données rapportées par SRIVASTAVA *et al.* (2007) soit une teneur de 57.4 ± 1.0 % (ms) pour le germe de blé brut, 57.6 ± 1.0 % pour le germe du blé traité à la vapeur et séché dans un sécheur à circulation d'air chaud.

2.1.2. Répartition granulométrique et rendement

La granulométrie d'une semoule permet de caractériser la répartition en taille et du nombre de particules dont elle est composée. Le comportement des matières premières au cours de leur transformation, notamment la quantité d'eau absorbée ainsi que la vitesse d'hydratation en dépend pour beaucoup (FEILLET, 2000). Elle joue aussi un rôle important dans le comportement de la pâte lors de son hydratation, ce qui influence l'aspect et la fermeté du produit fini (NASEHI *et al.*, 2009 ; PETITOT *et al.*, 2009c).

2.1.2.1. Rendement en germe de blé

La préparation du germe de blé en vue de son utilisation pour la pastification nécessite le passage par trois étapes : une première l'épuration et une deuxième le broyage et enfin le tamisage.

a. Epuration

Après épuration des échantillons, les rendements en germe de blé traité sont rapportés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 15. Rendement en germe de blé épuré en g pour 100 g de germe de blé brut

| | Rendement (%) |
|---------------------------------------|----------------------|
| Passant du tamis de 800 μm | 3.21 \pm 0.21 |
| Refus de TAKAIDA (son) | 20.18 \pm 0.18 |
| Germe de blé pur | 65.70 \pm 0.30 |
| Passant du tamis de 200 μm | 0.75 \pm 0.05 |
| Total | 89.84 |

Après un traitement d'épuration, on obtient 65.70 \pm 0.30 g de germe de blé épuré pour 100 g de germe brut ayant une granulométrie se situant dans l'intervalle [200-800] μm .

b. Broyage et tamisage

Le tamisage seul ne permet pas de procéder totalement à la séparation du son (résidu) du germe de blé. Toutefois, un broyage efficace permet cette séparation mais pas de façon totale avec toujours la présence de quelques débris.

2.1.2.2. Répartition granulométrique

La granulométrie des différentes fractions des matières premières utilisées dans la fabrication des pâtes alimentaires et leurs proportions respectives sont portées dans le tableau n° 16.

Tableau 16. Granulométrie des semoules utilisées dans la fabrication des pâtes alimentaires en pourcentage massique.

| Fraction | Semoule de blé dur (%) | Semoule de germe de blé (%) |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| [355-500[μm | 31.5 \pm 0.50 | 29.10 \pm 0.10 |
| [200-355[μm | 56.37 \pm 0.37 | 69.40 \pm 0.40 |
| Passant 200 μm | 10.7 \pm 0.30 | 0.0 |

De ce tableau, il ressort que la proportion des particules les plus importantes des échantillons étudiés se situe dans l'intervalle [200- 355[μm avec respectivement 56.37 \pm 0.37 % pour la semoule de blé dur contre 69.40 \pm 0.40 % pour la semoule de germe de blé.

Les semoules utilisées dans l'essai de pastification se caractérisent toutes par une granulométrie comprise dans l'intervalle défini par ABECASSIS (1993) recommandée pour la fabrication des pâtes alimentaires dont la taille admise ne doit pas dépasser le seuil de 350 μm . Selon la FAO (1995b), les semoules de blé dur utilisées dans la fabrication des pâtes alimentaires sont en général d'une granulométrie supérieure ou égale à 212 μm . C'est dans cette proportion que les fabricants souhaitent recevoir leurs produits de plus en plus fin ce qui permettrait d'augmenter le débit des presse, de réduire la durée de malaxage tout en produisant des produits plus homogènes, plus lisses, sans grosses piquûres apparentes ni points blancs, sans altération aucune ni pour la couleur ni pour la qualité culinaire (ABECASSIS, 1991).

En ce qui concerne la quantité du germe de blé broyé et tamisé, les rendements s'avèrent appréciables. Ces derniers sont de 98.50 g de semoule de germe de blé épuré avec absence totale de particules de farine (< 200 μm).

La différence de répartition des particules des matières premières utilisées pourrait être due à la composition, la texture et l'humidité de ces substrats ainsi qu'à la performance des broyeurs utilisés (MELCION, 2000).

Les résultats de la caractérisation biochimique des matières premières analysées, fait ressortir que l'enrichissement de notre formule à 20 % en germe de blé engendre une augmentation de 1.27 fois la teneur en protéine et 3 fois la teneur en lipide. En outre, d'après les résultats du tamisage, on peut conclure que toutes les semoules utilisées présentent une granulométrie inférieure à 350 μm et répondent bien aux exigences de la pastification.

2.2. Essai de pastification

2.2.1. Détermination du taux optimum d'hydratation

La détermination de la quantité d'eau optimale à ajouter à la semoule de blé dur a pour but de rechercher les meilleures propriétés plastiques aussi bien pour les pâtes à base de blé dur que pour les pâtes supplémentées par le germe de blé.

Concernant le taux d'hydratation des pâtes de notre étude, les quantités d'eau à ajouter ont été déterminées sur la base des essais préliminaires (tableau n° 11). Pour 100 g de semoule de blé dur nous avons ajouté 2 g du sel et fait varier les taux d'hydratations. Le taux minimal a été déterminé sur la base de l'obtention d'une pâte qui tient dans la main et le taux maximal d'hydratation fixé lorsqu'on obtient des pâtes trop collantes. L'intervalle d'hydratation choisis dans ce travail varie entre 49 et 59 g d'eau pour 100g de semoule de blé dur.

En effet, après hydratation de la semoule à un niveau de 57 % dont on a incorporé un taux de 24.99 % de germe de blé, on obtient une pâte très collante dont le travail au laminoir devient difficilement réalisable. Il existe donc une forte interaction entre les différents taux d'hydratation et celui de l'incorporation du germe de blé. Le niveau d'hydratation dépend donc de la qualité des protéines extensibles comme par exemple les protéines du gluten qui exigent plus d'eau que les globulines et les albumines abondantes dans le germe de blé. L'absorption de l'eau pourrait être à ce sujet reliée aussi bien au type de protéines (FERNANDEZ et BERRY, 1989) qu'à leurs teneurs (HEGZAZY et FOHEID, 1990).

Les essais réalisés révèlent que l'incorporation du germe de blé dans la semoule nécessite une augmentation excessive du taux d'hydratation à un niveau dit optimum à partir duquel une élévation de la quantité d'eau conduit à la production d'une pâte collante.

Egalement, l'addition à la formule différents taux de germe de blé traité semble conduire à l'affaiblissement de la pâte en termes de réduction de sa stabilité ce qui induit une augmentation de la rupture de la pâte au moment du pétrissage. Les observations faites à partir de nos résultats concordent pleinement avec ceux obtenus par POMERANZ *et al.*

(1970), RANGA RAO *et al.* (1980), CAKMAKLI *et al.* (1995) cité par SRIVASTAVA *et al.* (2007). Ces mêmes auteurs montrent que l'incorporation de germe de blé brut ou stabilisé par différents traitements entraîne une diminution des propriétés rhéologiques de la pâte mesurée à l'aide du farinographe et de l'extensographe. Le degré de changement et d'affaiblissement de la structure dépend donc de l'intensité du traitement thermique et du degré de dénaturation des protéines.

2.2.2. Description du comportement des pâtes

Le comportement des pâtes fabriquées selon les 13 points imposées par le plan d'expérience pendant les étapes du diagramme de fabrication a été observé.

Hydratation : On observe dans le cas de nos essais que les particules des différentes formules étudiées ont tendance à absorber de l'eau de façon différente et ce quelque soit le taux d'incorporation du germe de blé (exemple un même apport d'eau équivalent de 50.47 g ajoutée pour les deux traitements (90 °C et 121 °C) à base de 100 g de semoule enrichie différemment de germe de blé qui sont respectivement de 3.66 et 21.34 grammes), toutefois, ils permettent l'obtention d'une pâte hétérogènes sans agglomérats ni morceaux de granules.

La distribution granulométrique entre les différentes semoules et leurs particularités respectives dans la composition chimique sembleraient avoir un effet sur les propriétés d'hydratation. Cette tendance s'apparente à celle observée par PETITOT *et al.* (2009a).

Malaxage : l'augmentation du niveau d'incorporation du germe de blé engendre plus de travail pendant le pétrissage. Aussi, il ressort que la pâte obtenue avec du germe de blé s'étire difficilement par rapport à celle du témoin de semoule de blé dur. Celle-ci devient donc de plus en plus collante et prend ainsi l'aspect d'une pâte à gâteau avec un taux d'enrichissement respectif de l'ordre de 21.34 et 24.99 %. Ce comportement lié au collage s'apprécie de plus en plus avec l'élévation du taux d'hydratation des pâtes. Or, la fabrication des pâtes enrichies avec du germe de blé même avec un niveau de substitution supérieur à 25 % en raison de l'absence des agglomérats liés aux particules s'avère possible. Selon WOOD (2009), PETITOT (2009) et PETITOT *et al.* (2009a), la présence de polysaccharides solubles et la richesse en matière grasse dans la semoule de germe de blé contribuerait à la formation d'une pâte collante, c'est un phénomène qui pourrait être réduit en diminuant le taux d'hydratation, ce qui conforte les résultats de nos essais par rapport à ceux avancés par la littérature (MANTHEY *et al.*, 2004 ; WOOD, 2009) pour respectivement sur des pâtes additionnées de 10 à 30 % de pois chiche et de 20 à 25 % de farine de sarrasin.

Laminage : l'énergie transférée à la pâte est plus élevée avec le procédé d'extrusion qu'avec celui de laminage et une partie de celle-ci est dissipée sous forme de chaleur. En outre, lors de l'extrusion, la pâte est soumise à un stress de cisaillement alors pendant le laminage, un stress élongationnel a été appliqué. Ces différences de ces paramètres (le stress, la chaleur et la pression) peuvent entraîner la formation des pâtes de structures différentes (PETITOT *et al.*, 2010).

La pression joue un rôle important sur le comportement des pâtes. Ce paramètre peut être affecté avec un grand degré par les facteurs intrinsèques liées à la pâte : la nature de semoules utilisées, dimension des particules, teneur en protéines, l'humidité, la température et la viscosité (MOHAMMED, 1990 ; DALBON *et al.*, 1996). Egalement, cette étape devient difficile en raison des contraintes liées au collage avec l'addition de germe de blé.

2.2.3. Description visuelle des pâtes sèches des 13 points du plan d'expérience

Une description visuelle de l'aspect des pâtes sèches (type laminées) obtenues a été réalisée. Ainsi une imagerie des pâtes sèches type coudées a été faite (annexe n°3). L'aspect des pâtes alimentaires est déterminé par trois groupes de paramètres : la couleur (qui résulte de la superposition d'une composante jaune et d'une composante brune), le nombre et l'origine des piqûres brunes dues à la présence de particules de sons et des piqûres noires provenant de grains mouchetés et aussi à partir de la texture des produits représentée par des gerçures, bulles d'air, points blancs et état de surface des pâtes sèches qui dépendent des conditions de fabrication (FEILLET, 2000 ; NASEHI *et al.*, 2009). Ces paramètres sont résumés dans les tableaux n° 17 et 18.

Tableau 17. Appréciation visuelle des pâtes sèches fabriquées (type laminées) en fonction des 13 points du plan d'expérience (cas de germe de blé traité à 90°C).

| N° essais | Taux (Germe traité à 90°C- Hydratations) | Piqûres | Texture superficielle | Couleur | Brisûres |
|-----------|--|---------|-----------------------|-------------|--|
| 1 | (3.66- 50.47) | ABSENCE | Peu lisse | Jaune crème | Présence de brisure et facile à casser |
| 2 | (21.34-50.47) | | Rugueuse | Jaune foncé | |
| 3 | (3.66- 57.53) | | Peu Lisse | Jaune crème | |
| 4 | (21.34- 57.53) | | Rugueuse | Jaune foncé | |
| 5 | (0- 54) | | Peu Lisse | Jaune crème | |
| 6 | (25- 54) | | Lisse | Jaune brune | |
| 7 | (12.5 – 49) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 8 | (12.5 – 59) | | Peu lisse | Jaune | |
| 9 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 10 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 11 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 12 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 13 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |

Tableau 18. Appréciation visuelle de pâtes sèches (type laminées) fabriquées en fonction des 13 points du plan d'expérience (cas de germe de blé traité à 121°C).

| N° essais | Taux (Germe traité à 121°C- Hydratations) | Piqûres | Texture superficielle | Couleur | Brisûre |
|-----------|---|---------|-----------------------|-------------|--|
| 1 | (3.66- 50.47) | ABSENCE | Peu lisse | Jaune crème | Présence de brisure et facile à casser |
| 2 | (21.34-50.47) | | Peu lisse | Jaune foncé | |
| 3 | (3.66- 57.53) | | Peu lisse | Jaune crème | |
| 4 | (21.34- 57.53) | | Rugueuse | Jaune foncé | |
| 5 | (0 - 54) | | Peu Lisse | Jaune crème | |
| 6 | (25- 54) | | Peu lisse | Jaune brune | |
| 7 | (12.5 – 49) | | Peu lisse | Jaune | |
| 8 | (12.5 – 59) | | Lisse | Jaune | |
| 9 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 10 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 11 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 12 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |
| 13 | (12.5- 54) | | Peu Lisse | Jaune | |

D'après les observations des tableaux n° 17 et 18, nous constatons que les pâtes sèches fabriquées sur la base de formules établies par le plan d'expérience se caractérisent par l'absence des piqures. Cette tendance semblerait être liée à l'absence du son dans le germe de blé et l'efficacité des opérations de la préparation, nettoyage et de sassage des grains. Pour les 13 couples (Germe de blé - Hydratations), la texture superficielle des pâtes est en général peu lisse. Cette rugosité et une surface peu lisse des points pourraient être dus à un malaxage insuffisant ou l'utilisation des moules sans téflons ce qui concorde avec les remarques de ABECASSIS, 2011. L'absence des gerçures dans nos pâtes fabriquées a été constatée. Ces observations sont en accord avec les constatations faites par FEILLET *et al.* (1996), qui décrit la présence de gerçure uniquement dans les pâtes industrielles séchées dans les sécheurs à différentes températures.

Pour la coloration des pâtes fabriquées, Il ressort qu'avec un taux nul d'incorporation de germe de blé, les pâtes produites sont de couleur jaune crème. En revanche, les pâtes obtenues avec des ajouts de germe de blé présentent différentes couleurs et ce en fonction des niveaux d'incorporation :

- Couleur jaune avec 3.66 % ;
- Couleur jaune foncée avec 12.5% ;
- Couleur jaune plus foncée avec 21.34% ;
- Couleur jaune brune avec un taux d'incorporation du germe de blé à raison de 24.99 %.

Les quelques différences observées du comportement des pâtes ne résultent pas seulement des conditions de fabrication mais aussi pourraient être due à l'effet d'incorporation du germe de blé dans la formule.

2.3. Détermination du Temps de cuisson des pâtes fabriquées

Lors de l'écrasement des pâtes fabriquées (figure n° 9) entre deux plaques en verre, il y a apparition d'une ligne blanche épaisse dans les deux ou trois premières minutes qui suivent la cuisson. Passé ce temps, cette ligne blanche disparaît progressivement et ce en fonction du temps écoulé après chaque minute jusqu'à disparition totale. Ce moment correspond au temps optimal de cuisson qui se traduit par la gélatinisation de l'amidon.

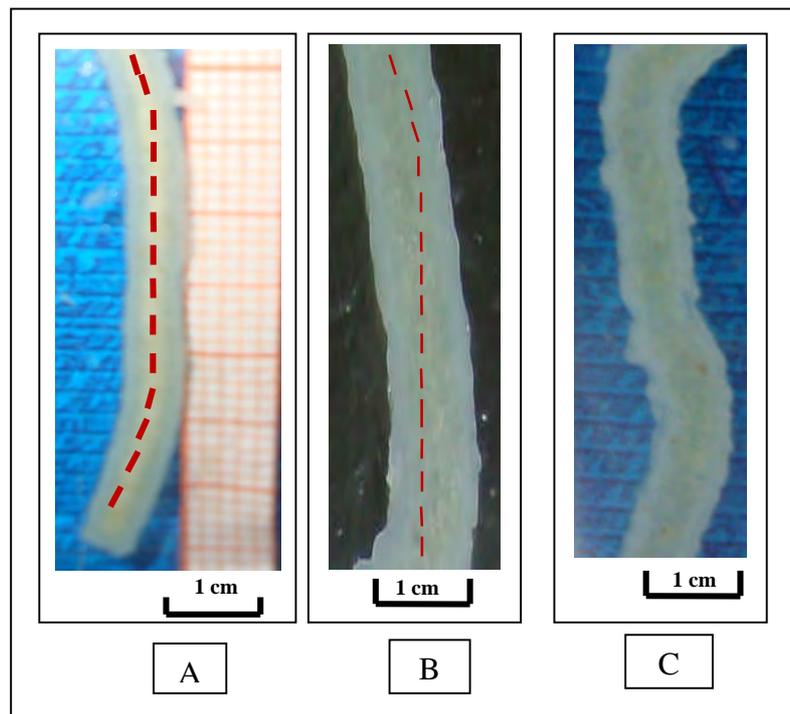


Figure 9. Illustration du test de la ligne blanche utilisé pour la détermination du temps optimal de cuisson. A : 2-3 min de cuisson, B : 4-5 min de cuisson, C : pâte cuite au temps optimal de cuisson

Les temps optimums de cuisson pour les 13 points du plan d'expérience ont été utilisés pour évaluer les pertes à la cuisson (degré de délitescence) des pâtes fabriquées.

Le tableau ci-dessous donne le Temps Optimal de Cuisson (TOC) des 13 essais.

Tableau 19. Temps Optimal de Cuisson (TOC) des 13 essais réalisés avec incorporation du germe de blé traité à 90°C et à 121 °C

| N° essais | TOC (min.) | |
|-----------|--|---|
| | Pâtes enrichie en germe de blé traité 90 °C/ 15 (min). | Pâtes enrichie en germe de blé traité 121 °C/ 10 (min). |
| 1 | 8.33± 0.35 | 8.23± 0.25 |
| 2 | 7.3± 0.30 | 7.10± 0.10 |
| 3 | 7.66 ± 0.32 | 8.03± 0.15 |
| 4 | 7.23± 0.25 | 7.13± 0.15 |
| 5 | 9.80± 0.20 | 9.80± 0.20 |
| 6 | 6.15 ± 0.30 | 6.5± 0.36 |
| 7 | 7.70± 0.20 | 7.56± 0.25 |
| 8 | 7.56± 0.15 | 7.16± 0.15 |
| 9 | 7.50± 0.15 | 7.23± 0.25 |
| 10 | 7.50± 0.15 | 7.23± 0.25 |
| 11 | 7.50± 0.15 | 7.23± 0.25 |
| 12 | 7.50± 0.15 | 7.23± 0.25 |
| 13 | 7.50± 0.15 | 7.23± 0.25 |

2.4. Exploitation des surfaces de réponses

Dans ce travail l'approche de la valeur pastière d'une pâte et la prédiction de ses propriétés culinaires et organoleptiques s'est faite empiriquement à travers la mesure des pertes de matières dans l'eau de cuisson et la détermination des indices de couleur. L'étude de ces paramètres réalisée pour les 13 points de couple (Hydratations, germe de blé traité à 90°C), (Hydratations, germe de blé traité à 121°C), a conduit au traçage des surfaces de réponses. Ainsi la mesure de ces paramètres a été effectuée pour les pâtes du commerce et celles témoins de semoule de blé dur fabriquées suivant le diagramme adopté sans addition du germe de blé. Celles-ci ont constitué la base de comparaison des résultats obtenus.

2.4.1. Surface de réponse du degré de délitescence des pâtes

Les réponses de la formule semoule (FS) au test culinaire sont exprimées par les niveaux des pertes de matières dans l'eau de cuisson (DD %) en fonction des taux de germe de blé traité et d'hydratations.

2.4.1.1. Surface de réponse du degré de délitescence des pâtes de la formule semoule en fonction des taux (Germe de blé traité à 90 °C- Hydratations)

La surface de réponse du degré de délitescence DD correspondante aux pâtes alimentaires obtenues à partir de l'ajout de germe de blé traité à 90 °C est représentée par la figure n° 10.

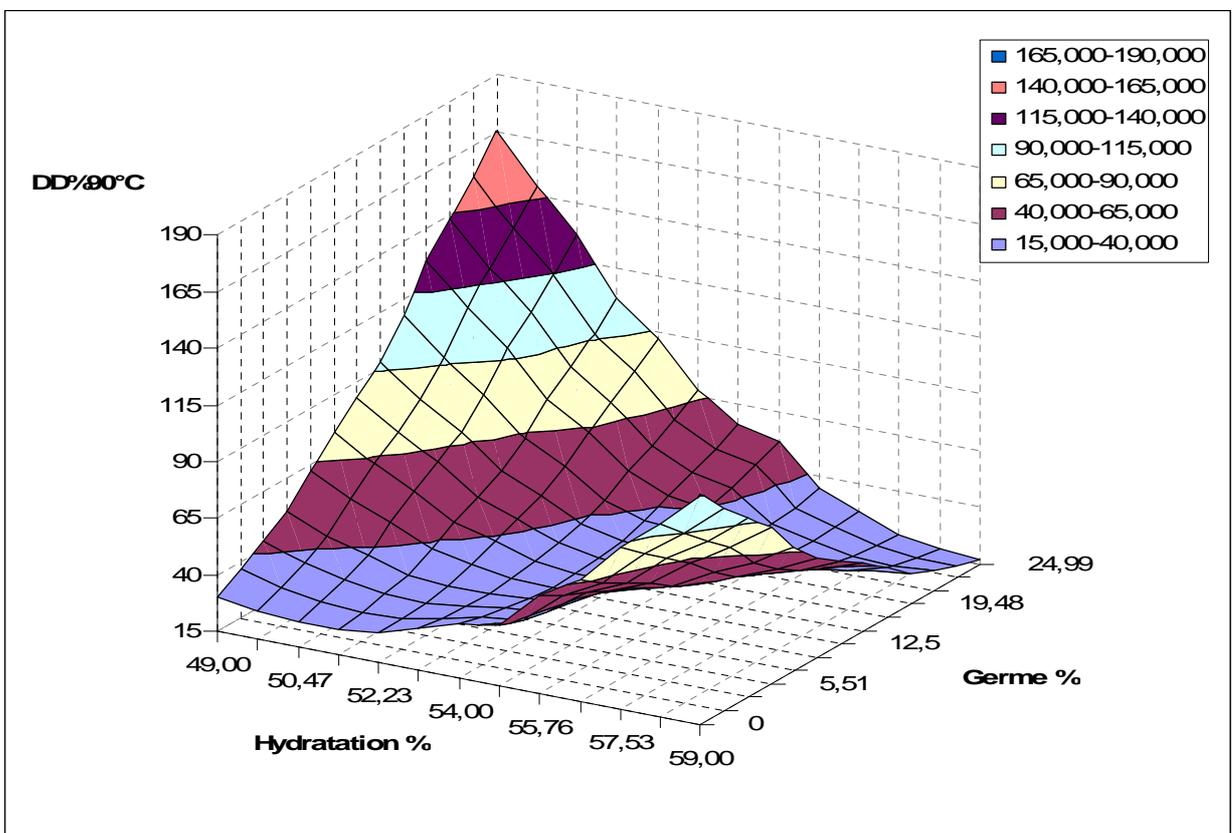


Figure 10. Surface de réponse du degré de délitescence (DD) % des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 90 °C- Hydratations).

La figure n° 10 montre que le DD varie de 15 à 190 %. Quelque soit le taux de germe de blé, le DD diminue avec l'augmentation des taux d'hydratations sauf pour le couple d'intervalle [0- 15.62] % relatif au germe et [54.88 – 59] % concernant l'eau où on note une augmentation. La surface de réponse couvre la zone de DD signalé par ABECASSIS *et al.* (1994) (9- 51) % (ms).

2.4.1.2. Surface de réponse du degré de délitescence des pâtes de la formule semoule en fonction des taux (Germe de blé traité à 121 °C- Hydratations)

La surface de réponse du degré de délitescence DD correspondante aux pâtes alimentaires obtenues à partir de l'ajout de germe de blé traité à 121 °C est représentée par la figure n° 11.

