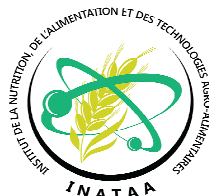


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Frères Mentouri Constantine 1

Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires
(I.N.A.T.A.A.)



N° d'ordre :

N° de série :

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité : Sciences Alimentaires

Pastification sans gluten par cuisson-extrusion : aptitude de formules
à base de riz enrichies en légumes secs

Par BOUASLA Abdallah

Soutenue le 14/10/2017

Membres de jury :

| | | | |
|------------------------|---------------------|--------|---|
| Président : | AGLI A. | Prof. | I.N.A.T.A.A., UFMC 1, Algérie |
| Rapporteur : | ZIDOUNE M. N. | Prof. | I.N.A.T.A.A., UFMC 1, Algérie |
| Co-rapporteur : | WÓJTOWICZ A. | M.C.A. | Université des Sciences de la Vie-Lublin, Pologne |
| Examineurs : | ALLAF K. | Prof. | Université de la Rochelle, France |
| | BENAHMAD DJILALI A. | M.C.A. | Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou, Algérie |
| | BENATALLAH L. | M.C.A. | I.N.A.T.A.A., UFMC 1, Algérie |

Année universitaire : 2017 / 2018

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier **Allah**, Le Tout Puissant et Le Miséricordieux, de m'avoir donné la santé, la volonté et la patience pour le bon aboutissement de ma thèse de Doctorat.

C'est avec un grand honneur et un grand plaisir que je remercie mon enseignant et directeur de thèse, Monsieur **Zidoune Mohammed Nasreddine**, Professeur à l'INATAA et Chef de l'équipe Transformation et Elaboration de Produits Agro-alimentaires (T.E.P.A.) du Laboratoire de Recherche en Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.), pour m'avoir proposé ce sujet et pour m'avoir dirigé tout au long de la réalisation de ce travail, pour son esprit scientifique, ses précieux conseils et ses encouragements. Soyez assuré de tout mon respect et de ma profonde gratitude.

C'est aussi avec un grand honneur et un grand plaisir que je remercie mon co-directrice de thèse, Madame **Wójtowicz Agnieszka**, maître de conférences et chef du Département d'Ingénierie des Procédés Alimentaires, Université des Sciences de la Vie de Lublin (Pologne), pour avoir accepté de collaborer avec nous, pour son accueil chaleureux, sa gentillesse, pour les facilités qu'elle m'a fait pour la réalisation de mon travail, pour ses précieux orientations et conseils, pour ses encouragements, sa disponibilité et pour toute les bonnes choses qu'elle m'a fait durant mes séjours en Pologne. Qu'elle trouve ici l'expression de mes plus vifs remerciements et de ma profonde reconnaissance. *"Dziękuję Bardzo"*

J'exprime mes vifs remerciements à mon enseignant Monsieur **Agli Abdel Nacer**, Professeur à l'INATAA et chef du département de Nutrition Humaine, pour son intéressement à mon travail, ses conseils enrichissants, ses encouragements, et enfin pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider ce jury.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **Allaf Karim**, professeur à l'Université de la Rochelle (France), pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de faire partie du jury d'évaluation de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements les plus vifs vont à Madame **Benahmed Djilali Adiba**, maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant de faire partie du jury d'évaluation de cette thèse. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements les plus vifs vont également à mon enseignante Madame **Benatallah Leila**, maître de conférences à l'I.N.A.T.A.A., pour ses encouragements et son acceptation d'examiner notre travail. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude aux collègues Polonais du Département d'Ingénierie des Procédés Alimentaires, Université des Sciences de la Vie de Lublin (Pologne), prof. **Mościcki Leszek**, Dr. **Mitrus Marcin**, Dr. **Oniszcuk Tomasz**, Dr. **Combrzyński Maciej** et monsieur **Juśko Stanisław**, pour avoir accepté de collaborer avec nous pour la réalisation de cette thèse, pour leur respect à mon égard, leur aide et leurs encouragements.

Je tiens également à témoigner aussi ma profonde gratitude aux collègues Polonais de l'Université médicale de Lublin (Pologne), Dr. **Oniszcuk Anna**, du Département de chimie inorganique, et Dr. **Olech Marta** et Dr. **Nowak Renata** du Département de botanique pharmaceutique, pour leur aide pour la réalisation des dosages des acides phénoliques et l'activité anti-radicalaire des échantillons.

Je tiens aussi à remercier prof. **Sujak Agnieszka** du Département de physique et Dr. **Domin Marek** du Département de réfrigération et énergétique de l'industrie alimentaire, pour leur aide technique.

Mes sentiments de reconnaissance et mes remerciements les plus vifs vont également à toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ma thèse, à tous les collègues enseignants ainsi qu'au personnel administratif et technique de l'I.N.A.T.A.A., pour la dimension humaine inestimable qu'ils ont manifestée à mon égard.

Enfin, je remercie du fond de mon cœur, mes parents, mon épouse, mes sœurs qui m'ont soutenu, encouragé et motivé pour le bon aboutissement de cette thèse.

Dédicace

D'un profond amour et d'une immense gratitude je dédie ce travail :

Aux deux personnes qui me sont les plus chères, mes parents, pour leur amour, leur patience et leurs encouragements. Ils m'ont transmis leur talent pour aider les autres personnes et de prendre soin de chacun d'eux. Qu'Allah Le Tout Puissant me les garde.

A ma chère épouse Sonia pour son amour, son soutien et ses encouragements.

A mes chères sœurs : Nesma, Nadia et Aïcha.

A mon ami Mohammed Salah.

*A tous mes Amis polonais, particulièrement
Dr. Hab. Eng. Agnieszka Wójtowicz.*

A tous les personnes qui m'ont aimé et respecté tout au long de mon parcours d'étude.

A toute ma famille.

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction..... 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|---|----|
| Chapitre 1. Pâtes alimentaires sans gluten | 4 |
| 1. Rôle du gluten dans les pâtes alimentaires à base de blé dur..... | 4 |
| 2. Substitution du rôle gluten dans les pâtes alimentaires sans gluten..... | 6 |
| 2.1. Ingrédients et/ou additifs utilisés en pastification sans gluten..... | 6 |
| 2.1.1. Hydrocolloïdes et émulsifiants..... | 7 |
| 2.1.2. Protéines..... | 8 |
| 2.1.3. Transglutaminase..... | 8 |
| 2.1.4. Farines et/ou amidons prétraités..... | 9 |
| 2.2. Procédés utilisés en pastification sans gluten..... | 9 |
| 2.2.1. Procédé traditionnel de fabrication des nouilles..... | 10 |
| 2.2.2. Procédé de cuisson-extrusion..... | 10 |
| 3. Matières premières utilisées en pastification sans gluten..... | 11 |
| 3.1. Riz..... | 12 |
| 3.2. Maïs..... | 12 |
| 3.3. Sorgho..... | 12 |
| 3.4. Avoine..... | 13 |
| 3.5. Pseudo-céréales..... | 13 |
| 3.6. Légumes secs..... | 14 |
| 3.7. Amidons..... | 14 |
| 3.8. Mélanges de différentes matières premières..... | 15 |
| Chapitre 2. Technologie de la cuisson-extrusion | 16 |
| 1. Définition..... | 16 |
| 2. Fonction et avantages..... | 16 |
| 3. Applications..... | 18 |
| 4. Equipement..... | 19 |
| 5. Impacts de la cuisson-extrusion sur la qualité des produits..... | 21 |
| 5.1. Impacts sur la qualité sensorielle..... | 22 |
| 5.2. Impacts sur la qualité nutritionnelle..... | 22 |
| 5.3. Impacts sur la qualité microbiologique..... | 25 |

| | |
|---|----|
| Chapitre 3. Riz et légumes secs | 25 |
| 1. Riz..... | 26 |
| 1.1. Généralités..... | 27 |
| 1.2. Composition..... | 27 |
| 2. Légumes secs..... | 28 |
| 2.1. Généralités..... | 28 |
| 2.2. Composition..... | 29 |
| 3. Intérêts de l'association céréales-légumes secs..... | 32 |

PARTIE EXPERIMENTALE

| | |
|---|----|
| MATERIEL ET METHODES | 34 |
| 1. Démarche expérimentale | 34 |
| 2. Matières premières | 35 |
| 2.1. Farine de riz..... | 35 |
| 2.2. Grains de légumes secs..... | 35 |
| 2.3. Obtention et préparation des farines de légumes secs..... | 36 |
| 3. Fabrication des pâtes alimentaires sans gluten | 36 |
| 4. Méthodes | 39 |
| 4.1. Analyses biochimiques..... | 39 |
| 4.1.1. Teneur en eau..... | 39 |
| 4.1.2. Protéines..... | 39 |
| 4.1.2. Lipides totaux..... | 40 |
| 4.1.3. Cendres..... | 40 |
| 4.1.4. Fibres alimentaires..... | 40 |
| 4.1.5. Glucides..... | 40 |
| 4.1.6. Acides phénoliques..... | 40 |
| 4.1.7. Détermination de l'activité anti-radicalaire..... | 42 |
| 4.2. Tests de cuisson des pâtes alimentaires sans gluten..... | 43 |
| 4.2.1. Temps de préparation minimal..... | 43 |
| 4.2.2. Capacité d'absorption de l'eau..... | 44 |
| 4.2.3. Pertes à la cuisson..... | 44 |
| 4.3. Texture des pâtes alimentaires sans gluten | 44 |
| 4.3.1. Test en cisaillement..... | 45 |
| 4.3.2. Test en compression..... | 45 |
| 4.4. Couleur des pâtes sèches et des pâtes hydratées..... | 46 |
| 4.5. Taux d'expansion des pâtes alimentaires sans gluten..... | 47 |
| 4.6. Analyse sensorielle des pâtes alimentaires sans gluten | 47 |
| 4.6.1. Profil sensoriel..... | 47 |

| | |
|---|-----------|
| 4.6.2. Acceptabilité sensorielle globale..... | 47 |
| 4.7. Indice d'absorption de l'eau et indice de solubilité dans l'eau..... | 48 |
| 4.8. Propriétés de viscosité des pâtes alimentaires sans gluten | 48 |
| 4.9. Microstructure des pâtes alimentaires sans gluten | 51 |
| 4.9.1. Préparation des coupes..... | 51 |
| 4.9.2. Microscopie électronique à balayage..... | 51 |
| 4.10. Rendement du procédé de cuisson-extrusion..... | 51 |
| 4.11. Energie mécanique spécifique..... | 51 |
| 5. Analyse statistique..... | 52 |
| | |
| RESULTATS ET DISCUSSION..... | 53 |
| Préambule..... | 53 |
| Partie 1. Effet des conditions de la cuisson-extrusion sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten à base de la formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1)..... | 54 |
| 1.1. Composition chimique de la formule..... | 54 |
| 1.2. Composition en acides phénoliques des pâtes sans gluten..... | 55 |
| 1.3. Activité anti-radicalaire des extraits des pâtes sans gluten..... | 59 |
| 1.4. Propriétés de viscosité des pâtes sans gluten..... | 60 |
| 1.4.1. Température de gélatinisation..... | 61 |
| 1.4.2. Viscosité initiale..... | 61 |
| 1.4.3. Viscosité maximale..... | 62 |
| 1.4.4. <i>Breakdown</i> | 63 |
| 1.4.5. <i>Setback</i> et viscosité finale..... | 64 |
| 1.5. Qualité culinaire des pâtes sans gluten..... | 66 |
| 1.5.1. Temps de préparation minimal..... | 66 |
| 1.5.2. Capacité d'absorption de l'eau..... | 66 |
| 1.5.3. Pertes à la cuisson..... | 67 |
| 1.6. Texture des pâtes sans gluten..... | 69 |
| 1.6.1. Dureté des pâtes sèches..... | 69 |
| 1.6.2. Dureté des pâtes hydratées..... | 70 |
| 1.6.3. Fermeté des pâtes hydratées..... | 72 |
| 1.6.4. Adhésivité des pâtes hydratées..... | 72 |
| 1.7. Microstructure des pâtes sans gluten sèches..... | 72 |
| 1.8. Acceptabilité sensorielle globale des pâtes sans gluten..... | 74 |
| Partie 2. Effet du type de légume sec et de son taux d'incorporation sur la qualité des pâtes sans gluten..... | 76 |
| 2.1. Composition chimique des farines..... | 76 |
| 2.2. Composition chimique des pâtes sans gluten sèches..... | 76 |

| | |
|---|------------|
| 2.3. Taux d'expansion des pâtes sans gluten..... | 78 |
| 2.4. Qualité culinaire des pâtes sans gluten..... | 79 |
| 2.4.1. Temps de préparation minimal..... | 79 |
| 2.4.2. Capacité d'absorption de l'eau..... | 79 |
| 2.4.3. Pertes à la cuisson..... | 80 |
| 2.5. Indice d'absorption de l'eau et indice de solubilité dans l'eau..... | 80 |
| 2.6. Couleur des pâtes sans gluten..... | 82 |
| 2.6.1. Couleur des pâtes sèches..... | 82 |
| 2.6.2. Couleur des pâtes hydratées..... | 83 |
| 2.7. Texture des pâtes sans gluten..... | 84 |
| 2.7.1. Dureté des pâtes sèches et des pâtes hydratées..... | 84 |
| 2.7.2. Fermeté et adhésivité des pâtes hydratées..... | 85 |
| 2.8. Profil sensoriel et acceptabilité sensorielle globale des pâtes sans gluten..... | 86 |
| 2.9. Microstructure des pâtes sans gluten..... | 87 |
| 2.9.1. Microstructure des pâtes sèches..... | 87 |
| 2.9.2. Microstructure des pâtes hydratées..... | 91 |
| Partie 3. Effet des conditions de la cuisson-extrusion et de la variation de la formulation sur le rendement du procédé et la consommation d'énergie pendant la fabrication des pâtes alimentaires à base des formules riz-légumes secs..... | 93 |
| 3.1. Effet des conditions de la cuisson-extrusion sur le rendement du procédé et l'énergie mécanique spécifique..... | 93 |
| 3.1.1. Effet sur le rendement..... | 93 |
| 3.1.2. Effet sur l'énergie mécanique spécifique..... | 94 |
| 2. Effet de la variation de la formulation sur le rendement du procédé et l'énergie mécanique spécifique..... | 95 |
| Conclusion et perspectives..... | 97 |
| Références bibliographiques..... | 100 |
| Annexe | |

Liste des abréviations

b.s. : base sèche.

CAE : capacité d'absorption de l'eau.

EMS : énergie mécanique spécifique.

HSD : *high significant difference*.

IAE : indice d'absorption de l'eau.

ISE : indice de solubilité dans l'eau.

PC : pertes à la cuisson.

TG : transglutaminase.

TPM : temps de préparation minimal.

UV – VIS : ultra-violet – visible.

VRV : vitesse de rotation de la vis.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. Pâte 100% blé dur-Structure aux différentes échelles d'observation (Micard <i>et al.</i> , 2010)..... | 5 |
| Figure 2. Approches utilisées pour la fabrication des pâtes sans gluten..... | 6 |
| Figure 3. Section transversale d'un extrudeur mono-vis (Fellows, 2000)..... | 19 |
| Figure 4. Différentes configurations de la vis et du fourreau dans les extrudeurs mono- et bi-vis (Mercier, 1994 ; Mościcki et Van Zuilichem, 2011)..... | 20 |
| Figure 5. Schéma récapitulatif des différentes parties de la thèse..... | 35 |
| Figure 6. Grains de légumes secs utilisés dans l'étude..... | 36 |
| Figure 7. Présentation du cuiseur-extrudeur TS-45 modifié..... | 38 |
| Figure 8. Illustration du test de la ligne blanche utilisé pour la détermination du temps de préparation minimal. A : pâte non hydratée, B : pâte hydratée au temps de préparation minimal. Adaptée à partir de Petitot (2009)..... | 43 |
| Figure 9. Présentation du test en cisaillement | 45 |
| Figure 10. Présentation du test en compression..... | 46 |
| Figure 11. Micro Visco-Amylo-Graph® (Brabender)..... | 49 |
| Figure 12. Type de diagramme du Micro Visco-Amylo-Graph® Brabender..... | 50 |
| Figure 13. Surface de réponses obtenue pour la température de gélatinisation des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 61 |
| Figure 14. Surface de réponses obtenue pour la viscosité initiale des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 62 |
| Figure 15. Surface de réponses obtenue pour la viscosité maximale des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 63 |
| Figure 16. Surface de réponses obtenue pour le <i>breakdown</i> des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 64 |
| Figure 17. Surface de réponses obtenue pour le <i>setback</i> des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 65 |
| Figure 18. Surface de réponses obtenue pour la viscosité finale des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 65 |
| Figure 19. Surface de réponses obtenue pour la capacité d'absorption de l'eau et des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 67 |
| Figure 20. Surface de réponses obtenue pour les pertes à la cuisson des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 68 |
| Figure 21. Surface de réponses obtenue pour la dureté des pâtes sèches à base de la formule riz-pois jaune..... | 70 |
| Figure 22. Surface de réponses obtenue pour la dureté des pâtes hydratées à base de la formule riz-pois jaune..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Figure 23. Surface de réponses obtenues pour la fermeté des pâtes hydratées à base de la formule riz-pois jaune..... | 71 |
| Figure 24. Surface de réponses obtenue pour l'adhésivité des pâtes hydratées à base de la formule riz-pois jaune..... | 72 |
| Figure 25. Surface des pâtes sèches fabriquées à : une teneur en eau de 28% à 60 tr/min (A, E) ; une teneur en eau de 28% à 100 tr/min (B, F) ; une teneur en eau de 30% à 80 tr/min (C, G) ; une teneur en eau de 32% à 100 tr/min (D, H), au grossissement × 125 (A, B, C, et D) et × 600 (E, F, G, et H)..... | 73 |
| Figure 26. Coupes transversales des pâtes sèches fabriquées à : une teneur en eau de 28% à 60 tr/min (A, E) ; une teneur en eau de 28% à 100 tr/min (B, F) ; une teneur en eau de 30% à 80 tr/min (C, G) ; une teneur en eau de 32% à 100 tr/min (D, H), au grossissement × 125 (A, B, C, et D) et × 600 (E, F, G, et H)..... | 74 |
| Figure 27. Surface des pâtes sans gluten sèches aux différents grossissements. a : pâtes à base de riz ; b, c, d : pâtes enrichies avec le pois jaune (10%, 20% et 30% respectivement) ; e, f, g : pâtes enrichies avec le pois chiche (10%, 20% et 30% respectivement) ; h, i, j : pâtes enrichies avec la lentille (10%, 20% et 30% respectivement)..... | 89 |
| Figure 28. Coupe transversale des pâtes sans gluten sèches aux différents grossissements. a : pâtes à base de riz ; b, c, d : pâtes enrichies avec le pois jaune (10%, 20% et 30% respectivement) ; e, f, g : pâtes enrichies avec le pois chiche (10%, 20% et 30% respectivement) ; h, i, j : pâtes enrichies avec la lentille (10%, 20% et 30% respectivement)..... | 90 |
| Figure 29. Surface des pâtes sans gluten hydratées : pâtes à base de riz (a) et pâtes enrichies avec 30% de pois chiche (b)..... | 91 |
| Figure 30. Coupe transversale des pâtes sans gluten hydratées : pâtes à base de riz (a) et pâtes enrichies avec 30% de pois chiche (b)..... | 92 |
| Figure 31. Surface de réponses obtenue pour le rendement du procédé durant la fabrication des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 93 |
| Figure 32. Surface de réponses obtenue pour l'EMS durant la fabrication des pâtes à base de la formule riz-pois jaune..... | 95 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Exemples d'ingrédients et de procédés utilisés en pastification sans gluten..... | 12 |
| Tableau 2. Principales application de la cuisson-extrusion (Mercier, 1994, Fellows, 2000 ; Ainsworth et Ibanoglu, 2006)..... | 18 |
| Tableau 3. Classification du riz (Juliano, 2004)..... | 26 |
| Tableau 4. Principaux nutriments du riz blanc cru (Juliano, 2004 ; Rossel et Marco, 2008)..... | 27 |
| Tableau 5. Principaux nutriments de quelques légumes secs (en g/100 g de matière sèche) (Wang et Daun, 2004 ; Petitot, 2009)..... | 30 |
| Tableau 6. Composition chimique de la farine de riz, de la farine de pois jaune et de la formule utilisée pour la fabrication des pâtes sans gluten (b.s.)..... | 54 |
| Tableau 7. Résultats analytiques de la CL-IEN-SM/SM des acides phénoliques..... | 55 |
| Tableau 8. Paramètres analytiques de la CL-IEN-MS/MS pour chaque acide phénolique analysé..... | 56 |
| Tableau 9. Composition en acides phénoliques (ng/g de matière sèche) des pâtes alimentaires sans gluten à base de la formule riz-pois jaune en fonction des conditions de fabrication..... | 57 |
| Tableau 10. Capacité de piégeage des radicaux DPPH' (%) des pâtes sans gluten en fonction des conditions de fabrication..... | 58 |
| Tableau 11. Scores obtenus pour l'acceptabilité sensorielle globale (ASG) des pâtes sans gluten fabriquées à base de la formule riz-pois jaune..... | 75 |
| Tableau 12. Composition chimique de la farine de riz et des farines de légumes secs (b.s.)..... | 76 |
| Tableau 13. Composition chimique des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs (b.s.)..... | 77 |
| Tableau 14. Taux d'expansion des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 78 |
| Tableau 15. Temps de préparation minimal (TPM), capacité d'absorption de l'eau (CAE) et pertes à la cuisson (PC) des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 79 |
| Tableau 16. Indice d'absorption de l'eau (IAE) et indice de solubilité dans l'eau (ISE) des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 81 |
| Tableau 17. Profil de couleur des pâtes sans gluten sèches à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 83 |
| Tableau 18. Profil de couleur des pâtes sans gluten hydratées à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 84 |

| | |
|---|----|
| Tableau 19. Dureté des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 85 |
| Tableau 20. Fermeté et adhésivité des pâtes sans gluten hydratées à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 86 |
| Tableau 21. Attributs sensoriels et acceptabilité sensorielle globale (ASG) des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 87 |
| Tableau 22. Rendement du procédé (Q) et énergie mécanique spécifique (EMS) des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs..... | 96 |

INTRODUCTION

Introduction

Les pâtes alimentaires sont universellement consommées et appréciées : la simplicité de leur fabrication, leur facilité de transport, leur palatabilité, leur excellente aptitude à la conservation, la diversité des modes de leur préparation et leur coût abordable sont autant d'atouts qui favorisent leur consommation (Mercier *et al.*, 2016).

Les pâtes alimentaires sont traditionnellement fabriquées à partir de semoule de blé dur. Cette dernière est connue comme étant la matière première la plus convenable pour la fabrication des pâtes (Feillet et Dexter, 1996). Le gluten du blé dur permet la formation optimale de la pâte pendant les phases de malaxage et d'extrusion, et est responsable de la qualité des pâtes cuites (Bruneel *et al.*, 2010).

Cependant, chez certains individus, l'ingestion de gluten provoque la maladie cœliaque qui affecte 0,5 à 1% de la population mondiale. C'est l'un des troubles digestifs chroniques les plus fréquents avec des études montrant que la prévalence de la maladie est en augmentation (Elli *et al.*, 2015 ; Plugis et Khosla, 2015 ; Tovoli *et al.*, 2015 ; Shannahan et Leffler, 2017).

A nos jours, le seul traitement de la maladie est l'adhésion stricte à vie à un régime sans gluten qui exige l'exclusion de tous les produits fabriqués à partir de blé, d'orge et de seigle (Pagano, 2006 ; O'Shea *et al.*, 2014 ; Elli *et al.*, 2015 ; Gobbetti *et al.*, 2017). Par conséquent, des produits sans gluten sont élaborés et commercialisés non seulement pour les patients cœliaques et ceux ayant un trouble lié au gluten (allergie au blé et sensibilité non cœliaque au gluten), mais également pour d'autres personnes sains qui souhaitent suivre un régime sans gluten pour ses avantages perçus pour la santé, notamment la perte de poids et/ou la diminution du risque futur de maladies gastro-intestinales (Hager *et al.*, 2012 ; Gobbetti *et al.*, 2017).

Le remplacement du gluten dans les produits à base de céréales présente un défi technologique majeur. Deux approches principales peuvent être envisagées. L'une est basée sur des ingrédients/additifs appropriés pour produire une structure cohésive qui peut surmonter l'absence de gluten. À cet égard, plusieurs additifs/ingrédients, y compris les amidons modifiés, les gommes, les émulsifiants, les protéines et les enzymes ont été utilisés. La deuxième approche focalise sur le rôle des conditions de transformation adéquates afin de promouvoir une organisation nouvelle et efficace de l'amidon capable de remplacer le réseau de gluten dans le produit final (Marti *et al.*, 2013).

La technique de cuisson-extrusion est l'une des technologies les plus appropriées pour la fabrication de pâtes sans gluten (Marti *et al.*, 2010; Wójtowicz, 2011 ; Cabrera-Chávez *et al.*, 2012 ; Marti et Pagani, 2013). La gélatinisation de l'amidon est le principal phénomène exploité dans la fabrication des pâtes sans gluten. En fait, le changement de l'organisation des granules d'amidon donne un produit digeste et malléable (Marti et Pagani, 2013). Il s'agit d'un procédé à haute température et à courte durée durant lequel les matières premières sont traitées par un cisaillement mécanique à une humidité relativement faible (Camire *et al.*, 1990). Cette technique présente de nombreux avantages, principalement la faible dégradation des éléments nutritifs, l'amélioration de la digestibilité par gélatinisation de l'amidon, dénaturation des protéines et désactivation des facteurs antinutritionnels (Alonso *et al.*, 2000 ; Shimelis et Rakshit, 2007). En outre, la modification des paramètres de fabrication (tels que la teneur en eau, la vitesse de rotation de la vis et/ou la température) au cours de la cuisson-extrusion permet d'utiliser plusieurs matières premières et de produire ainsi des pâtes alimentaires avec des caractéristiques et des fonctionnalités spécifiques (De Clindio *et al.*, 2002 ; Wójtowicz et Mościcki, 2009 ; Wójtowicz, 2011).

Plusieurs produits sans gluten commercialisés sont fabriqués à partir de riz en raison de son goût doux, sa couleur blanche, sa haute digestibilité, ses caractéristiques hypoallergéniques, mais aussi son faible coût et son abondance dans le marché (Rosell et Marco, 2008 ; Giménez *et al.*, 2013). Cependant, le riz (surtout dans le riz blanc) a un profil d'acides aminés mal équilibré et des niveaux limités de micronutriments (Thompson, 2009).

Afin d'améliorer la qualité nutritionnelle des pâtes sans gluten à base de riz, différents grains ont été utilisés : le sarrasin (Alamprese *et al.*, 2007), l'amarante (Cabrera-Chávez *et al.*, 2012), le sorgho (Marengo *et al.*, 2015) et l'haricot (Giuberti *et al.*, 2015a). Parmi ces grains, les légumineuses représentent une source intéressante de protéines (avec une bonne complémentarité avec les protéines des céréales en terme d'acides aminés), de fibres, de vitamines et de minéraux (Duranti, 2006 ; Zhao et Chang, 2008 ; Campos-Vega *et al.*, 2010). Cependant, l'incorporation des farines de légumineuses pourrait se répercuter sur les propriétés culinaires, organoleptiques et structurales des pâtes. Le développement de pâtes enrichies en légumineuses nécessite donc de répondre à un compromis entre la facilité de transformation, l'acceptabilité du consommateur et le gain nutritionnel (Marconi et Carcea, 2001 ; Petitot, 2009).

La formulation sans gluten à base de riz et de légumes secs fait l'objet des travaux de recherche de l'équipe « Transformation et Elaboration de Produits Agro-alimentaires » (T.E.P.A.) du Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.) de l'I.N.A.T.A.A., où la faisabilité a été étudiée pour plusieurs aliments dont le pain (Benatallah, 2009 ; Gherairia, 2011 ; Boulemkahel, 2014), le couscous (Benatallah, 2009 ; Boucheham, 2009), les farines infantiles sous forme de biscuit (Benkadri, 2010), les pâtes laminées (Betrouche, 2015) et les crêpes algériennes (Bouziane, 2014). L'utilisation des mêmes formules en pastification constitue un objectif de l'équipe. Dans notre travail, trois formules ont été choisies : riz-pois jaune, riz-pois chiche et riz-lentille. Par ailleurs, à notre connaissance, il ne semble pas exister d'études sur la fabrication de pâtes sans gluten à base de riz et de légumes secs par le procédé de cuisson-extrusion.

Ce travail de thèse s'insère dans les travaux de recherche de l'équipe T.E.P.A. et vise à contribuer à la diversification par la formulation et la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten par cuisson-extrusion. Ainsi, les objectifs de notre travail sont :

- l'étude de l'effet des conditions de fabrication par cuisson-extrusion (teneur en eau de la formule et vitesse de rotation de la vis du cuiseur-extrudeur) sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten ;
- l'étude de l'effet de la variation de la formulation (type de légume sec et son taux d'incorporation) sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten fabriquées par cuisson-extrusion ;
- l'étude de l'effet de la variation des conditions de fabrication et de la formulation sur le rendement du procédé de cuisson-extrusion et sa consommation d'énergie.

Le manuscrit est organisé comme suit :

- une étude bibliographique comprenant trois chapitres : le premier synthétise l'état des connaissances sur la pastification pâtes sans gluten, le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la technique de cuisson-extrusion, et enfin le troisième chapitre donne un aperçu sur les deux matières premières utilisées dans cette étude à savoir le riz et les légumes secs.
- une présentation du matériel et des méthodes utilisés pour la réalisation des expérimentations.
- une partie résultats et discussion qui est divisée en trois parties, chaque partie a fait l'objet d'une publication.

ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1. Pâtes alimentaires sans gluten

1. Rôle du gluten dans les pâtes alimentaires à base de blé dur

La norme CODEX STAN 118-1979 (adoptée en 1979. Amendement : 1983 et 2015. Révision: 2008) a défini le gluten comme la fraction protéique du blé, du seigle, de l'orge, de l'avoine ou de leurs variétés croisées et de leurs dérivés, à laquelle certaines personnes sont intolérantes et qui est insoluble dans l'eau salée à 0,5 M de NaCl. Les prolamines sont définies comme la fraction du gluten qui peut être extraite à l'aide d'éthanol à 40-70%. La prolamine du blé est la gliadine, celle du seigle la sécaline, celle de l'orge l'hordéine et celle de l'avoine l'avénine. La teneur en prolamine du gluten est généralement de 50 %. La présente norme précise aussi que l'avoine peut être tolérée par la plupart, mais pas par la totalité des personnes souffrant d'une intolérance au gluten. Il s'ensuit que l'autorisation d'incorporer de l'avoine non contaminée par du blé, du seigle ou de l'orge dans les aliments visés par la norme, peut être déterminée au niveau national (*Codex Alimentarius*, 2017a).

Les gluténines et les gliadines sont les fractions protéiques du gluten de blé dur. Ces protéines, en présence d'eau et de forces mécaniques, forment une phase continue appelée réseau de gluten responsable des caractéristiques viscoélastiques de la pâte. Les gliadines sont très extensibles et confèrent à la pâte son extensibilité, sa viscosité et sa plasticité. Les gluténines sont quant à elles, responsables de la ténacité et de l'élasticité de la pâte (Feillet, 2000).

Le degré de difficulté en pastification sans gluten est étroitement associé au rôle technologique du gluten dans le système du produit (Gallagher *et al.*, 2004 ; Gómez et Sciarini, 2015). La quantité et la qualité des protéines sont généralement considérées comme étant les principaux facteurs affectant les propriétés de la pâte et la qualité culinaire des pâtes à base de blé dur (Feillet et Dexter, 1996). La teneur en protéines du blé dur peut varier de 9 à 18% et ces protéines sont liées entre elles par des liaisons disulfures, hydrogène et hydrophobes pour former une matrice qui donne aux pâtes cuites des propriétés viscoélastiques (Gallagher, 2008). Une teneur élevée en protéines, ainsi qu'un réseau de gluten fort, sont nécessaires pour obtenir des pâtes avec des performances culinaires optimales et empêche la désagrégation des pâtes lors de la cuisson dans de l'eau bouillante (Feillet, 1984 ; Abecassis *et al.*, 1989 ; D'Egidio *et al.*, 1990 ; Feillet et Dexter, 1996).

Pendant la cuisson des pâtes, deux phénomènes principaux se produisent : d'une part, le réseau de gluten, développé au cours du malaxage, s'hydrate et, à mesure que la température augmente, se coagule et devient insoluble, créant ainsi un réseau puissant qui emprisonne les granules d'amidon (figure 1). D'autre part, la diffusion de l'eau à l'intérieur des pâtes et la montée de la température conduisent à la gélatinisation de l'amidon (Gómez et Sciarini, 2015).

La gélatinisation de l'amidon et la coagulation des protéines sont des phénomènes compétitifs, car ils se produisent à la même plage de température et sont tous deux influencés par la disponibilité de l'eau (Pagani, 1986). Plus vite a lieu la formation d'un réseau protéique continu, plus limité sera le gonflement d'amidon, et plus faible sera l'expansion des pâtes avec la plus faible quantité d'amylose qui se détache des granules et se diffuse vers la surface des pâtes, assurant une texture plus ferme et une adhérence plus faible du produit final. Au contraire, si le réseau protéique manque d'élasticité ou si sa formation est retardée, les granules d'amidon gonflent facilement et une partie du matériau amylicé se diffusera aussi bien à la surface des pâtes que dans l'eau de cuisson, ce qui donnera un produit caractérisé par une adhérence élevée et une mauvaise consistance avec un effet nuisible sur sa qualité sensorielle (Resmini et Pagani, 1983).

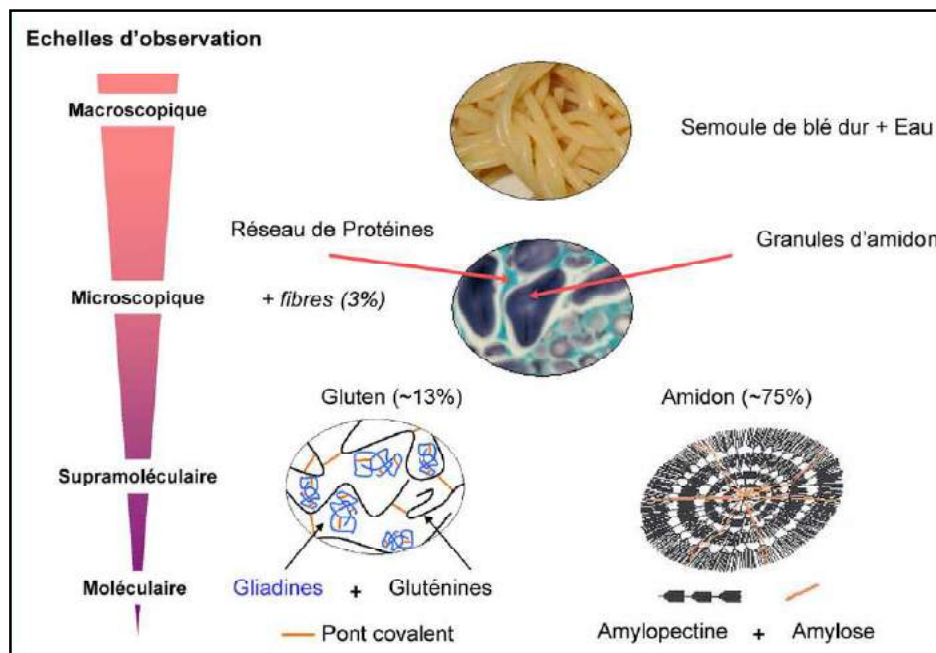


Figure 1. Pâte 100% blé dur-structure aux différentes échelles d'observation (Micard *et al.*, 2010)

2. Substitution du rôle du gluten dans les pâtes alimentaires sans gluten

Les pâtes alimentaires préparées uniquement à partir de farines sans gluten sont généralement considérées comme étant inférieures en qualité texturale par rapport aux pâtes à base de semoule de blé : elles ne tolèrent pas la sur-cuisson, elles sont collantes et surtout se caractérisent par des pertes à la cuisson élevées (Marti et Pagani, 2013).

Jusqu'à maintenant, pour les pâtes sans gluten, le rôle du gluten peut être remplacé par l'utilisation de l'une des deux approches principales. La première approche est basée sur le choix d'ingrédients et/ou d'additifs appropriés pour induire une structure cohésive qui surmonte l'absence de gluten. L'autre approche consiste à choisir des conditions de fabrication appropriées capables de créer un nouvel arrangement efficace de l'amidon dans le produit final (figure 2) (Marti et Pagani, 2013 ; Padalino *et al.*, 2016).

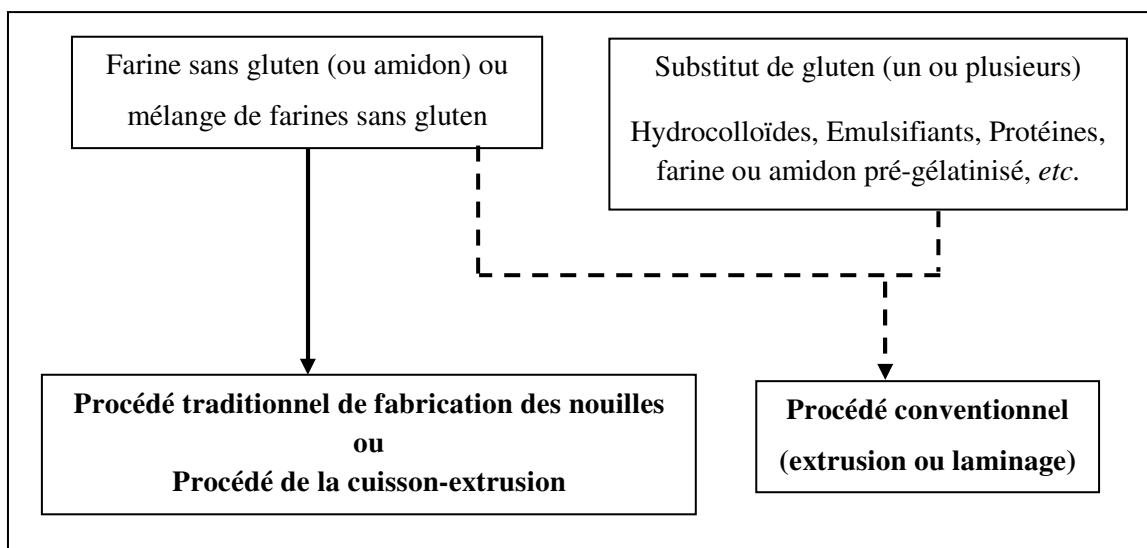


Figure 2. Approches utilisées pour la fabrication des pâtes sans gluten

2.1. Ingrédients et/ou additifs utilisés en pastification sans gluten

Lorsque la quantité appropriée de substituts de gluten est incorporée dans la farine sans gluten, les pâtes alimentaires peuvent être fabriquées par un procédé conventionnel (extrusion ou laminage). L'ajout des amidons, des hydrocolloïdes et d'autres additifs permet la fabrication de produits sans gluten avec un peu de ressemblance à leurs homologues contenant du gluten (Naqash *et al.*, 2017).

2.1.1. Hydrocolloïdes et émulsifiants

Les additifs les plus utilisés en pastification sans gluten sont, sans aucun doute, les hydrocolloïdes et les émulsifiants (Gómez et Sciarini, 2015). Les hydrocolloïdes alimentaires d'algues, de plantes, de microorganismes, ainsi que de bio-polymères modifiés, créés par une modification enzymatique ou chimique de la cellulose et de l'amidon, sont des composés à grande masse moléculaire, contenant une chaîne hydrophile et souvent avec des propriétés colloïdales (capacité à lier de grandes quantités d'eau, jusqu'à 100 fois sa masse) (Padalino *et al.*, 2016).

Les hydrocolloïdes ou les gommages sont couramment utilisés comme ingrédients dans l'industrie alimentaire pour leur capacité à donner un gel en petites quantités, procurer une consistance élevée à température ambiante et améliorer la fermeté. L'application d'hydrocolloïdes dans le secteur sans gluten dépend de leur capacité à augmenter la capacité de rétention de l'eau, la viscosité et le taux d'hydratation (Sozer, 2009 ; Susanne et Prabhasankar, 2013 ; Padalino *et al.*, 2016).

Une large gamme d'hydrocolloïdes a été utilisée en pastification sans gluten :

- la gomme de xanthane (Huang *et al.*, 2001 ; Yalcin et Basman, 2008a ; Padalino *et al.*, 2011 ; Larrosa *et al.*, 2012 ; Padalino *et al.*, 2013a ; Susanne et Prabhasankar, 2013 ; Larrosa *et al.* 2015 ; Loubes *et al.*, 2016).
- la gomme de caroube (Huang *et al.*, 2001 ; Yalcin et Basman, 2008b ; Larrosa *et al.*, 2012).
- la gomme de guar (Sozer *et al.*, 2013 ; Susanna et Prabhasankar, 2013 ; Larrosa *et al.*, 2015 ; Loubes *et al.*, 2016).
- le carboxyméthylcellulose (Singh *et al.*, 2004 ; Chillo *et al.*, 2007 ; Chillo *et al.*, 2009a ; Padalino *et al.*, 2011 ; Flores-Silva *et al.*, 2014).
- l'hydroxypropylméthylcellulose (Padalino *et al.*, 2011 ; Susanna et Prabhasankar, 2013 ; Loubes *et al.*, 2016).
- la gomme arabe (Singh *et al.*, 2004).
- la gomme de gellane (Padalino *et al.*, 2013a).
- la gomme d'Agar et le chitosane (Padalino *et al.*, 2011).

En ce qui concerne les émulsifiants, ils agissent comme lubrifiants dans le procédé d'extrusion et fournissent une consistance plus ferme et une surface moins collante, car ils contrôlent le gonflement de l'amidon et la lixiviation de l'amylose pendant la cuisson

(Eliasson et Krog, 1985 ; Lai, 2002), tout en améliorant la texture et minimisant les pertes à la cuisson du produit final (Charutigon *et al.*, 2008 ; Kaur *et al.*, 2005). Les émulsifiants les plus utilisés pour la fabrication des pâtes sans gluten sont les monoglycérides (Lai, 2002 ; Kaur *et al.*, 2005 ; Charutigon *et al.*, 2008 ; Padalino *et al.*, 2013 ; Sarawong *et al.*, 2014).

2.1.2. Protéines

L'utilisation de protéines comme ingrédients structuraux représente une alternative intéressante en pastification sans gluten (Thompson, 2009). Les protéines pourraient être incorporées sous diverses formes, en tant que constituants de farines sans gluten (par exemple, riz, soja, pois) ou sous forme de concentrés et d'isolats.

L'ajout de protéines dans la fabrication des produits sans gluten affecte positivement la structure, la texture, les propriétés sensorielles ainsi que la qualité nutritionnelle notamment en terme de réduction du déficit en acides aminés (Padalino *et al.*, 2016). A cet égard, les deux protéines principales utilisées en pastification sans gluten avec une qualité culinaire et une texture améliorées sont les protéines d'œuf (Sozer, 2009 ; Schoenlechner *et al.*, 2010 ; Larrosa *et al.*, 2012 ; Padalino *et al.*, 2013a ; Marti *et al.*, 2014 ; Sarawong *et al.*, 2014 ; Larrosa *et al.*, 2015 ; Larrosa *et al.*, 2016 ; Phongthai *et al.*, 2017) et les protéines du lait telles que la caséine (Sozer, 2009 ; Chillo *et al.*, 2009b ; Schoenlechner *et al.*, 2010) et les protéines de lactosérum (Chillo *et al.*, 2009b ; Susanna et Prabhasankar, 2013 ; Marti *et al.*, 2014 ; Phongthai *et al.*, 2017).

2.1.3. Transglutaminase

La transglutaminase (TG) induit des réticulations intermoléculaires ce qui modifie la structure protéique et pourraient améliorer les propriétés texturales des pâtes alimentaires sans gluten en piégeant l'amidon dans le réseau protéique formé (Naqash *et al.*, 2017).

L'amélioration de la qualité des pâtes alimentaires sans gluten par l'addition de la TG a été rapportée par certaines études. Yalcin et Basman (2008a) ont constaté que l'addition de la TG a amélioré l'aptitude à la transformation de la pâte à base de farine de riz. Les nouilles ainsi fabriquées étaient caractérisées par une surface lisse et des pertes à la cuisson faibles. Yalcin et Basman (2008b) ont trouvé que l'ajout de la TG abaissait les pertes à la cuisson des nouilles à base de maïs. Récemment, Rosa-Sibakov *et al.* (2016) ont rapporté que la TG a réduit la digestibilité *in vitro* de l'amidon et a augmenté certains

paramètres de texture (dureté, cohésion, élasticité et résilience) des pâtes alimentaires sans gluten préparées avec de la farine de fève.

2.1.4. Farines et/ou amidons prétraités

L'utilisation de farines et/ou amidons prétraités est l'un des techniques actuellement utilisées pour préparer les pâtes alimentaires sans gluten. Les traitements appliqués induisent la gélatinisation de l'amidon et la rétrogradation subséquente en précuisant la farine ou l'amidon dans un équipement séparé avant la fabrication des pâtes alimentaires (Padalino *et al.*, 2016).

La rétrogradation de l'amylose solubilisée pendant la gélatinisation implique la formation d'hélice double, stabilisée par liaison hydrogène et formant ainsi une phase continue entourant les granules d'amidon gonflés et déformés. Cet amylose rétrogradé est thermiquement stable et peut retarder le gonflement et la solubilisation de l'amidon pendant la cuisson. L'amidon idéal pour les pâtes sans gluten devrait avoir une forte tendance à la rétrogradation : cette propriété, généralement observée dans les céréales et les légumineuses à forte teneur en amylose, assure un bon comportement culinaire en termes de texture et des pertes à la cuisson faibles, même après une cuisson prolongée (Marti et Pagani, 2013 ; Gómez et Sciarini, 2015).

À cet égard, plusieurs traitements thermiques ont été utilisés pour la préparation des farines et/ou amidons prétraités tels que l'étuvage (Grugni *et al.*, 2009 ; Marti *et al.*, 2010), la pré-gélatinisation (Raina *et al.*, 2005 ; Yalcin et Basman, 2008a ; Yalcin et Basman, 2008b ; Chillo *et al.*, 2009a ; Mastromatteo *et al.*, 2012 ; Padalino *et al.*, 2013a ; Sarawong *et al.*, 2014), le recuit et le traitement par chaleur humide (Yoenyongbuddhagal et Noomhorm, 2002 ; Horndok et Noomhorm, 2007 ; Cham et Suwannaporn, 2010) sont parmi les plus importantes qui ont été proposées et chacun d'eux affecte spécifiquement les propriétés de l'amidon et favorise ainsi le développement structurel des pâtes, augmentant la fermeté du produit final et diminuant les pertes à la cuisson (Marti et Pagani, 2013 ; Gómez et Sciarini, 2015).

2.2. Procédés utilisés en pastification sans gluten

Malgré l'effet positif de l'ajout des ingrédients fonctionnels, ils comportent des coûts et les consommateurs associent souvent leur présence dans des pâtes alimentaires sans gluten à un aliment artificiel. Par conséquent, la recherche d'alternatives lors du choix

des matières premières et/ou des conditions de fabrication est nécessaire pour améliorer la qualité des pâtes sans gluten (Marti et Pagani, 2013 ; Naqash *et al.*, 2017).

La modification des technologies traditionnelles de fabrication et l'adoption de technologies alternatives peuvent présenter certaines des solutions les plus intéressantes pour la fabrication de pâtes à partir d'ingrédients non conventionnels (Marconi et Carcea, 2001). Des conditions de fabrication appropriées permettent une réorganisation de l'amidon dans les matières premières sans gluten assurant ainsi une bonne qualité culinaire avec une texture adéquate et des propriétés nutritionnelles améliorées (Marti et Pagani, 2013).

2.2.1. Procédé traditionnel de fabrication des nouilles

Lorsque les matières premières non conventionnelles utilisées contiennent de faibles teneurs en protéines (par exemple, farines de riz et de maïs) ou aucune protéine (par exemple des amidons de diverses origines), la technologie doit travailler sur la fraction d'amidon (Pagani, 1986 ; Abecassis *et al.*, 1989). Dans ce contexte, on peut adopter le procédé traditionnel utilisé pour fabriquer des nouilles de riz asiatiques (Chen *et al.*, 2002 ; Kaur *et al.*, 2005 ; Han *et al.*, 2011).

Le procédé consiste en un traitement thermique initial (gélatinisation de l'amidon) suivi d'une étape de refroidissement (rétrogradation de l'amidon). La gélatinisation implique la perte irréversible des régions cristallines dans les granules d'amidon et la transition vers un état amorphe. La rétrogradation consiste en la recristallisation partielle de l'amidon due à la force d'attraction entre les molécules d'amidon et les nombreuses liaisons hydrogène. La microstructure des pâtes d'amidon après gélatinisation montre un degré élevé de dispersion, tandis qu'après refroidissement et rétrogradation, on peut voir un réseau fibrillaire (Resmini et Pagani, 1983).

La bonne qualité culinaire des nouilles est attribuée au degré plus élevé de gélatinisation de l'amidon et à la formation d'un réseau continu d'amidon rétrogradé conservant l'intégrité des pâtes pendant la cuisson (Pagani, 1986). Cependant, le processus traditionnel nécessite une grande quantité d'énergie et d'eau pour les opérations de chauffage et de refroidissement et le diamètre du produit final doit être très mince (0,68-0,78 mm) pour une bonne perception sensorielle. Par conséquent, le transfert de la technologie des nouilles orientales traditionnelles à une échelle industrielle est difficile (Marti et Pagani, 2013).

2.2.2. Procédé de cuisson-extrusion

La cuisson-extrusion est l'une des technologies les plus appropriées pour la pastification sans gluten, ce qui simplifie le procédé traditionnel de fabrication de nouilles (Marti et Pagani, 2013 ; Gómez et Sciarini, 2015). Au cours de la cuisson-extrusion, la gélatinisation de l'amidon se produit à faible humidité dans le fourreau du cuiseur-extrudeur, où la pâte subit un chauffage sous pression. Une filière située à la sortie de l'extrudeur forme le produit, qui peut ensuite être séché en utilisant des procédés similaires à ceux utilisés dans la fabrication de pâtes conventionnelles.

La gélatinisation de l'amidon se produisant pendant la cuisson-extrusion est exploitée pour la pastification sans gluten (Marti et Pagani, 2013). En fait, il y a une perturbation de l'organisation des granules d'amidon par conversion des macromolécules d'amidon cristallin en un matériau plus amorphe capable de produire un produit malléable (Wolf, 2010). Cette structure est capable de maintenir l'intégrité des pâtes pendant la cuisson (Wójtowicz et Mościcki, 2014). En conséquence, les pâtes fabriquées par cuisson-extrusion montrent une fermeté et une texture élevées après cuisson, par rapport aux pâtes obtenues par un extrudeur conventionnel (Padalino *et al.*, 2016).

La technologie de cuisson-extrusion est très polyvalente et permet l'utilisation d'une large gamme de matières premières sans gluten (seules ou en mélange). Une telle formulation peut être utilisée pour produire des pâtes alimentaires à haute valeur nutritionnelle (Marconi et Carcea, 2001).

3. Matières premières utilisées en pastification sans gluten

Les matières premières utilisées comme substituts de blé dur dans la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten sont le riz, le maïs, les pseudo-céréales, le sorgho ainsi que leurs amidons (Gómez et Sciarini, 2015 ; Padalino *et al.*, 2016). Les farines sans gluten sont utilisées plus que les amidons, évitant ainsi l'étape coûteuse d'extraction de l'amidon à partir des grains. De plus, d'un point de vue technologique, l'utilisation des farines permet d'exploiter la présence d'interactions entre l'amidon et d'autres composants tels que les protéines et les lipides (Marti et Pagani, 2013).

En outre, il a été observé que les produits sans gluten sont pauvres en fibres alimentaires et d'autres nutriments importants (tels que certains minéraux et vitamines) car ils sont généralement obtenus à partir de farine raffinée et/ou d'amidons qui ne sont généralement pas enrichis. De nos jours, des ingrédients riches en protéines et en fibres

alimentaires, tels que les farines de légumes secs et de légumes, en combinaison avec des farines et des amidons sans gluten classiques, peuvent être ajoutés (Padalino *et al.*, 2016). Cette diversité de matières premières sans gluten contribue à augmenter la variété et améliorer la qualité nutritionnelle des produits sans gluten (Marti et Pagani, 2013 ; Padalino *et al.*, 2016). Le tableau 1 montre quelques exemples de formules (matières premières avec ou sans additifs) utilisées pour la fabrication des pâtes sans gluten par divers procédés.

3.1. Riz

Le riz est présent dans pratiquement tous les produits sans gluten disponibles sur le marché, et souvent la farine obtenue à partir de grains longs est préférée car elle présente une teneur élevée en amylose (Marti et Pagani, 2013 ; Gómez et Sciarini, 2015). La farine de riz est l'une des matières premières les plus adaptées en raison de ses propriétés hypoallergéniques, sa haute digestibilité, son goût doux, sa couleur blanche et de sa disponibilité (Rosell et Marco, 2008). Différents types de riz (blanc, brun ou étuvé) ont été utilisés pour fabriquer des pâtes alimentaires sans gluten (tableau 1).

3.2. Maïs

Comme la farine de riz, la farine de maïs est l'un des principaux ingrédients utilisés dans la plupart des produits sans gluten trouvés sur le marché en raison de son abondance et son faible coût (Giménez *et al.*, 2013).

Mestres *et al.* (1993), Waniska *et al.* (1999), Yalcin et Basman (2008b), Merayo *et al.* (2011) et Giménez *et al.* (2015) ont utilisé la farine de maïs (avec ou sans additifs) pour la préparation des pâtes alimentaires sans gluten (tableau 1).

3.3. Sorgho

Le sorgho présente des caractéristiques nutritionnelles intéressantes, car il est une source de protéines, d'amidon et de composés antioxydants (Taylor *et al.*, 2006). Pour cette raison, une nouvelle utilisation potentielle du sorgho pourrait être la fabrication des pâtes alimentaires, en addition ou en tant que substitut de farines de maïs ou de riz dans la préparation des aliments sans gluten (Marti et Pagani, 2013).

Il a été proposé que le principal facteur déterminant la haute performance de cette céréale est la dureté des grains, qui détermine la taille des particules de la farine et la quantité d'amidon endommagé (Schober *et al.*, 2005).