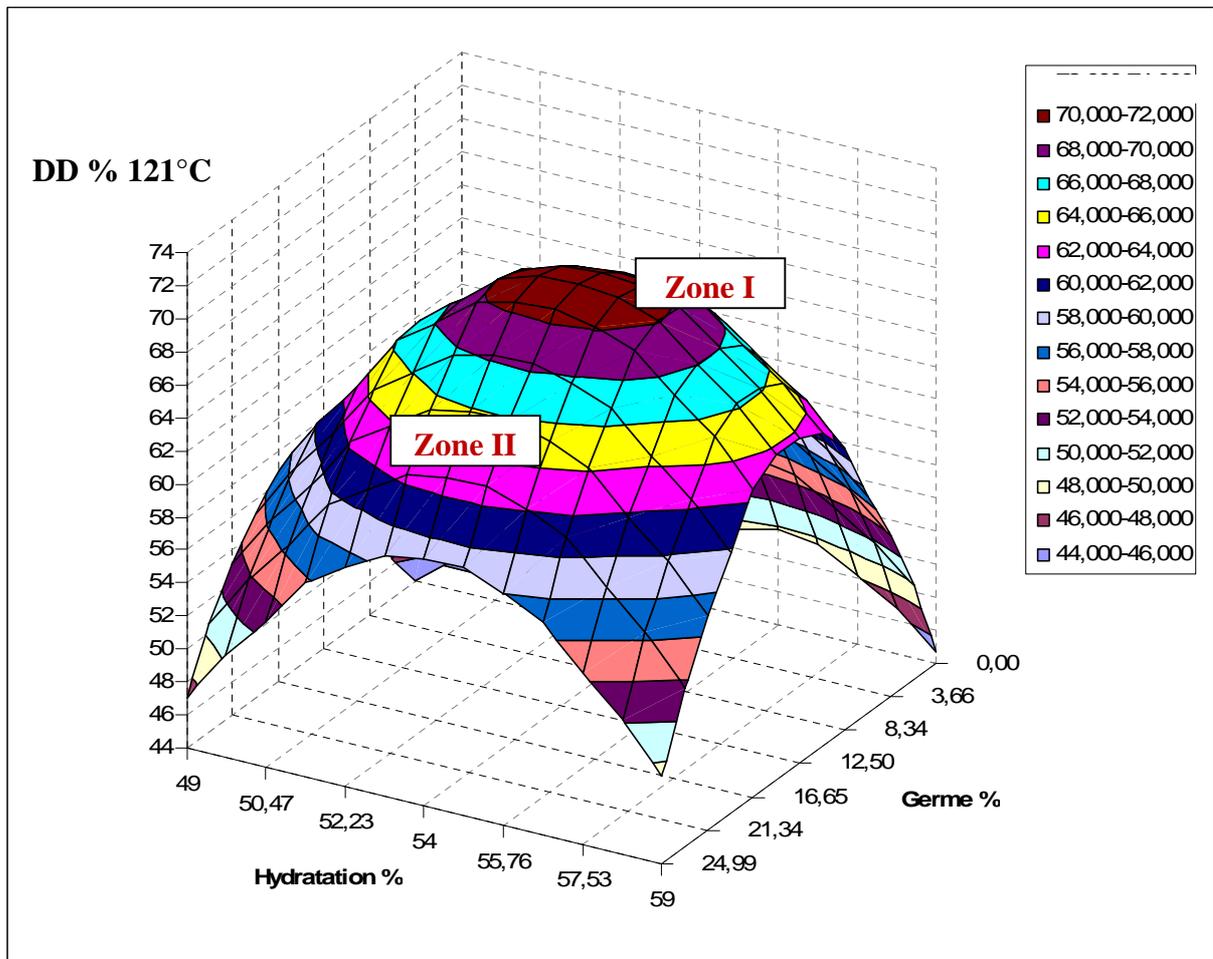


Figure 11. Surface de réponse du degré de délitescence (DD) % des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 121 °C- Hydratations).

La surface de réponse semble évoluer selon une allure de cloche avec un DD variant de 44 à 72 %. Quelque soit le taux d'hydratation :

- Zone I, pour l'intervalle [0-12.5] % de germe, le DD est proportionnelle avec l'ajout de germe jusqu'à 12.5 %.
- Zone II, pour l'intervalle]12.5- 24.99] %, le DD devient inversement proportionnelle à l'incorporation de germe de blé. La surface de réponse couvre la zone de DD signalé par ABECASSIS *et al.* (1994) (9- 51) %.

2.4.2. Surface de réponse des indices de couleur des pâtes

Les réponses de la formule semoule au test de couleur sont exprimées par les valeurs de l'indice de rouge (a^*), l'indice de jaune (b^*) et l'indice de brun ($100-L^*$) assurés par l'étude des deux facteurs à savoir le germe de blé traité à (90 °C , 121 °C) et d'hydratations.

2.4.2.1. Surface de réponse de l'indice de rouge

a. Surface de réponse de l'indice de rouge des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 90 °C - Hydratations).

Le suivi de l'évolution de l'indice de rouge (a^*) des pâtes fabriquées à partir de la formule semoule en fonction des taux de Germe de blé traité à 90 °C et d'hydratations est reporté dans la figure n° 12.

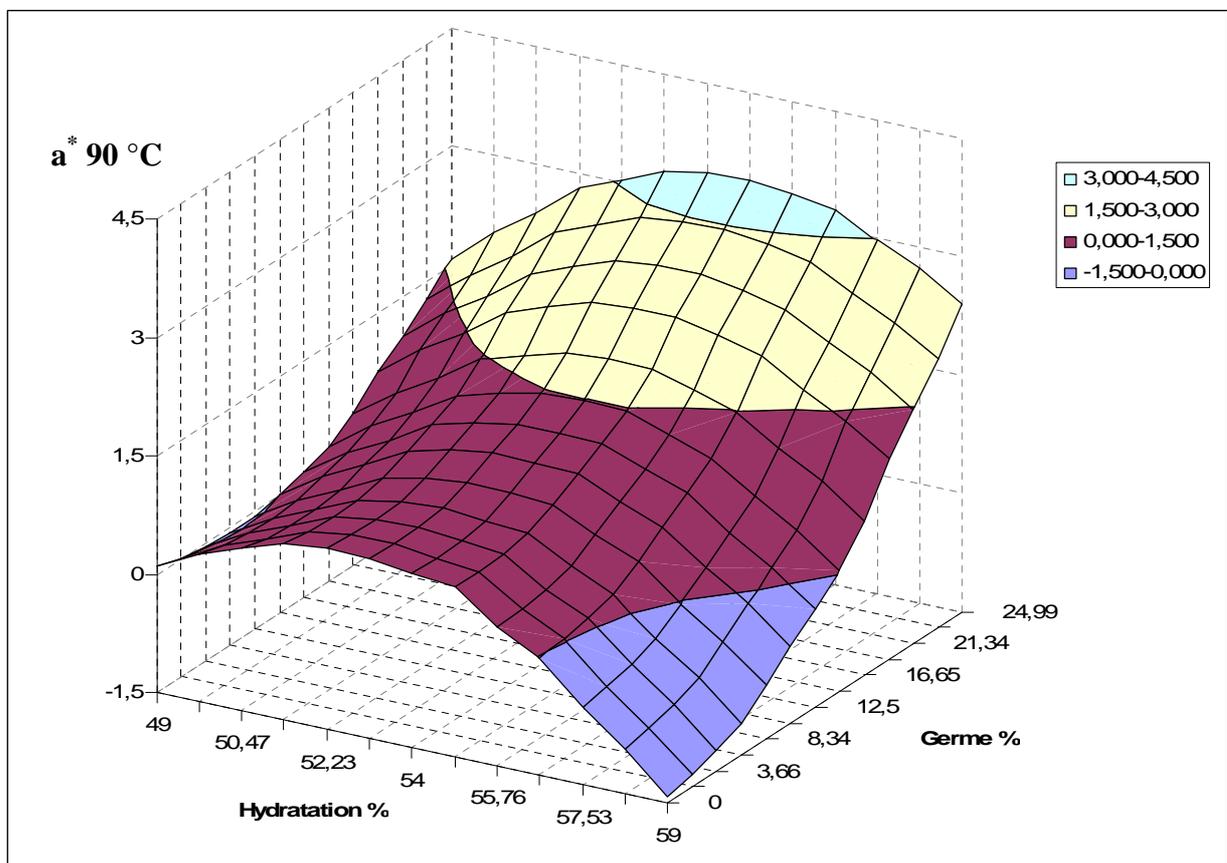


Figure 12. Surface de réponse de l'indice de rouge (a^*) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 90 °C - Hydratations).

Suivant les indications de cette surface, l'indice de rouge (a^*) varie de -1.5 à 4.5. La couleur des pâtes varie du vert (valeurs négatifs) au rouge (valeurs positives). Ce paramètre semble varier positivement avec l'augmentation du taux de germe de blé.

b. Surface de réponse de l'indice de rouge des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 121 °C- Hydratations).

Le suivi de l'évolution de l'indice de rouge (a^*) des pâtes fabriquées à partir de la formule semoule en fonction des taux de Germe de blé traité à 121 °C et d'hydratations est reporté dans la figure n° 13.

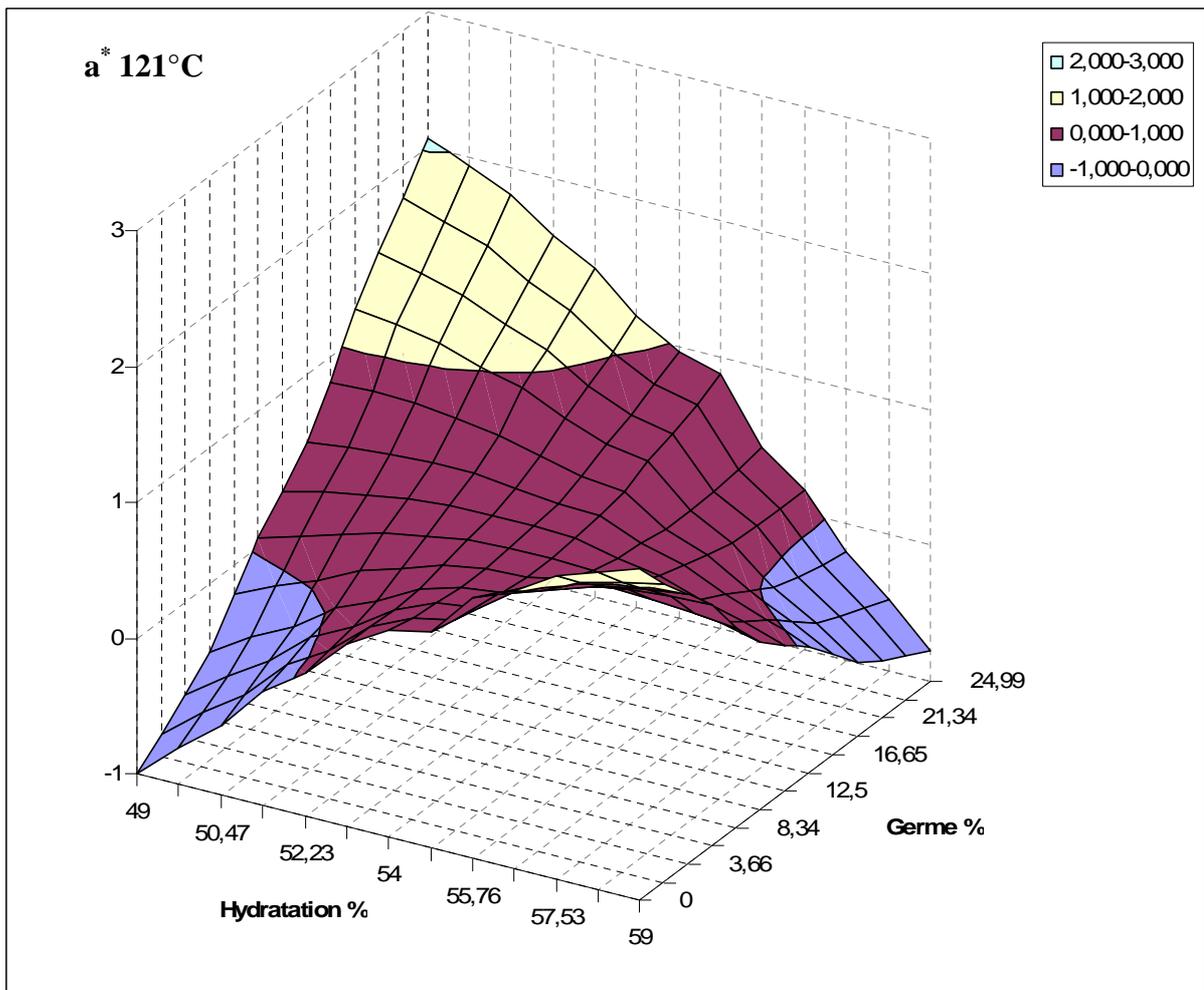


Figure 13. Surface de réponse de l'indice de rouge (a^*) des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 121 °C- Hydratations).

La surface de réponse correspondante aux pâtes alimentaires additionnées au germe de blé traité à 121 °C montre que l'indice de rouge varie de -1 à 3. Pour des faibles taux de germe du blé et d'hydratations limités par les intervalles de [0-12.5] % et [49- 53.11] % respectivement, l'indice de rouge est proportionnelle avec ces deux variables. Pour des taux élevés du germe et d'eau, ce paramètre est inversement proportionnel avec ces deux variables.

Les résultats enregistrés sur cet indice pour les deux types de fabrication des pâtes additionnées de germe de blé traité à 90 °C et 121°C montrent qu'il y a un chevauchement

entre les intervalles. Les données de littératures sur ce paramètre [1-5] (INGELBRECHT *et al.*, 2001 ; PINARLI *et al.*, 2004 ; PETITOT, 2009 ; PETITOT *et al.*, 2010 ; SAWSAN *et al.*, 2010) sont incluses dans l'intervalle de surface de réponse.

2.4.2.2. Surface de réponse de l'indice de jaune

a. Surface de réponse de l'indice de jaune des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 90 °C- Hydratations).

Le suivi de l'évolution de l'indice de jaune (b^*) des pâtes fabriquées à partir de la formule semoule en fonction des taux de Germe de blé traité à 90 °C et d'hydratations est reporté dans la figure n° 14.

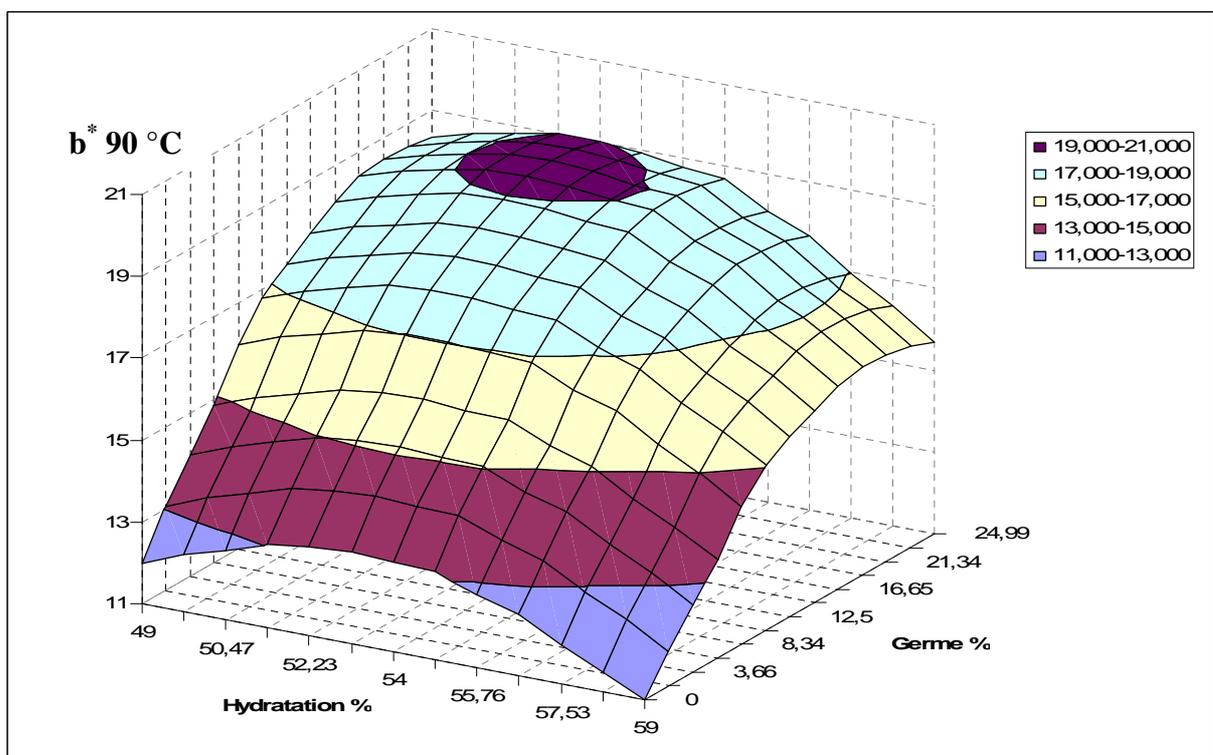


Figure 14. Surface de réponse de l'indice de jaune (b^*) des pâtes des taux (Germe de blé traité à 90°C - Hydratations)

La surface de réponse semble évoluer selon une allure de cloche avec b^* variant de 11 à 21. Quelque soit le taux d'hydratation, l'indice de jaune est proportionnel avec le taux de germe de blé jusqu'à un taux d'incorporation de 18.99 % pour lequel devient inversement proportionnel jusqu'au maximum d'incorporation.

b. Surface de réponse de l'indice de jaune des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 121°C- Hydratations).

Le suivi de l'évolution de l'indice de jaune (b^*) des pâtes fabriquées à partir de la formule semoule en fonction des taux de Germe de blé traité à 121°C et d'hydratations est reporté dans la figure n° 15.

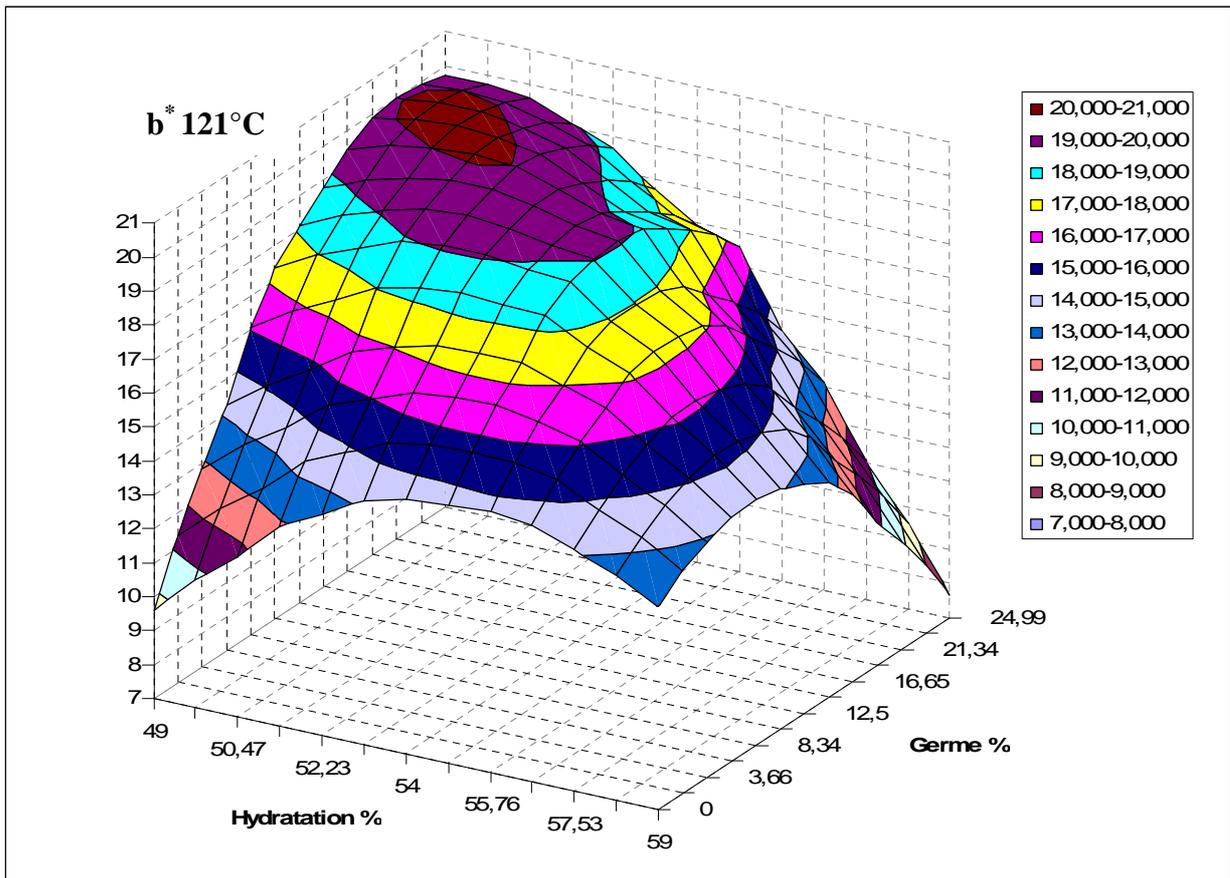


Figure 15. Surface de réponse de l'indice de jaune (b^*) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 121°C - Hydratations)

La réponse montre que l'indice de jaune semble évoluer selon une allure de cloche avec un b^* variant de 7 à 21. Quelque soit le taux d'hydratation, l'indice de jaune est proportionnel avec le taux de germe de blé jusqu'à un taux d'incorporation de 12.5 % pour lequel devient inversement proportionnel jusqu'au maximum d'incorporation.

Comparativement aux données de la littérature, il semblerait que les valeurs enregistrées pour l'indice de jaune des pâtes alimentaires enrichies en germe de blé traité à 90°C et à 121°C incluent celles rapportées par PINARLI *et al.* (2004) ($b^* = 18.4 \pm 0,007$) et SAWSAN *et al.* (2010) ($b^* = 20.88$). Egalement, le rapprochement du témoin de semoule de blé dur est assuré par l'augmentation des niveaux de germe de blé dans les deux cas.

Aussi pour les deux types de fabrication, on remarque que les pâtes additionnées du germe de blé traité à 90°C représentent des niveaux (b^*) les plus proche du celui du témoin à base de semoule observées par PINARLI *et al.* (2004) et SAWSEN *et al.* (2010). Par ailleurs, les données enregistrées par INGELBRECHT *et al.* (2001) (33.3 ± 0.2) et PETITOT *et al.* (2010) (42.7 ± 0.2) sur ce paramètre ne sont pas incluses dans l'intervalle de surface de réponse.

2.4.2.3. Surface de réponse de l'indice de brun

a. Surface de réponse de l'indice de brun des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 90 °C- Hydratations).

Le suivi de l'évolution de l'indice de brun ($100-L^*$) des pâtes fabriquées à partir de la formule semoule en fonction des taux de Germe de blé traité à 90 °C et d'hydratations est reporté dans la figure n° 16.

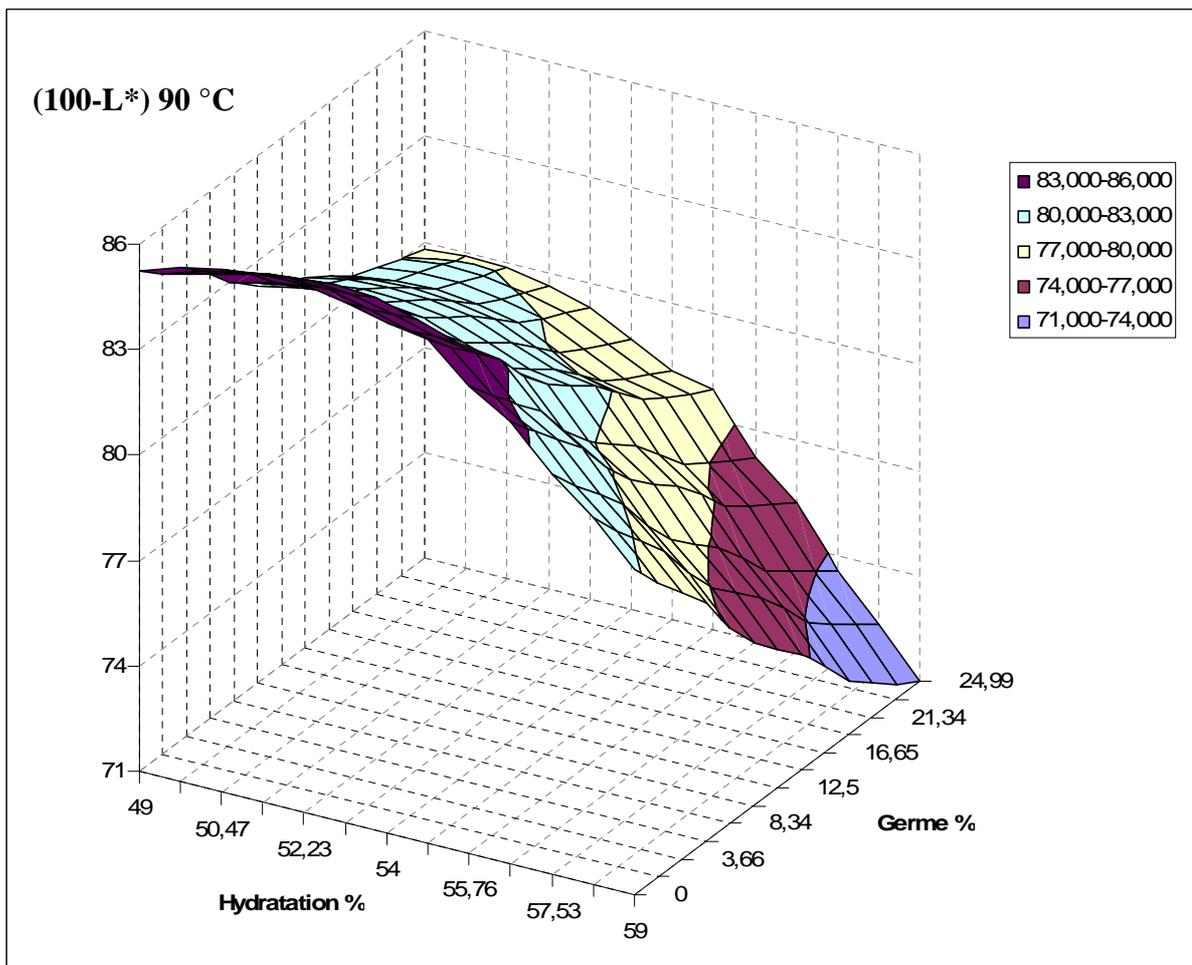


Figure 16. Surface de réponse de l'indice de brun ($100-L^*$) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 90°C - Hydratations)

Les indications de cette surface, montre que l'indice de brun varie de 71 à 86. Quelque soit l'hydratation et le taux de germe de blé, l'indice de brun est inversement proportionnel avec ces deux variables.

b. Surface de réponse de l'indice de brun des pâtes en fonction des taux (Germe traité à 121 °C- Hydratations).

Le suivi de l'évolution de l'indice de brun ($100-L^*$) des pâtes fabriquées à partir de la formule semoule en fonction des taux de Germe de blé traité à 121 °C et d'hydratations est reporté dans la figure n° 17.