Suhendro *et al.* (2000) ont étudié l'effet du cultivar, de la granulométrie de la farine et des conditions de transformation sur la qualité culinaire des nouilles préparées à partir de farine de sorgho décortiqué à l'échelle de laboratoire. La farine fine (avec une teneur élevée en amidon endommagé) préchauffée dans un four à micro-ondes et séchée en deux étapes a produit les meilleures nouilles avec des pertes à la cuisson modérées. Les mêmes auteurs ont produit des nouilles à partir de sorgho cireux qui présentaient une qualité inférieure par rapport au sorgho normal. Ces nouilles étaient molles et collantes, avec des pertes à la cuisson élevées, probablement en conséquence d'une rétrogradation limitée.

3.4. Avoine

L'avoine peut être tolérée par la plupart des malades cœliaques tant que la contamination croisée avec le blé, le seigle ou l'orge est évitée (*Codex Alimentarius*, 2017). L'utilisation de la farine d'avoine seule pour la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten a été rapportée par Chillo *et al.* (2009a). Ces auteurs ont préparé les pâtes sans gluten extrudées à base d'avoine avec ajout du carboxyméthylcellulose ou d'amidon pré-gélatinisé comme agents améliorants.

3.5. Pseudo-céréales

Les pseudo-céréales (amarante, quinoa et sarrasin) ont reçu une attention importante en raison essentiellement de leurs importantes propriétés fonctionnelles et de leur haute valeur nutritionnelle en termes de fibres, de vitamines, de minéraux et d'autres composants bioactifs (polyphénols, phytostérols, *etc.*) (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010). Cependant, leur disponibilité sur le marché est plutôt limitée et leur prix est supérieur à la plupart des farines et amidons. De ce fait, leur utilisation commerciale est limitée à des recettes supplémentaires à base de farine de riz et d'amidon (Gómez et Sciarini 2015).

Des spaghettis à partir de l'amarante (Chillo *et al.*, 2007), du quinoa (Chillo *et al.*, 2009a) et du mélange de sarrasin, amarante et quinoa (Schoenlechner *et al.*, 2010) ont été fabriqués par extrusion en utilisant différents additifs (tableau 1).

Le sarrasin est la pseudo-céréale préférée en pastification sans gluten. Il a été démontré que ces grains ont un effet négatif moins important sur la qualité des pâtes comparativement au quinoa et à l'amarante, en termes de fermeté, de temps de cuisson et de pertes à la cuisson. Lors de l'utilisation du quinoa, et en particulier de l'amarante, la fermeté des pâtes est considérablement réduite, ainsi que sa tolérance à la sur-cuisson (Schoenlechner *et al.*, 2010). Néanmoins, il a également été rapporté que le sarrasin est

susceptible de subir des réactions de Maillard pendant le séchage en raison de sa teneur élevée en lysine et en sucres réducteurs, ce qui donne un produit de couleur brune désagréable (Alamprese *et al.*, 2007). La performance de ces farines dépendra également du prétraitement auquel elles sont soumises avant la fabrication des pâtes alimentaires (Gómez et Sciarini, 2015).

3.6. Légumes secs

Les légumes secs sont une bonne source de protéines, de fibres, de vitamines et de minéraux (Duranti, 2006). Par conséquent, l'incorporation de la farine de légumes secs dans les produits sans gluten améliorerait leur qualité nutritionnelle (Gularte *et al.*, 2012).

Il y a peu d'études qui ont utilisé seulement la farine de légumes secs pour la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten. Frias *et al.* (1997) ont produit, par extrusion, des macaronis sans gluten à base des farines de pois vert et de pois jaune avec des émulsifiants. Wang *et al.* (1999) ont fabriqué des pâtes alimentaires sans gluten à partir de farine de pois en utilisant un cuiseur-extrudeur bi-vis. Ces pâtes ont présenté une texture et une saveur améliorées après cuisson et moins de changement après cuisson excessive, par rapport au même produit préparé en utilisant un extrudeur conventionnel. Plus récemment, la farine de pois chiche (Vijaykrishnaraj *et al.*, 2015), la farine de fèves (Rosa-Sibakov *et al.*, 2016) et les farines de lentille, de fève ou d'haricot urd (Laleg *et al.*, 2016) ont été utilisées pour la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten (tableau 1).

3.7. Amidons

L'amidon et ses dérivés jouent un rôle important dans les produits sans gluten. Il constitue l'agent de formation de la texture et de la structure dans les systèmes sans gluten (Naqash *et al.*, 2017).

Parmi les amidons les plus utilisés pour l'élaboration des pâtes alimentaires sans gluten on peut citer l'amidon de maïs (Tam *et al.*, 2004 ; Kaur *et al.*, 2005) et l'amidon de pomme de terre (Kim *et al.*, 1996 ; Chen *et al.*, 2002 ; Kaur *et al.*, 2005) en raison de leurs caractéristiques fonctionnelles, leur prix et leur disponibilité. Les amidons de manioc et de céréales comme le riz et le sorgho ont été aussi utilisés (Gómez et Sciarini, 2015). L'amidon provenant de différentes graines de légumineuses a été aussi utilisé : amidon d'haricot marine et d'haricot pinto (Kim *et al.*, 1996), amidon d'haricot mungo (Lii and Chang, 1981 ; Chen *et al.*, 2002), amidon de pois (Wang *et al.*, 2012), amidon de féverole et de lentille (Wang *et al.*, 2014) et amidon de fève (Rosa-Sibakov *et al.*, 2016) (tableau 1).

3.8. Mélanges de différentes matières premières

Plusieurs études ont évalué la qualité des pâtes alimentaires sans gluten fabriquées à partir de mélanges de différents ingrédients sans gluten (tableau 1). Le riz a été enrichi en : quinoa (Borges *et al.*, 2003), sarrasin (Alamprese *et al.*, 2007), amarante (Cabrera-Chávez *et al.*, 2012), amarante et avoine (Sakre *et al.*, 2015), sorgho (Marengo *et al.*, 2015), haricot (Giuberti *et al.*, 2015a), pulpe de manioc et la peau de pomelo (Wandee *et al.*, 2014), amidon rétrogradé ou réticulé de canna comestible (Wandee *et al.*, 2015) (banane plantain vert (Sarawong *et al.*, 2014), farine de soja dégraissée (Sereewat *et al.*, 2015), isolat de protéine de riz (Kim *et al.*, 2014), fractions riches en β -glucane préparées à partir des champignons *Lentinus edodes* (Heo *et al.*, 2014).

En ce qui concerne la farine de maïs, elle a été mélangée avec différentes farines pour produire des pâtes alimentaires sans gluten : quinoa (Caperuto *et al.*, 2001), quinoa et soja dégraissée (Mastromatteo *et al.*, 2011), fève (Giménez *et al.*, 2013), avoine (Padalino *et al.*, 2013a), riz brun (Moreira da Silava *et al.*, 2016), farines de légumes (artichauts, asperges, citrouille, courgettes, tomates, poivrons jaunes, poivrons rouges, poivrons verts, carottes, brocolis, épinards, aubergines et fenouil) (Padalino *et al.*, 2013b), banane plantain non mûr et pois chiche (Flores-Silva *et al.*, 2014), amidon de maïs et farine de citrouille ou farine de durian (Mirhosseini *et al.*, 2015).

D'autres formules ont également été testées en pastification sans gluten :

- farine de patate douce et farine de soja (Singh *et al.*, 2004).
- amarante-quinoa, amarante-fève et amarante-pois chiche (Chillo *et al.*, 2008).
- quinoa, avoine et pois chiche ou fève (Mastromatteo *et al.*, 2012).
- farine de banane verte (Zandonadi *et al.*, 2012).
- farine pré-gélatinisée à base d'amidon de manioc et de bagasse de manioc (70/30), amidon de manioc et farine d'amarante (Fiorda *et al.*, 2013).
- farine de teff et farine de teff avec de farine d'haricot blanc (Giuberti *et al.*, 2015b).
- farine de pois chiche avec poudre de moule verte (Vijaykrishnaraj *et al.*, 2015).
- farines de sorgho, de riz et de pomme de terre (Ferreira *et al.*, 2016).

Tableau 1. Exemples d'ingrédients et de procédés utilisés en pastification gluten

| Ingrédients | Procédé | Référence |
|---|--|---|
| Riz + monostéarate de glycérol | Extrusion | Lai (2001) |
| Amarante + CMC ou amidon pré-gélatinisé | | Chillo <i>et al.</i> (2007) |
| Avoine + CMC ou amidon pré-gélatinisé | | Chillo <i>et al.</i> (2009a) |
| Quinoa + CMC ou amidon pré-gélatinisé | | |
| Riz blanc ou riz brun étuvés | | Marti <i>et al.</i> (2010) |
| Sarasin + amarante + quinoa + blanc d'œuf + émulsifiant | | Schoenlechner <i>et al.</i> (2010) |
| Maïs + maïs pré-gélatinisée + légumes | | Padalino <i>et al.</i> (2013b) |
| Maïs + banane plantain + pois chiche + CMC | | Flores-Silva <i>et al.</i> (2014) |
| Pois chiche | | Vijaykrishnaraj <i>et al.</i> (2015) |
| Pois chiche + poudre de moule vert | | |
| Lentille, fève ou haricot urd | | Laleg <i>et al.</i> (2016) |
| Fève | | Rosa-Sibakov <i>et al.</i> (2016) |
| Amidon de fève | | |
| Riz + sarasin + oeufs | Laminage | Alamprese <i>et al.</i> (2007) |
| Farine pré-gélatinisée (à partir d'amidon de cassava et cassava bagasse), amidon de cassava + farine d'amarante | | Fiorda <i>et al.</i> (2013) |
| Riz | | Giuberti <i>et al.</i> (2015a) |
| Riz + haricot | | |
| Amidon de patate douce | Procédé traditionnel de fabrication des nouilles | Chen <i>et al.</i> (2002) |
| Amidon d'haricot mungo | | |
| Amidon de pomme de terre avec ou sans émulsifiant | | Kaur <i>et al.</i> (2005) |
| Amidon de maïs avec ou sans émulsifiant | | |
| Amidon de riz native ou traité | | Horndok et Noomhorm (2007) |
| Farine de riz + amidon de riz traité | | |
| Riz traité par chaleur humide ou par le recuit | | Cham et Suwannaporn (2010) |
| Riz | Han <i>et al.</i> (2011) | |
| Riz | Cuisson-extrusion | Tsao (1976) |
| Riz blanc ou riz brun étuvés | | Marti <i>et al.</i> (2010) |
| Riz brun | | Baek <i>et al.</i> (2014) |
| Riz + émulsifiants | | Charutigon <i>et al.</i> , 2008 |
| Riz brun et maïs | | Moreira da Silava <i>et al.</i> (2016) |
| Riz + amarante | | Cabrera-Chavez <i>et al.</i> (2012) |
| Riz + amarante + avoine | | Sakre <i>et al.</i> (2015) |
| Riz et quinoa | | Borges <i>et al.</i> (2003) |
| Maïs | | Mestres <i>et al.</i> (1993) ; Merayo <i>et al.</i> (2011) ; Giménez <i>et al.</i> (2015) |
| Maïs + Fève | | Giménez <i>et al.</i> (2013) |
| Sarasin | | Wójtowicz (2012) |
| Pois | | Wang <i>et al.</i> (1999) |
| Amidon de pois | | Vasanthan et Li (2003) |
| | | Wang <i>et al.</i> (2012) |
| Amidon de pois ou amidon de lentille | | Wang <i>et al.</i> (2014) |

Chapitre 2. Technologie de la cuisson-extrusion

1. Définitions

Littéralement, extruder signifie ‘‘pousser dehors’’. L’extrusion est un procédé qui consiste à forcer un produit à travers un orifice de petite dimension, la filière, sous l’action de pressions élevées obtenues grâce à une (extrudeur mono-vis) ou plusieurs (extrudeur bi-vis) vis d’Archimède (Mercier, 1994).

L’extrusion est principalement une opération de traitement thermomécanique qui combine plusieurs opérations unitaires, y compris le malaxage, le pétrissage, le cisaillement, le transport, le chauffage, le refroidissement, le formage, le séchage partiel ou le soufflage, selon le matériel et l’équipement utilisés (Ainsworth et Ibanoglu, 2006).

La cuisson-extrusion consiste à soumettre à l’action conjuguée du cisaillement, de la température et de la pression un mélange de matières premières alimentaires, hydratées ou non, sous forme pulvérulente, pâteuse ou liquide, et à les façonner ou à les souffler, une fois cuite, par passage forcé au travers d’une ou plusieurs filières. Les extrudeurs alimentaires permettent de transformer une large gamme de matières premières en semi-produits ou en produits finis. Etant donné que la température de cuisson peut atteindre 180-190°C et que le temps de séjour ne dépasse généralement pas 20 à 40 secondes, l’extrusion se classe parmi les traitements thermiques continus haute température/temps court (Riaz, 2001).

2. Fonctions et avantages

Dans les applications agro-alimentaires, les extrudeurs peuvent remplir les fonctions suivantes (Riaz, 2001) :

- mélanger, dégazer, broyer, cisailer, agglomérer, déshydrater ou cuire thermiquement des ingrédients ou modifier leur texture ;
- homogénéiser des mélanges ;
- gélatiser (cuire) l’amidon ;
- dénaturer et texturer des protéines ;
- inactiver des enzymes ;
- pasteuriser et stériliser des produits (afin d’éliminer les micro-organismes pathogènes ou d’empêcher la dégradation des aliments) ;
- façonner, expanser, souffler et conditionner des produits.

Les principaux avantages de l'extrudeur alimentaire, conduisant à son rôle élargi dans l'industrie alimentaire, sont :

- **versatilité** : une grande variété d'aliments peut être produite dans le même extrudeur en changeant juste l'un des ingrédients et/ou en modifiant les paramètres opératoires ou la filière (Harper, 1981 ; Guy, 2001 ; Riaz, 2001).
- **haute productivité** : l'extrusion permet de produire en continu à haut débit (Harper, 1981 ; Guy, 2001). En plus, la possibilité d'automatiser la plupart des extrudeurs apporte des gains de productivité (Riaz, 2001).
- **faible coût** : les besoins en main-d'œuvre et en surface par unité de production sont plus faibles que ceux des autres systèmes de cuisson et de mise en forme, ce qui accroît la rentabilité (Harper, 1981 ; Guy, 2001).
- **caractéristiques des produits** : la cuisson-extrusion permet de varier les formes, les textures et les apparences qui ne se forment pas facilement en utilisant d'autres méthodes de production. Ces caractéristiques sont obtenues en modifiant seulement un composant de l'extrudeur ou l'un de ses paramètres opératoires (Harper, 1981 ; Riaz, 2001).
- **haute qualité des produits** : le processus haute température/temps court minimise la dégradation des nutriments par la chaleur tout en améliorant la digestibilité par la gélatinisation de l'amidon et la dénaturation des protéines. Le temps court de traitement à haute température détruit également la plupart des facteurs indésirables dans les aliments. Certains de ces facteurs dénaturants à la chaleur sont des composés antinutritionnels, des enzymes indésirables (tels que les lipases ou des lipoxydases), des microorganismes et d'autres parasites d'origine alimentaire.
- **efficacité énergétique** : la cuisson-extrusion fonctionne à une humidité relativement faible. Cette humidité faible réduit la quantité de chaleur nécessaire à la cuisson et au séchage du produit de qui donne un rendement énergétique est excellent (Harper, 1981 ; Riaz, 2001).
- **production de nouveaux aliments** : les extrudeurs peuvent modifier les protéines des légumes secs, les amidons et d'autres matériaux alimentaires pour produire une variété de nouveaux produits alimentaires (Harper, 1981).
- **préservation de l'environnement** : la cuisson-extrusion se faisant à faible teneur en eau ce qui génère moins d'effluents et donc moins de pollution environnementale et de frais d'épuration (Guy, 2001).

- le passage de l'échelle de l'étude pilote à celle de la production commerciale se fait sans difficulté (Riaz, 2001).

3. Applications

Dans l'industrie agroalimentaire, la cuisson-extrusion donne lieu à une multitude d'applications dans des domaines très variés (Mercier, 1994). Actuellement, la cuisson-extrusion est utilisée pour la fabrication de nombreux produits alimentaires, allant des snacks expansés les plus simples aux analogues de viande hautement transformés (tableau 2) (Mościcki et Van Zuilichem, 2011).

Tableau 2. Principales application de la cuisson-extrusion (Mercier, 1994, Fellows, 2000 ; Ainsworth et Ibanoglu, 2006)

| Alimentation humaine | |
|---|----------------------------------|
| Céréales pour petit déjeuner | Réglisse |
| Pâtes alimentaires | Gommes à mâcher |
| Snacks et snacks expansés | Caramels au beurre (le toffee) |
| Pains plats | Brisures de cacahuètes |
| Aliments de sevrage | Produits co-extrudés |
| Farines composées précuites | Produits de grignotage |
| Saucisses, surimi | Epices stérilisées |
| Fromage fondu | Protéines végétales texturées |
| Alimentation animale | |
| Aliments semi-humide pour animaux familiers | aliments pour animaux aquatiques |
| Aliments secs pour animaux familiers | suppléments protéiques |
| Applications chimiques | |
| Amidons pré-gélatinisés | Dextrines |
| Amidons modifiés | Caséinates solubles |

Dans chacune des applications de la cuisson-extrusion, on exploite à divers degrés les fonctions de malaxage, de cuisson et de mise en forme (Mercier, 1994) :

- l'effet de malaxage est mis à profit en confiserie en vue de préparer des bonbons, gommes à mâcher ou de la réglisse, ou pour l'élaboration de produits complexes associant céréales, produits carnés et matières grasses, souvent à humidité intermédiaire (par exemple aliments pour animaux familiers).

- les applications à cuisson prédominante permettent de transformer des produits amylacés pour améliorer leurs aptitudes technologiques (par exemple modification des propriétés fonctionnelles comme la solubilité d'amidon) ou nutritionnelles (amélioration de la digestibilité). Un autre exemple de l'effet de cuisson est la stérilisation et surtout la détoxification appliquée aux produits issus de graines de légumineuses, telles que le pois, le soja et la féverole.
- parmi les applications de mise en forme prédominante, les exemples les plus connus pour les produits amylacés sont les biscuits apéritifs, les pains plats, les céréales pour petits déjeuners. La texture, et secondairement l'arôme et la couleur, sont alors des critères fondamentaux. La mise en forme par extrusion est utilisée également pour texturer les protéines en modifiant les liaisons entre molécules : la gamme de consistance que l'on peut obtenir est très large, allant de produits crémeux (fromage à tartiner) à des produits très élastiques (analogues de viande, surimi) selon les conditions du procédé, en particulier le pH, l'hydratation et l'intensité du cisaillement.

4. Equipement

Un extrudeur se compose en général des éléments suivants : un fourreau réglé thermiquement dans le quel tourne une vis ou deux vis parallèles, une filière de forme variable, un moteur à vitesse variable et un réducteur qui entraîne la ou les vis (figure 3).

Outre la géométrie de la vis et de la filière, les principaux paramètres qui peuvent être réglés sont les paramètres "machine" (débit d'alimentation, vitesse de rotation des vis, profil de température du fourreau) et les paramètres "produit" (choix des ingrédients, taux d'hydratation, additifs) (Mercier, 1994).

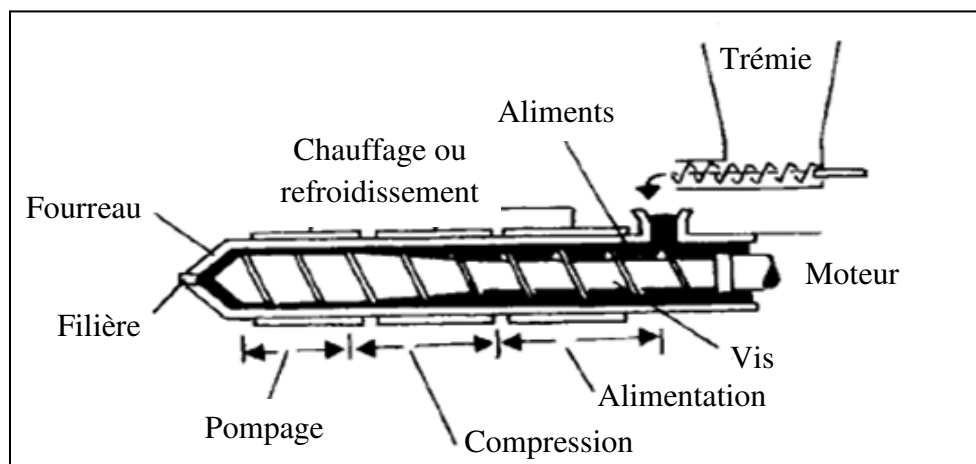


Figure 3. Section transversale d'un extrudeur mono-vis (Fellows, 2000)

La vis d'un extrudeur mono-vis possède généralement un filet de profondeur variable et un pas constant ou bien un filet de profondeur constant et un pas variable (figure 4) (Mercier, 1994). Le pas et le diamètre de la vis, le nombre de filets et le jeu entre les filets et le fourreau peuvent être ajustés pour changer les performances de l'extrudeur (Fellows, 2000).

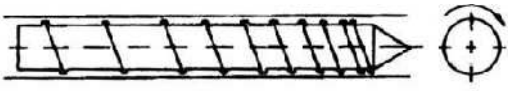

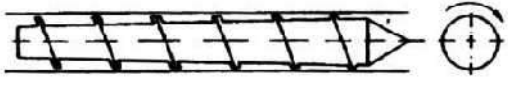


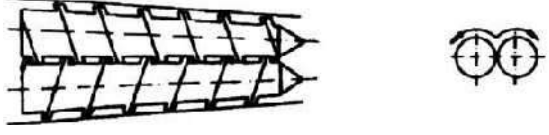

| Mono-vis | Bi-vis co-pénétrant |
|---|--|
| Pas décroissant | Co-rotatif partiellement autonettoyant |
|  |  |
| Noyau croisant | Co-rotatif cylindrique |
|  |  |
| Fourreau conique | Contra-rotatif conique |
|  |  |
| Fourreau rainuré | |
|  | |

Figure 4. Différentes configurations de la vis et du fourreau dans les extrudeurs mono- et bi-vis (Mercier, 1994 ; Mościcki et Van Zuilichem, 2011)

Les extrudeur bi-vis comportent deux vis de même longueur placés dans un même fourreau. Plus complexes que les mono-vis, ils sont plus polyvalents et plus faciles à contrôler (Riaz, 2001). Il existe quatre agencements possibles de vis pour l'extrudeur bi-vis : les vis peuvent tourner dans le même sens (vis co-rotatives) ou en sens inverse (vis contra-rotatives) et peuvent être co-pénétrantes ou non co-pénétrantes. Si les vis sont séparées, l'extrudeur s'apparente à un double extrudeur mono-vis. Il existe aussi des extrudeurs bi-vis à vis et fourreau coniques (Mercier, 1994).

Dans les extrudeurs bi-vis à vis co-pénétrante, le chevauchement partiel des vis à plusieurs effets notables : il crée un effet de pompe positive, assure un mélange efficace et exerce une action auto-nettoyante (l'une des vis balaye en permanence le filet de l'autre vis, ce qui empêche la matière de coller à cette vis) (Mercier, 1994 ; Riaz, 2001). Seules les machines à vis co-rotatives s'auto-nettoient et l'efficacité du mélange est réduite sur les machines à vis contra-rotatives (Riaz, 2001). Les extrudeurs bi-vis à vis co-rotatives co-pénétrants sont les plus utilisés dans l'industrie agroalimentaire et contribuent de manière importante à la diversification des productions (Mercier, 1994 ; Fellows, 2000 ; Riaz, 2001).

5. Impacts de la cuisson-extrusion sur la qualité des produits

En raison de l'action combinée de la température et de la pression, le matériau traité par cuisson-extrusion est sujet à des changements importants. Ces changements et leur mécanisme font toujours l'objet d'investigations scientifiques (Mościcki et Wójtowicz, 2011).

L'amplitude des changements physiques et chimiques dans le matériau traité dépend principalement des paramètres suivants : composition de la matière première, traitements antérieurs de la matière première, teneur en eau, débit d'alimentation de matière première, vitesse de rotation de la vis, configuration de la vis, température du fourreau, injection et configuration de la filière (Camire, 2001 ; Mościcki et Van Zuilichem, 2011).

En général, les changements chimiques ou physicochimiques des bio-polymères qui peuvent se produire pendant la cuisson-extrusion comprennent : la liaison, le clivage, la perte de conformation native, la fragmentation, la recombinaison et la dégradation thermique (Mościcki et Van Zuilichem, 2011).

5.1. Impacts sur la qualité sensorielle

La cuisson-extrusion a une influence importante sur les caractéristiques sensorielles du produit telles que la texture, la couleur et la saveur. La production de textures spécifiques est l'une des principales caractéristiques de la technologie d'extrusion. L'ampleur des modifications apportées à l'amidon, déterminée par les conditions opérationnelles et les matières premières, produit la large gamme de textures de produits (Camire, 2001).

Les conditions haute température/temps court dans la cuisson-extrusion ont seulement des effets mineurs sur la couleur naturelle et la saveur naturelle des aliments. Cependant, dans de nombreux aliments, la couleur du produit est déterminée par les pigments synthétiques ajoutés à la matière première. Dans la cuisson-extrusion, les arômes sont volatilisés lorsque les produits émergent de la filière. Les arômes micro-encapsulés sont plus appropriés mais coûteux. Les arômes sont donc plus souvent appliqués à la surface des aliments extrudés sous forme d'émulsions pulvérisées ou de boues visqueuses. Cependant, cela peut entraîner une adhérence dans certains produits ce qui nécessite un séchage supplémentaire (Fellows, 2000).

5.2. Impacts sur la qualité nutritionnelle

5.2.1. Impacts sur les glucides

La cuisson-extrusion favorise la gélatinisation de l'amidon. En effet, elle nécessite une teneur en eau (12 à 22 %) très inférieure à celle qu'exigent les autres procédés de transformation agroalimentaire. La gélatinisation n'est pas nécessairement complète, mais la digestibilité est meilleure (Camire, 2001). La digestibilité élevée de l'amidon est essentielle pour les aliments nutritionnels spécialisés tels que les aliments pour bébés et les aliments de sevrage (Rao et Thejaswini, 2015).

La modification des conditions d'extrusion permet d'obtenir de l'amidon résistant à la digestion. Détachés de leurs molécules, les branches d'amylopectine peuvent réagir avec d'autres glucides pour former de nouvelles liaisons qui ne sont pas digérées par les enzymes humains (Camire, 2001). La création d'amidon résistant par extrusion peut avoir de la valeur dans les produits à calories réduites (Rao et Thejaswini, 2015)

5.2.2. Impacts sur les protéines

La cuisson-extrusion de matières premières végétales a des répercussions sur la fraction protéique de ces aliments. Les protéines subissent de nombreux changements lors du procédé d'extrusion, la plus importante étant la dénaturation (perte de leur structure tertiaire et quaternaire). L'étendue de la dénaturation s'évalue en termes de modification de la solubilité des protéines. Pendant l'extrusion, les liaisons disulfure sont brisées et peuvent se reformer. Les interactions électrostatiques et hydrophobes favorisent la formation d'agrégats insolubles. Les modifications sont plus prononcées si le cisaillement est important, mais la température et la teneur en eau exercent également une influence significative (Cheftel, 1986 ; Camire, 2001 ; Rao et Thejaswini, 2015).