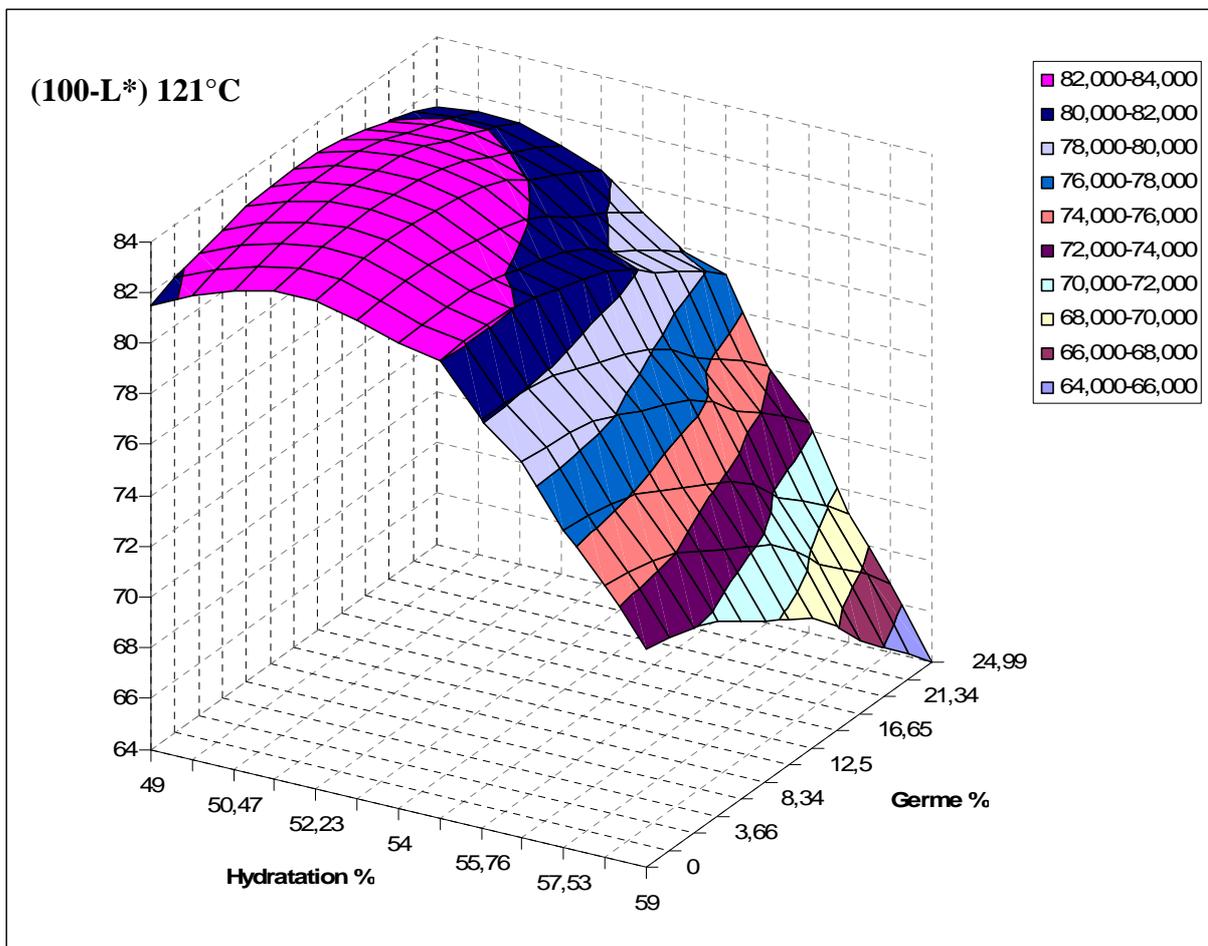


Figure 17. Surface de réponse de l'indice de brun ($100-L^*$) des pâtes en fonction des taux (Germe de blé traité à 121°C - Hydratations)

Les indications de surface de réponse des pâtes additionnées de germe de blé traité à 121 °C montre que l'indice de brun varie de 64 à 84. Quelque soit le taux de germe de blé, l'indice de brun est inversement proportionnel à l'hydratation. Les données de littérature enregistrés pour ce paramètre 67.9 ± 1.1 (PETITOT *et al.*, 2010) et 80.72 (SAWSAN *et al.*, 2010) pour les deux types de fabrications sont incluses dans l'intervalle de surface de réponse.

Cependant, les données enregistrées par INGELBRECHT *et al.* (2001) (49.1 ± 0.4) et PINARLI *et al.* (2004) (41.4 ± 0.007) sur ce paramètre ne sont pas incluses dans l'intervalle de surface de réponse.

Le traitement thermique de stabilisation du germe de blé semble :

- *influer sur le comportement culinaire des pâtes avec des tendances de réponses différentes de DD.*
- *influer sur la couleur [a^* , b^* , ($100-L^*$)] à travers des réponses différentes notées.*

2.5. Optimisation

La Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR) a été utilisée pour l'optimisation des pâtes (MALCOLMSON *et al.*, 2003 ; NASEHI *et al.*, 2009). Les domaines optimums (Germe-Eau) des pâtes de la formule semoule incorporées de germe sont obtenus par la superposition des courbes de niveau des réponses du degré de délitescence et des indices de couleurs obtenues après la coupure de chaque surface de réponse par rapport au témoin correspondant. Cette combinaison de germe de blé- hydratations permet en effet les meilleures propriétés de pastification d'où l'obtention des propriétés culinaires et organoleptiques les plus proches de celles des pâtes de blé dur dit "optimales".

Les données rapportées dans la littérature constituent une source référentielle de comparaison pour nos résultats (tableau n° 20).

Tableau 20. Données de littératures du degré de délitescence et les indices de couleurs

| Paramètres | Données de littérature Intervalles de faisabilité | Références |
|---------------------------------|--|---|
| degré de délitescence (DD %) | [minimum, moyenne, maximum] [9 - 21 - 51.5] | ABECASSIS <i>et al.</i> (1994) |
| Indice de rouge (a^*) | [1 - 5] | INGELBRECHT <i>et al.</i> (2001) PINARLI <i>et al.</i> (2004) PETITOT, 2009 ; PETITOT <i>et al.</i> (2010) SAWSAN <i>et al.</i> (2010) |
| Indice de jaune (b^*) | [18 - 43] | PINARLI <i>et al.</i> (2004) SAWSAN <i>et al.</i> (2010) |
| Indice de brun ($100-L^*$) | [41.0 - 81] | PETITOT <i>et al.</i> (2010) SAWSAN <i>et al.</i> (2010) |

Les courbes de niveaux des pâtes de la formule semoule additionnées du germe de blé traité à 90 °C et 121 °C coupées au même niveau que le témoin de semoule de blé dur sont représentées dans les figures n° 18 et 19.

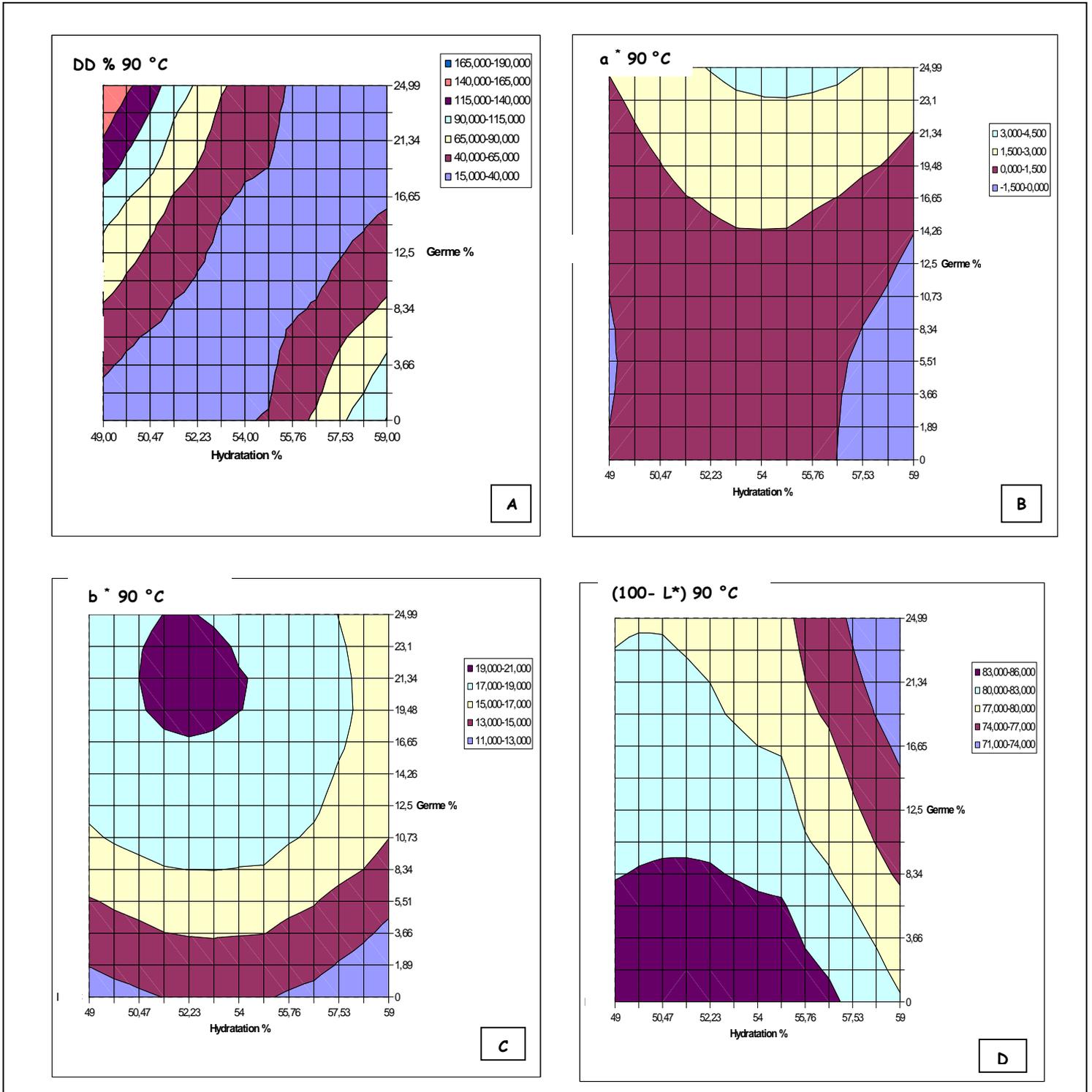


Figure 18. Courbes de niveaux des pâtes de la formule semoule additionnées du germe de blé traité à 90°C coupées au même niveau que le témoin de semoule de blé dur

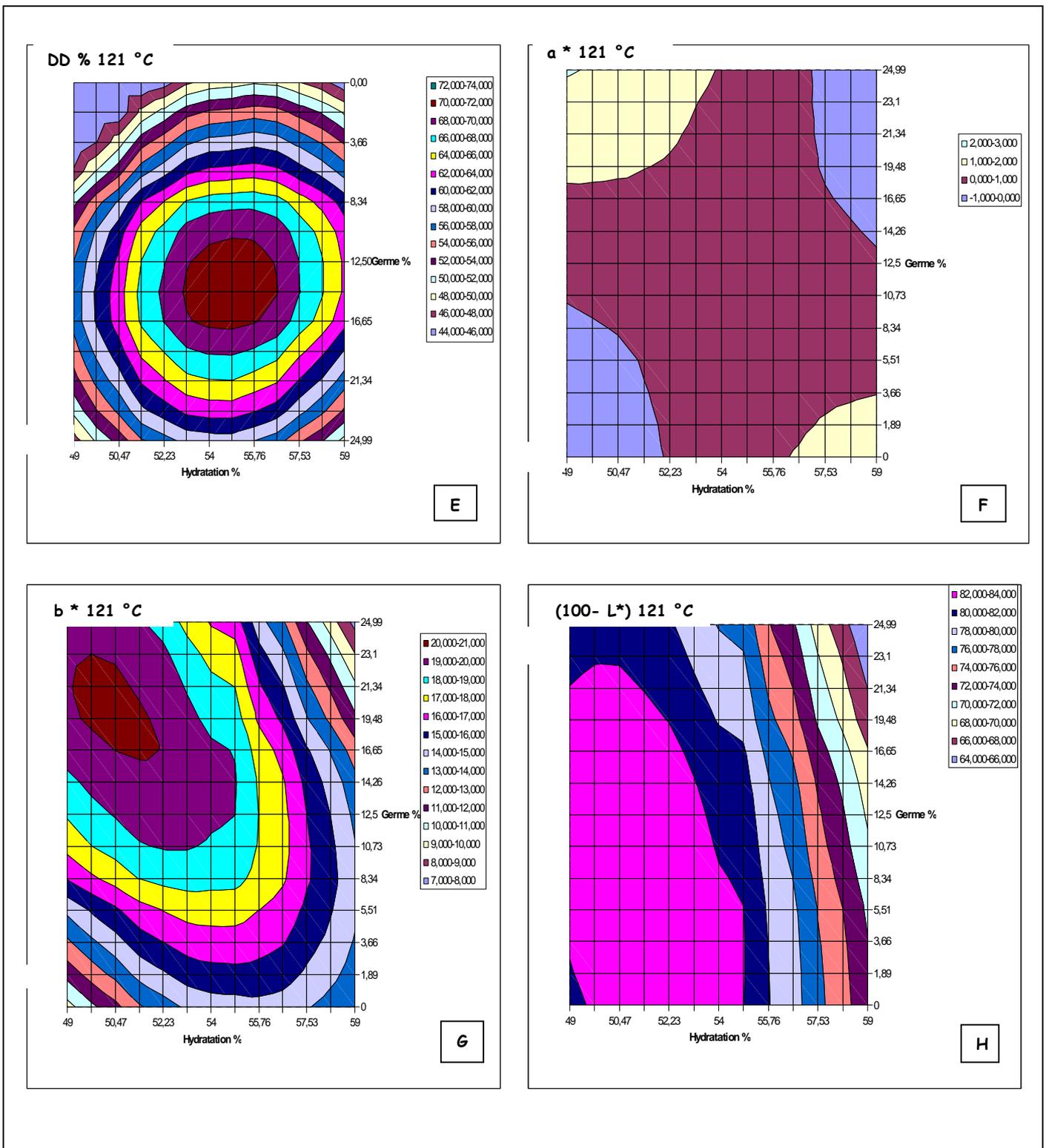


Figure 19. Courbes de niveaux des pâtes de la formule semoule additionnées du germe de blé traité à 121°C coupées au même niveau que le témoin de semoule de blé dur

La superposition des courbes de niveaux des réponses de l'indice du degré de délitescence (DD), de l'indice de rouge (a^*), de l'indice de jaune (b^*) et l'indice de brun ($100-L^*$) a permis de limiter des domaines optimums des niveaux *Germe- Eau* :

([11.61-24.99] % Germe traité à 90 °C et [51.52-56.47] % Eau) (Figure n° 20).

([21.34-24.99] % Germe traité à 121 °C et [49-50.47] % Eau) (Figure n° 21).

Tous les points à l'intérieur de ces domaines sont supposés assurer des caractéristiques culinaires et de couleur les plus proches à ceux du témoin.

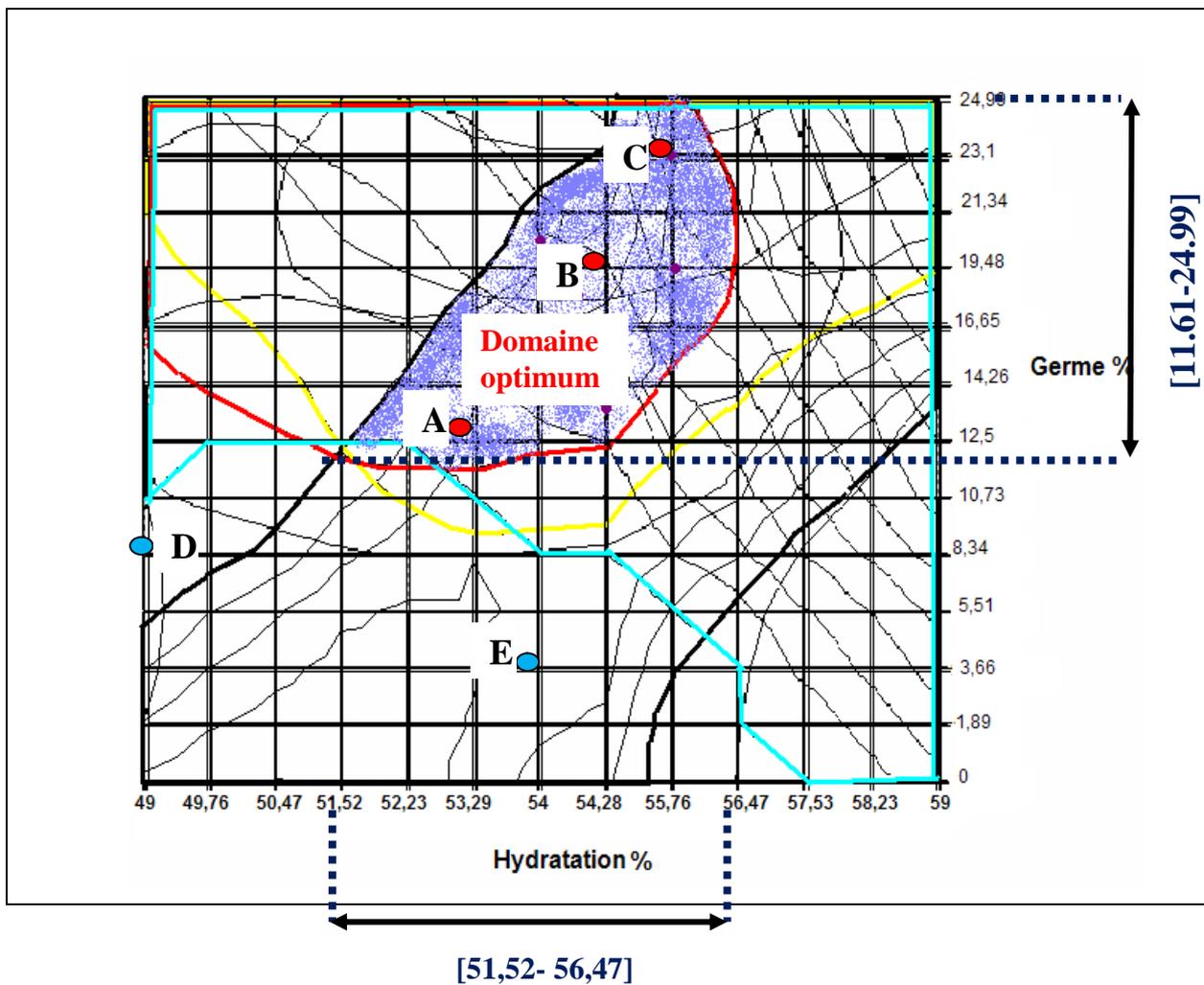


Figure 20. Délimitation du domaine optimum Germe de blé traité à 90 °C- Eau des pâtes de la formule semoule incorporée du germe de blé

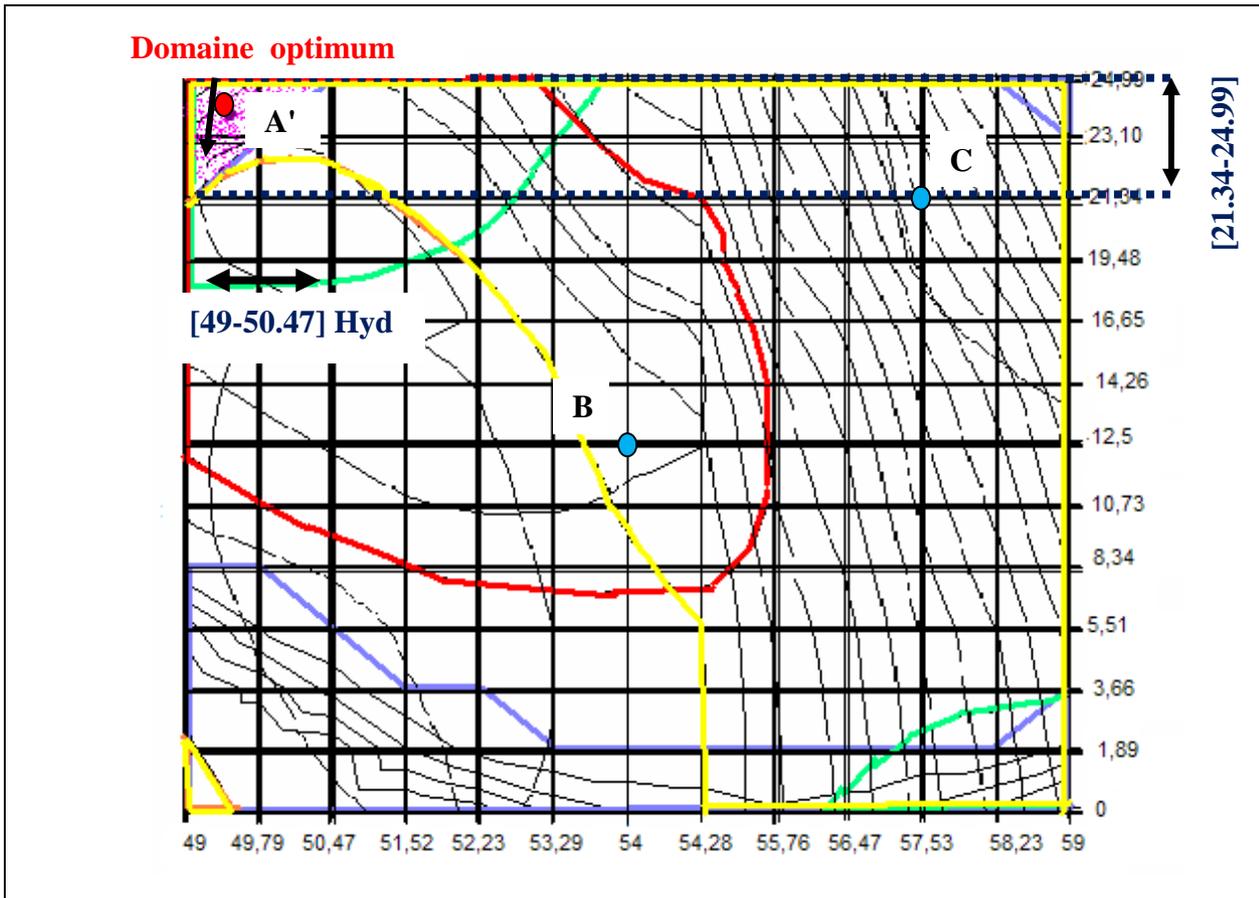


Figure 21. Délimitation du domaine optimum Germe de blé traité à 121 °C- Eau des pâtes de la formule semoule incorporée du germe de blé

2.5.1. Validation des résultats de l'optimisation

En vue de valider l'ensemble des résultats d'optimisation obtenus par MSR, nous avons sélectionné dans un premier temps des couples Germe-Hydratations à l'intérieur et en dehors des domaines optimums (tableau n° 21) puis nous avons vérifié quelques unes des caractéristiques des pâtes optimales :

- Test de pastification ;
- Qualité culinaire représentée par les pertes à la cuisson et l'indice de gonflement ;
- Imagerie des pâtes ;
- Dosage de l'acidité de l'eau de cuisson ;
- Caractérisation sensorielle.

Tableau 21. Couples Germe de blé-Hydratations représentatifs des domaines optimums et hors domaines optimums après optimisation par MSR des pâtes de la formule semoule additionnée du germe de blé

| | Couples (Germe 90°C- Hydratations) % | Couples (Germe 121°C- Hydratations) % |
|--|---|--|
| <i>DANS LES DOMAINES OPTIMUMS</i> | A (12.5-53.29) B (19.48-54.28) C (23.1-55.76) | A' (24.04-49.39) |
| <i>HORS DOMAINES OPTIMUMS</i> | D (8.34-49) E (3.66- 54) | B (12.5- 54) C (21.34-57.53) |

2.5.1.1. Test de pastification des points de vérification

Les tests de pastification restent le principal outil de vérification des résultats d'optimisation d'ajout de germe de blé traité à 90°C et 121°C à la formule semoule approchée par MSR et de la qualité finale des pâtes. Ces tests vont permettre notamment de vérifier la qualité culinaire représentée par le degré de délitescence et l'indice de gonflement, le dosage de l'acidité de l'eau de cuisson complétée par une imagerie des pâtes fabriquées et confortées par une caractérisation sensorielle des pâtes sèches et cuites.

2.5.1.2. Qualité culinaires des points de vérification

La qualité culinaire des pâtes optimales a été appréciée par la détermination du degré de délitescence et l'indice de gonflement à des temps de cuisson. Selon NASEHI *et al.* (2009); ABECASSIS (2011), la qualité des pâtes dépend trois facteurs :

- la matière première ;
- la recette de production ;
- et les étapes de production.

a. Temps de cuisson

Les résultats relatifs aux Temps Optimal de Cuisson (TOC) et de surcuisson des pâtes optimales additionnées de germe de blé et des pâtes témoins à base de semoule de blé dur fabriqués sans germe sont représentés dans les figures n° 22 et 23.

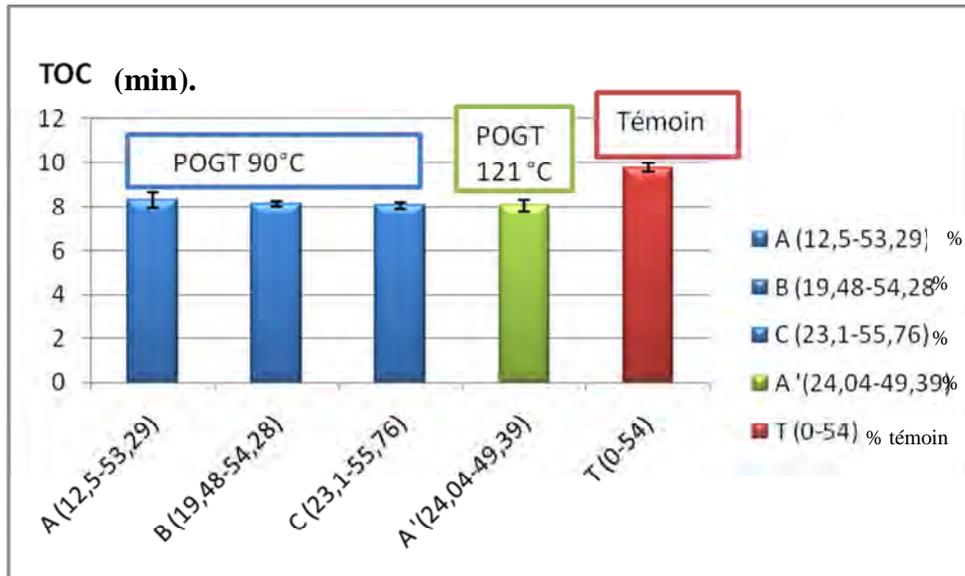


Figure 22. Temps Optimal de Cuisson (TOC) des pâtes optimales additionnées de germe de blé et pâtes témoins à base de semoule de blé dur

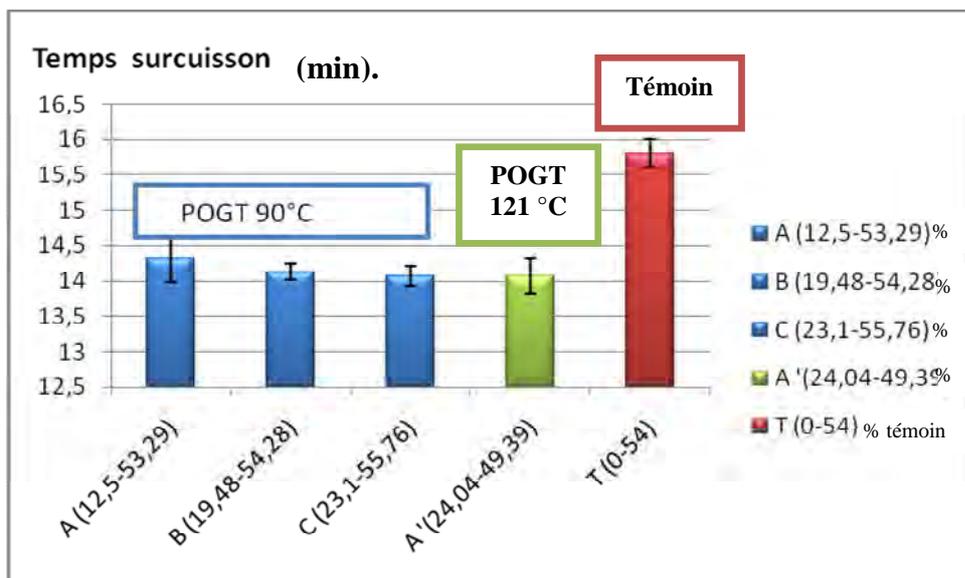


Figure 23. Temps de surcuisson (TOC + 6 min) des pâtes optimales additionnées de germe de blé et pâtes témoins à base de semoule de blé dur

POGT 90°C : pâte optimale enrichie par le germe de blé traité à 90°C.

A, B, C : Couples (Germe de blé traité à 90 °C –Eau) à l’intérieur du domaine optimum

POGT 121°C : pâte optimale enrichie par le germe de blé traité à 121°C.

A' : Couple (Germe de blé traité à 121°C –Eau) à l’intérieur du domaine optimum

T : pâte témoin fabriquée à base de semoule sans addition de germe de blé.

Les pâtes additionnées de germe de blé traité respectivement à 90 °C et à 121°C se caractérisent par des temps de cuisson significativement plus court que celles non supplémentées avec du germe et fabriquées selon le même diagramme et celles confectionnées avec du blé dur du commerce ($P < 0.0001$). Le temps de cuisson enregistré par exemple pour les pâtes enrichies avec 19.48 % de germe de blé et traité à 90°C est de 7.30 ± 0.30 (min). contre respectivement 9.9 ± 0.17 (min). et 9.27 ± 0.25 (min). dans le cas des pâtes de blé dur du commerce : pâtes de commerce 1, pâtes de commerce 2 et de 9.8 ± 0.20 (min). pour les pâtes témoins sans apport de germe. Cependant, il n'existe pas de différence significative relative au temps optimum de cuisson entre les pâtes enrichies à différents taux d'incorporation et du type de traitement de germe de blé.

Cette différence dans le temps de cuisson enregistré entre les pâtes de témoin de semoule de blé dur et celles enrichies au germe de blé pourrait s'expliquer par la diminution de la quantité du gluten et de la rupture physique de la matrice du gluten conditionnée par la présence de particules de germe de blé dans les pâtes. Ces transformations entraînent par conséquent la formation dans la pâte d'un réseau du gluten plus faible ce qui facilite l'absorption de l'eau et diminue le temps de cuisson.

Cette tendance a été observée par PETITOT (2009) ; PETITOT *et al.* (2010) sur des pâtes enrichies par la farine de légumineuse alimentaire avec un taux d'incorporation de 35 %. NASEHI *et al.* (2009), EDWARDS *et al.* (1995) et MANTHEY *et al.* (2002) confirment donc les résultats de PETITOT *et al.* (2010) et montrent qu'il existe une différence significative pour les temps optimums de cuisson des pâtes enrichies par la farine de soja comparées à celles issues de la farine de blé dur (Témoin). PINARLI *et al.* (2004) observent par ailleurs que l'enrichissement de la formule semoule par du germe de blé brut et traité par un séchage dans une micro-onde (750 W/ 3-4 min) avec un taux de 15 % diminue en effet la durée optimale de cuisson.

Les travaux de MANTHEY *et al.* (2007) effectuées sur des pâtes enrichies avec un taux de 30 % de la farine de son de sarrasin et MANTHEY *et al.* (2002) sur des pâtes de semoule blé dur, observent que le temps de cuisson ne change pas même avec des températures de séchage élevées de l'ordre de 55 °C à 90 °C. Par ailleurs, la température de circulation d'eau et la vitesse de vis de l'extrudeur ne semblent pas exercer d'effet significatif sur le temps de cuisson (NASEHI *et al.*, 2009).

b. Degré de délitescence

Selon YETTOU *et al.* (2000), le degré de délitescence des pâtes correspond au degré de désintégration des pâtes cuites. Les figures n° 24 et 25 représentent les pertes de matière dans l'eau de cuisson (degré de délitescence) en % de matière sèche des pâtes optimales et des pâtes témoins de semoule de blé dur fabriqués sans germe à temps de cuisson.

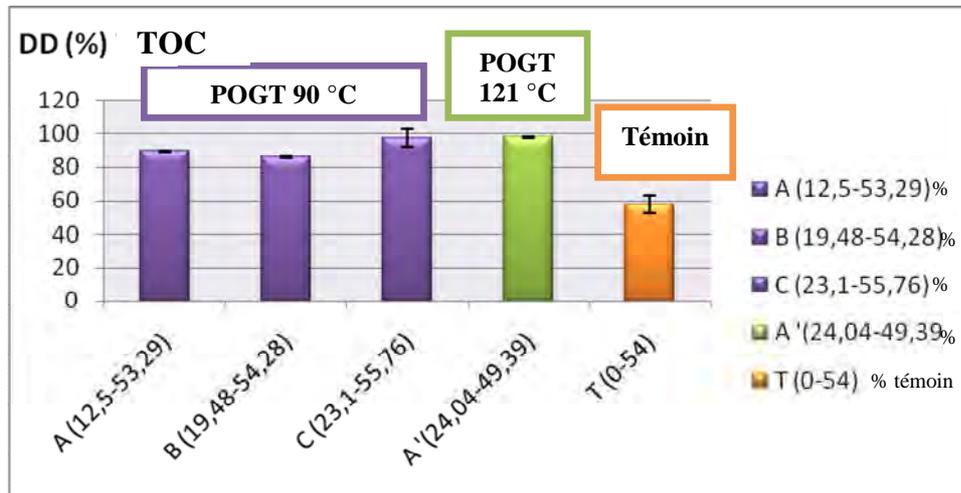


Figure 24. Degré de délitescence (% ms) à Temps Optimum de Cuisson (TOC) des pâtes optimales et des pâtes témoins de semoule de blé dur fabriqués.

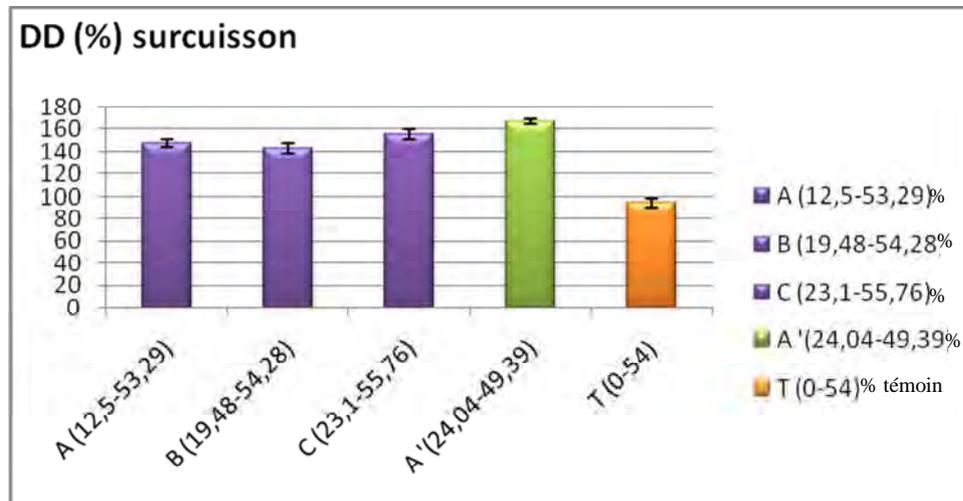


Figure 25. Degré de délitescence (% ms) à temps de surcuisson des pâtes optimales et des pâtes témoins de blé dur fabriqués.

L'analyse de variance des résultats relatifs au degré de délitescence montre que les pâtes additionnées de germe de blé traité respectivement à 90°C et à 121 °C ont des pertes de matière dans l'eau de cuisson significativement plus élevées que celles du témoin non supplémenté de germe et fabriqué selon le même diagramme et à celles commercialisées ($P < 0.0001$). Le degré de délitescence par exemple enregistré est de l'ordre de 142.93 ± 4.17 %

(ms) pour les pâtes additionnées de 19.48 % de germe de blé et traitées à 90 °C contre respectivement 86.86 ± 0.16 % (ms), 76.10 ± 4.04 % (ms), 84.28 ± 4.30 % (ms), 76.14 ± 9.61 % (ms) dans le cas des pâtes de blé dur du commerce : pâtes de commerce 1, pâtes de commerce 2, pâtes de commerce 3, pâtes de commerce 4 et de 94.47 ± 3.85 % (ms) pour les pâtes témoins sans apport de germe. Cependant, il ressort qu'il n'existe pas de différence significative relative à ce paramètre entre les pâtes enrichies à différents taux d'incorporation et du type de traitement de germe de blé, ce qui concorde aux résultats des travaux de PINARLI *et al.* (2004) sur des macaronis supplémentées du germe de blé brut et traité avec du micro-onde.

Les protéines de blé dur se composent principalement de gluténines et gliadines qui ont une capacité de former des liaisons disulfures intra-et intermoléculaires conduisant à la formation d'un réseau tridimensionnel appelé gluten lui même responsable des propriétés élastiques et culinaires des pâtes alimentaires (MASTUO et IRVINE, 1970). La quantité de gluten et la qualité de ses protéines sont des facteurs prédéterminant de la valeur pastière de la semoule (FEILLET et DEXTER, 1996 ; FEILLET, 2000) et de la texture de la pâte (SISSONS *et al.*, 2007). FEILLET (2000), trouve que les pertes de la matière à la cuisson sont consécutives à l'existence d'une relation étroite entre la quantité et la qualité des protéines. Avec des teneurs élevées de protéines, les brins des spaghetti gonflent et tiennent leurs fermeté au cours de la cuisson avec moins de pertes à la cuisson (DEXTER *et al.*, 1983).

En revanche, les protéines de germe de blé sont composés principalement de globulines solubles dans les sels et les albumines solubles dans l'eau (GUEGUEN *et al.*, 1988; BILGIÇLI *et al.*, 2006 ; HASSAN *et al.*, 2010). Ces protéines semblent jouer un rôle de dilution des protéines du gluten conditionnant un affaiblissement du réseau protéique qui entoure les granules d'amidon qui sont souvent solubilisés dans l'eau de cuisson. En outre, une faible énergie apportée lors du malaxage des pâtes (ICARD-VERNIERE, 1999) empêcherait le développement d'un réseau protéique (MASTUO *et al.*, 1978).

Egalement, la teneur élevée du germe en lipide pourrait expliquer ce comportement de délitescence. MASTUO *et al.* (1986) et SISSONS (2008) prouvent que ces lipides essentiellement non polaires ont des effets sur la qualité des pâtes en terme de viscosité et la délitescence. Au cours de l'étape de malaxage de la pâte, les lipides libres interagissent avec les composants de la semoule essentiellement les protéines ce qui conduit à l'amélioration de la force du gluten. Le processus de mélange accélère la formation des liaisons hydrophobes des lipides non polaire avec les composants solubles dans l'acide comme le glutenine,

gliadine, albumines et les composants non azotés (CHUNG, 1986). Tandis que les lipides polaires interagissent principalement avec les glutenines. Les lipides polaires libres peuvent également se lier à la gliadine par des liaisons hydrophiles. Ces liaisons améliorent les interactions de protéines ce qui fournissent un meilleur support structural pour le réseau du gluten (CHUNG *et al.*, 1978).

La dilution des protéines du gluten consécutive à l'incorporation des protéines germe dans notre semoule pourrait éliminer leurs interaction avec les lipides et par conséquent augmentation du caractère collant et les pertes de matière à la cuisson des pâtes. En outre, des températures élevées de séchage conduisent à la meilleure qualité culinaire du produit final avec une fermeté élevée, une diminution des pertes à la cuisson et le caractère collant (AKTAN *et al.*, 1992 ; ZWEIFEL *et al.*, 2003).

Ainsi et conformément à nos résultats, il ressort que la plupart des auteurs ont aussi constaté une perte de matière élevée à la cuisson notamment dans les spaghettis enrichis soit par la farine de légumineuses alimentaires soit par de la farine de soja et ce par suite à la destruction de la matrice protéique (NIELSEN *et al.*, 1980 ; RAYAS-DUARTE *et al.*, 1996; ZHAO *et al.*, 2005 ; TORRES *et al.*, 2007a ; NASEHI *et al.*, 2011). Toutes ces modifications observées et décrites relatives à la solubilité des protéines sembleraient résider au niveau du changement du degré d'association entre les chaînes polypeptidiques, les liaisons hydrogènes, les interactions hydrophobes et les liaisons covalentes.

A ce titre, la différence de pertes de matières dans l'eau de cuisson observées dans le cas de notre étude ou celle signalée par la littérature pour les pâtes de commerce résulte dans l'action de nombreux facteurs propres à l'ensemble des substrats utilisés dans la fabrication des pâtes tout en agissant seuls ou combinés. Parmi ces facteurs, on peut noter : l'effet variétal (MESTERS *et al.*, 1989), l'effet granulométrique (ABECASSIS *et al.*, 1994 ; MANTHEY *et al.*, 2002), la composition des substrats utilisés pour la pastification (NASEHI *et al.*, 2009; PETITOT *et al.*, 2009c, PETITOT *et al.*, 2010), les conditions d'extrusion et l'effet de cisaillement (vitesse de vis de l'extrudeur, la pression pendant l'extrusion, la surface de la matrice de l'extrudeur, le format des filières (MESTERS *et al.*, 1989 ; ABECASSIS *et al.*, 1994 ; NASEHI *et al.*, 2009; NASEHI *et al.*, 2011) et les températures de séchage (D'EGIDIO *et al.*, 1990 ; AKTAN et KHAN 1992 ; GRANT *et al.*, 1993 ; NOVARO *et al.*, 1993 ; MALCOLMSON *et al.*, 2003 ; ZWEIFEL *et al.*, 2003 ; BAIANO *et al.*, 2006).

c. Indice de gonflement

L'appréciation de la tenue à la surcuisson est évaluée par le gonflement ou la capacité de fixation de l'eau et les pertes à la cuisson (FEILLET, 2000 ; NASEHI *et al.*, 2009). Les résultats de l'indice de gonflement (% ms) des pâtes optimales et ceux du témoin de blés durs fabriqués sont représentés dans les figures n° 26 et 27.

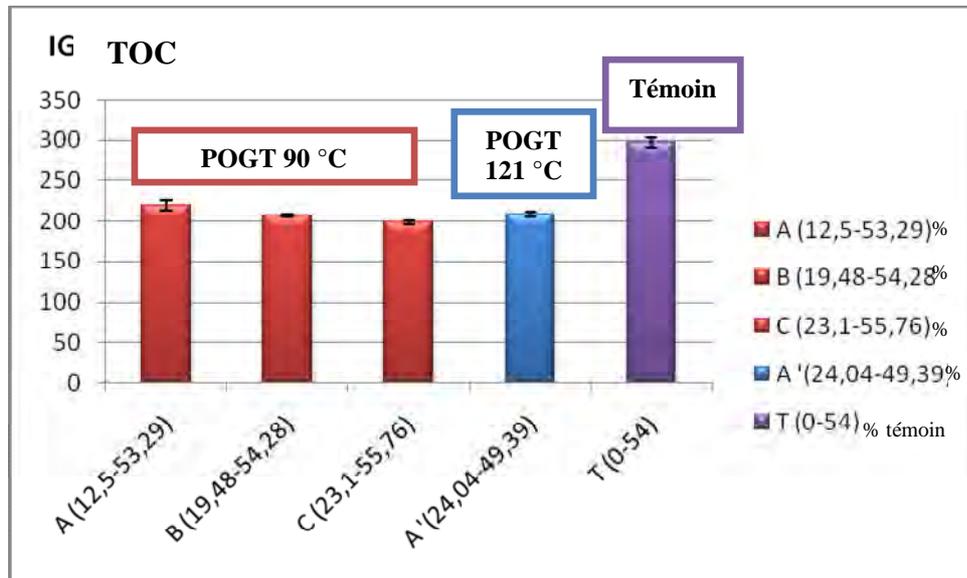


Figure 26. Indice de gonflement (% ms) à Temps Optimum de Cuisson (TOC) des pâtes optimales et des pâtes témoins de semoule de blé dur fabriqués.

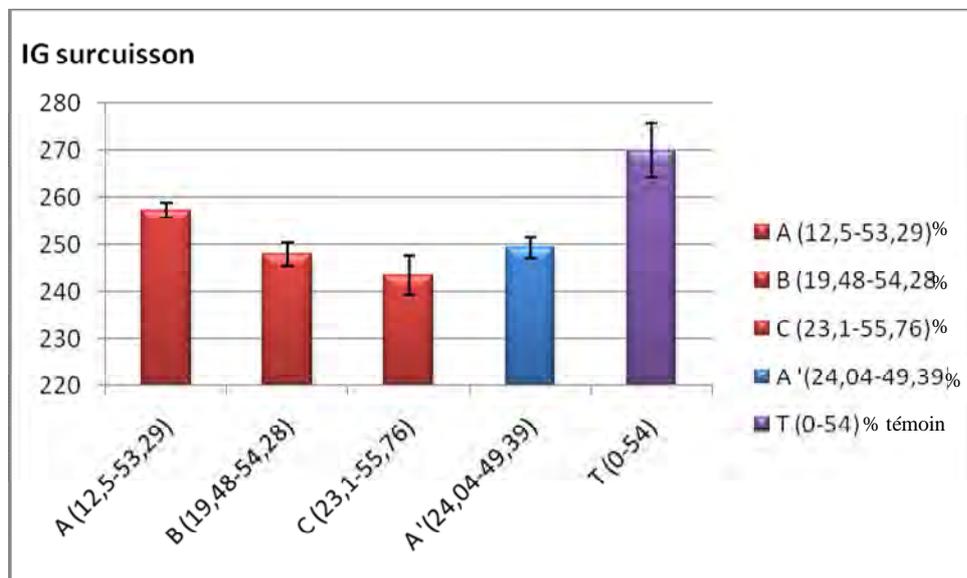


Figure 27. Indice de gonflement (% ms) à temps de surcuisson des pâtes optimales et des pâtes témoins de semoule de blé dur fabriqués.

L'analyse de variance fait ressortir qu'il existe une différence significative relative à l'indice de gonflement entre les pâtes enrichies avec du germe de blé (220.02 ± 5.96 % ms

pour les pâtes additionnées avec 12.50 % de germe de blé et traité à 90 °C par exemple) comparativement à celles fabriquées sans germe de blé et préparées selon le même diagramme élaboré (témoin : 296.81 ± 5.75 % ms). Cependant, il n'existe pas de différence significative relative à ce paramètre entre les pâtes enrichies à différents taux d'incorporation et du type de traitement de germe de blé. Egalement, il existe une différence significative pour l'indice de gonflement entre pâtes fabriquées dans le cadre de cette étude et celles du commerce pour $P < 0.0001$. Les valeurs observées pour ce paramètre sont de 296.81 ± 5.75 % (ms) pour les pâtes témoin sans addition de germe de blé contre respectivement 118.04 ± 4.58 % (ms), 142.81 ± 3.88 % (ms), 155.32 ± 3.82 % (ms) et 151.96 ± 4.87 % (ms) pour le cas des pâtes de blé dur du commerce en l'occurrence : pâtes de commerce 1, pâtes de commerce 2, pâtes de commerce 3 et pâtes de commerce 4.

L'absorption d'eau se fait par le réseau protéique ainsi que par les granules d'amidons (ABECASSIS *et al.*, 1994 ; FEILLET, 2000 ; PETITOT *et al.*, 2009c ; PETITOT *et al.*, 2010). Le faible niveau de ce paramètre pourrait s'expliquer par la diminution de la teneur en amidon après ajout du germe de blé (LUCISANO *et al.*, 2008 ; CHILLO *et al.*, 2008b). Ces constatations faites relatives à l'effet de l'incorporation sur l'indice de gonflement des pâtes sont similaires aux résultats des travaux réalisés par NASEHI *et al.* (2009) sur des pâtes enrichies avec de la farine de soja.

La chaleur semble avoir aussi un effet très important sur la structure des protéines. Elle pourrait entraîner en effet leur dénaturation dont les molécules tendent à se dérouler et rendent les groupements fonctionnels exposés vers la surface extérieure en ayant agité sur l'augmentation de la surface hydrophobe des protéines ce qui diminue par conséquent sa capacité à fixer l'eau (BERGMAN *et al.*, 1994). Des résultats similaires sont enregistrés par PINARLI *et al.* (2004) sur des macaronis additionnés de germe de blé brut et aussi pour celui traité par micro-onde à un taux de 15 %.

Les données consignées dans les figures n° 28 et 29 montrent que l'indice de gonflement est significativement affecté par le temps de cuisson. Il est donc clair que plus le temps de cuisson est long plus la quantité d'eau absorbée est importante ce qui confirme les résultats des travaux de PINARLI *et al.* (2004).

La différence de comportement de l'absorption d'eau entre les pâtes fabriquées dans le cadre de cette étude et celles du commerce trouve son explication selon la littérature par la variation du diagramme de fabrication. Selon, NASEHI *et al.* (2009), montrent qu'il existe des

interactions entre les ingrédients utilisés et la vitesse de vis de l'extrudeur ce qui explique l'effet significatif sur la capacité d'absorption d'eau à temps optimal de cuisson. Selon ces mêmes auteurs, il apparaît que la température de circulation d'eau n'a aucun effet sur ce paramètre. Par contre, ABECASSIS *et al.* (1994) trouvent que l'augmentation de température de circulation d'eau dans l'extrudeur exerce un effet significatif sur l'indice de gonflement des spaghettis du blé dur.

Donc la force de gonflement indique la capacité de l'amidon à s'hydrater sous des conditions spécifiques (temps/température) (SINGH *et al.*, 2006) et que celui-ci dépend aussi de l'espèce botanique et du type de l'amidon natif (BULEON *et al.*, 1998).

Il importe donc de conclure que le temps de cuisson semble avoir un lien avec la nature du supplément incorporé dans la fabrication des pâtes au vu des réactions observées.

La qualité culinaire est également influencée par l'origine histologique des produits. Les pâtes alimentaires issues de semoules très pures provenant du centre de l'albumen possèdent de bonnes propriétés rhéologiques (en particulier d'élasticité) mais ont tendance à se déliter si la cuisson se prolonge. Inversement les produits les plus périphériques fournissent des produits qui manquent d'élasticité mais qui peuvent conserver un remarquable état de surface même après cuisson prolongée en dépit d'importantes pertes à la cuisson.

L'aspect et la qualité culinaire des pâtes sont influencés par la composition biochimique et l'état physique (granulométrie) des semoules, eux même liés à l'origine histologique des produits.

La structure finale de pâtes est donc le résultat de changements successifs qui se produisent tout au long des étapes de fabrication et qui touche principalement l'amidon et les fractions protéiques. Une modification des paramètres du processus de fabrication pourrait donc modifier la structure des pâtes et par conséquent résulte des répercussions sur ses propriétés culinaires et nutritionnelles.

2.5.1.3. Imagerie des pâtes

Une imagerie des pâtes témoins, des pâtes du commerce et celles optimales à l'état sec et cuit est représentée par les figures n° 28, 29 et 30. Ainsi une description visuelle de ces pâtes est donnée dans les tableaux n° 22 et 23.