La valeur nutritive des protéines végétales est généralement améliorée par la cuisson-extrusion suite à l'augmentation de la digestibilité, probablement due à la dénaturation des protéines et à l'inactivation des inhibiteurs enzymatiques présents dans les matières premières, par l'exposition de nouveaux sites actifs à l'attaque enzymatique (Cheftel, 1986 ; Fellows, 2000 ; Camire, 2001 ; Rao et Thejaswini, 2015).

5.2.3. Impacts sur les lipides

En principe, l'extrusion concerne uniquement les aliments à moins de 10% de lipides car, au-delà de ce taux, le matériau glisse dans le fourreau de l'extrudeur et l'extrusion devient difficile, notamment pour les produits expansés.

Les monoglycérides et les acides gras libres forment des complexes avec l'amylose durant la cuisson-extrusion ; ceci les rend plus difficilement extractibles par les solvants organiques. Cependant, les complexes amylose-lipides ne devraient pas altérer l'utilisation des graisses (Champ, 1994 ; Camire, 2001).

L'oxydation des lipides est l'une des causes principales de la dégradation nutritionnelle et organoleptique des aliments destinés aux humains et des aliments pour animaux. L'oxydation des lipides n'intervient pas pendant l'extrusion, puisque les temps de séjour sont réduits (Camire, 2001 ; Rao et Thejaswini, 2015). L'extrusion peut inactiver les enzymes lipolytiques ainsi que d'autres enzymes favorisant l'oxydation, et les complexes amidon-lipides formés dans le fourreau peuvent être plus résistants à l'oxydation (Camire, 2001).

5.2.4. Impacts sur les fibres alimentaires

La cuisson et le cisaillement des fibres par cuisson-extrusion peuvent produire des changements dans leurs caractéristiques structurales et leurs propriétés physico-chimiques. L'effet principal étant une redistribution des fibres insolubles en fibres solubles. Cet effet serait le résultat de la rupture des liaisons covalentes et non covalentes entre les glucides et les protéines associées aux fibres, ce qui entraîne des fragments moléculaires plus petits qui seraient plus solubles. De telles modifications physico-chimiques pourraient renforcer considérablement les propriétés bénéfiques des aliments extrudés (Camire, 2001 ; Rao et Thejaswini, 2015).

5.2.5. Impacts sur les vitamines

Les vitamines peuvent être détruites par l'action de la température ou par l'oxydation. Étant donné que la cuisson-extrusion implique principalement un traitement thermique à des températures de 100°C ou plus, une certaine perte de vitamines dans le matériau traité est attendue, en particulier des substances thermosensibles et hydrosolubles, telles que la vitamine C. Cependant, l'ampleur des pertes est beaucoup moins par rapport aux méthodes conventionnelles (Mościcki et Wójtowicz, 2011).

Les pertes de vitamines dans les aliments extrudés varient en fonction du type d'aliments, de la teneur en eau, de la température de traitement et du temps de séjour. Les conditions haute température/temps court de la cuisson-extrusion et le refroidissement rapide à mesure que le produit émerge de la filière provoquent des pertes relativement faibles de la plupart des vitamines. Par exemple, à une température d'extrusion de 154°C, il existe une rétention de 95% de la thiamine et une perte faible de riboflavine, de pyridoxine, de niacine ou d'acide folique dans les céréales. Cependant, les pertes d'acide ascorbique et de β -carotène sont jusqu'à 50%, en fonction du temps pendant lequel les aliments sont maintenus aux températures élevées (Fellows, 2000).

La vitamine A révèle une grande stabilité dans les produits extrudés, beaucoup plus élevés que dans le cas des matières premières. Ce phénomène est associé à une susceptibilité accrue à l'extraction des vitamines liposolubles après traitement barothermique. Il en va de même pour la vitamine E qui n'est presque pas détruite lors de l'extrusion (Mościcki et Wójtowicz, 2011).

La solution la plus avantageuse est d'enrichir les produits extrudés (par exemple par pulvérisation) après le processus d'extrusion. Cette approche est très utilisée par les

fabricants de produits alimentaires céréaliers extrudés qui ajoutent un certain nombre d'autres micronutriments à ce stade (Mościcki et Wójtowicz, 2011).

5.2.6. Impacts sur les facteurs antinutritionnels

Les inhibiteurs d'enzymes, les analogues d'hormones, les saponines, et d'autres composés peuvent retarder la croissance des enfants. En détruisant ces nombreux facteurs antinutritionnels et toxines naturels, la cuisson-extrusion permet d'obtenir des aliments plus sains et plus digeste. Pour certains composés plus résistants à la chaleur et au cisaillement (comme les allergènes et les mycotoxines), l'extrusion peut être combinée à des traitements chimiques (Camire, 2001 ; Rao et Thejaswini, 2015).

5.3. Impacts sur la qualité microbiologique

L'une des exigences les plus importantes pour les consommateurs est la sécurité microbiologique des produits alimentaires. La plupart des produits extrudés classiques tels que les snacks et les céréales pour petit-déjeuner sont sains à manger car les matières premières sont soumises à des températures élevées et l'activité de l'eau du produit est faible (0,1 - 0,4) car le produit est séché à une teneur en humidité inférieure à 5% (Rao et Thejaswini, 2015)

La destruction de micro-organismes pendant la cuisson-extrusion est avantageuse pour les aliments destinés à être consommés après réhydratation (aliments de sevrage et autres farines infantiles précuites, boissons instantanées, aliments pour animaux domestiques ou pour l'aquaculture). Les traitements habituels de cuisson-extrusion provoquent vraisemblablement la destruction complète des espèces pathogènes et une réduction très significative de la charge microbienne totale (Cheftel, 1994).

Chapitre 3. Riz et légumes secs

1. Riz

1.1. Généralités

Le riz a été, à travers l'histoire, l'un des aliments les plus importants dans l'alimentation humaine et l'une des cultures céréalières les plus cultivées. Le riz est principalement consommé comme grain blanc, mais au début du 21^{ème} siècle, des dizaines de produits contenant du riz comme ingrédient sont apparus sur le marché (Rossel et Marco, 2008).

Deux espèces différentes de riz sont cultivées : *Oryza sativa* et *Oryza glaberrima*, et il existe environ 22 espèces sauvages. *Oryza sativa*, originaire de la zone tropicale humide de l'Asie, est l'espèce prédominante qui est cultivée dans le monde entier. *Oryza glaberrima* n'est cultivé qu'en Afrique de l'Ouest à une échelle limitée (Juliano, 2004).

Il n'y a pas de normes internationales pour la classification du riz blanc. Deux classifications sont proposées : selon la taille basée sur la longueur du grain, et en fonction de la forme basée sur le rapport longueur/largeur de celui-ci. L'Institut International de Recherche sur le Riz (IRRI) utilise une échelle pour la taille et la forme, alors que la FAO utilise une autre échelle (tableau 3) (Juliano, 2004).

Tableau 3. Classification du riz (Juliano, 2004)

| | Classification selon la longueur du grain (mm) | | Classification selon sa forme basée sur le rapport longueur/largeur du grain | | |
|------------|--|-------------|--|-----------|-----------|
| | IRRI | FAO | | IRRI | FAO |
| Extra long | > 7,50 | ≥ 7,00 | Mince | > 3,0 | > 3,0 |
| Long | 6,61 – 7,50 | 6,00 – 6,99 | Moyen | 2,1 – 3,0 | / |
| Moyen | 5,51 – 6,60 | 5,00 – 5,99 | Voyant | 1,1 – 2,0 | 2,0 – 3,0 |
| Court | < 5,50 | < 5,00 | Rond | ≤ 1,0 | < 2,0 |

Selon la norme CODEX STAN 198-1995, il existe plusieurs types de riz (*Codex Alimentarius*, 2017b) :

- le **riz paddy** est un riz qui a conservé sa balle après battage.
- le **riz décortiqué** (riz brun, riz cargo ou riz complet) est un riz paddy dont seulement la balle a été éliminée. Le décorticage et la manutention peuvent entraîner quelques pertes de péricarpe.
- le **riz usiné** (riz blanc) est un riz décortiqué qui a été débarrassé par usinage de tout ou partie du péricarpe et du germe.
- le **riz étuvé** est un riz décortiqué ou usiné obtenu par trempage dans l'eau de riz paddy ou de riz décortiqué, puis soumis à un traitement thermique qui gélatinise entièrement l'amidon, suivie par un séchage.
- le **riz gluant** : variétés spéciales de riz dont les grains sont blancs et opaques. L'amidon du riz gluant est presque entièrement constitué d'amylopectine. Il a tendance à s'agglutiner après la cuisson.

1.2. Composition

La composition du grain de riz dépend des cultivars cultivés, des facteurs environnementaux et de la transformation. La composition chimique du grain de riz change pendant l'usinage. L'élimination des couches extérieures de son provoque une perte de protéines, de graisses et un pourcentage important de fibres, de vitamines et de minéraux (tableau 4) (Rossel et Marco, 2008).

Tableau 4. Principaux nutriments du riz blanc cru (Juliano, 2004 ; Rossel et Marco, 2008)

| | Teneurs (g/100 g de matière sèche) |
|---------------------|------------------------------------|
| Amidon | 92,8 |
| Protéines | 7,31 – 8,24 |
| Fibres alimentaires | 0,81 – 2,67 |
| Cendres | 0,35 – 0,93 |
| Lipides | 0,35 – 0,58 |

Les glucides sont le composant le plus abondant du riz, avec des teneurs en amidon d'environ 92,8%. L'amidon de riz est composé d'amylose et d'amylopectine dans différentes proportions selon la variété de riz. La teneur en amidon dans le grain de riz

augmente de la surface au centre du grain, et ainsi le riz blanc est riche en amidon. L'amidon de riz est considéré comme non allergène en raison des protéines hypoallergéniques présentes. L'amidon détermine les propriétés physiques et la fonctionnalité des grains de riz, et ces propriétés dépendent grandement du rapport amylose/amylopectine. L'amylopectine est le polymère ramifié et est plus abondante que le polymère linéaire (amylose). Cependant, l'amylose a reçu plus d'attention de la communauté scientifique car elle est considérée comme un indicateur de la qualité culinaire (Rossel et Marco, 2008).

Les protéines sont le deuxième constituant le plus abondant du riz blanc avec des teneurs inférieures à 10%. Ces teneurs en protéines sont les plus faibles parmi les céréales. Pour le riz blanc, les fractions des protéines (selon leur solubilité) sont : ~ 15% d'albumine-globuline (soluble dans l'eau et dans le sel respectivement), 20% de prolamine (soluble dans l'alcool) et 65% de glutéline (soluble dans les alcalis). Les protéines du son sont constituées de 66 à 98% d'albumines (Juliano, 2004).

Bien que les protéines du riz soient déficientes en lysine comme toutes les autres céréales, elles comportent l'un des plus grands taux de lysine parmi eux due à la forte concentration de glutélines et la concentration faible de prolamines (Juliano, 2004). Les acides aminés essentiels les plus abondants sont l'acide glutamique, l'acide aspartique, la leucine et l'arginine, suivis par l'alanine, la valine, la phénylalanine et la sérine (Rossel et Marco, 2008).

Les lipides sont des composants mineurs, mais ils contribuent aux caractéristiques nutritionnelles, sensorielles et fonctionnelles, puisqu'ils forment des complexes avec les chaînes d'amylose. La majorité des lipides sont des lipides libres, et ils sont situés dans la couche d'aleurone et le germe. Ils comprennent des lipides neutres, avec une petite quantité de glycolipides et de phospholipides (Rossel et Marco, 2008).

2. Légumes secs

2.1. Généralités

Selon la norme CODEX STAN 171-1989 (adoptée en 1989. Révision 1995. Amendements 2012), les légumes secs sont les graines sèches de légumineuses se distinguant des graines de légumineuses oléagineuses par leur faible teneur en matière grasse. Les légumes secs faisant l'objet de la cette norme sont les suivants (*Codex Alimentarius*, 2017c) :

- haricots de *Phaseolus* spp. (à l'exception de *Phaseolus mungo* L. syn. *Vigna mungo* (L.) Hepper et *Phaseolus aureus* Roxb. syn. *Phaseolus radiatus* L., *Vigna radiata* (L.) Wilczek) ;
- lentilles de *Lens culinaris* Medic. Syn. *Lens esculenta* Moench. ;
- pois de *Pisum sativum* L.;
- pois chiches de *Cicer arietinum* L. ;
- fèves de *Vicia faba* L. ;
- niébés (haricots à œil noir) de *Vigna unguiculata* (L.) Walp., Syn. *Vigna sesquipedalis* Fruwh., *Vigna sinensis* (L.) Savi exd Hassk.

Les légumineuses appartiennent à la famille *Leguminosae* ou *Fabaceae*. Leurs graines ont joué un rôle majeur dans la plupart des cultures et des civilisations, et leur culture et leur incorporation dans l'alimentation humaine de base et leur préparation tant qu'aliment remontent à 7000 avant J. C.. Les légumineuses associées à d'autres produits constituent l'aliment de base pour une grande partie de la population mondiale, en particulier dans les pays en développement (Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

Les organisations de santé recommandent la consommation de légumes secs dans le cadre d'une alimentation saine, et des initiatives ont été développées pour améliorer leur production, leur consommation et leurs utilisations (López-Barrios *et al.*, 2014).

À part leurs avantages nutritionnels connus, la consommation des légumes secs a récemment été associée à des effets protecteurs ou thérapeutiques sur les maladies chroniques, telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète, le cancer, le surpoids et l'obésité (López-Barrios *et al.*, 2014).

2.2. Composition

Les légumes secs sont des graines très nutritives, notamment les pois secs, les lentilles et les pois chiches (Asif *et al.*, 2013). La composition chimique des légumes secs varie selon les espèces. Cependant, la teneur élevée en glucides, en protéines et en fibres, ainsi que la teneur faible en lipides sont remarquables pour chaque légume sec (tableau 5) (Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

Tableau 5. Principaux nutriments de quelques légumes secs (en g/100 g de matière sèche) (Wang et Daun, 2004 ; Petitot, 2009)

| | Pois | Pois chiche | Lentille |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| Amidon | 32 – 49 | 38,2 – 58 | 43 – 65 |
| Protéines | 20,2 – 27,4 | 17,9 – 30,8 | 21,6 – 29,0 |
| Fibres alimentaires | 8,4 – 22 | 4,2 – 18 | 8,1 – 20 |
| Cendres | 2,3 – 3,4 | 2,9 – 3,8 | 2,6 – 3,4 |
| Lipides | 1,0 – 3 | 4 – 7 | 1,0 – 3 |

Les légumes secs sont riches en glucides. Dans ce groupe, l'amidon doit être mis en évidence parce que c'est la principale source d'hydrates de carbone dans l'alimentation humaine. Cet amidon peut changer sa structure pendant le traitement et être transformé en amidon résistant, qui a une activité fonctionnelle en agissant comme une fibre. D'autres glucides présents dans ces graines sont les monosaccharides (ribose, glucose, galactose et fructose), les disaccharides (saccharose et maltose) et les α -galactosides (raffinose, stachyose et verbascose). Les α -galactosides, lorsqu'ils atteignent le côlon, sont fermentés par des bactéries pour produire de l'hydrogène, du méthane et du CO₂, qui provoquent ensuite des flatulences car ils ne sont pas absorbés ou hydrolysés par le système digestif humain, qui manque d'enzyme α -galactosidase, responsable de la dégradation de ces polysaccharides. La concentration d' α -galactosides dans les légumineuses est de 2 à 10 g/100 g d'échantillon sec (Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

La teneur en protéines des légumes secs varie selon les espèces. La principale fraction de protéines dans les graines de légumineuses est les protéines de stockage. Selon la source, les graines présentent habituellement 1 ou 2 protéines de stockage prédominantes, les autres sont des protéines mineures y compris les enzymes, la protéase et les inhibiteurs de l'amylase, les léctines, la lipoxigénase, les protéines de défense et d'autres. Sur la base de leur solubilité, les protéines de stockage sont classées en globulines, albumines, glutélines et prolamines. Les globules représentent 70% de la quantité totale de protéines dans les légumes secs, cette fraction est soluble dans les solutions salines mettant en évidence la légumine et la viciline. Les albumines sont hydrosolubles et représentent 10% à 20% des protéines de légumes secs, tandis que les glutélines sont solubles dans les acides dilués et les alcalis et leur concentration varie de 10% à 20%. Les prolamines sont solubles dans l'éthanol (50-80%). Cette fraction n'est

généralement pas trouvée dans les légumes secs ou se trouve à des niveaux très bas (López-Barrios *et al.*, 2014 ; Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

En outre, les protéines de légumes secs sont déficientes en acides aminés soufrés et en tryptophane, mais elles possèdent de plus grandes quantités de lysine, arginine, acide glutamique et acide aspartique par rapport aux grains de céréales (López-Barrios *et al.*, 2014).

La teneur en fibres des légumes secs est une autre zone d'intérêt pour consommer ces graines. Elle dépend de l'espèce, de la variété et du traitement des grains. Dans la plupart des légumes secs, la concentration de fibres varie entre 8% et 27,5% et environ 3,3% à 13,8% de cette concentration correspond à des fibres solubles. Les parois cellulaires des cotylédons contiennent une variété de polysaccharides, y compris les substances pectiques (environ 55%), la cellulose (environ 9%) et les glucanes non cellulosiques sans amidon (6 à 12%), alors que dans l'enveloppe des graines, la teneur en cellulose (35-57%) est plus élevée (Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

Concernant les lipides, les légumes secs contiennent des teneurs faibles (inférieures à 3%) à l'exception du pois chiche qui a des teneurs allant de 4 à 7% (Wang et Daun, 2004 ; Petitot, 2009).

Les grains de légumes secs sont également une source importante de minéraux car ils contiennent des minéraux en quantités importantes notamment le fer, le zinc et le calcium. Néanmoins, les concentrations de Fe, Zn et Ca sont plus faibles par rapport aux aliments d'origine animale (Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

Par ailleurs, les légumes secs joueraient un rôle clé dans la prévention des maladies cardiovasculaires (en raison de la teneur élevée en fibres, l'index glycémique faible et la présence d'oligosaccharides), du diabète (en raison de la faible index glycémique et du contenu élevé en fibres), des maladies du tube digestif (due à la teneur élevée en fibres insolubles qui accélèrent le transit dans le tractus intestinal), du surpoids et de l'obésité (en raison de l'effet de satiété) (Duranti, 2006).

Bien que les légumineuses possèdent une composition nutritionnelle précieuse, certaines personnes les rejettent car elles contiennent des substances qui sont considérées comme non nutritives. Les graines accumulent ces composés comme un mécanisme de défense contre l'attaque de parasites, d'insectes, de champignons et d'animaux herbivores principalement, et comme réserve pour continuer à croître même dans des conditions

défavorables (Sánchez-Chino *et al.*, 2015). Les composés non nutritifs peuvent être classés en deux groupes principaux (Asif *et al.*, 2013 ; López-Barrios *et al.*, 2014 ; Sánchez-Chino *et al.*, 2015) :

- le premier correspond à des composés de nature protéique, y compris les léctines (hémagglutinines), les inhibiteurs de protéases (comme la trypsine et la chymotrypsine) ;
- le second, de nature non protéinique, qui comprend les alcaloïdes, l'acide phytique, les tanins et les saponines.

Les inhibiteurs de la protéase exercent leur effet antinutritionnel en provoquant une hypertrophie/hyperplasie pancréatique, ce qui entraîne finalement une inhibition de la croissance. La léctine, en raison de sa capacité à se lier aux récepteurs de glycoprotéines sur les cellules épithéliales entourant la muqueuse intestinale, inhibe la croissance en interférant avec l'absorption des nutriments (Liener, 1994).

Parmi les effets indésirables causés par les hémagglutinines chez les humains et les animaux, on trouve la diarrhée, l'inflammation, l'agglutination du sang et les vomissements. L'acide phytique a une capacité élevée à chélater les ions métalliques multivalents, en particulier le Zn, le Ca et le Fe, en diminuant leur biodisponibilité, mais il peut également chélater les métaux toxiques tels que le Cd et le Pd (Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

Néanmoins, les effets néfastes de facteurs antinutritionnels peuvent être facilement inactivés après la cuisson ou des traitement comme le trempage, la fermentation, la germination, le décorticage et d'autres processus (Asif *et al.*, 2013 ; López-Barrios *et al.*, 2014).

Par ailleurs, il a été rapporté qu'en fonction de la dose, ces composés non nutritifs ont également différentes bioactivités comme agents antioxydants, hypolipémiants, hypoglycémiant et anticancéreux, qui ont été prouvés par des études scientifiques (Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

3. Intérêts de l'association céréales-légumes secs

L'association des céréales et des légumineuses secs se retrouve dans les traditions culinaires de nombreux pays : riz et soja en Extrême-Orient, couscous et pois-chiches en Afrique du Nord, maïs et haricots secs en Amérique, mil et niébés (haricots africains) en Afrique noire, blé, orge, seigle, avoine et haricots secs, lentilles, fèves, pois cassés en

Europe. Quel que soit le pays concerné, cette association se limite cependant à la consommation simultanée de la céréale et de la légumineuse. Aucun aliment courant né du mélange intime des constituants respectifs du blé dur et des légumineuses n'est actuellement consommé. Or, dans notre mode de vie actuel, les produits transformés représentent 80 % des aliments consommés (Micard *et al.*, 2010).

Les légumes secs ont le double de la quantité de protéines que les céréales. Les protéines des légumes secs sont déficitaires en méthionine et en cystéine (acides aminés contenant du soufre) alors qu'elles sont riches en lysine. En revanche, les protéines des céréales ont une faible concentration en lysine avec des concentrations plus élevées d'acides aminés soufrés. Par conséquent, la combinaison de légumes secs et de céréales dans le régime alimentaire fournit des acides aminés qui sont nécessaires pour une nutrition adéquate (Asif *et al.*, 2013 ; Sánchez-Chino *et al.*, 2015).

PARTIE
EXPERIMENTALE

MATERIEL
ET
METHODES

Matériel et méthodes

Les objectifs de notre travail étaient (1) l'étude de l'effet des conditions de fabrication par cuisson-extrusion sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten ; (2) l'étude de l'effet de la variation de la formulation sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten fabriquées par cuisson-extrusion ; et (3) l'étude de l'effet de la variation des conditions de fabrication et de la formulation sur le rendement du procédé de cuisson-extrusion et sa consommation d'énergie.

1. Démarche expérimentale

Notre travail comporte trois parties (figure 5) :

- 1) Dans la première partie, nous avons étudié l'effet des conditions de fabrication par cuisson-extrusion sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten à base d'une formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1). Les deux conditions de fabrication à faire varier sont :
 - la teneur en eau de la formule. Le mélange de farines constituant la formule est hydraté de façon à obtenir une teneur en eau de 28%, 30% ou 32%. Ces teneurs en eau représentent les teneurs en eau finales de la formule en prenant en considération la teneur en eau initiale des farines utilisées.
 - la vitesse de rotation de la vis du cuiseur-extrudeur. Trois vitesses ont été appliquées : 60, 80 et 100 tr/min.
- 2) Après avoir déterminé les meilleures conditions de fabrication (teneur en eau de 30% et vitesse de rotation de la vis de 80 tr/min), l'effet du type de légume sec et de son taux d'incorporation sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten a été étudié dans la deuxième partie. Nous avons utilisé trois formules (riz/pois jaune, riz/pois chiche et riz/lentille) à trois rapports massiques riz-légume sec : 90/10, 80/20 et 70/30. En effet, Petitot (2009) a rapporté un rapport céréales/légumes secs de 90/10 qui a donné des pâtes jugées acceptables par les dégustateurs alors que la FAO recommande un rapport 70/30 comme rapporté par Giménez *et al.* (2013). Les pâtes alimentaires témoins sont fabriquées à base de la farine de riz en utilisant les mêmes conditions de fabrication.
- 3) Dans la troisième partie, nous avons étudié l'effet de la variation des conditions de fabrication et de la formulation sur le rendement du procédé et sa consommation d'énergie. Le rendement et la consommation d'énergie ont été calculés à partir des deux expérimentations précédentes.

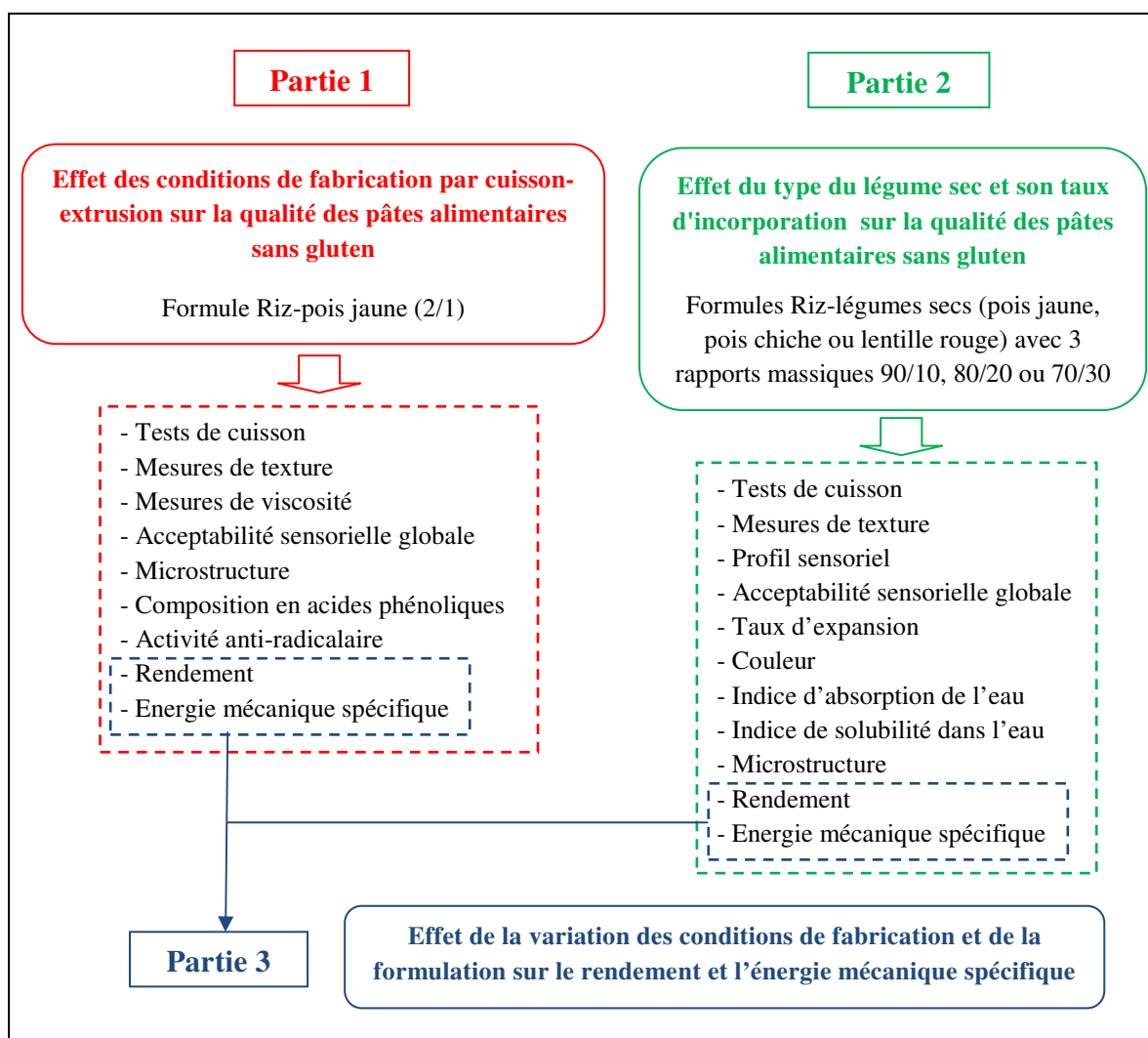


Figure 5. Schéma récapitulatif des différentes parties de la thèse

2. Matières premières

2.1. Farine de riz

Nous avons utilisé une farine de riz (*Oryza sativa* L.) type R300S (granulométrie inférieure à 500 μm) issue de la mouture de grain de riz long. La farine de riz a été fournie par la minoterie de la société Lubella Sp. z o.o. Sp. k. (Lublin, Pologne).