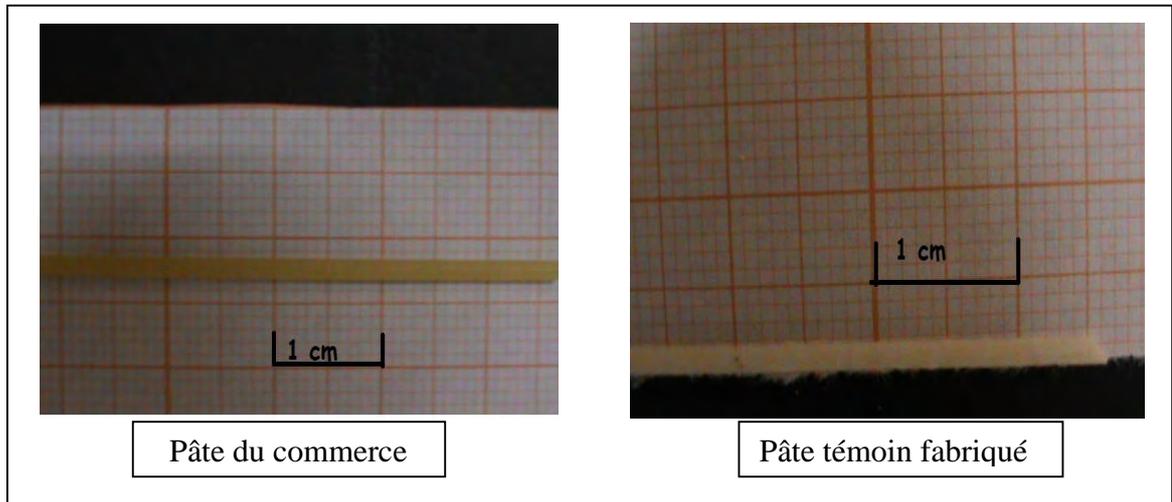


Figure 28. Imagerie des pâtes témoins sèches de blé dur fabriquées (type laminées) et pâtes du commerce

Tableau 22. Description visuelle des pâtes témoins sèches de blé dur fabriquées et pâtes du commerce

| Pâtes | Paramètres de comparaison | | | |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------|-----------------|
| | Piqûres | Texture superficielle | Couleur | Brisures |
| Témoin | absence | Peu rugueuse | jaune crème | facile à casser |
| Commerce C ₁ | absence | quelques gerçures | jaune foncé | Bonne tenue |
| Commerce C ₂ | quelques points | Présence de gerçures | jaune | Bonne tenue |

FEILLET (1986) avait constaté la présence de gerçures au niveau des pâtes du commerce dont leur fabrication a été réalisée de façon industrielle et séchées dans des sècheurs à différentes températures. Ces constatations confirment les observations faites dans le cas de notre étude. La différence des conditions de fabrication pourrait expliquer la différence notée entre les pâtes du commerce et celles des témoins de blé dur.

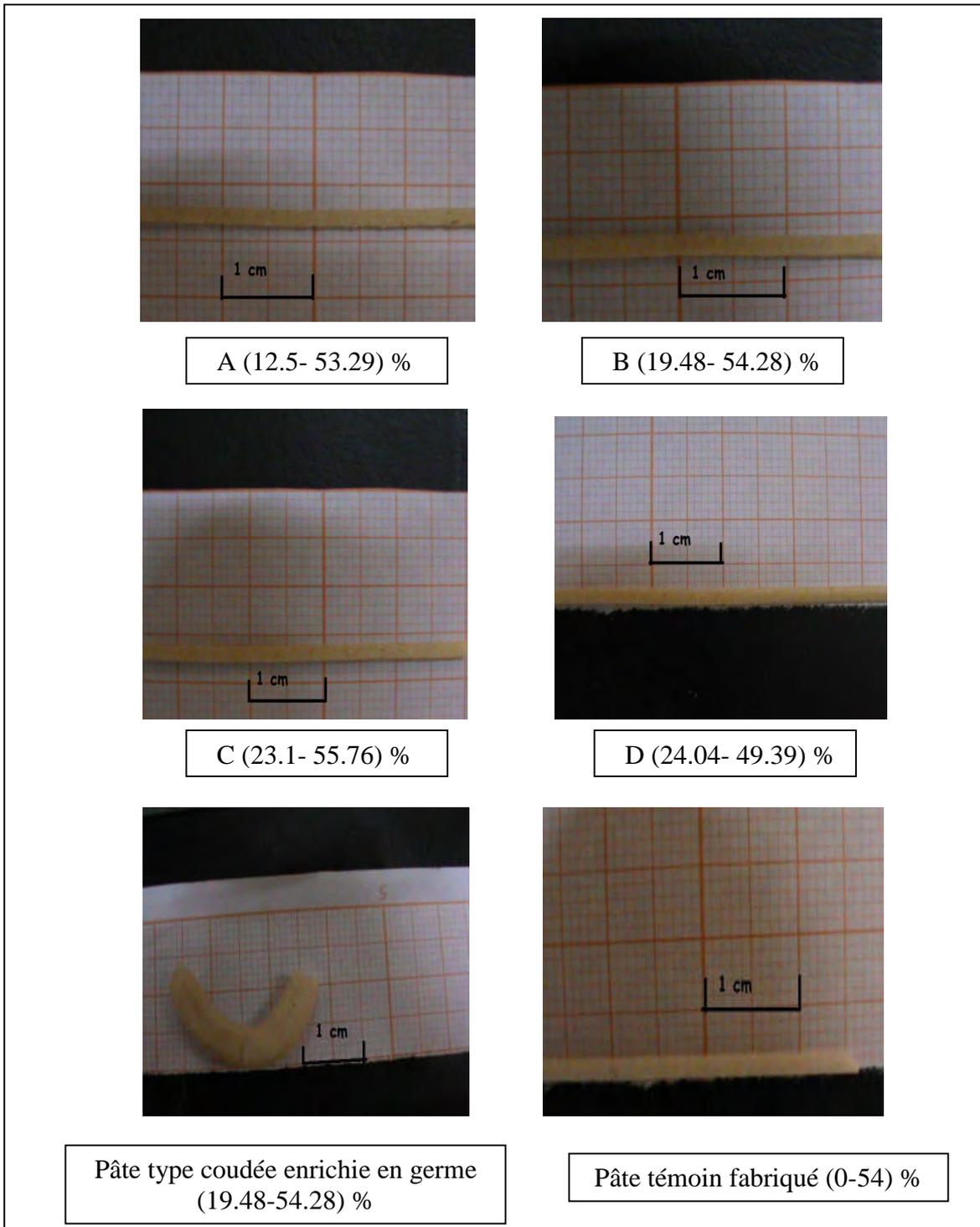


Figure 29. Imagerie des pâtes optimales enrichies par le germe de blé traité à 90°C, 121 °C et celles témoins sans germe (types laminées et coudées)

Tableau 23. Description visuelle des pâtes optimales enrichies par le germe de blé et pâtes témoins de blé dur fabriquées (types laminées et coudées)

| <i>Pâtes types laminées et coudées</i> | Paramètres de comparaison | | | |
|--|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| | Piqûres | Texture superficielle | Couleur | Brisures |
| Témoin | Absence | Peu rugueuse | Jaune crème | Facile à casser |
| <u>POGT 90 °C :</u> | | | | |
| A (12.5-53.29 %) | Absence | Peu rugueuse | Jaune | Bonne tenue |
| B (19.48-54.28 %) | Absence | Peu rugueuse | Jaune | Bonne tenue |
| C (23.1-55.76 %) | Absence | Peu rugueuse | Jaune peu foncé | Bonne tenue |
| <u>POGT 121 °C :</u> | | | | |
| A' (24.04-49.39 %) | Absence | Peu rugueuse | Jaune foncé | Bonne tenue |

D'après les observations du tableau n° 23, nous constatons que les pâtes témoins et celles enrichies par le germe de blé ont une texture peu rugueuse. Cette tendance semblerait être liée à la nature de moufle sans teflon utilisé pendant le laminage. En ce qui concerne la coloration, nous remarquons que les pâtes additionnées de germe de blé ont une couleur jaune. Elle est de plus en plus foncée avec l'incorporation de germe de blé. L'absence du vide lors du tréfilage dans le diagramme de fabrication suivie pourrait expliquer la couleur des pâtes produites. Ces constatations sont en accord avec celles observées par PINARLI *et al.* (2004) sur des macaronis enrichis par le germe de blé brut et traité. Egalement, Les lipides constituent un facteur déterminant de la couleur de la pâte. Elle est établit au cours de la période de fabrication des pâtes en raison de l'oxydation des pigments jaunes sous l'action des lipoxygénases principalement au cours de l'hydratation, malaxage, extrusion et pendant l'étape de séchage (SISSONS, 2008).

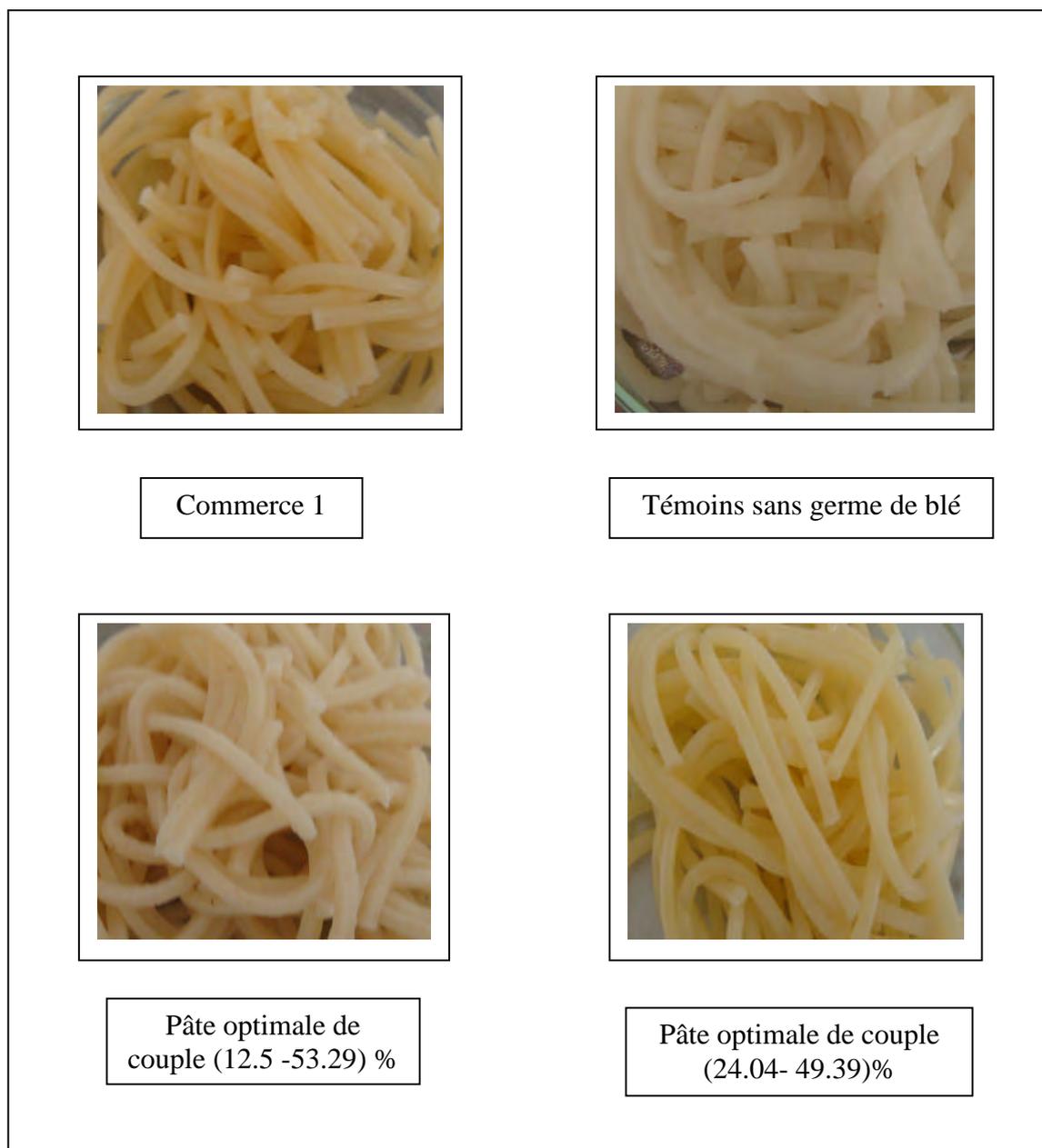


Figure 30. Imagerie des pâtes optimales enrichies par le germe de blé traité à 90 °C, 121 °C et celles témoins sans germe (types laminées cuites).

2.5.1.4. Acidité de l'eau de cuisson

Les résultats d'acidité de l'eau à temps de surcuisson pâtes optimales, des pâtes témoins fabriqués sont représentée dans la figure n° 31.

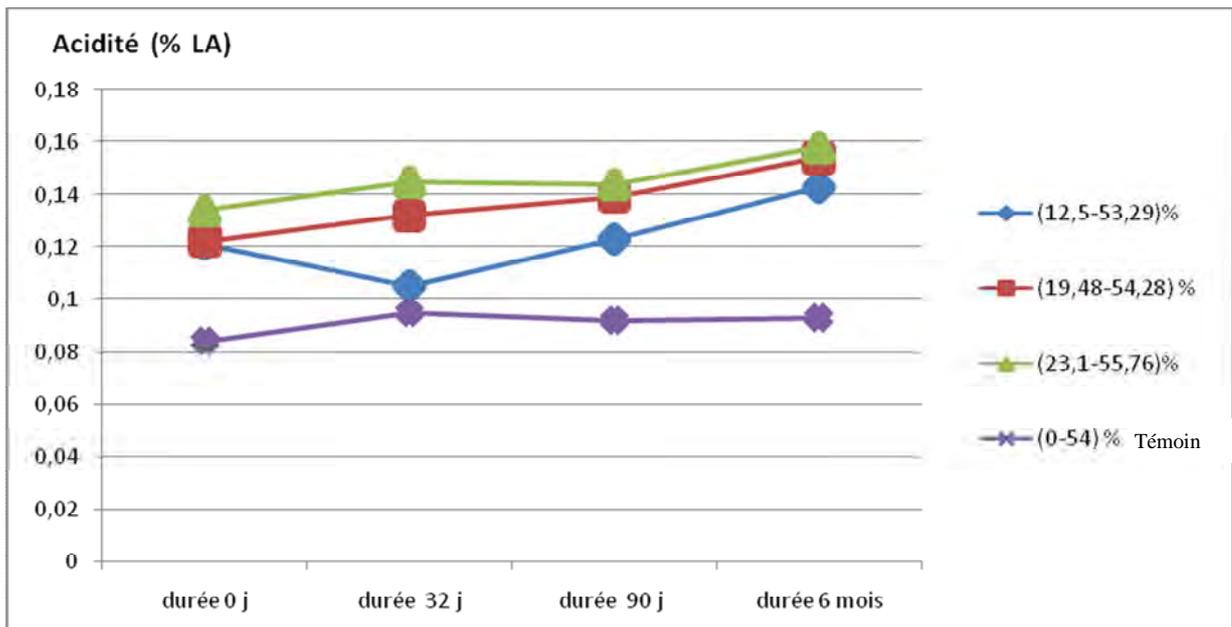


Figure 31. Cinétique de l'acidité de l'eau à temps de surcuisson des pâtes optimales (germe-hydratations) et des pâtes témoins fabriquées (LA % : En p. cent d'acide lactique)

Les résultats relatifs à l'acidité de l'eau de cuisson montrent que les pâtes enrichies en germe de blé traité à 90°C et à 121 °C ont un taux d'acidité plus élevé que les pâtes témoins non supplémentées et fabriquées selon le même diagramme ($P < 0.0001$). L'enrichissement en germe de blé augmente de manière significative l'acidité des pâtes fabriquées ($P < 0.0001$), quelque soit le mode de traitement thermique utilisé. De la même manière, nous notons une corrélation significative entre l'acidité des pâtes enrichies par le germe et la durée de stockage ($r = 0.8$) contre une stabilité de celle-ci pour le témoin sans germe.

La prise en considération de nos résultats d'acidité laisse penser que les deux traitements thermiques appliqués en vue de stabiliser le germe incorporé n'ont pas été suffisamment efficace pour assurer la désactivation de l'activité enzymatique responsable de l'instabilité de nos pâtes fabriquées au cours du temps. Les résultats d'études faites sur l'effet de traitements thermiques proches aux nôtres sur la stabilité du germe de blé et sur des pâtes alimentaires enrichies en germe (SRIVASTAVA *et al.* (2007) et PINARLI *et al.* (2004)), vont dans le même sens que les nôtres.

Nous concluons que malgré la bonne faisabilité technologique des pâtes enrichies en germe de blé, il importe d'étudier l'ensemble des traitements thermiques en vue d'assurer la meilleure stabilité enzymatique des produits fabriqués au cours du temps.

2.5.1.5. Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle s'est déroulée en trois étapes. Nous avons réalisé un test triangulaire, un test de classement par rang et un test hédonique. Ces tests sont réalisés sur des pâtes optimales et celles témoins de semoule de blé dur fabriquées sèches et cuites.

a. Test triangulaire

Quand tous les dégustateurs ont eu fini le test, la bonne réponse repérée porte le signe (+) si les dégustateurs ont bien identifié l'échantillon distinct et dans le cas contraire le signe (-) caractérise la mauvaise réponse. Selon le test de Tukey, nous avons comparé le nombre total de dégustateurs ayant donné les bonnes réponses (X) par rapport au nombre total de dégustateurs (n) (Annexe n° 5).

❖ Avis des dégustateurs sur les pâtes sèches et cuites liées au type de traitement

On note deux (2) bonnes réponses dans le cas des pâtes sèches dont la probabilité est de $0,857 \geq 0,05$ pour un niveau de signification au seuil de 5 % contre 5 dégustateurs qui ont donné une réponse favorable pour le cas des pâtes cuites pour une probabilité de $0,145 \geq 0,05$. Consécutivement à ces résultats de probabilité, il importe de souligner qu'il n'existe pas de différence significative entre les échantillons secs et cuits pour la probabilité au seuil de 5 %, car une différence est jugée significative lorsque la probabilité serait égale ou inférieure à 0.05.

A ce sujet, Il y'a lieu de conclure que l'analyse statistique des résultats obtenus sur les différents traitements effectués sur le germe de blé ne révèle aucune différence significative.

❖ Avis des dégustateurs sur les pâtes sèches et cuites par rapport au taux d'incorporation

Dans le cas des pâtes sèches : on enregistre 9 bonnes réponses pour les deux taux d'incorporation à savoir respectivement 12.5 % et le 23.01 % ; 8 bonnes réponses pour les niveaux d'incorporation respectifs de 19.48 % et de 24.04 %. La probabilité estimée est de 0.001 (b) d'où inférieure à 5% ($p = 0.001 \leq 0,05$) donc il y'a signification au seuil 0.05.

Dans le cas des pâtes cuites : on enregistre 9 bonnes réponses avec des taux d'incorporation respectifs de 12.5 %, 19.48 % et 23.01 % ; 7 bonnes réponses dans le cas du taux d'incorporation à 24.04 %. La probabilité est de $0,008 \leq 0,05$ (b) pour un seuil de signification de 5 %. A ce sujet, nous pouvons déduire qu'il existe une différence significative

entre les différents échantillons testés, puisque 7/9 et 9/9 des 9 dégustateurs avaient bien choisi l'échantillon qui est différent des 2 autres.

Cette différence est vraisemblablement attribuée à l'effet d'incorporation de germe de blé dans la formule des pâtes à base de semoule qui conditionne ces particularités aux dégustateurs pour la différence de qualité par rapport à l'échantillon témoin sans addition de germe de blé dans l'état sec et cuit.

b. Test de classement

Pour réaliser ce test, il s'agit de classer les différents substrats en faveur de certains paramètres. Dans ce cadre, nous avons demandé aux dégustateurs de classer les échantillons secs selon certaines appréciations tels que l'aspect, la couleur, le goût et l'odeur en termes d'acceptabilité sans donner d'égalité afin d'attribuer à l'échantillon une cote différente même comparable. L'échantillon auquel on accorde des attributs acceptables se voit obtenir la cote 9 et celui qui paraît le moins acceptable reçoit la cote 1. La valeur critique calculée pour $p \leq 0.05$ (09 dégustateurs et 5 échantillons) est de 19 d'après le tableau de l'annexe n° 6.

Les différences entre les totaux de classement par paires, montrent qu'il y'a absence de différences significatives (différences < 19) entre les aspects et les couleurs des pâtes sèches étudiées (A et E) (B et E), (C et E), (D et E) , (A et D)(D et B), (D et C), (C et A), (C et B) (D et A) (D et E) et (A et B). Aussi on note qu'il n' ya pas de différence significative entre les aspects, la couleur et le goût des pâtes cuites.

Après le test, les dégustateurs ont classé les pâtes sèches par ordre de préférence selon l'intensité des attribues étudiées (aspect et couleur) comme suit :

- Premier rang revient aux pâtes enrichies par le germe à un taux de 19.48 % codée par la lettre C ;
- Deuxième rang pour les pâtes additionnées de germe de blé à des taux de l'ordre de 23.01 et 24.04 % codées par les lettres D et E ;
- Troisième rang revient à l'échantillon codé par la lettre B qui correspond à la pâte additionnée de germe de blé à un seuil de 12.5 % ;
- Et enfin l'échantillon du témoin issu de la semoule du blé dur sans addition de germe, occupe le 4^{ème} rang.

Concernant les pâtes cuites, les dégustateurs ont pu les classer par ordre de préférence selon l'intensité des différents indicateurs tels que l'aspect, la couleur et le goût en attribuant :

- la première classe revient à la pâte cuite incorporée à un taux de 19.48 % de germe de blé codée par la lettre C ;
- la deuxième classe revient à celle additionnée à 12.5 % de germe codée par la lettre B ;
- classe trois revient à la pâte enrichie à 24.04 % de germe de blé codée par la lettre E ;
- la classe quatre appartient au témoin codée par la lettre A ;
- et enfin la dernière classe est revenue à la pâte enrichie par 23.01 % de germe de blé codée par la lettre D.

c. Test hédonique

Dans cette étude, nous avons suivi une démarche de réalisation des profils sensoriels, et nous nous sommes intéressés à l'analyse réelle des échantillons secs et cuits sur la base de la liste des descripteurs.

❖ Profil sensoriel des pâtes sèches

Le profil sensoriel des pâtes optimales et témoins sans germe de blé sèches, fabriquées est représenté dans la figure n° 32.

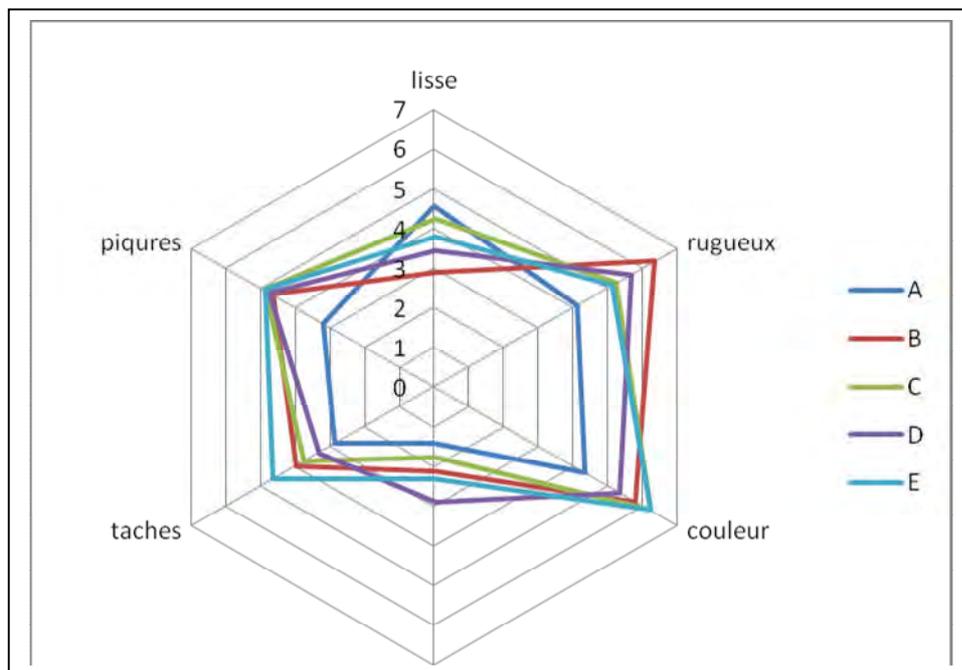


Figure 32. Profil sensoriel des pâtes sèches étudiées [(A) pâte témoin, couple germe hydratation : (B) (12.5-53.29) %, (C) (19.48-54.28) %, (D) (23.1-55.76) %, (E) (24.04-49.39) %]

Après dégustation des différentes pâtes par un panel expérimenté, nous avons constaté que les dégustateurs ont perçu plus intensivement et de manière très singulière les paramètres sensoriels caractérisant les indicateurs relatifs aux aspects des pâtes sèches dont la présence ou l'absence des piqûres ainsi que la couleur. Contrairement au caractère de fissure et des taches blanches, nous avons noté une faible intensité pour chacun de ses descripteurs. L'analyse de ces résultats met en évidence clairement que :

- la pâte témoin de blé dur à un aspect plus lisse, mais aussi une texture rugueuse, moins de piqûres et une couleur jugée acceptable ;
- en revanche, les pâtes additionnées de germe de blé présentent un aspect plus rugueux que celles sans addition de germe avec plus de piqûres et une couleur jugée meilleure.

Les zones indiquées dans la figure n° 32, indiquent que les pâtes additionnées respectivement de 19.48 et 23.01 % de germe de blé sont les plus appréciées par les dégustateurs grâce à leurs caractéristiques organoleptiques intenses. Par contre, les autres produits ont une zone d'acceptabilité trop restreinte due aux faibles intensités des descripteurs pour la texture, la couleur et le caractère de piqûres.

L'ANOVA utilisée pour les notations de la couleur confirme l'existence de différence significative ($p < 0,05$) entre la pâte témoin sans germe de blé et la pâte (C) et que les membres du panel ont été unanimes pour attribuer les meilleures notes pour (C) en raison de sa couleur très appréciée et jugée supérieure par la plupart des membres du panel.

Par ailleurs, d'après l'analyse de la variance, il semblerait que la pâte du témoin (A) ne présente pas de différences significatives au seuil ($p > 0,05$) par rapport aux autres échantillons et aussi pour les indicateurs suivants : l'aspect (aspect lisse, rugueux), les fissures, les taches et les piqûres.

Les indicateurs cités plus haut dont les notes sont sensiblement proches n'ont pas permis au panel des dégustateurs de différencier de manière singulière les pâtes testées en raison de leur faible perceptibilité. Les caractéristiques organoleptiques (aspect, fissures, taches et piqûres) sont en revanche confondues sur l'ensemble des produits analysés.

❖ **Profil sensoriel des pâtes cuites**

Le profil sensoriel des pâtes optimales et celles témoins sans germe de blé cuites est représentés dans la figure n° 33.

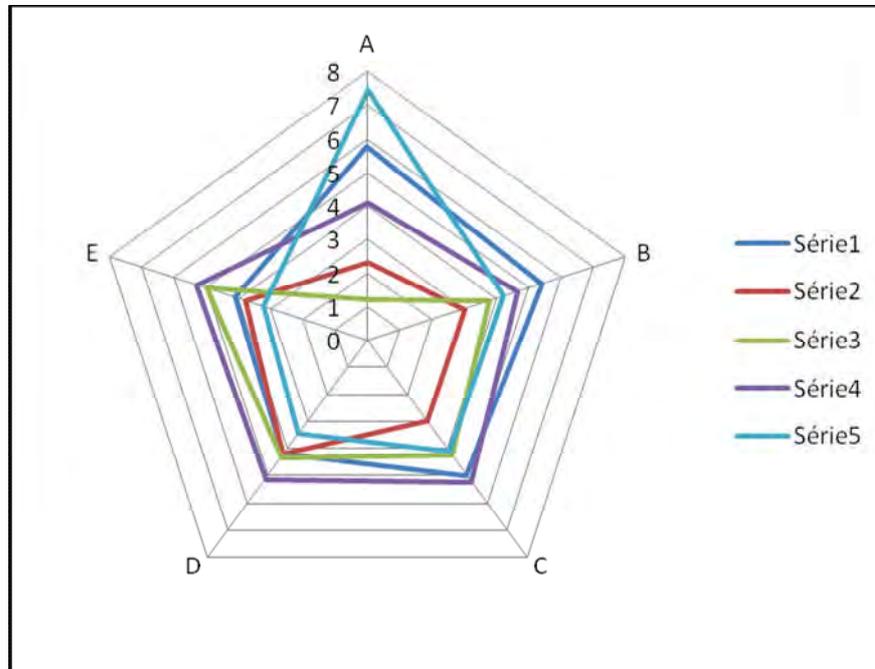


Figure 33. Profil sensoriel des pâtes cuites étudiées [(série 1) pâte témoin, couple germe hydratation : (série 2) (12.5-53.29) %, (série 3) (19.48-54.28) %, (série 4) (23.1-55.76) %, (série 5) (24.04-49.39) %]

A: caractère lisse, B: caractère rugueux, C: caractère couleur, D: caractère fermeté,
E: caractère collant

Il y'a lieu de souligner que les membres du panel de dégustation ont pu percevoir que les paramètres sensoriels sélectionnées décrivant l'aspect des pâtes cuites, la couleur, le caractère collant et la fermeté sont intenses. Il ressort clairement que la pâte du témoin issue de la semoule de blé dur a le caractère le plus collant et affichant une intensité plus faible respectivement pour la couleur et la fermeté. Par contre, les pâtes additionnées de germe de blé présentent un aspect plus lisse et moins collant que celles sans addition de germe. Ces caractères semblent diminuer au fur et à mesure qu'on augmente les taux d'incorporation du germe dans la formule initiale. Par ailleurs, on a observé que les paramètres liés à la fermeté et la couleur jaune sont proportionnelles aux taux de germe de blé. Le caractère collant semble dépendre lui aussi du niveau d'incorporation du germe et des taux d'hydratations imposés.

Les zones identifiées dans la figure n° 33, indiquent que les pâtes fabriquées et renfermant du germe de blé sont plus appréciées par les dégustateurs en raison de leurs caractéristiques organoleptiques intenses. Les pâtes enrichies respectivement à 19.48 et 23.01 % de germe de blé sont encore les plus appréciées comparativement à celle du témoin. Ce dernier aurait par contre une zone d'acceptabilité trop restreinte en raison aux faibles intensités des indicateurs en l'occurrence la couleur, la fermeté et surtout pour l'aspect collant à forte intensité.

L'analyse des notations sur le caractère collant à l'aide de l'ANOVA met clairement en évidence une différence significative ($p < 0,05$) entre la pâte témoin et celles enrichies à des taux variés par le germe de blé. Les membres du panel pour cet aspect sont anonymes pour l'attribution des meilleures notes pour les pâtes renfermant du germe de blé car elles présentent un aspect collant jugé faible et donc mieux apprécié.

Par ailleurs, l'analyse des résultats pour les caractères l'aspect (aspect lisse, rugueux), la couleur, fermeté, des taches, montre qu'il n'existe pas de différences significatives ($p > 0,05$) entre les pâtes testées. Les notes attribuées par les dégustateurs aux indicateurs des différents substrats analysés sont sensiblement très proches ce qui n'a pas permis de les différencier de manière plus claire car leurs qualités organoleptiques sont aussi très proches au niveau de la perception.

Il y'a lieu donc de conclure que le test triangulaire appliqué pour l'analyse des différentes pâtes testées a montré clairement qu'il existe une différence significative .Le test de classement par rang, montre à son tour, que les pâtes fabriquées dans le cadre de notre étude et enrichies avec du germe de blé sont bien appréciées et mieux notées par les dégustateurs par rapport au témoin en raison de leurs bonnes qualités organoleptiques.

CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES

Le but de cette étude consiste d'incorporer le germe de blé dans la fabrication de pâtes alimentaires et la détermination de l'impact de l'enrichissement sur la faisabilité technologique, les propriétés culinaires et organoleptiques du produit fini.

La caractérisation biochimique des matières premières analysées a permis essentiellement de faire ressortir que l'enrichissement de notre formule à 20% en germe de blé offre une majoration de 1.27 en protéines et de 3 en lipides.

Les domaines optimums délimités après superposition des courbes de niveau du degré de délitescence et des indices de couleur au niveau du témoin sont les suivants :

- 1- Traitement à 90°C : [11.61-24.99] % Germe et [51.52-56.47] % Eau ;
- 2- Traitement à 121°C : [21.34-24.99] % Germe et [49-50.47] % Eau.

Les pâtes enrichies en germe de blé traité respectivement à 90 °C et à 121°C issues des domaines optimums se caractérisent par des temps de cuisson significativement plus court que celles non supplémentées avec du germe et fabriquées selon le même diagramme et celles confectionnées avec de semoule de blé dur du commerce ($P < 0.0001$). Les pâtes enrichies ont des pertes de matière dans l'eau de cuisson significativement plus élevées que celles du témoin non supplémenté de germe et fabriqué selon le même diagramme et à celles commercialisées ($P < 0.0001$). Un bon gonflement des pâtes enrichies est enregistré.

Bien que la bonne faisabilité technologique des pâtes enrichies en germe de blé, il importe d'étudier l'ensemble des traitements thermiques en vue d'assurer la meilleure stabilité enzymatique des produits fabriqués au cours du temps.

Le test triangulaire a montré l'existence d'une différence significative entre les différentes pâtes. Le test de classement par rang, montre que les pâtes fabriquées dans le cadre de notre étude et enrichies avec du germe de blé sont bien appréciées et mieux notées par les dégustateurs par rapport au témoin à base de semoule de blé dur en raison de leurs bonnes qualités organoleptiques. Qu'il s'agisse de pâtes sèches ou cuites enrichies par du germe de blé, celle qui est le plus préférée correspond au couple (germe-hydratation) : (19.48- 54.28) %.

Nous avons pu valoriser le germe de blé en l'introduisant avec succès dans notre formule de pastification.

Perspectives

Au terme de ce travail, nous proposons :

- Etudier et revoir l'ensemble des traitements thermiques en vue d'assurer la meilleure stabilité du germe de blé.
- De passer à l'échelle pilote puis semi-industrielle en vue d'industrialiser les pâtes que nous avons fabriqué ;
- D'affiner la recherche sur la qualité des pâtes enrichies par du germe de blé en passant à leur caractérisation à l'échelle microscopique et moléculaire ;
- D'étudier la pureté du germe de blé en vue d'enrichir des pâtes sans gluten ;
- D'élargir cet enrichissement à divers produits alimentaires avec ou sans gluten tels que le pain, connu pour son indice glycémique plus élevé que les pâtes.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- AALAMI M., RAO U., LEELAVATHI K., 2007.** Physical chemical and biochemical characteristics of Indian durum wheat varieties: Relationship to semolina milling and spaghetti making quality. *Food chemistry*, 102 (4), 993-1005.
- ABECASSIS J., 1991.** La mouture de blé dur. In **GODON B.** Biotransformation des produits céréaliers. APRIA/INRA. *Lavoisier Tec et Doc*. Paris. 221p.
- ABECASSIS J., 1993.** Nouvelles possibilités d'apprécier la valeur meunière et la valeur semoulière des blés. *Industries des céréales* (81), pp.25-37.
- ABECASSIS J., ABBOU R., CHAURAND M., MOREL M.H., VERNOUX P., 1994.** Influence of extrusion conditions on extrusion speed, temperature and pressure in the extruder and on pasta quality. *Cereal chemistry*, 71 (3), 247-253.
- ABECASSIS J., ABBOU R., CHAURAND M., MOREL M-H., VERNOUX P., 2004.** Influence of extrusion conditions on extrusion speed, temperature and pressure in the extruder and on pasta quality. *Cereal Chemists*, vol 71, N 03, 247.
- ABECASSIS J., 2011.** Innovations pour améliorer la qualité des productions et des produits céréaliers. *UMR-IATE Ingénierie des Agropolymères et Technologies Emergentes INRA, CIRAD, SUPAGRO, UM II Montpellier, France.*
- ADAMS M.L., LOMBI E., ZHAO F.J., MCGRATH S.P., 2002.** Evidence of low selenium concentrations in UK bread-making wheat grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82: 1160–1165.
- AFNOR., 1991.** Contrôle de la qualité des produits alimentaires. *Céréales et produits céréaliers*. ISBN, 3^{ème} édition, Paris, 360 p.
- AKTAN B., KHAN K., 1992.** Effect of high-temperature drying of pasta on quality parameters and on solubility, gel electrophoresis, and reverse-phase high-performance liquid chromatography of protein components. *Cereal Chem.* 69:288-295.
- ALTAN A., MASKAN M., 2005.** Microwave assisted drying of short-cut (ditalini) macaroni: drying characteristics and effect of drying process on starch properties. *Food Research International*, 38 (7), 787-796.
- AOAC: Révisé par WILLIAM H., GEORGE W., LATIMER J.R., 2011.** The Scientific Association Dedicated to Analytical Excellence: official Methods of Analysis. *Current through Revision 4.*

- AUTRAN J.C., ABECASSIS J., FEILLET P., 1986.** Statistical evaluation of different technological and biochemical tests for quality assessment in durum wheats. *Cereal Chem.*, 63: 390-394.
- BAHNASSEY Y., KHAN K., 1986a.** Fortification of spaghetti with edible legumes II. Rheological, processing, and quality evaluation studies. *Cereal Chemistry*, 63(3), 216-219.
- BAIANO A., DEL NOBILE M.A., 2006.** Influence of drying temperature on the spaghetti cooking quality. *Journal of Food Engineering*, 76(3), 341-347.
- BAR., 1995.** Contrôle de la qualité des céréales et des protéagineux. *Guide pratique*. ITCF. Paris. 253p.
- BARNES P.J., 1983.** Cereal Tocophérols. *Proc.7th world Cereal and Bread Congress, Prague*.
- BARRON C., SURGET A., ROUAU X., 2007.** Relative amounts of tissues in mature wheat (*Triticum aestivum L.*) grain and their carbohydrate and phenolic acid composition. *Journal of Cereal Science* 45, 88–96.
- BELDEROK B., MESDAG H., DONNER D.A., 2000.** Bread-Making Quality of Wheat. *Springer, New York*.
- BENATALLAH L., 2009.** Couscous et pain sans gluten pour malades cœliaques: aptitudes technologiques de formule à base de riz et de légumes secs. *Thèse de Doctorat en sciences alimentaires*.
- BERGER M., 1982.** Les lipides de blé tendre. *Science des aliments* 2, 412-450 pages.
- BERGMAN C.J., GUALBERTO D.G., WEBER C.W., 1994.** Development of a high-Temperature-dried soft wheat pasta supplemented with cowpea: cooking quality color and sensory evaluation. *Cereal chem.* 71 (6): 523-7.
- BETA T., MAN S., DEXTER J.E., SAPIRSTEIN H.D., 2005.** Phenolic content and antioxidant activity of pearled wheat and roller-milled fractions. *Cereal Chemistry*, 82: 390–393.
- BILGIÇLI N., ELGÜN A., HERKEN E.N., TÜRKER S., ERTAS N., IBANOGLU S., 2006.** Effect of wheat germ/bran addition on the chemical, nutritional and sensory quality of tarhana, a fermented wheat flour-yoghurt product. *Journal of Food Engineering* (77). ELSEVIER: 680–686.

- BLECH A., LIN J., NGYEN S., CHAN R., ANDERSON O.D., DUPONT F..M., 2007.** Transgenic wheats with elevated levels of Dx5 and/or Dy10 high molecular weight glutenin subunits yield doughs with increased mixing strength and tolerance. *Journal of Cereal Science*, 45: 172–183.
- BLOKSMA A.H., 1990 b.** Dough structure, dough rheology and baking quality. *Cereal Foods World*, 35:237-244.
- BOLTE L.C., FINNEY K.F., 1977.** Note on small-scale laboratory equipment for separating germ for wheat. *Cereal Chem.* 54 (2): 306-310.
- BRENNAN C. S., KURI V., TUDORICA C. M., 2003.** Inulin-enriched pasta: effects on textural properties and starch degradation. *Food Chemistry*, 86(2), 189-193.
- BULEON A., COLONNA P., PLANCHOTI V., BALL S., 1998.** Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23(2), 85-112.
- CAKMAKLI U., KOSE E., KEMAHLIOGLU K., 1995.** *Gida* 20(4):243– 248.
- CALVEL R., 1984.** La boulangerie moderne. *Editions EYROLLES*, 10^{ème} Édition, Paris, 460 p.
- CARINI E., VITTADINI E., CURTI E., ANTONIAZZI F., 2009.** Effects of different shaping modes on physic-chemical properties and water status of fresh pasta. *Journal of Food Engineering*, 93 (4), 400-406.
- CHANG C.L., VARGAS R.I., 2007.** Nutrition OF *B. dorsalis* LARVAE: Wheat Germ Oil and Its Effects on a Liquid Larval Rearing Diet for Oriental Fruit Flies (*Diptera: Tephritidae*). *J. Econ. Entomol.* 100(2): 322-326.
- CHILLO S., LAVERSE J., FALCONE P.M., PROTOPAPA A., DEL NOBILE M.A., 2008b.** Influence of the addition of buckwheat flour and durum wheat bran on spaghetti quality. *Journal of science*, 47 (2), 144-152.
- CHUNG O.K., POMERANZ Y., FINNEY K.F., 1978.** Wheat flour lipids in bread making. *Cereal Chemistry* 55, 598-618.
- CHUNG O.K., 1986.** Lipid-protein interactions in wheat flour dough, gluten and protein fractions. *Cereal Foods World* 31, 242-256.
- CLEARY L., BRENNAN C., 2006.** The influence of a (1 -> 3) (1 -> 4)-beta-D-glucan rich fraction from barley on the physico-chemical properties and in vitro reducing sugars release

of durum wheat pasta. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(8), 910-918.

CORNELL H., 2003. Improving Quality. *Woodhead Publishing*, Cambridge.

CRAPLET C., 1971. Alimentation d'aujourd'hui et de demain. Ed; Vigot frères. Paris.600 pages.

CUNIN C., HANDSCHIN S., WALTHER P., ESCHER F., 1995. Structural changes of starch during cooking of durum wheat pasta. *LEBENSMITTEL-WISSENSCHAFT und-Technologies*. 28 (3), 323-328.

CUQ B., ABECASSIS J., GUILBERT S., 2003. State diagrams to help describe wheat bread processing. *International Journal of Food Science &Technology*: 38 (7) 759-766.

D' EGIDIO M. G., MARIANI B. M., NARDIS S., NOVARO P., CUBADDA R. 1990. Chemical and technological variables and their relationships: A predictive equation for pasta cooking quality. *Cereal Chem.* 67:275-281.

D'EGIDIO M.G., MARIANI B.M., NARDI S., NOVARO P., 1993. Viscoelastograph measures and total organic matter test: Suitability in evaluation of textural characteristics of cooked pasta. *Cereal Chemistry* 70, 67-72.

DALBON G., GRIVON D., PAGANI M.A., 1996. Pasta: continuous manufacturing process. **In:** KRUGER J.E., MASTUO R.R., DICK J.W. Pasta and noodle technology (pp.13-58). St Paul, MN, USA: *American Association of cereals chemists*.

DEL NOBILE M.A., BAIANO A., CONTE A., MOCCI G., 2005. Influence of protein content on spaghetti cooking quality. *Journal of cereal science*, 41 (3), 347-356.

DEVIN J.R., OSCAR A.P., 2006. A simple method to measure lipase activity in wheat and wheat bran as an estimation of storage quality. *J. Am Oil Chem. Soc.* 83: 415-419.

DEXTER J.E., MASTUO R.R., 1977. Changes in semolina proteins during spaghetti processing. *Cereal chemistry*: 54 (4) 882-894.

DEXTER J.E., MASTUO R.R., 1978. The effect of gluten protein fractions on pasta dough rheology and spaghetti-making quality. *Cereal Chemistry* 55, 44-57.

DEXTER J.E., MASTUO R.R., 1979. Effect of semolina extraction rate on semolina characteristics and spaghetti quality. *Cereal chem.* 55: 841.

- DEXTER J.E., MASTUO R.R., MORGAN B.S., 1983.** Spaghetti stickiness: Some factors influencing stickiness and relationship to other cooking quality characteristics. *Journal Food Sci.*48:1545-1559.
- DJAMAA A., NASRI L., 2011.** Aptitude à la pastification d'une formule à base de riz et de féverole améliorée par du germe de blé stabilisé par traitement thermique à 90°C. Mémoire d'ingénieur I.N.T.A.A. Université de Constantine. Algérie. 51pages.
- DRAPRON R., GENOT C., 1979.** Les lipides des céréales. Industrie alimentaire et agricole 1257-1271 pages.
- DUNFORD N.T., 2005.** Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Sixth Edition, Six Volume Set. Edited by Fereidoon Shahidi. Copyright John Wiley & Sons, Inc.
- DURANTI M., 2006.** Grain legume proteins and nutraceutical properties. *Fitoterapia*, 77 (2), 67-82.
- EDWARDS N.M., IZYDORCZYK M., DEXTER J.E., BILIADERIS C.G., 1993.** Cooked pasta texture: comparison of dynamic viscoelastic properties to instrumental assessment of firmness. *Cereal Chemistry* 70,122-126.
- EDWARS N. M., BILIADERIS C. G., DEXTER J. E., 1995.** Textural characteristics of whole wheat pasta and pasta containing non-starch polysaccharides. *Journal of Food Science*, 60(6), 1321-1324.
- EDWARS N.M., MULVANEY S.J., SCANLON M.G., DEXTER J.E., 2003.** Role of gluten and its components determining durum semolina dough viscoelastic properties. *Cereal Chemistry* 80,755-763.
- EISENMENGER M., DUNFORD N.T., 2008.** Bioactive components of commercial and supercritical carbon dioxide processed wheat germ oil. *JAOCS*, 85, 55-61.
- F.A.O, 1980.** Les glucides en nutrition humaine. 98 pages.
- F.A.O, 1990.** Utilisation des aliments tropicaux-Céréales. Rome: 120 p.
- F.A.O, 1995b.** Norme codex pour la semoule et la farine de blé dur, *CODEX STAN 178-1991* p.
- F.A.O, 1996.** Codex Alimentarius : Céréales, légumes secs, légumineuses, produits dérivés et protéines végétales. *FAO. Vol 7. 2^{ème} édition. Rome.* 164 p.
- FARDET A., HOEBLER C., BALDWIN P.M., BOUCHET B., GALLANT D.J., BARRY J.L., 1998b.** Involvement of the protein network in the vitro degradation of starch

from spaghetti and lasagna: a microscope and enzymic study. *Journal of Cereal of Science*, 27 (2), 133-145.

FATMA L. A., AMR A.R., ABDEL RAHMAN M. A., 2010. Additional Effect of Defatted Wheat Germ Protein Isolate on Nutritional Value and Functional Properties of Yogurts and Biscuits. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(8): 3139-3147.

FAVIER J.C., RIPERT J., TOQUE C., FEINBERG M., 1995. Répertoire général des aliments, table de composition. 2^{ème} édition. Ed ; *Tec et Doc. Lavoisier*. Paris.897 pages.

FAVIER J., SAMSON M.F., AUBLED C., MOREL M.H., ABECASSIS J., 1996. Thermal kinetics of dough proteins insolubilisation determined by size exclusion high performance liquid chromatography. *Sciences des aliments*: 16 (6) 573-591.

FEILLET P., JEANJEAN M.F., KOBRHEL K., LAIGNELET B., 1974. Le brunissement des pâtes alimentaires. *Bull. ENSMIC*, 262: 190-194.

FEILLET P.1986. L'industrie des pâtes alimentaires: Technologies de fabrication, qualité des produits finis et des maladies premières. IAA.10 : 979-989.

FEILLET P., DEXTER J.E., 1996. Quality requirements of durum wheat for semolina milling and pasta production. **In: KRUGER J.E., MASTUO R.R., DICK J.W.** *Pasta and Noodle Technology*, ED: AACC, St Paul, Minnesota, pp. 95-131.

FEILLET P. 2000. Le grain de blé, composition et utilisation. *Institut national de la recherche agronomique*, INRA, Paris : 308 p.

FEINBERG M., FAVIER J.C., IRLAND-RIPERT J., 1991. Répertoire général des aliments. INRA/ Cuiqual-Régal/Lavoisier. *Tec et Doc. Paris*. 281 p.

FERNANDEZ M.L., BERRY J.W., 1989. Phonological properties of flour and sensory characteristics of bread made from germinated chickpea. *Int. J. Food Sci Technol.*, 24,103-110.

FRANK A., MANTHEY L. S, ANTON L.S., 2002. Physical and Cooking Quality of Spaghetti Made from Whole Wheat Durum. *America Association of Cereal Chemists*, Inc: C-0604-01R.

GALLAGHER E., GORMELY T.R., ARENDT E.K., 2004. Recent Advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trens in Food Science, Technology* 15: 143-152.

- GALLIARD T., 1983.** Enzymatic degradation of cereal lipids, in *Lipids in Cereal Technology*, edited by P.J. Barnes. *Academic Press. New York*, pp. 11-147.
- GALLIARD T., GALLAGHER D.M., 1988.** The effect of wheat bran particle size and storage period on bran flavour and baking quality of bran/flour blends. *J. Cereal Sci.* 8: 147-154.
- GODON B., WILLM C., 1991.** Les industries de première transformation des céréales. *Technique et Documentation –Lavoisier*.
- GONI I., VALENTIN-GAMAZO C., 2003.** Chickpea flour ingredient slows glyceemic response to pasta in healthy volunteers. *Food Chemistry*, 81(4), 511-515.
- GOUPY J., 1999.** Plans d'expériences pour surfaces de réponses. Dunod, Paris: 409 p.
- GRANT L. A., DICK J. W., SHELTON D. R., 1993.** Effects of drying temperature, starch damage, sprouting, and additives on spaghetti quality characteristics. *Cereal Chem.* 70:676-684.
- GUEGUEN J., BARBOT J., 1988.** Quantitative and qualitative variability of pea (*Pisum sativum* L.) protein composition. *Journal of the science of food and agriculture*, 42 (3), 209-224.
- GUEZLANE L., ABECASSIS J., 1991.** Méthodes d'appréciation de la qualité culinaire du couscous de blé dur. *Ind. Alim. Agr*, 11: 966-971.
- GÜLER S., KOKSEL H., 2002.** Effect of industrial pasta drying temperature on starch properties and pasta quality. *Food Research International*, 35 (5), 421-427.
- HARIPRIYA S, PREMAKUMARI S, 2010.** Effect of wheat bran on diabetic subjects. *Indian Journal of Science and Technology*, 3(3).
- HASSAN H.M.M., AFIFY A.S., BASYIONY A.E., AHMED GHADA T., 2010.** Nutritional and Functional Properties of Defatted Wheat Protein Isolates. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(2): 348-358.
- HEGAZY N.A., FOHEID S.M.N., 1990.** Rheological and sensory characteristics of dough and cookies based + 41 Xeheat, Soybean, chickpea and lupin Flour. *Die Nahrung*, 34 (9), 835-841.