2.2. Grains de légumes secs

Dans notre travail, nous avons utilisé trois types de légumes secs récoltés en 2014 en Pologne : pois jaune (*Pisum sativum* L.), pois chiche (*Cicer arietinum* L.) et lentille corail (*Lens culinaris* L.) (figure 6). Ces grains sont achetés en vrac à partir d'un marché local de la ville de Lublin (Pologne).

Les légumes secs sont choisis d'une part pour compléter le riz vu les avantages connus de l'association céréales-légumes secs notamment un meilleur équilibre en acides aminés, apport en fibres, en minéraux et en vitamines. D'autre part, l'incorporation des farines de légumes secs peut avoir un effet positif sur la qualité des pâtes alimentaires.

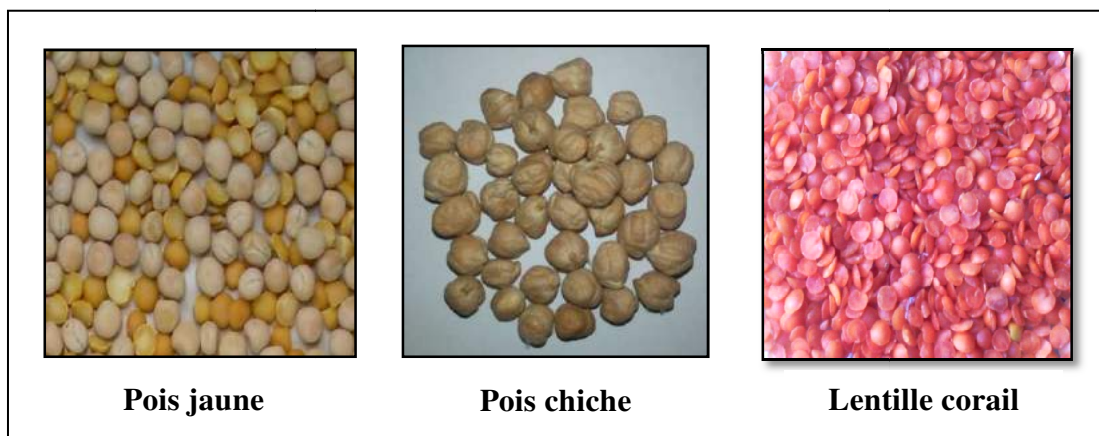


Figure 6. Grains de légumes secs utilisés dans l'étude

2.3. Obtention et préparation des farines de légumes secs

L'obtention des farines à partir des légumes secs consiste d'abord à un triage manuel des grains pour éliminer celles endommagées et les corps étrangers (graines étrangères, débris de plantes, pierres, *etc.*).

Tous les grains sont ensuite transformés en farine à l'aide d'un broyeur à couteaux LMN-100 (Testchem, Radlin, Pologne). Les produits de broyage sont tamisés à travers un tamis d'ouverture de mailles de 500 μm dont le passant constitue la farine utilisée dans la fabrication des pâtes alimentaires. Les farines obtenues sont stockées dans des sacs en plastique hermétiquement fermés et déposées dans un endroit frais et sec jusqu'à utilisation.

3. Fabrication des pâtes alimentaires sans gluten

Toutes les pâtes alimentaires sans gluten ont été fabriquées au niveau du Département d'Ingénierie des Procédés Alimentaires, Université des Sciences de la Vie, Lublin (Pologne) en utilisant un cuiseur-extrudeur mono-vis TS-45 (ZMch Metalchem, Gliwice, Pologne) modifié (figure 7). La modification a consisté en l'addition d'une section de refroidissement avant la filière. Cette partie est connectée à un refroidisseur (SW 8P MINI's Cool, Chotomów, Pologne) qui fonctionne avec du glycol. Le refroidissement a

pour objectif d'abaisser la température du produit et minimiser son adhésivité (Juško *et al.*, 2009).

Le cuiseur-extrudeur utilisé a les caractéristiques suivantes :

- diamètre de la vis : 4,4 cm.
- diamètre du fourreau : 4,5 cm.
- longueur de la vis : 100 cm.
- longueur de la zone de travail de la vis : 83 cm.
- distance entre les hélices de la vis : 4 cm.
- rapport longueur de la vis à son diamètre : $L/D = 18$.
- vitesses de rotation de la vis : 60 à 130 tr/min.
- nombre de rainures dans le fourreau : 20 rainures longitudinales.
- orifices de la filière : $12 \times 0,8$ mm de diamètre.
- température du traitement : 40 à 180°C.
- temps de traitement : 35 à 70 secondes.
- puissance du moteur : 10 kW.
- puissance du système de chauffage : 5 kW.

Le procédé de fabrication des pâtes alimentaires sans gluten a comporté trois étapes :

- hydratation/malaxage : les mélanges farine de riz-farine de légume sec sont tout d'abord mélangés manuellement pendant 5 min. Les mélanges sont ensuite hydratés avec de l'eau du robinet tout en effectuant un malaxage manuel, de façon à obtenir la teneur en eau désirée (28%, 30% ou 32%). Les mélanges hydratés sont laissés au repos pendant 30 min dans des récipients fermés hermétiquement pour une bonne hydratation.
- mise en forme : les mélanges hydratés sont introduites dans le cuiseur-extrudeur réglé à une température de 90°C dans la première section, 100°C dans la seconde et 70°C dans la section finale. Les mélanges hydratés sont extrudés à travers une filière à spaghettis. Les pâtes alimentaires sont collectées, coupées puis suspendues sur des cannes.
- séchage : après un pré-séchage de 5 min à température ambiante sur les cannes, les brins de spaghetti sont répartis sur des plateaux perforés en acier inoxydable puis séchés dans un sécheur à 40°C pendant 4 h. Les pâtes alimentaires sèches (humidité inférieure à 12%) sont stockées dans des sacs en plastique hermétiquement fermés.

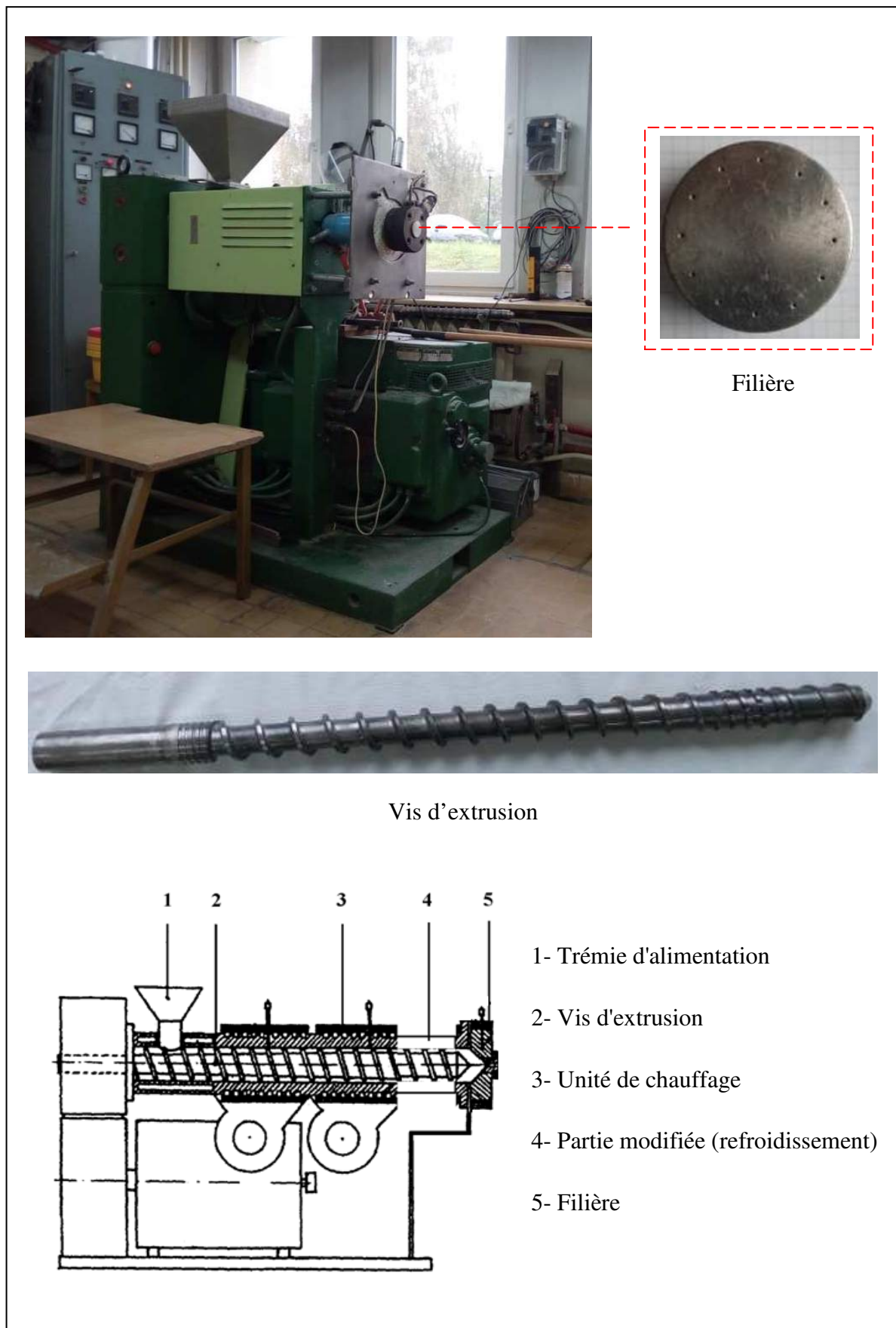


Figure 7. Présentation du cuiseur-extrudeur TS-45 modifié

4. Méthodes

Les expérimentations ont été réalisées dans différents lieux :

- Département d'Ingénierie des Procédés Alimentaires, Université des Sciences de la Vie, Lublin (Pologne) : dans le laboratoire de ce département, nous avons réalisés la teneur en eau, les tests de cuisson, les mesures de texture, de la couleur, du taux d'expansion, des propriétés de viscosité, de l'indice d'absorption de l'eau et l'indice de solubilité dans l'eau et les analyses sensorielles.
- Laboratoire Central d'Agro-Ecologie de l'Université des Sciences de la Vie, Lublin (Pologne) où nous avons réalisés les analyses chimiques (protéines, lipides totaux, cendres et fibres alimentaires) et la microstructure des pâtes sèches et des pâtes hydratées.
- Département de Chimie Inorganique et Département de Botanique Pharmaceutique de l'Université de Médecine de Lublin (Pologne) où nous avons dosés les acides phénoliques sur les pâtes alimentaires sans gluten sèches et nous avons déterminés l'activité anti-radicalaire.

4.1. Analyses biochimiques

4.1.1. Teneur en eau

La teneur en eau est déterminée selon la norme AFNOR N.F. V03-707 de juin 1989 (AFNOR 1991). Une prise d'essai est pesée dans une coupelle de masse connue, placée dans une étuve à 130°C (pendant 2 h au moins) jusqu'à obtention d'un poids constant. La teneur en eau (H) est ensuite exprimée en grammes d'eau pour 100 g d'échantillon :

$$H = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$$

où : M_0 : masse en gramme de la prise d'essai avant séchage.

M_1 : masse en gramme de la prise d'essai après séchage.

4.1.2. Protéines

Les protéines sont déterminées par la méthode de Kjeldahl (*American Association of Cereal Chemists* 46-10) en triplicata. L'azote de l'échantillon est minéralisé par de l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur. Après une alcalinisation par la lessive de soude, l'ammoniac libéré (azote minéral) est distillé et collecté dans une solution d'acide borique, puis dosé par titration à l'aide d'une solution d'acide

chlorhydrique. Un facteur de conversion de 5,7 a été utilisé pour passer de la concentration en azote à celles des protéines dans le produit brut (AACC, 1995).

4.1.3. Lipides totaux

Les lipides sont déterminés en triplicata selon la méthode AACC 30-10. Une hydrolyse acide de l'échantillon avec l'acide chlorhydrique est tout d'abord effectuée pour libérer les lipides liés. Les lipides sont ensuite extraits avec un mélange d'éthers. Ces derniers solvants sont évaporés, et le résidu lipidique est chauffé à 100°C jusqu'à un poids constant. La masse du résidu est rapportée au poids initial de l'échantillon et considéré comme pourcentage de lipides totaux dans le produit brut (AACC, 1995).

4.1.4. Cendres

La teneur en cendres est déterminée par incinération de l'échantillon dans un four à moufle à une température de 550°C selon la méthode AACC 08-01. Après l'obtention d'un résidu gris clair avec un poids constant, le résidu est rapporté au poids initial de l'échantillon est considéré comme pourcentage de cendres dans le produit brut (AACC, 1995).

4.4.5. Fibres alimentaires

La teneur en fibres est déterminée en deux répétitions. L'échantillon est digéré avec un mélange d'acides (acétique, nitrique et trichloroacétique) pour éliminer les autres composants, puis rincé avec de l'alcool éthylique et séché jusqu'à poids constant. La masse résiduelle rapportée à la prise d'essai donne la teneur en fibres alimentaires (AOAC, 2000).

4.1.6. Glucides

La teneur en glucides est calculée par soustraction de la somme des teneurs (en p.100) des protéines, des lipides totaux, des cendres et des fibres de 100 p.100 de produit sec (ou de matière sèche).

4.1.7. Acides phénoliques

4.1.7.1. Produits chimiques et étalons

Tous les réactifs utilisés étaient de qualité analytique. Les étalons d'acides phénoliques sont des produits de Sigma-Aldrich Fine Chemicals (St. Louis, MO, Etats-Unis d'Amérique). Le méthanol et l'éthanol de qualité appropriée à la chromatographie liquide ont été achetés de J.T. Baker (Phillipsburg, NJ, Etats-Unis d'Amérique). L'eau

destinée à la chromatographie liquide a été préparée à l'aide d'un système de purification Millipore Direct-Q3 (Bedford, MA, Etats-Unis d'Amérique).

4.1.7.2. Procédures d'extraction

Quatre systèmes de solvants différents (éthanol, méthanol, éthanol aqueux à 80% et méthanol aqueux à 80%) ont été testés pour l'extraction des acides phénoliques. Les rendements les plus élevés de tous les composés analysés ont été obtenus avec une solution aqueuse à 80% d'éthanol.

L'extraction assistée par ultrasons a été réalisée dans un bain à ultrasons d'une fréquence de 20 kHz et une puissance 100 W munie d'un thermostat (J.P. Selecta, Barcelone, Espagne). L'extraction a été effectuée à température constante de 60°C avec un échantillon de 2 g de pâtes broyées (granulométrie inférieure à 300 µm) et 40 ml de solvant pour chacun des deux cycles (20 min à la fois, ce qui correspond à 40 min d'extraction totale). Après évaporation des extraits, les résidus ont été dissous dans 10 ml de méthanol. La procédure a été répétée 3 fois pour chaque échantillon (Oniszczyk *et al.*, 2014 ; Oniszczyk et Podgórski, 2015).

Avant l'analyse chromatographique, les extraits ont été filtrés à travers un filtre seringue en nylon de 0,45 µm de diamètre de pores (Millex-HN, Ireland).

4.1.7.3. Analyse des acides phénoliques

Les extraits ont été analysés par chromatographie en phase liquide à haute performance et spectrométrie de masse à ionisation par électro-nébulisation selon la méthode décrite par Nowacka *et al.* (2014).

Pour la séparation chromatographique, nous avons utilisé un système HPLC Agilent Series 1200 (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, Etats-Unis d'Amérique) équipé d'une pompe de solvant à gradient binaire, un dégazeur, un échantillonneur automatique et une colonne munie d'un thermostat. Les échantillons ont été séparés sur une colonne SB-C18 (2,1 × 50 mm, 1,8 µm taille des particules ; Zorbax, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, Etats-Unis d'Amérique) maintenue à 25°C en utilisant des injections de 3 µl. Les phases mobiles sont de l'eau contenant 0,1% de HCOOH (A) et du méthanol contenant 0,1% de HCOOH (B). Le programme de gradient d'élution suivant, à un débit de 400 µl/min, a été appliqué :

- 0 à 1 min : 5% de B et 95% de A ;

- 2 à 4 min : 20% de B et 80% de A ;
- 8 à 9,5 min : 70% de B et 30% de A ;
- 11,5 à 15 min : 5% de B et 95% de A.

La détection par spectrométrie de masse a été réalisée dans un spectromètre de masse 3200 QTRAP (AB Sciex, Framingham, MA, Etats-Unis d'Amérique) équipé d'une source d'ionisation par électro-nébulisation fonctionnant dans le mode d'ion-négatif et un analyseur de masse à piège-ionique triple quadripôle contrôlé par le logiciel Analyst 1.5 pour l'acquisition et le traitement des données. L'azote a été utilisé comme gaz rideau et gaz de collision et les valeurs optimales des paramètres de la source d'électro-nébulisation étaient :

- température capillaire : 400°C.
- pression du gaz rideau : 2,07 bar.
- pression du gaz nébuliseur : 4,14 bar.
- la tension de la source : - 4500 V.

Pour chaque composé, les conditions optimales de mode de réaction multiple ont été déterminées dans le mode d'infusion. L'injection de toutes les solutions étalons et des échantillons a été répétée 3 fois.

Les composés ont été identifiés en comparant le temps de rétention et les valeurs m/z (masse/charge) obtenues par la première et la deuxième spectrométrie avec les spectres de masse des étalons correspondants testés dans les mêmes conditions. Les courbes d'étalonnage obtenues en mode de réaction multiple ont été utilisées pour la quantification de tous les composés analysés. Les acides phénoliques identifiés ont été quantifiés en fonction de leurs surfaces des pics et la comparaison avec une courbe d'étalonnage obtenue avec les étalons correspondantes.

4.1.8. Détermination de l'activité anti-radicalaire

L'activité anti-radicalaire des extraits des pâtes a été déterminée par spectrophotométrie contre les radicaux DPPH[•] (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl) à une concentration de 0,1 mM (4 mg de radicaux libres et 100 ml de méthanol) (Oniszczuk *et al.*, 2015). L'échantillon de référence est préparé en mélangeant 2 ml de la solution DPPH[•] et 1 ml de méthanol. Une autre solution contenant 1 ml des extraits et 2 ml de la solution de DPPH[•] a été aussi préparée et incubée à 28°C pendant 30 min à l'obscurité.

L'analyse spectrophotométrique est basée sur la mesure de l'absorbance de chaque échantillon par le spectrophotomètre UV- VIS (Thermo Scientific Genesis 10S Serie, Etats-Unis d'Amérique) à la longueur d'onde 517 nm à température ambiante. Le méthanol pur a été utilisé comme échantillon neutre pour l'étalonnage de l'équipement avant chaque mesure. Le résultat final est la moyenne de 3 répétitions. L'activité anti-radicalaire a été calculée avec la formule suivante (Oniszczuk *et al.*, 2015) :

$$\text{Capacité de piégeage des radicaux DPPH (\%)} = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100$$

où : A_0 : absorbance de l'échantillon de référence ;

A_1 : absorbance de l'échantillon avec les extraits testés.

4.2. Test de cuisson des pâtes alimentaires sans gluten

4.2.1. Temps de préparation minimal

L'eau est portée à l'ébullition, puis, un volume de 200 ml est immédiatement versé sur 10 g de pâtes dans un récipient que l'on maintient ensuite fermé. À des intervalles de temps réguliers (30 secondes), un brin de pâtes est prélevé puis écrasé entre deux plaques de plexiglas. Le temps de préparation minimal correspond à la durée du séjour suffisante assurant la disparition de la ligne blanche du centre du brin de pâtes (figure 8) (Wójtowicz et Mościcki, 2009 ; Wójtowicz et Mościcki, 2014).

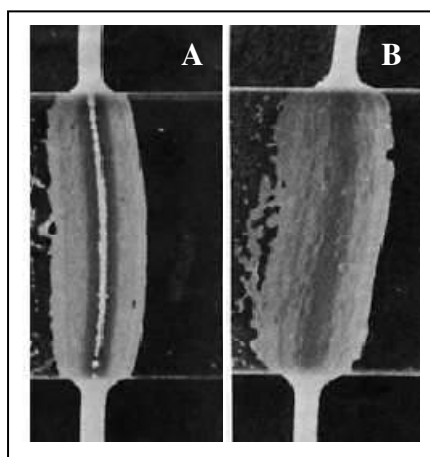


Figure 8. Effet de l'hydratation sur la disparition de la ligne blanche du centre du brin de la pâte alimentaire. A : pâte non hydratée, B : pâte hydratée au temps de préparation minimal. Adaptée à partir de Petitot (2009).

4.2.2. Capacité d'absorption de l'eau

La capacité d'absorption de l'eau a été déterminée selon la méthode décrite par Wójtowicz et Mościcki (2009). Un échantillon de 10 g de pâtes est hydraté au temps de préparation minimal dans 200 ml d'eau bouillante, rincé avec de l'eau froide (20°C) et égoutté pendant 5 min à l'aide d'une passoire. Le poids de l'échantillon de pâte hydraté est ensuite mesuré et la capacité d'absorption de l'eau (en g d'eau absorbée par 100 g de pâtes sèches) est calculée comme suit :

$$\text{Capacité d'absorption de l'eau (g/100 g)} = \frac{\text{poids des pâtes hydratées} - \text{poids des pâtes sèches}}{\text{poids des pâtes sèches}} \times 100$$

4.2.3. Pertes à la cuisson

Les pertes à la cuisson sont déterminées selon la méthode de décrite par Wójtowicz et Mościcki (2009). Dix grammes de chaque échantillon de pâtes sont hydratés avec 200 ml d'eau bouillante. Après le temps de préparation minimal correspondant, l'échantillon hydraté est rincé avec 100 ml d'eau froide (20°C) et égoutté à l'aide d'un passoir pendant 5 min. L'eau d'hydratation et l'eau de rinçage sont collectées dans un récipient, puis totalement évaporées dans une étuve à 110°C jusqu'à poids constant. Les pertes à la cuisson (en g de matière sèche pour 100 g de pâtes sèches) sont évaluées comme suit :

$$\text{Pertes à la cuisson (\%)} = \frac{\text{poids du résidu}}{\text{poids des pâtes sèches}} \times 100$$

4.3. Texture des pâtes alimentaires sans gluten

Les mesures de texture des pâtes sans gluten ont été effectuées à l'aide de l'instrument Zwick-Roell BDO-FB0.5 TH (Zwick GmbH & Co., Ulm, Allemagne) selon la méthode de Wójtowicz (2012) avec des modifications mineures. Deux types de tests ont été réalisés : un test en cisaillement et un test en compression. Le logiciel TestXpertR[®] 10.11 a été utilisé pour enregistrer et analyser les valeurs des forces de cisaillement et de compression.

4.3.1. Test en cisaillement

Le test en cisaillement est réalisé pour déterminer la dureté des pâtes en 5 répétitions. Le test consiste à placer un brin de pâte (sèche ou hydratée au temps de préparation minimal) sur la plaque d'adaptation à 90° par rapport au dispositif de Warner-Bratzler (111 mm de long, 60 mm de largeur, 3 mm d'épaisseur, double-face tronquée à angle de 45°) avec application d'une force de 0,5 kN à une vitesse constante de 3,3 mm/s (du haut en bas) jusqu'à rupture du brin (figure 9).

La dureté correspond à la force de cisaillement maximale (N) nécessaire pour couper le brin de pâte (Charutigon *et al.*, 2008).

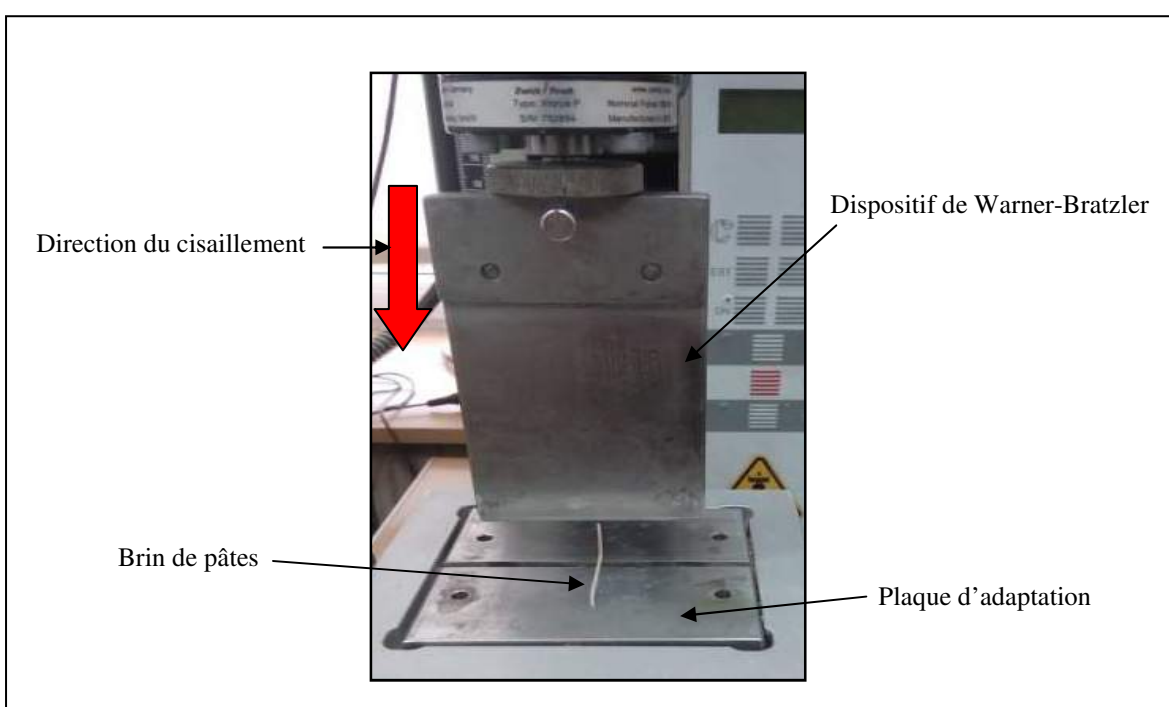


Figure 9. Présentation du test en cisaillement

4.3.2. Test en compression

Le test en compression est effectué pour déterminer la fermeté et l'adhésivité des pâtes hydratées en duplicata. Un échantillon de pâtes hydratées et égouttées (50 g) est placé dans la chambre OTMS (*Ottawa Texture Measuring System*), puis une compression en deux cycles est appliquée par un dispositif carré (figure 10). Les paramètres du test utilisés sont les suivants :

- force de compression de 0,5 kN appliquée à une vitesse constante de 3,3 mm/s (du haut en bas).
- déplacement du dispositif jusqu'à 80% de l'épaisseur initiale de la couche d'échantillon de pâtes.
- temps de repos de 5 secondes entre les 2 compressions.