- HEMERY Y., ROUAU X., LULLIEN-PELLERIN V., BARRON C., ABECASSIS J., 2007.** Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *Journal of Cereal Science-ELSIEVIER*, 327-347.
- HENEEN W.K., BRISMAR K., 2003.** Structure of cooked spaghetti of durum and bread wheats. *Starch –starke*, 55 (12), 546-557.
- HORIGANE A.K., NAITO S., KURIMOTO M., IRIE K., YAMADA M., MOTOI H., 2006.** Moisture distribution and diffusion in cooked pasta studied par NMR imaging and diffusion model. *Cereal chemistry*, 83 (3), 235-242.
- HOULIAROPOULOS E., ABECASSIS J., AUTRAN J.C., 1981.** Produits de mouture du blé dur: Coloration et caractéristiques culinaires. *Industries des Céréales*, 12: 3-13.
- HOWARD B.M., HUNG Y.C., MCWATTERS K., 2011.** Analysis of Ingredient Functionality and Formulation Optimization of Pasta Supplemented with Peanut Flour. *Journal of Food Science*. Vol. 76, Nr. 1.
- HUBERT J., 2006.** Caractérisation biochimique et propriétés biologiques des micronutriments du germe de soja – Etude des voies de sa valorisation en nutrition et santé humaines. Mémoire de doctorat. École doctorale des Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bio ingénieries Spécialité: Qualité et sécurité des aliments. Institut National Polytechnique de Toulouse. 174 p.
- HUNG P.V., YAMAMORI M., MORITA N., 2005.** Formation of enzyme-resistant starch in bread as affected by high amylase wheat flours substitutions. *Cereal Chemistry* 82,690-694.
- IBANOGLU E., 2002.** Kenetic study on colour changes in wheat germ due to heat. *Journal of food engineering* 51. 209-213.
- ICARD-VERNIERE C., 1999.** De la semoule de blé dur aux pâtes alimentaires fraîches: événements physiques et biochimiques. (p 183). Montpellier: Université Montpellier II.
- INGELBRECHT J. A., MOERS K., ABECASSIS J., ROUAU X., DELCOUR J. A., 2001.** Influence of arabinoxylans and endoxylanases on pasta processing and quality. Production of high-quality pasta with increased levels of soluble fiber. *Cereal Chemistry*, 78(6), 721-729.
- ISO 4120, 1983.** Methods for sensory analysis of food. *Triangular test*. 12 p.

- IZYDORCZYK M.S., BILIADERIS C.G., BUSHUK W., 1991.** Physical properties of water soluble pentosans from different wheat varieties. *Cereal Chem.* (68), pp.145-150.
- JEANTET R., CROGUENNEC T., SCHUCK P., BRULE G., 2007.** Science des aliments biochimie, microbiologie, procédés et produits. Volume 02. *Technologie des produits alimentaires. Edition Tec et Doc. Lavoisier.*456 pages.
- JONES J.A., 2006.** Grain-based foods and health. *Cereal Foods World* 51, 108-113.
- KIGER J.L., KIGER J.G., 1967.** Techniques modernes de biscuiterie, pâtisserie, boulangerie industrielle et artisanale et les produits de régime. *Edition, DUNO. Paris.* 676 pages.
- KIM E.H.J., PETRIE J.R., MOTOI L., MORGENSTERN M.P., SUTTON K.H., SIMMOND L.D., 2008.** Effect of structural characteristics of the protein matrix in pasta on in vitro starch digestibility. *Food Biophysics:* 3(2) 229-234.
- KRUGER J.E., MASTUO R.R., DICK J.W., 1996.** Pasta and noodle technology. St. Paul, Minnesota: *American Association of cereal chemist.*
- KUMAR P., YADAVA R.K., GOLLEN B., KUMAR S., VERMA R.K., YADAV S., 2011.** Nutritional Contents and Medicinal Properties of Wheat. *Life Sciences and Medicine Research, LSMR-22.*
- LAMACCHIA C., DILUCCIA A., BAIANO A., GAMBACORTA G., LAGATTA B., PATI S., 2007.** Changes in pasta proteins induced by drying cycles and their relationship to cooking behavior. *Journal of cereal science,* 46 (1), 58-63.
- LAMPART-SZCZAPA E., OBUCHOWSKI W., CZACZYK K., PASTUSZEWSK B., BURACZEWSKA L., 1997.** Effect of lupine flour on the quality and oligosaccharides of pasta and crisps. *Nahrung:* 41(4), 219-223.
- LAPPE F.M., 1982.** Diet for a small planet. 10th anniversary edition, *Ballantine Books.* New York: 230p.
- LEENHARDT F., ANTHONY F., BERNARD L., ELYETT G., EDMOND R., ANDRZEJ M., ELISABETH C., CHRISTIAN D., CHRISTIAN R., 2008.** Wheat Germ Supplementation of a Low Vitamin E Diet in Rats Affords Effective Antioxidant Protection in Tissues. *Journal of the American College of Nutrition,* Vol. 27, No. 2, 222–228.
- LEHTINEN P., KIILIANEN P.K., LEHTOMAKI I., LAAKSOO S., 2003.** Effect of heat treatment on lipid stability in processed oats. *J. Cereal Sci.* 37:215-221.

- LEMOUCHI H., OUGHIDNI S., 2011.** Aptitude à la pastification d'une formule à base de riz et de féverole améliorée par du germe de blé stabilisé par traitement thermique à 121 °C. Mémoire d'ingénieur I.N.T.A.A. Université de Constantine. Algérie. 54pages.
- LINTAS C., APPOLONIA B.L., 1973.** Effect of spaghetti processing on semolina carbohydrates. *Cereal chemistry*, 50 (5), 563-570.
- LIU C.Y., SHEPHERD K.W., RATHJEN A.J., 1996.** Improvement of durum wheat pasta making and bread making qualities. *Cereal Chem.*, 73(2) :155-166.
- LUCISANO M., PAGANI M. A., MARIOTTI M., LOCATELLI D. P., 2008.** Influence of die material on pasta characteristics. *Food Research International: 41 (6) 646-652*, 41(6), 646-652.
- MALCOLMSON L.J., MASTUO R.R., BALSHAW R., 2003.** Textural Optimization of Spaghetti using Response Surface Methodology: effect of drying temperature and durum protein level. *American Association of Cereal Chemist*. Vol 70, NO.4.47 p.
- MANTHEY F. A., SCHORNO A. L., 2002.** Physical and cooking quality of spaghetti made from whole wheat durum. *Cereal Chemistry*, 79(4), 504-510.
- MANTHEY F.A., YALLA S.R., DICK T.J., BADARUDDIN M., 2004.** Extrusion properties and cooking quality of spaghetti containing buckwheat bran flour. *Cereal chemistry*, 81(2), 239-236.
- MANTHEY F. A., HALL C. A., 2007.** Effect of processing and cooking on the content of minerals and protein in pasta containing buckwheat bran flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(11), 2026-2033.
- MARCHYLO B.A., DEXTER J.E., MALCOLMSON L.M., 2004.** Improving the texture of pasta. In: *Texture in Food (Vol 2) Solid Foods*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, UK, pp 465-500.
- MASTUO R.R., IRVINE G.N., 1970.** Effect of gluten on the cooking quality of spaghetti. Board of grain commissioners for Canada, Grain Research Laboratory Winnipeg 2, Manitoba.
- MASTUO R.R., DEXTER J.E., DRONZEK B.L., 1978.** Scanning electron microscopy study of spaghetti processing. *Cereal chemistry*, 55 (5), 744-753.

- MASTUO R.R., DEXTER J.E., KOSMOLAK F.G., LEISLE D., 1982.** Statistical evaluation of tests for assessing spaghetti making quality of durum wheat. *Cereal Chemistry* 59, 222-228.
- MASTUO R.R., DEXTER J.E., BOUDREAU A., DAUN J.K., 1986.** The role of lipids in determining spaghetti cooking quality. *Cereal Chemistry* 63, 484-489.
- MEGAHED M.G., 2011.** Study on stability of wheat germ oil and lipase activity of wheat germ during periodical storage. *Agriculture and biology journal of North ISSN Print: 2151-7517*.
- MELCION J.P., 2000.** La granulométrie de l'aliment : principe, mesure et obtention. *INRA Prod.Anim.* Paris.vol.13, n° 2.pp.81-89.
- MERROUCHE D., 2008.** Contribution à l'étude de l'enrichissement des pâtes alimentaires (Rechta) avec le germe de blé. Mémoire d'ingénieur I.N.T.A.A. Université de Constantine. Algérie. 87 pages.
- MESTRES C., MATENCIO F., FAURE J., ABECASSIS J., 1989.** Fabrication industrielles de pâtes composées blé-mais. *Céréales en régions chaudes*. AUPELF-UREF, Eds John Libbey Eurolex, Paris, pp.337-347.
- MILLER E. R., PASTOR-BARRIUSO R., DALAL D., RIEMERSMA R.A., APPEL L.J., GUALLAR E., 2005.** Meta-analysis: high-dosage vitamin E supplementation may increase all-cause mortality. *Ann Intern Med* 142:37– 46.
- MOHAMMED S., 1990.** Factors affecting extrusion characteristics of expanded starch based products. *Journal of food processing and preservation*. 14 (6), 437-452.
- MUKHERJEE K.D., HILLS M.J., 1994.** Lipase from plants, in *Lipases: Their Structure, Biochemistry, and Application*, edited by P. Wooley and S.B. Petersen, University Press, Cambridge, pp. 49-75.
- NARA J. M., BURKHOLDER W. E., 1983.** *Environ. Entomol.*, 12, 703.
- NASEHI B., MORTAZAVI S.A., RAZAVI S.M.A., NASIRI MAHALLATI M., KARIM R., 2009.** Optimization of the extrusion conditions and formulation of spaghetti enriched with full-fat soy flour based on the cooking and color quality. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, Informa UK Ltd 60 (S4): 205-214.

- NASEHI B., JOOYANDEH H., NASEHI R., 2011.** Quality Attributes of Soy-pasta During Storage Period. *Pakistan Journal of Nutrition* 10 (4): 307-312, ISSN 1680-5194.
- NATTRASS P., 1975.** The production of bran, wheat-feed and germ. In: The practice of flour milling, vol. I, Chap. 14. Northern Pub. Co: Liverpool, England.
- NIELSEN M. A., SUMNER A. K., WHALLEY L. L., 1980.** Fortification of pasta with pea flour and air-classified pea protein concentrate. *Cereal Chemistry*, 57(3), 203-206.
- NOVARO P., D'EGIDIO M. G., MMARIANI B. M., NARDI S., 1993.** Combined effect of protein content and high-temperature drying systems on pasta cooking quality. *Cereal Chem.* 70:716-719.
- NYSTROM L., PAASONEN A., LAMPI A.M., PIIRONEN V., 2007.** Total plant sterols, steryl ferulates and steryl glycosides in milling fractions of wheat and rye. *Journal of Cereal Science* 45,106–115.
- PAGANI M.A., GALLANT D., BOUCHET B., RESMINI P., 1986.** Ultra-structure of cooked spaghetti. *Food Microstructure*, 5, 111-129.
- PAGANI M.A., RESMINI P., DALBON G., 1989.** Influence of the extrusion process on characteristics and structure of pasta. *Food Microstructure*, 8 (2), 173-182.
- PETITOT M., 2009.** Pâtes alimentaires enrichies en légumineuse. Structuration des constituants au cours du procédé : impact sur la qualité culinaire et les propriétés nutritionnelles des pâtes. *Thèse de doctorat en sciences agronomiques de Montpellier*. 246 p.
- PETITOT M., ABECASSIS J., MICARD V., 2009a.** Structuring of pasta components during processing: impact on starch and protein digestibility and allergenicity. *Food Science technology* 20. 521-532.
- PETITOT M., BROSSARD C., BARRONA C., LARRE C., MOREL M.H., MICARD V., 2009c.** Modification of pasta structure induced by high drying temperatures. Effects on the in vitro digestibility of protein and starch fractions and the potential allergenicity of protein hydrolysates. *Food Chemistry*, 116(2), 401-412.
- PETITOT M., BOYER L., MINIER C., MICARD V., 2010.** Fortification of pasta with split pea and faba bean flours: Pasta processing and quality evaluation. *Food Research International* 43. 634–641.

- PINARLI I., IBANOGLU S., ONER M.D., 2004.** Effect of storage on the selected properties of macaroni enriched with wheat germ. *Journal of Food Engineering*. 249-256 p.
- PIRAS A., ROSA A., FALCONIERI D., PORCEDDA S., DESSI M.A., MARONGIU B., 2009.** Extraction of Oil from Wheat Germ by Supercritical CO₂. *Open Access Molecules ISSN 1420-3049*.
- POMERANZ Y., CARVAJAL M.J., SHROGEN M.D., HOSENEY R.C., FINNEY K.F., 1970.** *Cereal Chem* 47(4):429–437.
- POMERANZ Y., 1992.** Biochemical, functional and nutritive changes during storage, in Storage of Cereal Grains and Their Products, 4th edn., *American Association of Cereal Chemists*, St. Paul, MN, pp.55-141.
- PURNIMA C., RAMASARMA P.R., PRABHASANKAR P., 2011.** Studies on effect of additives on protein profile, microstructure and quality characteristics of pasta. *Association of Food Scientists & Technologists*.
- RANGA RAO G.C.P., HARIDAS RAO P., KUMAR G.V., SHURPALEKAR S.R., 1980.** *J Food Sci Tech* 17:171-175.
- RAYAS-DUARTE P., MOCK C.M., SATTERLEE L.D., 1996.** Quality of spaghetti containing buckwheat, amaranth and lupin flours. *Cereal Chemistry*, 73(3), 381-387.
- ROUAU X., EL-HAYEK M.L., MOREAU D., 1994.** Effect of an enzyme preparation containing pentosanases on the bread making quality of flours in relation to changes in pentosane properties. *J.Cereal Sci.* (19), pp.259-272.
- SABANIS D., MAKRI E., DOXASTAKIS G., 2006.** Effect of durum flour enrichment with chickpea flour on the characteristics of dough and lasagna. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(12), 1938-1944.
- SADEGHI M. A., BHAYA S., 2008.** Quality characterization of pasta enriched with mustard protein isolate. *Journal of Food Science*, 73(5), S229-S237.
- SAWSAN Y. EL., EID A., HUSSEIN K., 2010.** Barely Flour and Durum Flour Blends in Macaroni Product. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (12): 6169-6178.
- SELSELET A., 1991.** Technologie des céréales et produits céréaliers. *Institut de technologie agricole de Mostaganem*, 147 p.
- SENOUSSI A., 2009.** Etude de l'effet du pétrissage sur la qualité du pain à base de semoule

enrichie par le germe de blé. Mémoire d'ingénieur I.N.T.A.A. Université de Constantine. Algérie. 91pages.

SHEWRY P.R., 2009. The Health grain programme opens new opportunities for improving wheat for nutrition and health. *Nutrition Bulletin*, 34(2): 225–231.

SHORGEN R.L., HARELAND G.A., WU Y.V., 2006. Sensory Evaluation and Composition of Spaghetti Fortified with Soy Flour. *Journal of Food Science-vol. 71, Nr .6.*

SIMMOND D.H., 1989. Inherent Quality Factors in Wheat, Wheat and Wheat Quality in Australia. *Australia Wheat Board*, Melbourne, pp. 31–61.

SINGH H., MACRITCHIE F., 2004. Changes in proteins induced by heating gluten dispersions at high temperature. *Journal of cereal Science*, 39 (2), 297-301.

SINGH N., KAURL L., SANDHU K.S., KAUR J., NISHINARI K., 2006. Relationships between physic-chemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. ELSEVIER. *Food Hydrocolloids* 20:532-542 p.

SISSONS M.J., EGAN N.E., GIANIBELLI M.C., 2005 b. New insights into the role of gluten on durum pasta quality using reconstitution method. *Cereal Chemistry* 82, 601-608.

SISSONS M.J., SOH H.N., TURNER M.A., 2007. Role of gluten and its components in influencing durum wheat dough properties and spaghetti cooking quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87, 1874-1885.

SISSONS M., 2008. Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Food* 2 (2), 75- 90. Global Science Books.

SLAVIN J.L., MARTINI M.C., JACOBS D.R., MARQUART L., 1999. Plausible mechanisms for the protectiveness of whole grains. *American Journal of Clinical Nutrition* 70, 459S–463S.

SOH H.N., SISSONS M.J., TURNER M.A., 2006. Effect of starch granule size distribution and elevated amylase content on durum dough rheology and spaghetti cooking quality. *Cereal Chemistry* 83,513-519.

SONNTAGE N.O.V., 1979. Composition and characteristics of individual fats and oils, in *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, Vol. 1,4th edn., edited by D. Swern, John Wiley & Sons, New York, pp. 289-477.

- SOUCI S.W., FACHMANN W., KRAUT H., 1994.** La composition des aliments : Tableaux des valeurs nutritives. *Medpharm Scientific Publishers*, 5^{ème} édition. Stuttgart. Germany 1091p.
- SOUCI S.W., FACHMAN W., KRAUT H., 1995.** La composition des aliments, tableau des valeurs nutritives. 3^{ème} édition, Ed BORDAS., France.1091 pages.
- ŠRAMKOVA Z., GREGOVA E., STURDIK E., 2009.** Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta chimica slovacica*, vol.2, No.1, 115-138.
- SRIVASTAVA A.K., SUDHA M.L., BASKRAN V.K., LEELAVATHI K., 2007.** Studies on heat stabilized wheat germ and its influence on rheological characteristics of dough. *Eur Food Res Technol. Springer-Verlag Edition* 224 : 365–372.
- STARON T., 1985.** Les nouvelles sources des protéines comestibles et les produits toxiques éventuellement présents dans l'aliment. P.P.202-348 in alimentation humaine 2^{ème}. Ed APRIA.
- SUMAN M., 2008.** Effect of structural and physico-chemical characteristics of the protein matrix in pasta on in vitro starch digestibility. *Food Biophysics*, 3(2), 229-234.
- SUNG W.C., STONE M., 2003.** Characterization of various wheat starches in pasta development. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 61-69.
- SURGET A., BARRON C., 2005.** Histologie du grain de blé, *Industrie des céréales* n°145, pp42.
- TORRES A., FRIAS J., GRANITO M., GUERRA M., VIDAL-VALVERDE C., 2007a.** Chemical, biological and sensory evaluation of pasta products supplemented with alpha-galactoside-free lupin flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(1), 74-81.
- TREMOLIERE J., SERVILES Y., JACQOT R., 1984.** Manuel d'alimentation humaine tome 2, les aliments. 9^{ème} édition. E.D.E.S.F. Paris.540 pages.
- TUDORICA C.M., KURI U., BRENNAN C.S., 2002.** Nutritional and physicochemical characteristics of dietary fiber enriched pasta. *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 50 (2) 347-356.
- TURNBULL K., 2001.** Quality assurance in a dry pasta factory. In: KILL R.C, TURNBULL K (Ed) *Pasta and Semolina Technology*, Blackwell Scientific, Oxford, pp 181-221.

- TURNER M.A.A., SOH C.H.N., GANGULI N.K., SISSONS M.J., 2008.** A Survey of water soluble arabinopolymers in bread and durum dough rheology and spaghetti cooking quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88, 2551-2555.
- UAUY C., DISTELFELD A., FAHIMA T., BLECH A., DUBCOVSKY J., 2006.** A gene regulating senescence improves grain protein, Zn and Fe content in wheat. *Science*, 314: 1298–1301.
- UMAIR ARSHAD A., SURRYIA Z.F., ANJUM M., TAHIR Z., HAQ N., 2008.** Nutritive Value of Cookies Containing Wheat Germ Oil. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences* 6 (2): 127-134.
- VANSTEELANDT J., DELCOUR J.A., 1998.** Physical behavior of durum wheat starch (*triticum durum*) during industrial pasta processing. *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 46 (7), 2499-2503.
- VETRIMANT R., HARIDAS RAO. P., 1990.** Studies on stabilization of wheat bran. *J. Food Sci. Technol. Mysore* 27:332-335.
- WANG M., HAMER R.J., VAN VLIET T., GRUPPEN H., MARSEILLE H., WEEGELS P.L., 2003.** Effect of Water Unextractable Solids on Gluten Formation and Properties: Mechanistic Considerations. *J.Cereal Sci.*37 (1), pp.55-64.
- WASIK R.J., BUSHUK W., 1975.** Relation between molecular weight distribution of endosperm proteins and spaghetti making quality. *Cereal Chemistry* 52,322-328.
- WATTS B.M., YLIMAKI G.L., JEFFERY L.E., ELIAS L.G., 1991.** Méthodes de base pour l'évaluation sensorielle des aliments. ED. *Centre de recherche pour le développement International, Amérique*, 145 p.
- WOOD J. A., 2009.** Texture, processing and organoleptic properties of chickpea-fortified spaghetti with insights to the underlying mechanisms of traditional durum pasta quality. *Journal of Cereal Science*, 49, 128-133.
- WRIGLEY C., BRKES F., BUSHUK W., 2006.** Gliadin and Glueinin: The unique balance of wheat quality (^{1st} Edn), *AACC International, MN*, pp 3-32.
- YESLI A., 2001.** Etude de l'influence des lipides sur la qualité technologique de quelques variétés de blé algérien. *Thèse de Magister. INA. EL-HARRACH, Alger*, 98 p.

- YETTOU N., GHEZLANE L. OUNANE G., 2000.** Mise au point d'une méthode instrumentale d'évaluation de la délitescence du couscous de blé dur. Symposium blé, enjeux et stratégies. Alger 7-9: 271-276.
- YULDASHEVA N.K., ULCHENKO I., GLUSHENKOVA A.I., 2010.** Wheat germ oil. *Journal Chemistry of Nautral Compounds*, 46:97-98.
- ZACCHI P., DAGHERO J., JAEGER P., EGGERS R., 2006.** Extraction/fractionation and deacidification of wheat germ oil using supercritical carbon dioxide. *Braz. J. Chem. Eng.*, 3, 105-110.
- ZARDETTO S., DALLA ROSA. M., 2005.** Study of the effect of lamination process on pasta by physical chemical determination and near infrared spectroscopy analysis. *Journal of Food Engineering*, 74 (3), 402-409.
- ZARRINTAN M.H., CHAN H.K., MONAZJJEMZADEH F., 2006.** The Effect of Humidity and Compactional Pressure on the Wheat Germ Lipase Activity. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research.* 4: 245-248.
- ZHAO Y. H., MANTHEY F. A., CHANG S. K. C., HOU H. J., YUAN S.H., 2005.** Quality characteristics of spaghetti as affected by green and yellow pea, lentil, and chickpea flours. *Journal of Food Science*, 70(6), S 371-S 376.
- ZHU K., ZHOU H., 2005.** Purification and characterization of a novel glycoprotein from wheat germ water-soluble extracts. *Process Biochemistry*, 40: 1469-1474.
- ZHU K., SUN X., ZHOU H., 2009.** Optimization of ultrasound-assisted extraction of defatted wheat germ proteins by reverse micelles. *Journal of Cereal Science*, 50(2): 266-271.
- ZITARI F., 2010.** Enrichissement des pâtes alimentaires type TRIDA par l'incorporation du germe de blé. Mémoire d'ingénieur I.N.T.A.A. Université de Constantine. Algérie. 81pages.
- ZWEIFEL C., CONDE-PETITOT B., ESCHER F., 2000.** Thermal modifications of starch during high-temperature drying of pasta. *Cereal Chemistry*, 77 (5), 645-651.
- ZWEIFEL C., HANDSCHIN S., ESCHER F., COND-PETIT B., 2003.** Influence if high-temperature drying on structural and textural properties of durum wheat pasta. *Cereal Chemistry*: 80 (2), 159-167.

Annexes

Annexe 1. Préparation du germe de blé



Annexe 2. Phases de fabrication des pâtes

Matières premières



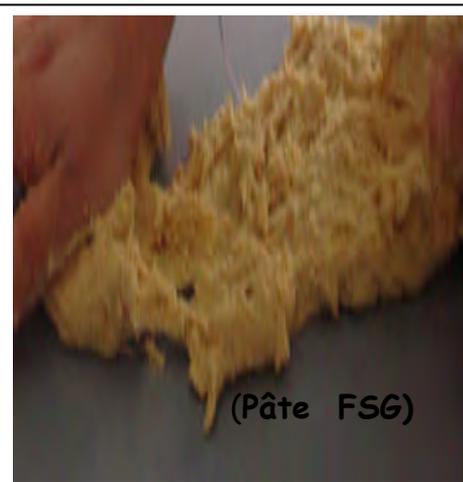
Hydratation



Malaxage / pétrissage manuel



FS : Formule à base de semoule de blé



Formule semoule + taux germe

Phase de repos



Phase de façonnage par le principe de laminage



FS



FSG



Pré séchage (20 min) et découpage

Annexe 3. Imagerie des pâtes coudées enrichies au germe de blé traité à 90 °C en fonction de couples du plan d'expérience



Annexe 4. Test de cuisson et le dosage de l'acidité de l'eau de cuisson des pâtes fabriquées



Annexe 5. Test binomial à une queue

Probabilité de jugements corrects égale ou supérieure à X avec n essai (p=1/3)

| n \ X | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | | |
|-------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 5 | | 868 | 539 | 210 | 045 | 004 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | 912 | 649 | 320 | 100 | 018 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | 941 | 737 | 429 | 173 | 045 | 007 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | 961 | 805 | 532 | 259 | 088 | 070 | 003 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | 974 | 857 | 623 | 350 | 145 | 042 | 008 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | 983 | 896 | 701 | 441 | 213 | 077 | 020 | 003 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | 988 | 925 | 766 | 527 | 289 | 122 | 039 | 009 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | 992 | 946 | 819 | 607 | 368 | 178 | 066 | 019 | 004 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | 995 | 961 | 861 | 678 | 448 | 241 | 104 | 035 | 009 | 002 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | 997 | 973 | 895 | 739 | 524 | 310 | 149 | 058 | 017 | 004 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | 998 | 981 | 921 | 791 | 596 | 382 | 203 | 088 | 031 | 008 | 002 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | 998 | 986 | 941 | 834 | 661 | 453 | 263 | 126 | 050 | 016 | 004 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | 999 | 990 | 956 | 870 | 719 | 522 | 326 | 172 | 075 | 027 | 008 | 002 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | 999 | 993 | 967 | 898 | 769 | 588 | 391 | 223 | 108 | 043 | 014 | 004 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | 995 | 976 | 921 | 812 | 648 | 457 | 279 | 146 | 065 | 024 | 007 | 002 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | 997 | 982 | 940 | 848 | 703 | 521 | 339 | 191 | 092 | 038 | 013 | 004 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | 998 | 987 | 954 | 879 | 751 | 581 | 399 | 240 | 125 | 056 | 021 | 007 | 002 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | 998 | 991 | 966 | 904 | 794 | 638 | 460 | 293 | 163 | 079 | 033 | 012 | 003 | 001 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | 999 | 993 | 974 | 924 | 831 | 690 | 519 | 349 | 206 | 107 | 048 | 019 | 036 | 002 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | 999 | 995 | 980 | 941 | 862 | 737 | 576 | 406 | 254 | 140 | 068 | 028 | 010 | 003 | 001 | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | 999 | 996 | 985 | 954 | 888 | 778 | 630 | 462 | 304 | 178 | 092 | 042 | 016 | 006 | 002 | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | 997 | 989 | 964 | 910 | 815 | 679 | 518 | 357 | 220 | 121 | 058 | 025 | 009 | 003 | 001 | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | 998 | 992 | 972 | 928 | 847 | 725 | 572 | 411 | 266 | 154 | 079 | 036 | 014 | 005 | 002 | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | 999 | 994 | 979 | 943 | 874 | 765 | 623 | 464 | 314 | 191 | 104 | 050 | 022 | 008 | 003 | 001 | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | 999 | 996 | 984 | 955 | 897 | 801 | 670 | 517 | 364 | 232 | 133 | 068 | 031 | 013 | 005 | 001 | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | 999 | 997 | 988 | 965 | 916 | 833 | 714 | 568 | 415 | 276 | 166 | 090 | 043 | 019 | 007 | 002 | 001 | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | 998 | 991 | 972 | 932 | 861 | 754 | 617 | 466 | 322 | 203 | 115 | 059 | 027 | 011 | 004 | 001 | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | 998 | 993 | 978 | 946 | 885 | 789 | 662 | 516 | 370 | 243 | 144 | 078 | 038 | 016 | 006 | 002 | 001 | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | 999 | 995 | 983 | 957 | 905 | 821 | 705 | 565 | 419 | 285 | 177 | 100 | 051 | 023 | 010 | 004 | 001 | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | 999 | 996 | 987 | 965 | 922 | 849 | 744 | 612 | 468 | 330 | 213 | 126 | 067 | 033 | 014 | 006 | 002 | 001 | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | 999 | 997 | 990 | 973 | 937 | 873 | 779 | 656 | 516 | 376 | 252 | 155 | 087 | 044 | 020 | 009 | 003 | 001 | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | 998 | 992 | 978 | 949 | 895 | 810 | 697 | 562 | 422 | 293 | 187 | 109 | 058 | 028 | 012 | 005 | 002 | 001 | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | 998 | 994 | 963 | 959 | 913 | 838 | 735 | 607 | 469 | 336 | 223 | 135 | 075 | 038 | 018 | 007 | 003 | 001 | | | | | | | | | |
| 38 | | | | | 999 | 996 | 987 | 967 | 928 | 863 | 769 | 650 | 515 | 381 | 261 | 164 | 095 | 051 | 025 | 011 | 004 | 002 | 001 | | | | | | | | |
| 39 | | | | | 999 | 997 | 990 | 973 | 941 | 885 | 800 | 689 | 560 | 425 | 301 | 196 | 118 | 066 | 033 | 016 | 007 | 003 | 001 | | | | | | | | |
| 40 | | | | | 999 | 997 | 992 | 979 | 952 | 903 | 829 | 726 | 603 | 470 | 342 | 231 | 144 | 083 | 044 | 021 | 010 | 004 | 001 | | | | | | | | |
| 41 | | | | | | 998 | 994 | 983 | 961 | 920 | 854 | 761 | 644 | 515 | 385 | 268 | 173 | 104 | 057 | 029 | 014 | 006 | 002 | 001 | | | | | | | |
| 42 | | | | | | 999 | 995 | 987 | 968 | 933 | 876 | 791 | 683 | 558 | 428 | 307 | 205 | 127 | 073 | 038 | 019 | 008 | 003 | 001 | | | | | | | |
| 43 | | | | | | 999 | 996 | 990 | 974 | 945 | 895 | 820 | 719 | 600 | 471 | 347 | 239 | 153 | 091 | 050 | 025 | 012 | 005 | 002 | 001 | | | | | | |
| 44 | | | | | | 999 | 997 | 992 | 980 | 955 | 912 | 845 | 753 | 639 | 514 | 389 | 275 | 182 | 111 | 063 | 033 | 016 | 007 | 003 | 001 | | | | | | |
| 45 | | | | | | 999 | 998 | 994 | 984 | 963 | 926 | 867 | 783 | 677 | 556 | 430 | 313 | 213 | 135 | 079 | 043 | 022 | 010 | 004 | 002 | 001 | | | | | |
| 46 | | | | | | | 998 | 995 | 987 | 970 | 938 | 887 | 811 | 713 | 596 | 472 | 352 | 246 | 161 | 098 | 055 | 029 | 014 | 006 | 003 | 001 | | | | | |
| 47 | | | | | | | | 999 | 996 | 990 | 976 | 949 | 904 | 836 | 745 | 635 | 514 | 392 | 287 | 189 | 119 | 070 | 038 | 019 | 009 | 004 | 002 | 001 | | | |
| 48 | | | | | | | | | 999 | 997 | 992 | 980 | 958 | 919 | 859 | 776 | 672 | 554 | 433 | 318 | 220 | 142 | 086 | 048 | 025 | 012 | 006 | 002 | 001 | | |
| 49 | | | | | | | | | 999 | 998 | 994 | 984 | 965 | 932 | 879 | 803 | 706 | 593 | 473 | 356 | 253 | 168 | 105 | 061 | 033 | 017 | 008 | 003 | 001 | | |
| 50 | | | | | | | | | 999 | 998 | 995 | 987 | 972 | 943 | 896 | 829 | 739 | 631 | 513 | 395 | 287 | 196 | 126 | 076 | 042 | 022 | 011 | 005 | 002 | 001 | |

Note : Il faut rajouter devant chaque chiffre «0,».

Annexe 6. Différences des sommes de classement par rang absolu critiques pour les comparaisons de "tous les traitements" à un seuil de signification de 5%.

| Dégustateurs | Nombre d'échantillons | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 3 | 6 | 8 | 11 | 13 | 15 | 18 | 20 | 23 | 25 | 28 |
| 4 | 7 | 10 | 13 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 |
| 5 | 8 | 11 | 14 | 17 | 21 | 24 | 27 | 30 | 34 | 37 |
| 6 | 9 | 12 | 15 | 19 | 22 | 26 | 30 | 34 | 37 | 42 |
| 7 | 10 | 13 | 17 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 |
| 8 | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 | 30 | 34 | 39 | 43 | 47 |
| 9 | 10 | 15 | 19 | 23 | 27 | 32 | 36 | 41 | 46 | 50 |
| 10 | 11 | 15 | 20 | 24 | 29 | 34 | 38 | 43 | 48 | 53 |
| 11 | 11 | 16 | 21 | 26 | 30 | 35 | 40 | 45 | 51 | 56 |
| 12 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 42 | 48 | 53 | 58 |
| 13 | 12 | 18 | 23 | 28 | 33 | 39 | 44 | 50 | 55 | 61 |
| 14 | 13 | 18 | 24 | 29 | 34 | 40 | 46 | 52 | 57 | 63 |
| 15 | 13 | 19 | 24 | 30 | 36 | 42 | 47 | 53 | 59 | 66 |
| 16 | 14 | 19 | 25 | 31 | 37 | 42 | 49 | 55 | 61 | 67 |
| 17 | 14 | 20 | 26 | 32 | 38 | 44 | 50 | 56 | 63 | 69 |
| 18 | 15 | 20 | 26 | 32 | 39 | 45 | 51 | 58 | 65 | 71 |
| 19 | 15 | 21 | 27 | 33 | 40 | 46 | 53 | 60 | 66 | 73 |
| 20 | 15 | 21 | 28 | 34 | 41 | 47 | 54 | 61 | 68 | 75 |
| 21 | 16 | 22 | 28 | 35 | 42 | 49 | 56 | 63 | 70 | 77 |
| 22 | 16 | 22 | 29 | 36 | 43 | 50 | 57 | 64 | 71 | 79 |
| 23 | 16 | 23 | 30 | 37 | 44 | 51 | 58 | 65 | 73 | 80 |
| 24 | 17 | 23 | 30 | 37 | 45 | 52 | 59 | 67 | 74 | 82 |
| 25 | 17 | 24 | 31 | 38 | 46 | 53 | 61 | 68 | 76 | 84 |
| 26 | 17 | 24 | 32 | 39 | 46 | 54 | 62 | 70 | 77 | 85 |
| 27 | 18 | 25 | 32 | 40 | 47 | 55 | 63 | 71 | 79 | 87 |
| 28 | 18 | 25 | 33 | 40 | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 | 89 |
| 29 | 18 | 26 | 33 | 41 | 49 | 57 | 65 | 73 | 82 | 90 |
| 30 | 19 | 26 | 34 | 42 | 50 | 58 | 66 | 75 | 83 | 92 |
| 31 | 19 | 27 | 34 | 42 | 51 | 59 | 67 | 76 | 85 | 93 |
| 32 | 19 | 27 | 35 | 43 | 51 | 60 | 68 | 77 | 86 | 95 |
| 33 | 20 | 27 | 36 | 44 | 52 | 61 | 70 | 78 | 87 | 96 |
| 34 | 20 | 28 | 36 | 44 | 53 | 62 | 71 | 79 | 89 | 98 |
| 35 | 20 | 28 | 37 | 45 | 54 | 63 | 72 | 81 | 90 | 99 |
| 36 | 20 | 29 | 37 | 46 | 55 | 63 | 73 | 82 | 91 | 100 |
| 37 | 21 | 29 | 38 | 46 | 55 | 64 | 74 | 83 | 92 | 102 |
| 38 | 21 | 29 | 38 | 47 | 56 | 65 | 75 | 84 | 94 | 103 |
| 39 | 21 | 30 | 39 | 48 | 57 | 66 | 76 | 85 | 95 | 105 |
| 40 | 21 | 30 | 39 | 48 | 57 | 67 | 76 | 86 | 96 | 106 |
| 41 | 22 | 31 | 40 | 49 | 58 | 68 | 77 | 87 | 97 | 107 |
| 42 | 22 | 31 | 40 | 49 | 59 | 69 | 78 | 88 | 98 | 109 |
| 43 | 22 | 31 | 41 | 50 | 60 | 69 | 79 | 89 | 99 | 110 |
| 44 | 22 | 32 | 41 | 51 | 60 | 70 | 80 | 90 | 101 | 111 |
| 45 | 23 | 32 | 41 | 51 | 61 | 71 | 81 | 91 | 102 | 112 |
| 46 | 23 | 32 | 42 | 52 | 62 | 72 | 82 | 92 | 103 | 114 |
| 47 | 23 | 33 | 42 | 52 | 62 | 72 | 83 | 93 | 104 | 115 |
| 48 | 23 | 33 | 43 | 53 | 63 | 73 | 84 | 94 | 105 | 116 |
| 49 | 24 | 33 | 43 | 53 | 64 | 74 | 85 | 95 | 106 | 117 |
| 50 | 24 | 34 | 44 | 54 | 64 | 75 | 85 | 96 | 107 | 118 |
| 55 | 25 | 35 | 46 | 56 | 67 | 78 | 90 | 101 | 112 | 124 |
| 60 | 26 | 37 | 48 | 59 | 70 | 82 | 94 | 105 | 117 | 130 |
| 65 | 27 | 38 | 50 | 61 | 73 | 85 | 97 | 110 | 122 | 135 |
| 70 | 28 | 40 | 52 | 64 | 76 | 88 | 101 | 114 | 127 | 140 |
| 75 | 29 | 41 | 53 | 66 | 79 | 91 | 105 | 118 | 131 | 145 |
| 80 | 30 | 42 | 55 | 68 | 81 | 94 | 108 | 122 | 136 | 150 |
| 85 | 31 | 44 | 57 | 70 | 84 | 97 | 111 | 125 | 140 | 154 |
| 90 | 32 | 45 | 58 | 72 | 86 | 100 | 114 | 129 | 144 | 159 |
| 95 | 33 | 46 | 60 | 74 | 88 | 103 | 118 | 133 | 148 | 163 |
| 100 | 34 | 47 | 61 | 76 | 91 | 105 | 121 | 136 | 151 | 167 |

On se sert des valeurs exactes adaptées de Hollander et Wolfe (1973) jusqu'à 15 dégustateurs.

On peut se servir d'interpolation pour les valeurs de tableau non spécifiées faisant appel à plus de 50 dégustateurs.

Annexe 7. Avis des dégustateurs sur les pâtes sèches après traitement à (90 °C et 121 °C)

| Dégustateurs | Résultat |
|--------------|----------|
| 1 | - |
| 2 | - |
| 3 | + |
| 4 | - |
| 5 | - |
| 6 | + |
| 7 | - |
| 8 | - |
| 9 | - |

Total de bonnes réponses = 2

Annexe 8. Avis des dégustateurs sur les pâtes cuites après traitement à (90 °C et 121 °C)

| Dégustateurs | Résultat |
|--------------|----------|
| 1 | + |
| 2 | + |
| 3 | - |
| 4 | - |
| 5 | + |
| 6 | + |
| 7 | - |
| 8 | - |
| 9 | + |

Total de bonnes réponses = 5

Annexe 9. Avis du dégustateur sur les différents paramètres liés au taux d'incorporation des pâtes sèches

| Dégustateurs | Résultats | | | |
|---------------------------------|-------------|--------------|-------------|---------------|
| | (12.5 -0) % | (19.48- 0) % | (23.01-0) % | (24.04 – 0) % |
| 1 | + | + | + | + |
| 2 | + | + | + | + |
| 3 | + | + | + | + |
| 4 | + | - | + | + |
| 5 | + | + | + | + |
| 6 | + | + | + | - |
| 7 | + | + | + | + |
| 8 | + | + | + | + |
| 9 | + | + | + | + |
| Total de bonnes Réponses | 9 | 8 | 9 | 8 |

Annexe 10. Avis du dégustateur sur les différents paramètres liés au taux d'incorporation des pâtes cuites

| Dégustateurs | Résultats | | | |
|---------------------------------|-------------|--------------|-------------|---------------|
| | (12.5 -0) % | (19.48- 0) % | (23.01-0) % | (24.04 – 0) % |
| 1 | + | + | + | + |
| 2 | + | + | + | + |
| 3 | + | + | + | + |
| 4 | + | + | + | + |
| 5 | + | + | + | - |
| 6 | + | + | + | + |
| 7 | + | + | + | + |
| 8 | + | + | + | - |
| 9 | + | + | + | + |
| Total de bonnes Réponses | 9 | 9 | 9 | 7 |

Annexe 11. Résultats du test de classement par rang pour les cinq pâtes sèches

| Dégustateur | Echantillons | | | | |
|-------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | 5 | 4 | 1 | 3 | 2 |
| 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 3 | 5 | 1 | 2 | 4 | 3 |
| 4 | 5 | 2 | 3 | 1 | 4 |
| 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | 1 | 4 | 3 | 2 | 5 |
| 7 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 8 | 5 | 3 | 4 | 2 | 1 |
| 9 | 2 | 4 | 1 | 5 | 3 |
| Total classement | 34 | 28 | 23 | 25 | 25 |
| Classement | 4 | 3 | 1 | 2 | 2 |

Annexe 12. Résultats du test de classement par rang des cinq types de pâtes cuites

| Dégustateur | Echantillons | | | | |
|-------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2 | 5 | 4 | 1 | 3 | 2 |
| 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 4 | 1 | 2 | 4 | 5 | 3 |
| 5 | 2 | 1 | 3 | 5 | 4 |
| 6 | 2 | 1 | 3 | 4 | 5 |
| 7 | 5 | 3 | 1 | 4 | 3 |
| 8 | 5 | 2 | 1 | 3 | 4 |
| 9 | 5 | 4 | 1 | 3 | 2 |
| Total classement | 31 | 23 | 20 | 33 | 29 |
| Classement | 4 | 2 | 1 | 5 | 3 |

Annexe 13. Analyse des résultats enregistrés sur les différentes pâtes testées à l'aide de test de Tukey (HSD) pour les attributs relatifs

| Attribut | Moyenne Estimée | Groupes | Attribut | Moyenne Estimée | Groupes |
|----------------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|
| Aspect lisse A | 4.556 | A | Taches A | 2.889 | A |
| Aspect lisse B | 2.889 | A | Taches B | 4.000 | A |
| Aspect lisse C | 4.222 | A | Taches C | 3.778 | A |
| Aspect lisse D | 3.444 | A | Taches D | 3.333 | A |
| Aspect lisse E | 3.778 | A | Taches E | 4.667 | A |
| Fissures A | 1.444 | A | Piqûres A | 2.889 | A |
| Fissures B | 2.111 | A | Piqûres B | 4.000 | A |
| Fissures C | 1.778 | A | Piqûres C | 3.778 | A |
| Fissures D | 2.889 | A | Piqûres D | 3.333 | A |
| Fissures E | 2.333 | A | Piqûres E | 4.667 | A |

Annexe 14. Analyse des résultats enregistrés sur les différentes pâtes cuites testées à l'aide de test de Tukey (HSD) pour les caractères : aspect, couleur et fermeté au seuil de probabilité à 0.05 %

| Attribut | Moyenne estimée | Groupes |
|----------------|-----------------|---------|
| Aspect lisse A | 5.778 | A |
| Aspect lisse B | 5.444 | A |
| Aspect lisse C | 5.000 | A |
| Aspect lisse D | 4.222 | A |
| Aspect lisse E | 4.111 | A |
| Couleur A | 3.778 | A |
| Couleur B | 4.111 | A |
| Couleur C | 4.222 | A |
| Couleur D | 4.222 | A |
| Couleur E | 4.778 | A |
| Fermeté A | 4.889 | A |
| Fermeté B | 4.667 | A |
| Fermeté C | 5.222 | A |
| Fermeté D | 5.111 | A |
| Fermeté E | 5.333 | A |

Annexe 15. Résultats de l'ANOVA pour le test hédonique des pâtes sèches avec un seuil de signification de 5%.

| Paramètres | Source | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F | Pr> F |
|------------|---------------|-----|------------------|--------------------|-------|-------|
| Lisse | Modèle | 4 | 15,333 | 3,833 | 0,781 | 0,545 |
| | Erreur | 40 | 196,444 | 4,911 | | |
| | Total corrigé | 44 | 211,778 | | | |
| rugueux | Modèle | 4 | 29,911 | 5,978 | 1,821 | 0,144 |
| | Erreur | 40 | 131,33 | 3,283 | | |
| | Total corrigé | 44 | 155,244 | | | |
| Couleur | Modèle | 4 | 58,756 | 14,689 | 2,846 | 0,036 |
| | Erreur | 40 | 206,444 | 5,161 | | |
| | Total corrigé | 44 | 265,200 | | | |
| Fissures | Modèle | 4 | 10,889 | 2,722 | 1,565 | 0,202 |
| | Erreur | 40 | 69,556 | 1,739 | | |
| | Total corrigé | 44 | 80,444 | | | |
| Tâches | Modèle | 4 | 16,356 | 4,089 | 1,032 | 0,403 |
| | Erreur | 40 | 158,444 | 3,961 | | |
| | Total corrigé | 44 | 174,800 | | | |
| Piqûres | Modèle | 4 | 16,356 | 4,089 | 1,032 | 0,403 |
| | Erreur | 40 | 158,444 | 3,961 | | |
| | Total corrigé | 44 | 174,800 | | | |

Annexe 16. Résultats de l'ANOVA pour le test hédonique des pâtes cuites avec un seuil de signification de 5%.

| Paramètres | Source | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F | Pr> F |
|------------|---------------|-----|------------------|--------------------|-------|---------|
| Lisse | Modèle | 4 | 19,422 | 4,856 | 1,469 | 0,230 |
| | Erreur | 40 | 132,222 | 3,306 | | |
| | Total corrigé | 44 | 151,644 | | | |
| rugueux | Modèle | 4 | 19,689 | 4,922 | 1,479 | 0,227 |
| | Erreur | 40 | 133,111 | 3,328 | | |
| | Total corrigé | 44 | 152,800 | | | |
| Couleur | Modèle | 4 | 4,667 | 1,167 | 0,228 | 0,921 |
| | Erreur | 40 | 205,111 | 5,128 | | |
| | Total corrigé | 44 | 209,778 | | | |
| Fermeté | Modèle | 4 | 2,578 | 0,644 | 0,206 | 0,934 |
| | Erreur | 40 | 125,333 | 3,133 | | |
| | Total corrigé | 44 | 127,911 | | | |
| Collant | Modèle | 4 | 104,800 | 26,200 | 8,159 | <0.0001 |
| | Erreur | 40 | 128,444 | 3,211 | | |
| | Total corrigé | 44 | 233,244 | | | |

Abstract

The aim of this work is the incorporation of wheat germ in pasta and the determination of its impact on, the technological feasibility, culinary and organoleptic properties of the end product.

Response surface methodology was used for the optimization of wheat germ enriched pasta. A central composite design with two factors (*Germ-Hydration*) and five levels was employed. The intervals of both factors (*Germ-Hydration*) are respectively [0-24.99] % and [49-59] %.

The enrichment of our formula with 20 % of wheat germ causes an increase of 1.27 times in protein content and 3 times in lipid content. Essay of pastification of the couples (*Germ-Hydration*) resulting from the optimum domains shows a good technological feasibility.

The optimum domains delimited after superposition of the degree of desintegration and color indices contours, on the witness level are: 1- Treatment at 90°C: [11.61-24.99] % Germ and [51.52-56.47] % water; 2- Treatment at 121°C: [21.34-24.99] % Germ and [49-50.47] % water.

The culinary quality assessment tests of the couples (*Germ-Hydration*) resulting from the optimum domains gave pasta with cooking loss (degree of disintegration) and color indices similar to those found in literature.

Wheat germ enriched pasta presents lower cooking times than those of the lab witness or the commercially available. In general, wheat germ enriched pasta caused a higher increase in cooking loss when compared with witnesses. On the other hand, a good swelling of the enriched pasta has been recorded. Although good technological feasibility of the pasta enriched with wheat germ, it is important to study all the heat treatments applied in order to ensure the best enzymatic stability of the products manufactured during time.

The triangular test showed the existence of a significant difference between the various pasta. The test of classification per row, showed in its turn, that the pasta made within the framework of our study and enriched with wheat germ are well appreciated and noted better by the tasters compared to the witness because of their good organoleptic qualities. Whether it was dried or cooked wheat germ enriched pasta, the preferred one corresponds to the couple (*Germ-Hydration*): (19.48- 54.28) %.

Key words: pasta, wheat germ, proteins, response surface methodology, culinary technological quality, characterisation, cooking loss, acidity, pasta color.

Résumé

Le but de cette étude consiste d'incorporer le germe de blé dans la fabrication de pâtes alimentaires et la détermination de l'impact de l'enrichissement sur la faisabilité technologique, les propriétés culinaires et organoleptiques du produit fini.

La Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR) a été utilisée pour l'optimisation des pâtes enrichies par du germe de blé. Ceci a nécessité l'emploi d'un plan d'expérience central composite à deux facteurs (Germe-Hydratation) et cinq niveaux. Les intervalles des taux *Germe-Hydratation* utilisés sont respectivement [0-24.99] % et [49-59] %.

L'enrichissement de notre formule à 20 % en germe de blé engendre une augmentation de 1.27 fois la teneur en protéines et 3 fois la teneur en lipides. L'essai de pastification des couples (Germe-Hydratation) issus des domaines optima montre une bonne faisabilité technologique.

Les domaines optima délimités après superposition des courbes de niveau du degré de délitescence et des indices de couleur au niveau du témoin sont les suivants : 1- Traitement à 90°C : [11.61-24.99] % Germe et [51.52-56.47] % Eau ; 2- Traitement à 121°C : [21.34-24.99] % Germe et [49-50.47] % Eau.

Les tests de l'appréciation de la qualité culinaire des couples (Germe-Hydratation) issus des domaines optima ont donné des pâtes avec des degrés de délitescence et des indices de couleur se situant dans les données de littérature.

Les pâtes enrichies en germe de blé présentent des temps de cuisson inférieurs que celles du témoin fabriqué ou acheté du commerce. De façon globale, les pâtes enrichies par du germe de blé se délitent plus que celles des témoins fabriqués ou du commerce. En revanche, un bon gonflement des pâtes enrichies est enregistré. Bien que la bonne faisabilité technologique des pâtes enrichies en germe de blé, il importe d'étudier l'ensemble des traitements thermiques en vue d'assurer la meilleure stabilité enzymatique des produits fabriqués au cours du temps.

Le test triangulaire a montré l'existence d'une différence significative entre les différentes pâtes. Le test de classement par rang, montre à son tour, que les pâtes fabriquées dans le cadre de notre étude et enrichies avec du germe de blé sont bien appréciées et mieux notées par les dégustateurs par rapport au témoin en raison de leurs bonnes qualités organoleptiques. Qu'il s'agisse de pâtes sèches ou cuites enrichies par du germe de blé, celle qui est la plus préférée correspond au couple (germe-hydratation) : (19.48- 54.28) %.

Mots clés: pâtes alimentaires, germe de blé, protéines, méthodologie de surface de réponse, qualité technologique, caractérisation culinaire, degré de délitescence, acidité, couleur des pâtes