La fermeté (N) a été enregistrée comme la force maximale relevée pendant la première compression et l'adhésivité (mJ) comme le travail nécessaire pour surmonter une adhérence entre l'échantillon et la surface du matériau de la chambre d'essai (Ross, 2006).

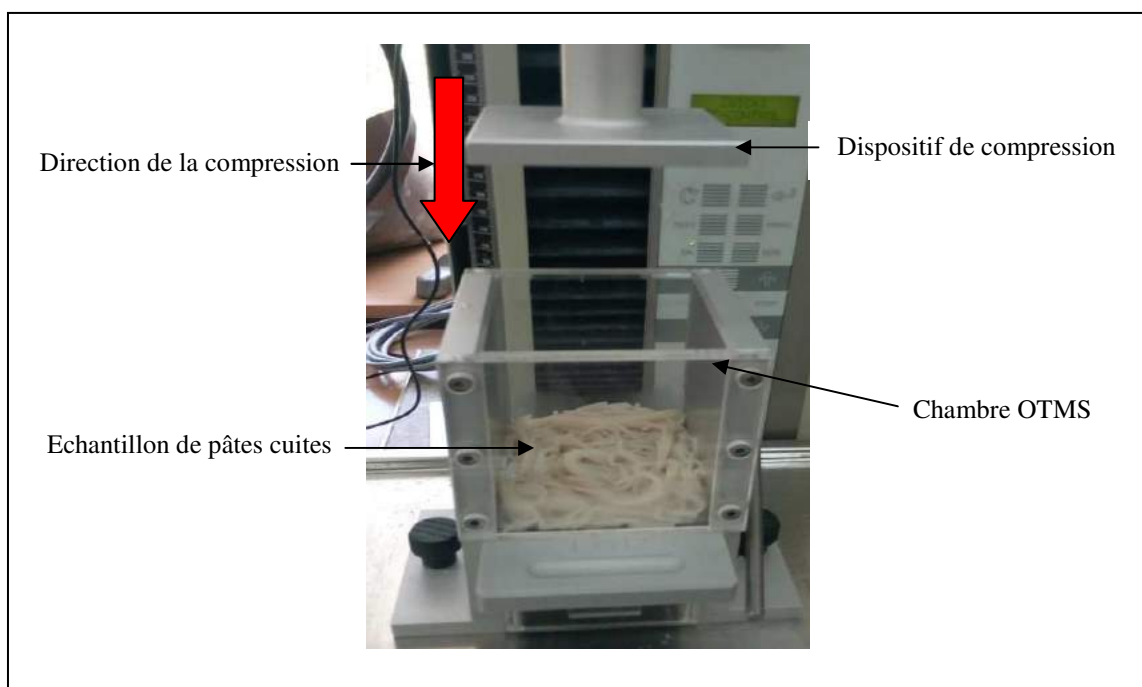


Figure 10. Présentation du test en compression

4.4. Couleur des pâtes sèches et des pâtes hydratées

Le système de couleur et des mesures d'apparence Lovibond CAM-System 500 (La Tintometer Ltd., Amesbury, Royaume-Uni) a été utilisé pour évaluer le profil de couleur des pâtes sèches et des pâtes hydratées en 10 répétitions à l'aide de l'échelle de couleurs CIE-LAB. Les valeurs L^* mesurent la luminance allant du noir (valeur 0) au blanc (valeur 100). La composante a^* mesure le vert (valeurs négatives) et le rouge (valeurs positives). La composante b^* mesure le bleu (valeurs négatives) et le jaune (valeurs positives) (Wójtowicz et Mościcki, 2014).

4.5. Taux d'expansion des pâtes alimentaires sans gluten

Le diamètre en millimètre de 10 brins de chaque échantillon de pâtes alimentaires a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse numérique. Le taux d'expansion est calculé par la formule suivante (Wójtowicz et Mościcki, 2014) :

$$\text{Taux d'expansion} = \frac{\text{diamètre du brin de la pâte sèche (mm)}}{\text{diamètre de l'orifice de la filière (0,8 mm)}}$$

4.6. Analyse sensorielle des pâtes alimentaires sans gluten

Les analyses sensorielles ont été effectuées à l'aide d'un jury semi-entraîné constitué de 15 membres (étudiants polonais du Département d'ingénierie des procédés alimentaires, Université des Sciences de la vie, Lublin, Pologne). Elles consistent en un test hédonique pour déterminer le profil sensoriel et l'acceptabilité sensorielle globale.

4.6.1. Profil sensoriel

Chaque échantillon de pâtes est hydraté dans l'eau chaude au temps de préparation minimal correspondant, égoutté et servi dans un ordre randomisé au jury. Une note sur une échelle de 1 à 5 est donnée à chacun des attributs suivants : apparence, couleur, flaveur, goût et adhésivité. L'échelle de notation situe le degré d'appréciation avec 1 : insatisfaisant, 2 : peu satisfaisant, 3 : acceptable, 4 : bon et 5 : très bon (Wójtowicz et Mościcki, 2014).

4.6.2. Acceptabilité sensorielle globale

Ce test est réalisé pour mesurer le degré d'appréciation des pâtes sans gluten dans leur globalité. Chaque échantillon de pâtes sans gluten est hydraté dans de l'eau chaude pendant le temps de préparation minimal correspondant puis égoutté. Les échantillons de pâtes hydratées ont été servis dans un ordre randomisé au jury qui a évalué l'acceptabilité sensorielle globale de chaque échantillon de pâtes en indiquant une catégorie sur les 9 constituant l'échelle hédonique qui va de « détesté extrêmement » à « aimé extrêmement ». Les catégories sont converties en notations numériques allant de 1 à 9, où 1 = « détesté extrêmement », 2 = « détesté beaucoup », 3 = « détesté modérément », 4 = « détesté légèrement », 5 = « ni détesté ni aimé », 6 = « aimé légèrement », 7 = « aimé modérément », 8 = « aimé beaucoup », et 9 = « aimé extrêmement ». Les pâtes alimentaires avec un score moyen d'acceptabilité sensorielle globale supérieur à 5 ont été considérés comme acceptables (Bustos *et al.*, 2011).

4.7. Indice d'absorption de l'eau et indice de solubilité dans l'eau des pâtes alimentaires sans gluten

L'indice d'absorption de l'eau et l'indice de solubilité dans l'eau ont été déterminés selon la méthode décrite par Wójtowicz et Mościcki (2014). Dans des tubes à essai, 7 ml d'eau distillée ont été ajoutés à 0,7 g de pâtes sèches broyées (granulométrie inférieure à 300 μm). Après 5 min de repos, l'échantillon est mélangé 5 fois (1 fois/min) puis centrifugé à température ambiante à 12577 g pendant 10 min dans une centrifugeuse T24 (VEB MLW MEDIZINETECHNIK, Leipzig, Allemagne). Le surnageant a été recueilli et séché dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant. Les essais ont été effectués en triple. L'indice d'absorption d'eau et l'indice de solubilité dans l'eau ont été calculés en utilisant les équations suivantes :

$$\text{Indice d'absorption de l'eau (g/g)} = \frac{\text{poids du culot humide}}{\text{poids de l'échantillon sec}}$$

$$\text{Indice de solubilité dans l'eau (\%)} = \frac{\text{poids du surnageant sec}}{\text{poids de l'échantillon sec}} \times 100$$

4.8. Propriétés de viscosité des pâtes alimentaires sans gluten

Bien que le test viscoamylographique a été principalement adopté pour caractériser les propriétés de viscosité de l'amidon et des farines, il a été également réalisé sur des pâtes sèches pour donner des informations sur les transformations d'amidon après la fabrication des pâtes alimentaires par cuisson-extrusion (Marti *et al.*, 2014).

Les propriétés de viscosité de suspensions de pâtes sèches broyées (granulométrie inférieure à 300 μm) ont été effectuées en deux répétitions selon Mitrus et Mościcki (2012) avec des modifications mineures en utilisant un Micro Visco-Amylo-Graph[®] (Brabender OHG, Duisburg, Allemagne) (figure 11).

Environ 10 g de pâtes broyées sont suspendus dans environ 100 ml d'eau distillée (de façon à ajuster l'humidité des pâtes broyées à 14% selon la méthode standard recommandée pour le test) dans le bol de l'instrument avec agitation continue. Le bol est ensuite placé dans l'enceinte où s'effectue le chauffage électrique et le refroidissement des suspensions dans des conditions constantes de mesure (vitesse de rotation du bol :

250 tr/min ; sensibilité: 235 cmg). Les changements de viscosité et de température sont mesurés à l'aide d'un dispositif immergé complètement dans le bol. Ce dispositif comporte:

- une palette agissant comme agitateur et détecteur de viscosité haute résolution ;
- un capteur de température ;
- un doigt de refroidissement.

Nous avons appliqué le profil temps-température suivant avec des vitesses de chauffage et de refroidissement de $7,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$:

- chauffage de 30°C à 93°C .
- maintien à 93°C pendant 5 min.
- refroidissement de 93°C à 50°C .
- maintien à 50°C pendant 1 min.

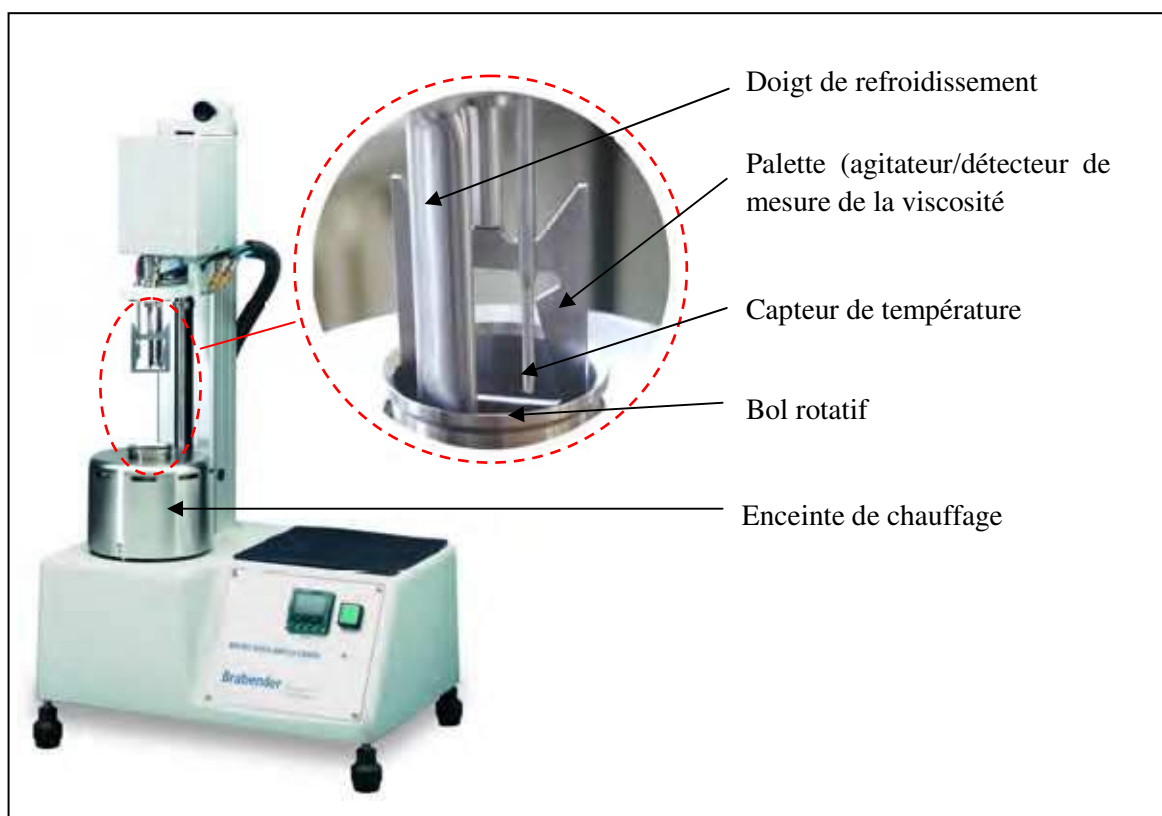


Figure 11. Micro Visco-Amylo-Graph[®] (Brabender)

L'instrument enregistre la résistance à l'action d'agitation de la palette en traçant une courbe de viscosité en fonction de la température et du temps (figure 12). Les caractéristiques suivantes sont déterminées par le logiciel Viscograph 4.1.1 fourni avec l'instrument :

- la température de gélatinisation (°C) : la température au début de l'augmentation de la viscosité (ou température à laquelle la première viscosité détectable est mesurée par l'instrument) ;
- la viscosité initiale (mPa s) : viscosité à froid à 30°C ;
- la viscosité maximale (mPa s) : la viscosité la plus élevée au cours du cycle de chauffage ;
- le *Breakdown* (mPa s) : correspondant à la différence entre la viscosité maximale et la viscosité à la fin de la période de maintien à 93°C. Il est un indice de diminution de la viscosité au cours du maintien à 93°C ;
- le *Setback* (mPa s) : correspondant à la viscosité finale moins la viscosité à la fin de la période de maintien à 93°C. Il est un indice d'augmentation de la viscosité au cours du cycle de refroidissement ;
- la viscosité finale (mPa s) : la viscosité atteinte à la fin de la période de refroidissement.

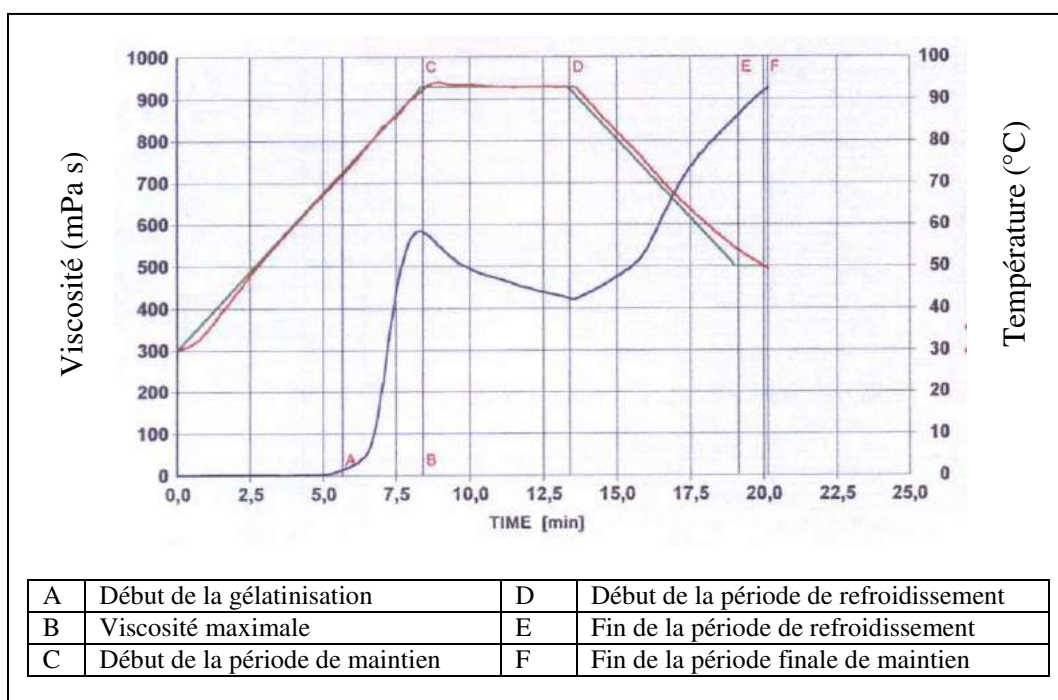


Figure 12. Type de diagramme du Micro Visco-Amylo-Graph® Brabender

4.9. Microstructure des pâtes alimentaires sans gluten

4.9.1. Préparation des coupes

Les pâtes hydratées au temps de préparation minimal correspondant ont été préalablement immergées dans de l'azote liquide puis lyophilisées.

Des coupes transversales de 5 mm de longueur ont été réalisées et les échantillons (3 brins pour chaque pâte) sont montés sur des disques en carbone à l'aide d'un ruban d'argent puis métallisés par pulvérisation avec de l'or dans un pulvérisateur de revêtement K-550X fonctionnant à vide (Emitech, RC, Ashford, Angleterre).

4.9.2. Microscopie électronique à balayage

La microstructure des pâtes sèches et des pâtes hydratées a été observée à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Le microscope VEGA LMU (Tescan, Warrendale, PA, Etats-Unis d'Amérique) fonctionnant à la tension d'accélération de 10 kV a été utilisé pour examiner la surface des échantillons et leurs sections transversales. Les images sont acquises en niveaux de gris à différents grossissements ($\times 125$, $\times 600$ et $\times 2000$).

4.10. Rendement du procédé de cuisson-extrusion

Le rendement du procédé a été calculé à chaque variation dans les conditions de fabrication par cuisson-extrusion (teneur en eau et vitesse de rotation de la vis) et pour chaque formule. Après 5 min du début de la fabrication, un échantillon de pâtes est collecté à la sortie de la filière pendant 15 secondes, puis pesé (le poids de l'échantillon pour 15 s est exprimé en poids pour une heure). Le rendement du procédé (Q) exprime la quantité de pâtes alimentaires (en kg) obtenue en une heure de fabrication et s'obtient comme suit (Kręcisz, 2016) :

$$Q \text{ (kg/h)} = \frac{m}{t}$$

où : Q : rendement du procédé ;

m : poids des pâtes obtenues pendant la collecte (kg) ;

t : temps de mesure (h).

4.11. Energie mécanique spécifique

Un enregistreur connecté au moteur du cuiseur-extrudeur a été utilisé pour mesurer sa puissance électrique à chaque variation dans les conditions de la cuisson-extrusion et

pour chaque formule. La charge du moteur a été déterminée en divisant la vitesse de rotation utilisée sur la vitesse maximale (130 tr/min) multipliée par 100. L'énergie mécanique spécifique (EMS) en kWh/kg est calculée selon la méthode décrite par Ryu et Ng (2001) en utilisant l'équation suivante :

$$\text{EMS (kWh/kg)} = \frac{n}{N} \times \frac{L}{100} \times \frac{P}{Q}$$

où : n : vitesse utilisée pour la vis (tr/min) ;

N : vitesse maximale de la vis (tr/min) ;

L: charge du moteur (%) ;

P : puissance électrique du moteur (kW) ;

Q : rendement du procédé (kg/h) ;

5. Analyse statistique

Les données issues des expérimentations ont été analysées à l'aide du logiciel Statistica version 10 (StatSoft. Inc., Tulsa, OK, Etats-Unis d'Amérique, 2011) qui a été aussi utilisé pour la préparation des surfaces de réponses. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de moyennes \pm écarts types.

Nous avons employé plusieurs analyses statistiques :

- l'analyse de variance (ANOVA) à un facteur suivie du test post-hoc de Tukey HSD. Cette analyse nous a permis de déterminer les différences statistiques entre les groupes homogènes de moyennes à un seuil de signification de 0,05.
- l'analyse de la variance à deux facteurs a été utilisée pour déterminer l'effet des conditions de fabrication sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten. Trois seuils de significations ont été fixés : $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$ qui correspondent à un effet significatif, très significatif et hautement significatif respectivement.
- le coefficient de corrélation linéaire de Pearson (ou r) a été utilisé pour déterminer l'intensité de la corrélation linéaire entre deux variables quantitatives.

RESULTATS
ET
DISCUSSION

Résultats et discussion

Préambule

L'ensemble des résultats obtenus à partir des différentes expérimentations réalisées sont répartis en trois parties. Chaque partie a fait l'objet d'une publication (annexe 1). Cependant, dans le présent manuscrit, la partie résultats et discussion est plus détaillée que celle présentée dans les publications. Ainsi, les trois parties sont :

- partie 1. Effet des conditions de la cuisson-extrusion sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten à base de la formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1). Les résultats obtenus dans cette partie ont été publiés dans *Journal of Food Science* (2016), 81, C1070–C1079 sous le titre « *Gluten-free precooked rice-yellow pea pasta: effect of extrusion-cooking conditions on phenolic acids composition, selected properties and microstructure* ».
- partie 2. Effet du type de légume sec et de son taux d'incorporation sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten. Les résultats obtenus dans cette partie ont été publiés dans *LWT - Food Science and Technology* (2017), 75, 569–577 sous le titre « *Gluten-free precooked rice pasta enriched with legumes flours: Physical properties, texture, sensory attributes and microstructure* ».
- partie 3. Effet de la variation des conditions de fabrication et de la formulation sur le rendement du procédé de cuisson-extrusion et sa consommation d'énergie pendant la fabrication des pâtes alimentaires à base des formules riz-légumes secs. Les résultats obtenus dans cette partie ont été publiés dans *Agriculture engineering*, (2017), 21 (1), 39–46 sous le titre « *Energy consumption and process efficiency as affected by extrusion-cooking conditions and recipe formulation during the production of gluten-free rice-legumes products* ».

Partie 1. Effet des conditions de la cuisson-extrusion sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten à base de la formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1)

1.1. Composition chimique de la formule

La formule utilisée dans cette partie est composée de la farine de riz et de la farine de pois jaune avec un rapport massique de 2/1. La farine de pois jaune a des teneurs significativement plus élevées en protéines (23,48%), en cendres (2,90%) et en fibres (3,03%) par rapport à la farine de riz (7,92%, 2,30% et 1,31% respectivement). Au contraire, la farine de riz a des teneurs en lipides (2,30%) et en glucides (87,1%) plus élevées que celles de la farine de pois jaune (1,23% et 69,35% respectivement) (tableau 6).

Le calcul des teneurs des différents constituants de la formule a montré que les teneurs en protéines (13,11%), en cendres (1,88%) et en fibres (1,89%) sont plus élevées que celles de la farine de riz (tableau 6). Ces teneurs ont augmenté de 66% pour les protéines, de 37% pour les cendres et de 44% pour les fibres. Des observations similaires ont été rapportées pour le couscous sans gluten fabriqué avec une formule riz-pois protéagineux (rapport massique 2/1) par Benatallah *et al.* (2008) et pour les pâtes alimentaires à base de blé dur enrichies avec 35% de farine de pois cassé par Petitot *et al.* (2010). Au contraire, nous avons trouvé une diminution des teneurs en lipides (1,94%) et en glucides (81,18%) dans la formule utilisée par rapport à la farine de riz.

Tableau 6. Composition chimique de la farine de riz, de la farine de pois jaune et de la formule utilisée pour la fabrication des pâtes sans gluten (b.s.)

| Farines | Protéines (%) | Lipides (%) | Cendres (%) | Fibres (%) | Glucides (%) |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| Riz (R) | 7,92 ± 0,004 ^a | 2,30 ± 0,01 ^b | 1,37 ± 0,02 ^a | 1,31 ± 0,01 ^a | 87,1 |
| Pois jaune (PJ) | 23,48 ± 0,02 ^b | 1,23 ± 0,01 ^a | 2,90 ± 0,04 ^b | 3,03 ± 0,03 ^b | 69,35 |
| R/PJ (2/1) [*] | 13,11 | 1,94 | 1,88 | 1,89 | 81,18 |

^{a - b} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

^{*} Résultat obtenu par calcul.

1.2. Composition en acides phénoliques des pâtes sans gluten

Une bonne linéarité a été obtenue pour tous les acides phénoliques analysés. Les coefficients de détermination de toutes les courbes d'étalonnage étaient supérieurs à 0,9992. Les résultats analytiques de la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse avec une ionisation par électro-nébulisation (CL-SM-IEN/SM) sont présentés dans le table 7, alors que et les paramètres analytiques pour chaque acide phénolique analysé sont mentionnés dans le tableau 8.

Tableau 7. Résultats analytiques de la CL-SM-IEN/SM des acides phénoliques

| Acides phénoliques | Temps de rétention (min) | [M-H] ⁻ (ou m/z) | Fragments de [M-H] ⁻ | Energie de collision (eV) |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Acide protocatéchique | 2,1 | 152,9 | 107,8 | - 38 |
| | | | 80,9 | - 26 |
| Acide gentisique | 3,85 | 152,8 | 107,9 | - 36 |
| | | | 81 | - 30 |
| Acide 4-OH-benzoïque | 4,00 | 136,8 | 92,9 | - 18 |
| Acide vanillique | 5,30 | 166,8 | 107,9 | - 18 |
| | | | 123 | - 12 |
| Acide trans-caféique | 5,55 | 178,7 | 134,9 | - 16 |
| | | | 88,9 | - 46 |
| Acide cis-caféique | 5,75 | 178,7 | 134,9 | - 16 |
| | | | 88,9 | - 46 |
| Acide syringique | 6,40 | 196,9 | 181,9 | - 12 |
| | | | 122,8 | - 24 |
| Acide trans-p-coumarique | 7,38 | 162,7 | 119 | - 14 |
| | | | 93 | - 44 |
| Acide cis-p-coumarique | 7,50 | 162,7 | 119 | - 14 |
| | | | 93 | - 44 |
| Acide trans-férulique | 7,95 | 192,8 | 177,9 | - 12 |
| | | | 133,9 | - 16 |
| Acide salicylique | 8,02 | 136,8 | 93 | - 16 |
| | | | 75 | - 48 |
| Acide 3-OH-cinnamique | 8,10 | 162,8 | 119 | - 14 |
| | | | 91 | - 36 |
| Acide cis-férulique | 8,12 | 192,8 | 177,9 | - 12 |
| | | | 133,9 | - 16 |
| Acide trans-sinapique | 8,15 | 222,8 | 148,9 | - 20 |
| | | | 121 | - 36 |
| Acide cis-sinapique | 8,30 | 222,8 | 148,9 | - 20 |
| | | | 121 | - 36 |

Tableau 8. Paramètres analytiques de la CL-MS-IEN/MS pour chaque acide phénolique analysé

| Acides phénoliques | LD (ng/ml) | LQ (ng/ml) | r^2 | Intervalle de linéarité (ng/ml) |
|--------------------------|---------------|---------------|--------|------------------------------------|
| Acide protocatéchique | 10 | 25 | 0,9999 | 50-12500 |
| Acide gentisique | 5 | 15 | 0,9994 | 15-5000 |
| Acide 4-OH-benzoïque | 20 | 50 | 0,9999 | 50-2000 |
| Acide vanillique | 25 | 50 | 0,9995 | 50-5000 |
| Acide trans-caféique | 10 | 25 | 0,9992 | 25-2500 |
| Acide cis-caféique | 10 | 25 | 0,9992 | 25-2500 |
| Acide syringique | 25 | 50 | 0,9993 | 50-10000 |
| Acide trans-p-coumarique | 10 | 25 | 0,9999 | 25-2500 |
| Acide cis-p-coumarique | 10 | 25 | 0,9999 | 25-2500 |
| Acide trans-férulique | 10 | 25 | 0,9994 | 40-2000 |
| Acide salicylique | 10 | 30 | 0,9999 | 30-1000 |
| Acide 3-OH-cinnamique | 10 | 25 | 0,9997 | 50-2500 |
| Acide cis-férulique | 10 | 25 | 0,9994 | 40-2000 |
| Acide trans-sinapique | 8 | 20 | 0,9996 | 20-2500 |
| Acide cis-sinapique | 8 | 20 | 0,9996 | 20-2500 |

LD : limite de detection.

LQ : limite de quantification.

Les résultats de la composition en acides phénoliques des pâtes alimentaires sans gluten à base de la formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1) sont présentés dans le tableau 9. Dans les pâtes alimentaires, 15 acides phénoliques ont été détectés. Il s'agissait :

- des acides dérivés de l'acide benzoïque : protocatéchique, 4-OH-benzoïque, vanillique, salicylique, gentisique et syringique ;
- des acides dérivés de l'acide cinnamique : trans-p-coumarique, cis-p-coumarique, trans-férulique, cis-férulique, trans-caféique, cis-caféique, 3-OH-cinnamique, trans-sinapiques et cis-sinapiques.

Tableau 9. Composition en acides phénoliques (ng/g de matière sèche) des pâtes alimentaires sans gluten à base de la formule riz-pois jaune en fonction des conditions de fabrication

| TE (%) | VRV (tr/min) | Acide protocatéchique | Acide 4-OH-benzoïque | Acide vanilique | Acide trans-p-coumarique | Acide cis-p-coumarique | Acide trans-férulique | Acide cis-férulique | Acide salicylique | Total |
|--------|--------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---------|
| 60 | 60 | 133,67±1,41 ^c | 344,14±3,1 ^c | 729,43±5,29 ^d | 219,33±0,88 ^c | 242,77±1,59 ^d | 230,18±3,17 ^b | 1563,59±3,53 ^d | 284,29±3,53 ^d | 3747,38 |
| 28 | 80 | 94,28±0,07 ^b | 299,85±2,23 ^b | 552,39±7,00 ^b | 163,18±0,09 ^a | 165,22±2,80 ^b | 168,19±3,85 ^a | 1073,82±8,76 ^b | 185,16±1,58 ^a | 2702,09 |
| 100 | 100 | 215,07 ±2,12 ^a | 432,88±3,31 ^a | 867,01±8,82 ^a | 308,63±4,59 ^d | 259,86±3,0 ^a | 329,80±6,35 ^c | 1666,67±7,06 ^c | 328,09±1,76 ^f | 4408,05 |
| 60 | 60 | 156,82±2,81 ^d | 382,13±0,82 ^d | 590,57±7,02 ^b | 235,73±0,35 ^c | 221,84±2,46 ^c | 240,57±0,18 ^b | 1449,75±4,39 ^c | 304,47±1,05 ^e | 3581,89 |
| 30 | 80 | 76,11±1,97 ^a | 266,02±1,28 ^a | 403,63±5,27 ^a | 164,93±2,11 ^a | 175,61±1,41 ^a | 159,59±0,88 ^a | 1107,80±7,03 ^a | 205,42±2,46 ^b | 2559,09 |
| 100 | 100 | ND | 339,74±2,82 ^a | 570,58±7,02 ^b | 195,36±0,18 ^b | 213,97±0,88 ^b | 177,75±1,93 ^a | 1327,21±0,0 ^b | 242,74±0,88 ^e | 3067,35 |
| 60 | 60 | 394,66±2,8 ^b | 569,61±1,85 ^b | 767,80±5,25 ^d | 459,94±3,5 ^a | 255,94±1,75 ^{a*} | 559,35±6,29 ^d | 2090,75±8,74 ^b | 403,68±6,12 ^b | 5501,73 |
| 32 | 80 | 357,45±0,7 ^a | 654,11±2,59 ^b | 856,33±12,30 ^c | 497,51±0,53 ^f | 346,76±5,27 ^f | 563,01±5,27 ^f | 2851,11±7,03 ^b | 457,74±2,99 ^b | 6584,02 |
| 100 | 100 | 276,98±2,11 ^f | 476,13±1,18 ^d | 658,88±0,00 ^f | 442,57±7,03 ^c | 203,75±2,99 ^b | 573,10±1,76 ^d | 1854,80±10,55 ^f | 413,97±1,70 ^e | 4900,17 |

^{a-f} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différents (p > 0,05).

TE: teneur en eau.

VRV: vitesse de rotation de la vis.

N.D.: not détecté.

Cependant, les concentrations des acides gentisique, trans-caféique, cis-caféique, syringique, 3-OH-cinnamique, trans-sinapique et cis-sinapique étaient inférieures à la limite de quantification mais plus élevées que la limite de détection. Ainsi, nous avons pu quantifier 8 acides phénoliques : protocatéchique, 4-OH-benzoïque, vanilique, trans-p-coumarique, cis-p-coumarique, trans-férulique, cis-férulique, et salicylique, avec des concentrations plus élevées pour l'acide cis-férulique, l'acide vanilique et l'acide 4-OH-benzoïque.

Les acides phénoliques sont un groupe de composés qui présentent une forte activité antioxydante et sont capables de protéger les membranes cellulaires ainsi que les protéines structurales, les enzymes, les lipides membranaires ou les acides nucléiques. De plus, les acides phénoliques constituent environ un tiers de l'apport quotidien en antioxydants, ce qui en fait des agents antioxydants précieux (Nowacka *et al.*, 2014).

L'analyse de la variance à deux facteurs a montré des effets hautement significatifs ($p < 0,001$) de la teneur en eau, de la vitesse de rotation de la vis et des interactions teneur en eau-vitesse de rotation de la vis sur les teneurs de tous les acides phénoliques dans les pâtes alimentaires sans gluten. Ainsi, il ressort que les teneurs en acides phénoliques des pâtes alimentaires sans gluten ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en eau et cela quelque soit la vitesse de rotation de la vis appliquée. Cependant, lorsque une vitesse de rotation de la vis de 80 tr/min a été appliquée à une teneur en eau de 32%, les acides phénoliques étaient présents dans les échantillons de pâtes alimentaires à la plus haute concentration (en particulier 2851,11 ng/g pour l'acide cis-férulique, 856,33 ng/g pour l'acide vanilique et 654,11 ng/g pour l'acide 4-OH-benzoïque, avec une teneur totale pour tous les acides phénoliques de 6584,02 ng/g), de sorte que ces conditions de transformation ont eu le plus faible impact négatif sur la stabilité des acides phénoliques.

Par ailleurs, à une teneur en eau de 28%, les teneurs en acides phénoliques étaient plus élevées pour les pâtes fabriquées à une vitesse de rotation de la vis de 100 tr/min (4408,05 ng/g) par rapport à celles fabriquées à 60 tr/min (3747,38 ng/g). Ce phénomène peut être associé au fait que les acides phénoliques dans les grains de céréales (riz) sont principalement liés aux composants de la paroi cellulaire (Inglett *et al.*, 2010). De tels complexes de lignine sont difficiles à décomposer et les vitesses de vis faibles sont moins efficaces. La friction générée par la vitesse élevée de rotation de la vis pourrait être à l'origine de la libération des acides phénoliques de ces complexes.

1.3. Activité anti-radicalaire des extraits des pâtes sans gluten

Les données des analyses spectrophotométriques des pâtes alimentaires sans gluten à base de la formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1) ont montré une faible capacité de piégeage des radicaux DPPH (entre 12,14 et 33,65%) quelles que soient la teneur en eau et la vitesse de rotation de la vis utilisées.

Le maximum de 33,65% a été enregistré pour les pâtes alimentaires fabriquées avec une teneur en eau de 30% et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min (tableau 10). Cette faible activité anti-radicalaire pourrait être le résultat de la faible qualité et quantité d'acides phénoliques dans les pâtes fabriquées par cuisson-extrusion. Une réduction des acides phénoliques libres, qui sont considérés comme des piègeurs de radicaux libres, a été trouvée par Fares *et al.* (2010) lors de la fabrication des pâtes alimentaires en raison des réactions oxydatives provoquées par l'eau, l'oxygène et la chaleur. En outre, le pois jaune présentait une activité antioxydante faible comme l'ont rapporté Halvorsen *et al.* (2002) et Oomah *et al.* (2011).

Tableau 10. Capacité de piégeage des radicaux DPPH (%) des pâtes sans gluten en fonction des conditions de fabrication

| Teneur en eau (%) | Vitesse de rotation de la vis (tr/min) | Capacité de piégeage des radicaux DPPH (%) |
|-------------------|--|--|
| 28 | 60 | 22,87 ± 0,92 ^b |
| | 80 | 31,46 ± 1,79 ^{cd} |
| | 100 | 12,14 ± 0,52 ^a |
| 30 | 60 | 33,65 ± 1,18 ^d |
| | 80 | 15,31 ± 0,29 ^a |
| | 100 | 13,2 ± 0,38 ^a |
| 32 | 60 | 26,87 ± 0,29 ^{bc} |
| | 80 | 24,9 ± 3,07 ^b |
| | 100 | 30,93 ± 1,44 ^{cd} |

^{a - d} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p > 0,05).

1.4. Propriétés de viscosité des pâtes sans gluten

Au cours de l'essai visco-amylographique, l'amidon qui n'a pas été rétrogradé pendant la fabrication des pâtes a la possibilité de se rétrograder. Ainsi, des valeurs faibles de *setback* et de viscosité finale reflètent une quantité élevée d'amidon rétrogradé dans les pâtes alimentaires. Au contraire, des valeurs élevées de *setback* et de viscosité finale reflètent une faible quantité d'amidon rétrogradé dans les pâtes alimentaires (Mariotti *et al.*, 2011).

Certaines différences dans les caractéristiques de viscosité des échantillons des pâtes alimentaires broyées ont été observées selon chaque condition de fabrication. Ces différences peuvent être dues à la modification de l'amidon pendant la cuisson-extrusion et aux interactions entre protéines, amidon et autres polysaccharides résultant du traitement (Marti *et al.*, 2010). Généralement, pour tous les échantillons de pâtes, la température de gélatinisation et les valeurs de viscosité étaient inférieures à celles rapportées pour la farine de riz natif et la farine de riz pré-gélatinisée (Marti *et al.*, 2013). La température de gélatinisation et les valeurs de viscosité étaient aussi inférieures à celles rapportées pour les pâtes sans gluten faites à partir de riz blanchi par le procédé de cuisson-extrusion (Marti *et al.*, 2010) et pour les pâtes sans gluten commerciales (de riz, de maïs, d'amidon ou de mélange riz et maïs) (Mariotti *et al.*, 2011).

L'analyse de la variance à deux facteurs pour les caractéristiques de viscosité des pâtes sans gluten a montré que :

- la teneur en eau a eu un effet hautement significatif ($p < 0,001$) sur toutes les caractéristiques de viscosité des pâtes sans gluten.
- la vitesse de rotation de la vis a eu un effet hautement significatif ($p < 0,001$) sur la température de gélatinisation et la viscosité initiale, un effet très significatif ($p < 0,01$) sur la viscosité finale et un effet significatif ($p < 0,05$) sur la viscosité maximale.
- l'interaction teneur en eau-vitesse de rotation de la vis a eu un effet significatif ($p < 0,05$) sur la température de gélatinisation, la viscosité initiale et la viscosité finale.

1.4.1. Température de gélatinisation

Nous avons enregistré des températures de gélatinisation faibles allant de 25,50 à 65°C. La température de gélatinisation la plus élevée est notée pour les pâtes sans gluten fabriquées à une vitesse de rotation de la vis de 100 tr/min pour les teneurs en eau de 28 et

30%. Nous avons aussi remarqué que la température de gélatinisation a diminué à la moitié (entre 25,50 et 31, 50°C) pour les pâtes fabriquées avec une teneur en eau de 32% pour les trois vitesses de rotation de la vis ($r = -0,78$, $p < 0,001$) (figure 13).

En outre, les pâtes fabriquées à une vitesse de rotation de la vis de 100 tr/min ont eu une température de gélatinisation significativement plus élevée que celle des pâtes fabriquées à 60 ou 80 tr/min, et cela sans tenir compte de la teneur en eau.

Nous avons trouvé que la température de gélatinisation est corrélée positivement avec la viscosité maximale ($r = 0,68$, $p < 0,01$) et le *breakdown* ($r = 0,64$, $p < 0,01$).

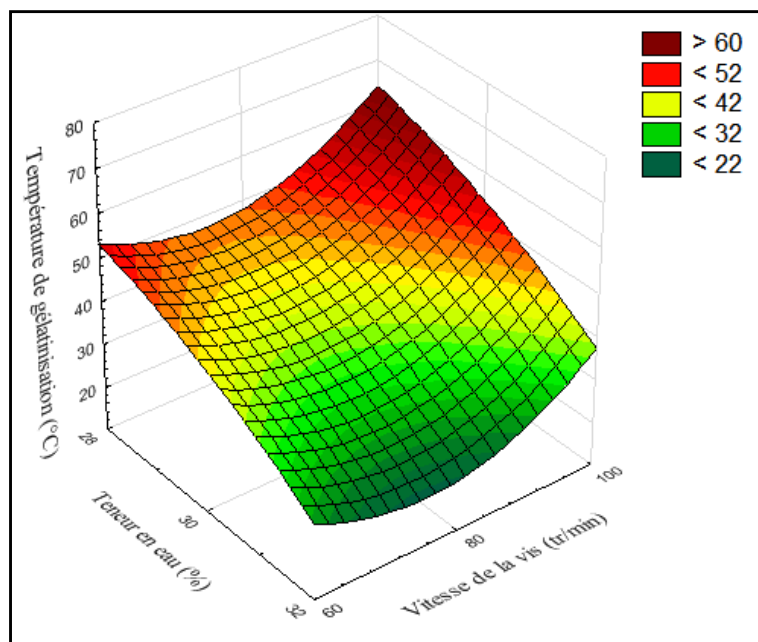


Figure 13. Surface de réponses obtenue pour la température de gélatinisation des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

1.4.2. Viscosité initiale

La viscosité initiale des échantillons de pâtes broyées variait de 16,50 à 56 mPa s. Ces valeurs élevées indiquent que les granules d'amidon dans toutes les pâtes sans gluten sont partiellement gélatinisés. La viscosité initiale a augmenté avec la diminution de la teneur en eau ($r = -0,84$, $p < 0,001$) (figure 14). Au contraire, la viscosité initiale était significativement plus élevée pour les pâtes fabriquées à 100 tr/min.

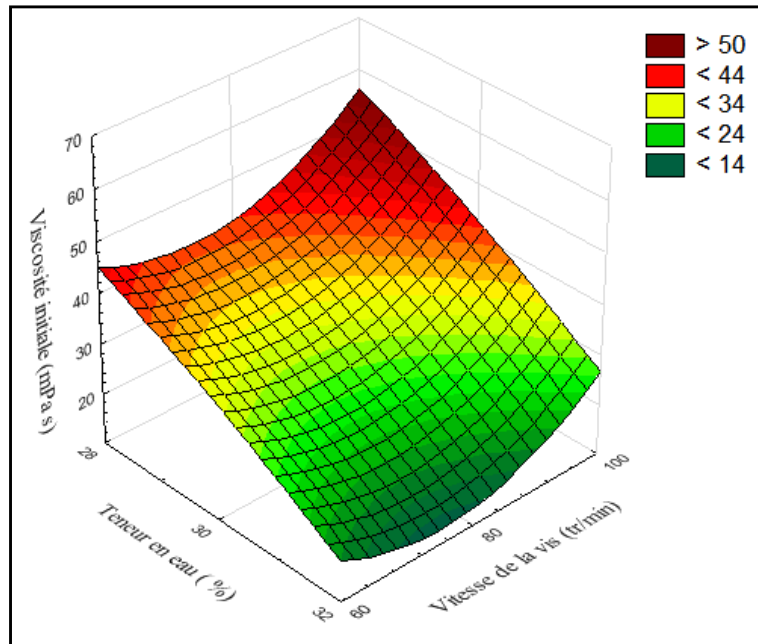


Figure 14. Surface de réponses obtenue pour la viscosité initiale des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

Les valeurs faibles de la température de gélatinisation et les valeurs élevées de la viscosité initiale des pâtes alimentaires pourraient résulter des hautes forces de cisaillement pendant l'extrusion des matières à une teneur en eau faible (Ortiz *et al.*, 2010). Cela conduit à la modification moléculaire des granules d'amidon, entraînant la perte de son intégrité et la destruction de sa cristallinité comme rapportée par Lai (2001) et Lai et Cheng (2004). La présence d'une quantité plus élevée d'amidon endommagé dans les pâtes alimentaires sèches, qui pourrait rapidement absorber l'eau et ses granules d'amidon gonflent rapidement, provoque une gélatinisation facile de l'amidon à température plus basse.

1.4.3. Viscosité maximale

La viscosité maximale reflète le gonflement maximal du granule d'amidon (Zhong *et al.*, 2009). Tous les échantillons de pâtes sans gluten présentaient une viscosité maximale faible (entre 96,50 et 135,50 mPa s) notamment pour les pâtes fabriquées à teneur en eau de 32% et des vitesses de rotation de la vis faibles (60 et 80 tr/min). En outre, la viscosité maximale était corrélée négativement avec le teneur en eau ($r = -0,77$, $p < 0,001$) (figure 15). Les valeurs faibles de la viscosité maximale des échantillons de pâtes sans gluten peut être attribué à la capacité d'hydratation faible de la matrice, en

conséquence de la gélatinisation de l'amidon et du phénomène de rétrogradation qui se déroulent lors de la cuisson-extrusion (Hagenimana *et al.*, 2006 ; Marti *et al.*, 2014).

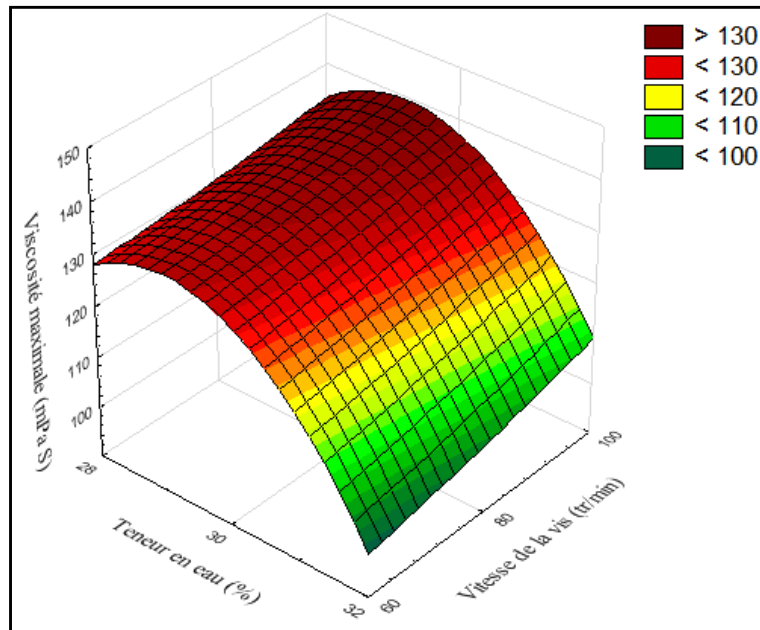


Figure 15. Surface de réponses obtenue pour la viscosité maximale des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

La viscosité maximale était corrélée positivement avec le *setback* ($r = 0,64$, $p < 0,01$) et la viscosité finale ($r = 0,75$, $p < 0,001$). Mariotti *et al.* (2011) ont trouvé des résultats similaires pour des échantillons de pâtes sans gluten commerciales.

1.4.4. Breakdown

Les températures et le cisaillement mécanique élevés appliqués aux suspensions de pâtes pendant la période de maintien à 93°C ont entraîné la rupture du granule d'amidon et la lixiviation de l'amylose, provoquant une diminution de la viscosité des échantillons de pâtes ce qui correspond au *breakdown* (Barbiroli *et al.* 2013).

Les valeurs de *breakdown* variaient de 37 à 75 mPa s et les pâtes fabriquées à une teneur en eau de 32% présentaient des valeurs significativement plus faibles que celles des pâtes fabriquées à des teneurs en eau faibles (28 et 30%). Nous avons trouvé aussi que le *breakdown* a diminué avec l'augmentation de la teneur en eau ($r = - 0,68$, $p < 0,001$) (figure 16). En plus, le *breakdown* était positivement corrélé avec le *setback* ($r = 0,73$, $p < 0,001$).

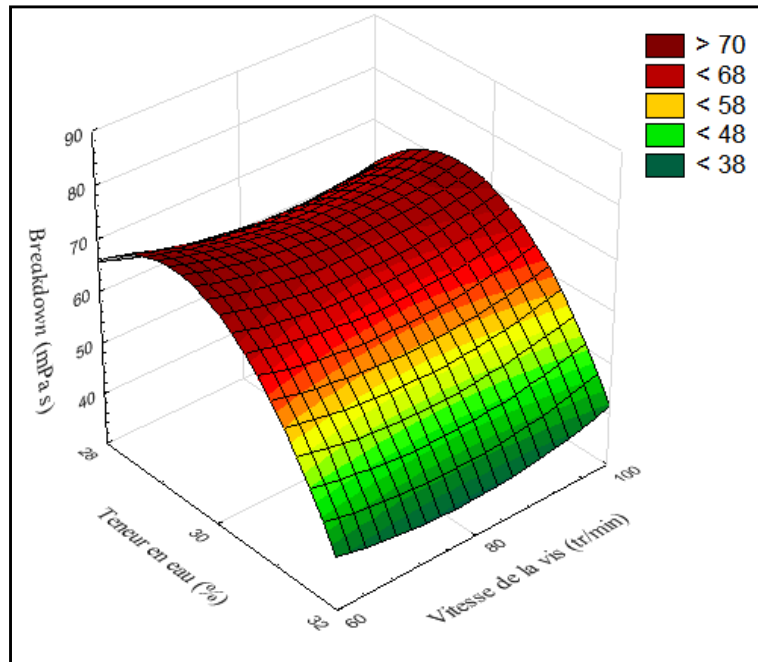


Figure 16. Surface de réponses obtenue pour le *breakdown* des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

1.4.5. *Setback* et viscosité finale

Au cours du refroidissement, les molécules d'amylose, lessivées du granule d'amidon, sont associées de nouveau, ce qui conduit à la formation d'une masse visqueuse provoquant ainsi une augmentation de la viscosité (correspondant à la *setback*) (Kim et Shin, 2014).

Les figures 17 et 18 représentent les surfaces de réponses obtenues respectivement pour le *setback* et la viscosité finale des pâtes à base de la formule riz-pois jaune. Nous avons trouvé des valeurs faibles de *setback* (entre 60,50 et 75,50 mPa s) et de viscosité finale (entre 120 et 143,50 mPa s) pour les échantillons de pâtes sans gluten. Ce résultat reflète une quantité faible d'amidon rétrogradé formé au cours du test visco-amylographique (Abdel-Aal *et al.*, 2002, Ragaee et Abdel-Aal, 2006), et indique que le procédé de cuisson-extrusion utilisé pour la fabrication des pâtes sans gluten a induit une rétrogradation importante de l'amidon (Mariotti *et al.*, 2011).

La viscosité finale était plus faible pour les pâtes fabriquées à 60 tr/min que pour celles fabriquées à 80 ou 100 tr/min.

En outre, une corrélation positive a été trouvée entre le *setback* et la viscosité finale ($r = 0,66$, $p < 0,01$). Cette dernière correspondant à la viscosité atteinte à la fin de la période de refroidissement à 50°C.

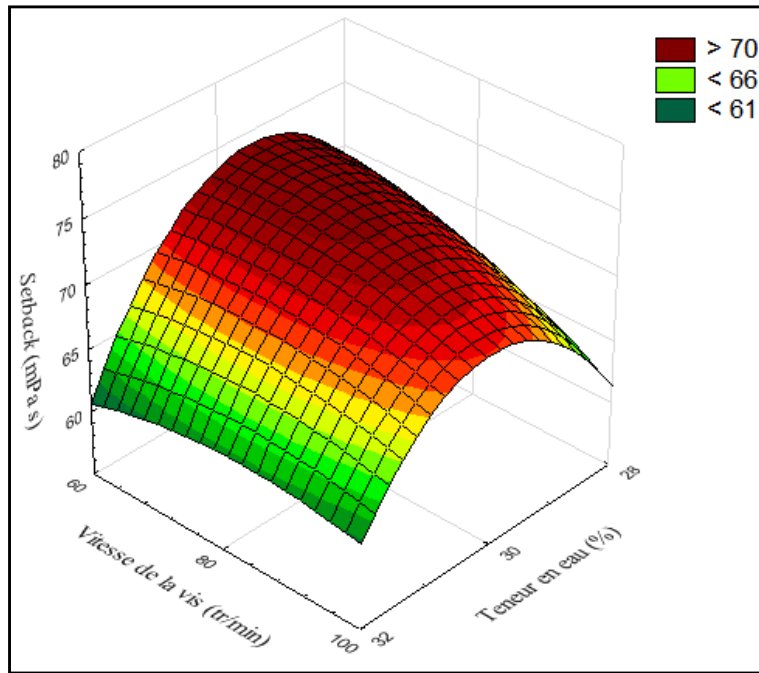


Figure 17. Surface de réponses obtenue pour le *setback* des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

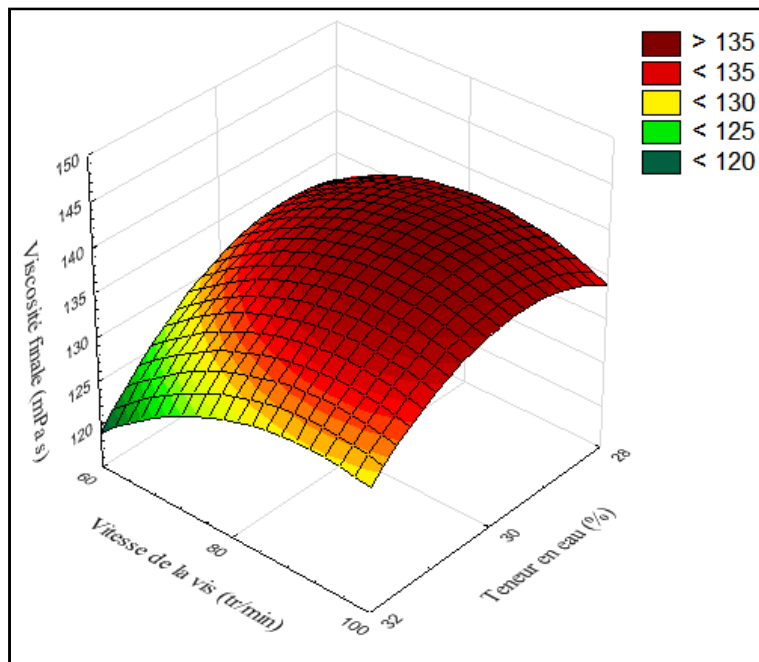


Figure 18. Surface de réponses obtenue pour la viscosité finale des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

1.5. Qualité culinaire des pâtes alimentaires sans gluten

L'analyse de la variance à deux facteurs pour les paramètres de la qualité culinaire a montré que :

- la teneur en eau a eu des effets hautement significatifs ($p < 0,001$) sur la capacité d'absorption de l'eau et sur les pertes à la cuisson.
- la vitesse de rotation de la vis a eu des effets hautement significatifs ($p < 0,001$) sur la capacité d'absorption de l'eau.
- l'interaction teneur en eau-vitesse de rotation de la vis a eu un effet hautement significatif ($p < 0,001$) sur la capacité d'absorption de l'eau et un effet significatif ($p < 0,05$) sur les pertes à la cuisson.

1.5.1. Temps de préparation minimal

Le temps de préparation minimal de la plupart des pâtes sans gluten à base de la formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1) était de 7 min. Ce temps d'hydratation dans l'eau chaude a suffi pour obtenir la consistance adéquate (disparition de la ligne blanche du centre du brin de spaghetti) sans cuisson conventionnelle dans l'eau en ébullition. Cependant, un temps de préparation minimal plus long est noté pour les pâtes fabriquées avec une teneur en eau de 32% et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min ou 100 tr/min (8 min et 9 min respectivement) sans que cette augmentation soit significative. Wang *et al.*, (2012) ont constaté que le temps de cuisson augmentait à mesure que la vitesse de rotation de la vis et la teneur en eau augmentaient pour les nouilles faites à partir d'amidon de pois à l'aide d'un cuiseur-extrudeur double vis.

1.5.2. Capacité d'absorption de l'eau

La capacité d'absorption de l'eau est un indice important, qui dépend de la quantité d'amidon endommagé et de la faiblesse de ses granules (Yoenyongbuddhagal et Noomhorn, 2002a, b). La capacité d'absorption de l'eau des pâtes sans gluten variait de 168,53 g/100g (pour les pâtes fabriquées avec une teneur en eau de 30% et une vitesse de rotation de la vis de 100 tr/min) à 226,33 g/100g (pour les pâtes fabriquées avec une teneur en eau de 32% et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min).

En outre, nous avons trouvé une corrélation positive entre la capacité d'absorption de l'eau et les pertes à la cuisson ($r = 0,82$, $p < 0,001$).

La figure 19 montre que lorsque la teneur en eau augmente la capacité d'absorption de l'eau augmente ($r = 0,63$, $p < 0,001$). Ce comportement suggère que la cuisson-extrusion à haute teneur en humidité a conduit à la formation d'une structure plus hydrophile qui entraîne une absorption d'eau plus élevée telle que rapportée par Marti *et al.* (2010). En plus, une faible capacité d'absorption de l'eau indique une mauvaise qualité des pâtes cuites en raison de la texture difficile à mâcher (Wang *et al.*, 2012).

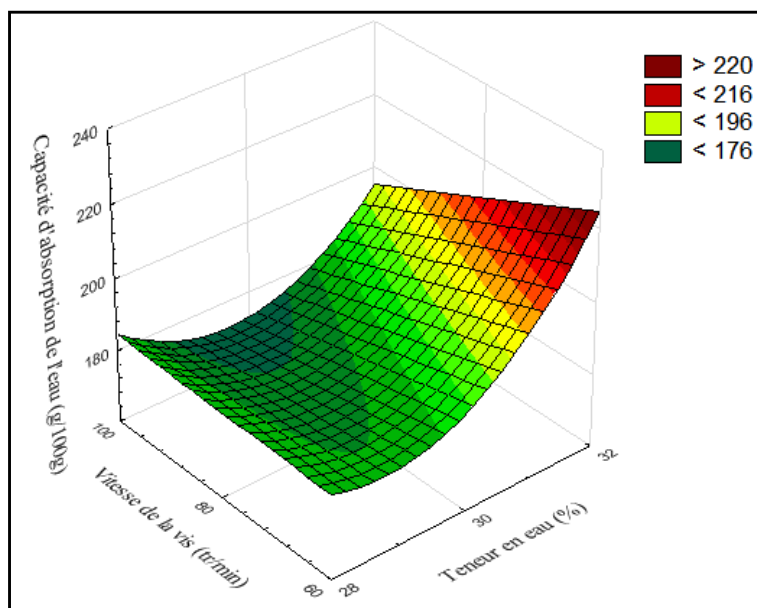


Figure 19. Surface de réponses obtenue pour la capacité d'absorption de l'eau des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

1.5.3. Pertes à la cuisson

Nous avons trouvé des pertes à la cuisson des pâtes sans gluten qui varient de 5,03% (pour les pâtes fabriquées à une teneur en eau de 28% et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min) à 6,73% (pour les pâtes fabriquées à une teneur en eau de 32% et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min). Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées pour les pâtes sans gluten fabriquées par cuisson-extrusion à partir de farine de pois (Wang *et al.*, 1999) et d'un mélange de farines maïs-fèves (Giménez *et al.*, 2013), et plus élevées que ceux trouvés par Marti *et al.* (2010) pour les pâtes obtenues à partir de riz blanchi.

Les pertes à la cuisson ont augmenté à mesure que la teneur en eau augmentait ($r = 0,65$, $p < 0,001$) (figure 20). Cependant, les valeurs déterminées des pertes à la cuisson restent inférieures à 7 à 8% rapportées pour les spaghettis à base de semoule de blé dur (Doxastakis *et al.*, 2007), 9 à 10% pour les nouilles d'amidon (Tan *et al.*, 2009) et 10% pour les pâtes précuites (Kim *et al.*, 1996 ; Wang *et al.*, 1999). Ces résultats indiquent que

les conditions de fabrications appliquées ont un effet positif sur les pertes à la cuisson qui est un paramètre très important pour l'évaluation de la qualité des pâtes alimentaires.

Par ailleurs, les valeurs faibles des pertes à la cuisson suggèrent que la cuisson-extrusion appliquée pour fabriquer les pâtes sans gluten à base de la formule riz-pois jaune a permis la formation d'une structure avec un bon réseau d'amidon rétrogradé qui tolèrent les contraintes lors de l'hydratation dans l'eau chaude. La formation de ce réseau est confirmée par les valeurs faibles de *Setback* et de viscosité finale obtenues lors du test visco-amylographique. En outre, Giménez *et al.* (2013) ont suggéré que la cuisson-extrusion à haute température et faible teneur en eau a conduit à la création d'une structure moins soluble, en concordance avec les faibles pertes à la cuisson (moins de 7% dans notre étude).

Par ailleurs, l'amidon est souvent considéré comme le principal réseau structurel des pâtes sans gluten en raison de ses propriétés fonctionnelles (Lucisano *et al.*, 2012). La formation d'un réseau solide d'amidon rétrogradé autour de l'amidon gélatinisé déclenche moins de lixiviation de l'amidon gélatinisé à partir de la surface des pâtes sans gluten, donc moins de pertes à la cuisson (Resmini et Pagani, 1983).

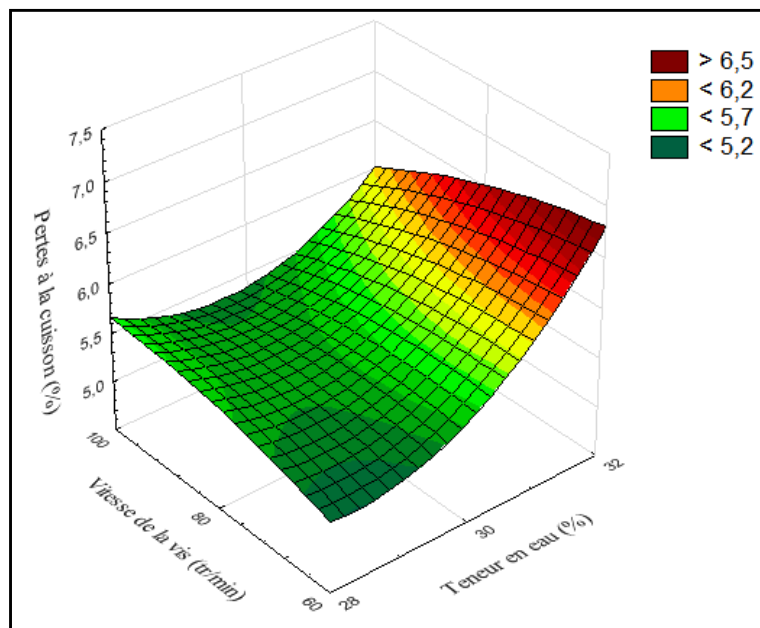


Figure 20. Surface de réponses obtenue pour les pertes à la cuisson des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

1.6. Texture des pâtes sans gluten

La texture est un paramètre critique pour évaluer la qualité globale et l'acceptation des pâtes cuites par le consommateur (Galvez et Resurreccion, 1992 ; Lucisano *et al.*, 2012).

En utilisant l'analyse de la variance à deux facteurs, la teneur en eau a montré un effet hautement significatif ($p < 0,001$) sur tous les paramètres de texture des pâtes sans gluten sauf la fermeté. Pour la vitesse de rotation de la vis, elle a eu un effet très significatif ($p < 0,01$) sur la dureté des pâtes hydratées et sur l'adhésivité. Cependant, l'interaction teneur en eau-vitesse de rotation de la vis avait un effet significatif ($p < 0,05$) sur la dureté des pâtes hydratées seulement.

1.6.1. Dureté des pâtes sèches

La dureté des pâtes sèches variait de 2,72 N si les pâtes sont fabriquées à une teneur en eau de 32% et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min à 7,20 N si les pâtes sont fabriquées à une teneur en eau de 28% et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min. Nous avons noté que la dureté des pâtes sèches a diminué avec l'augmentation de la teneur en eau ($r = - 0,79$, $p < 0,001$) et (figure 21). Les pâtes fabriquées à une teneur en eau de 28% ont été caractérisées par une structure forte qui est confirmée par les valeurs les plus faibles des pertes à la cuisson et donc par des valeurs élevées de dureté des pâtes sèches. La dureté des pâtes sèches et les pertes à la cuisson étaient, en fait, corrélées négativement ($r = - 0,63$, $p < 0,001$). Une corrélation négative a été également observée entre la dureté des pâtes sèches et la capacité d'absorption de l'eau ($r = - 0,65$, $p < 0,001$).

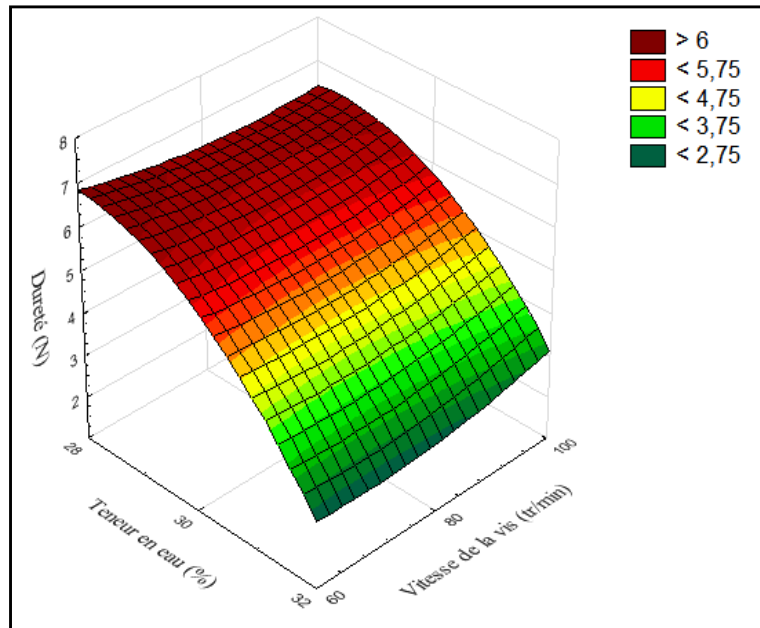


Figure 21. Surface de réponses obtenue pour la dureté des pâtes sèches à base de la formule riz-pois jaune

1.6.2. Dureté des pâtes hydratées

L'hydratation des pâtes dans l'eau chaude a entraîné une forte diminution de la dureté (valeurs entre 0,21 et 0,36 N). Les valeurs de la dureté des pâtes hydratées sont supérieures à celles trouvées par Wójtowicz (2012) pour les pâtes au sarrasin, et inférieures à celles rapportées par Wójtowicz et Mościcki (2009) pour les pâtes fabriquées à base de blé tendre. Ces auteurs ont utilisé le même instrument de mesure de la texture.

La dureté des pâtes hydratées a diminué avec l'augmentation de la teneur en eau ($r = -0,79$, $p < 0,001$) (figure 22). Au contraire, la dureté des pâtes hydratées a augmenté à mesure que la vitesse de rotation de la vis augmentait. En plus, la dureté des pâtes hydratées et la capacité d'absorption de l'eau étaient corrélées négativement ($r = -0,68$, $p < 0,001$).

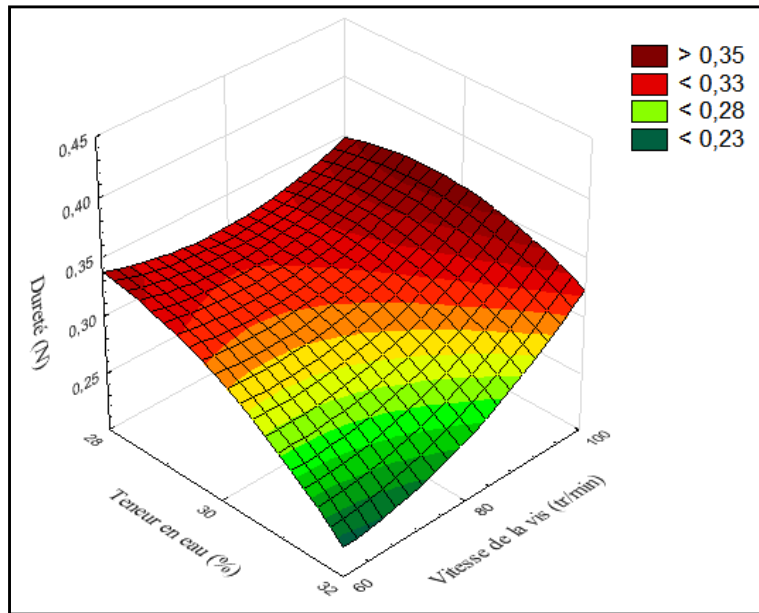


Figure 22. Surface de réponses obtenue pour la dureté des pâtes hydratées à base de la formule riz-pois jaune

1.6.3. Fermeté des pâtes hydratées

La fermeté des pâtes hydratées variait de 217 à 259,5 N et la fermeté la plus élevée était enregistrée pour les pâtes fabriquées à une teneur en eau de 30% et une vitesse de rotation de la vis de 80 tr/min (figure 23). Ces échantillons de pâtes ont eu le score le plus élevé pour l'acceptabilité sensorielle globale (tableau 12).

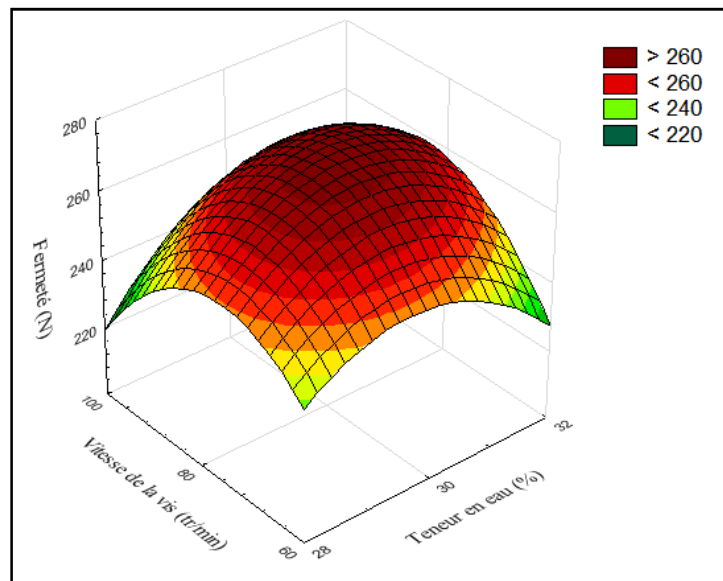


Figure 23. Surface de réponses obtenues pour la fermeté des pâtes hydratées à base de la formule riz-pois jaune

1.6.4. Adhésivité des pâtes hydratées

L'adhésivité des pâtes hydratées variait de 3,72 à 21,85 mJ et les valeurs les plus faibles ont été observées pour les pâtes fabriquées à 60 tr/min et une teneur en eau de 30%.

Nous avons trouvé une corrélation positive entre l'adhésivité des pâtes hydratées et la teneur en eau ($r = 0,83$, $p < 0,001$) (figure 24). Selon Dexter *et al.* (1985) et Wood (2009), l'amylose et l'amylopectine sont moins dégradés dans le produit traité à haut niveau de teneur en eau en raison de la viscosité relativement faible de l'amidon dans le fourreau de l'extrudeur, ce qui entraîne moins d'effet de la vitesse de rotation la vis sur les forces de cisaillement. L'adhésivité des pâtes était affectée à la fois par la structure de la surface des pâtes et par l'amylose exsudé à la surface des pâtes pendant la cuisson.

L'adhésivité était corrélée positivement avec la capacité d'absorption de l'eau ($r = 0,61$, $p < 0,01$) et avec les pertes à la cuisson ($r = 0,53$, $p < 0,05$).

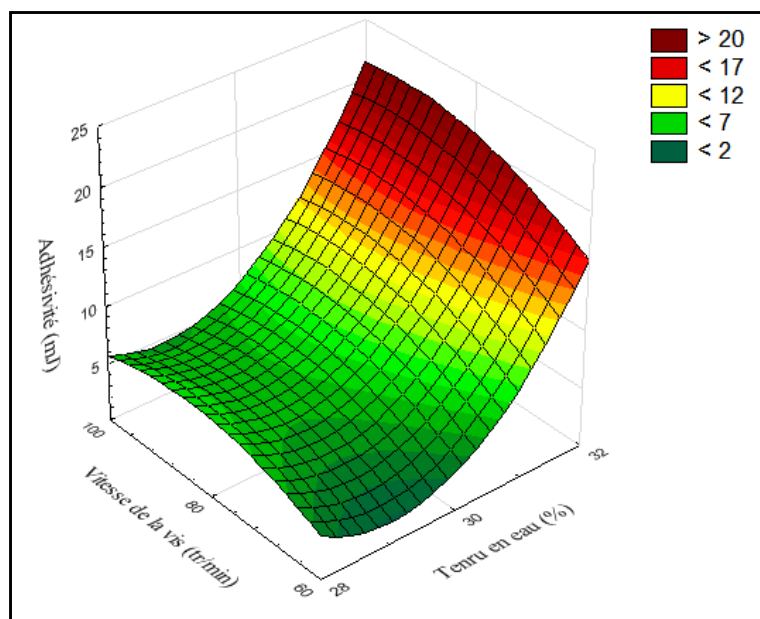


Figure 24. Surface de réponses obtenues pour l'adhésivité des pâtes hydratées à base de la formule riz-pois jaune

1.7. Microstructure des pâtes sans gluten sèches

Des échantillons de pâtes sans gluten sèches ont été observés par microscopie électronique à balayage. Selon les images acquises, il s'avère que la microstructure de la surface et de la section transversale des pâtes sans est affectée par les conditions de fabrication. En effet, tous les échantillons de pâtes présentaient une surface ondulée (figure

25A à D). La même observation a été rapportée par Wójtowicz et Mościcki (2014) pour les pâtes précuites à base de blé tendre enrichies en farine de pois jaune. En outre, la surface de tous les échantillons de pâtes présentait des matériaux fondus (figure 25E à H), en raison de l'influence de la technique de cuisson-extrusion sur la structure d'amidon.

A un grossissement plus élevé ($\times 600$), les pâtes sans gluten fabriquées à faible teneur en humidité (28%) ont présenté une surface rugueuse (figure 25E et F). En revanche, les échantillons fabriqués à une teneur en eau de 30% et 32% ont montré une surface plus lisse (figure 25G et H).

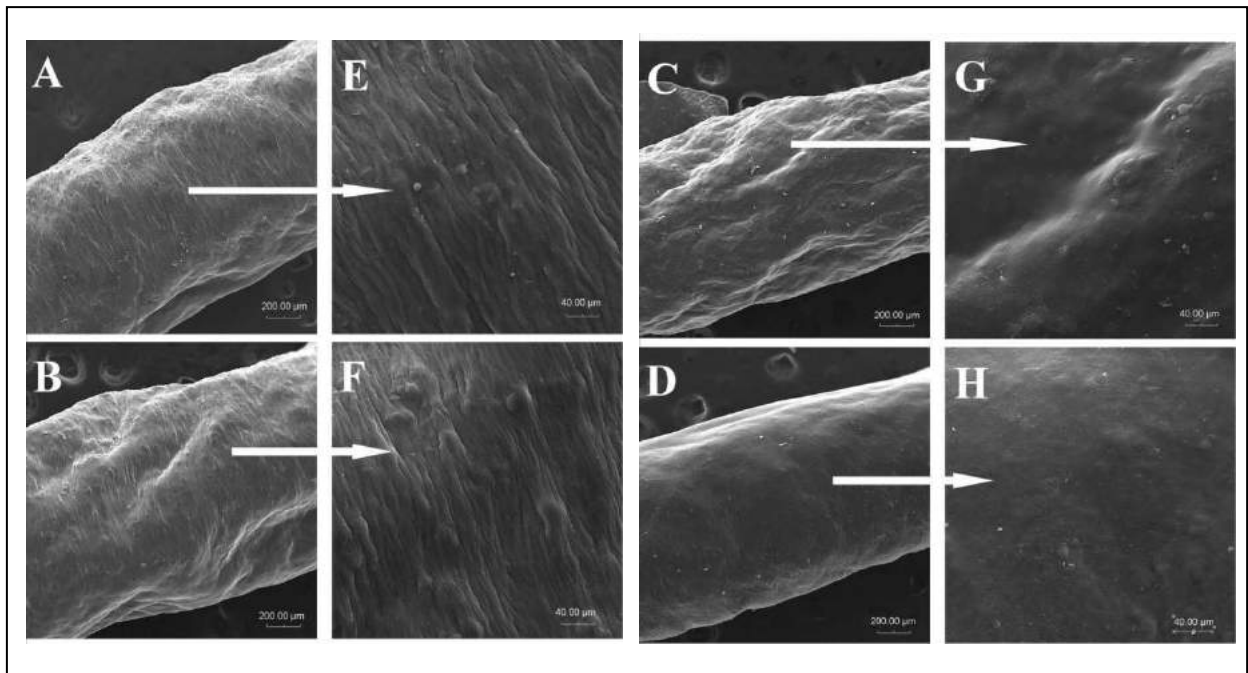


Figure 25. Surface des pâtes sèches fabriquées à : une teneur en eau de 28% à 60 tr/min (A, E) ; une teneur en eau de 28% à 100 tr/min (B, F) ; une teneur en eau de 30% à 80 tr/min (C, G) ; une teneur en eau de 32% à 100 tr/min (D, H), au grossissement $\times 125$ (A, B, C, et D) et $\times 600$ (E, F, G, et H)

La microstructure de la section transversale des pâtes sans gluten a révélé une structure interne compacte presque homogène avec une matrice protéines-amidon et peu d'agrégats visibles à un grossissement élevé. Cette structure a caractérisé les échantillons fabriqués à haute teneur en eau (30% et 32%) indépendamment de la vitesse de rotation de la vis (figure 26C, G, D et H). Cette structure découle de l'effet des conditions de la cuisson-extrusion (teneur en eau, forces de cisaillement et température) qui engendrent la gélatinisation de l'amidon et la structure cohérente (Wójtowicz et Mościcki, 2009).

L'organisation de l'amidon rétrogradé est considérée comme une alternative au réseau de gluten car elle donne une rigidité aux pâtes cuites et réduit l'adhésivité des pâtes et les pertes à la cuisson (Lucisano *et al.*, 2012). Cependant, les échantillons de pâtes fabriquées à une teneur en eau de 28% et à 60 tr/min ont montré une structure interne plus irrégulière avec de nombreux agrégats (figure 26A et E). En outre, les échantillons de pâtes fabriquées à une teneur en eau de 28% et à 100 tr/min étaient caractérisés par la présence de gros trous vides. Ce phénomène pourrait être attribué à la faible teneur en eau et au fort cisaillement impliquant l'évaporation de l'eau à l'intérieur du brin des pâtes lors de la fabrication (figure 26B et F). Ainsi, ces échantillons ont reçu le score le plus bas pour l'acceptabilité globale lors de l'évaluation sensorielle.

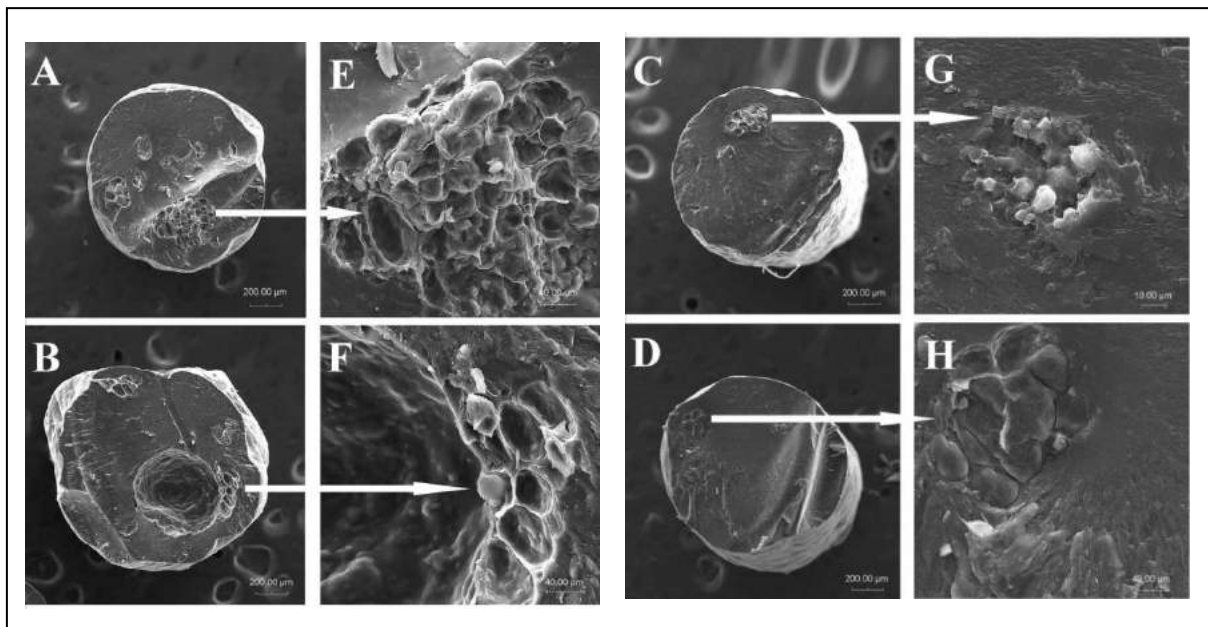


Figure 26. Coupes transversales des pâtes sèches fabriquées à : une teneur en eau de 28% à 60 tr/min (A, E) ; une teneur en eau de 28% à 100 tr/min (B, F) ; une teneur en eau de 30% à 80 tr/min (C, G) ; une teneur en eau de 32% à 100 tr/min (D, H), au grossissement $\times 125$ (A, B, C, et D) et $\times 600$ (E, F, G, et H)

1.8. Acceptabilité sensorielle globale des pâtes sans gluten

L'analyse de la variance à deux facteurs a révélé un effet hautement significatif ($p < 0,001$) des conditions de fabrication (teneur en eau et vitesse de rotation de la vis) ainsi que leur interaction sur l'acceptabilité sensorielle globale.

Le tableau 11 présente les valeurs moyennes des scores obtenus pour l'acceptabilité sensorielle globale des pâtes alimentaires sans gluten à base de la formule riz-pois jaune

(rapport massique 2/1) correspondant à chaque condition de cuisson-extrusion. Le panel de dégustation a donné des scores acceptables (scores supérieures à 5) pour toutes les pâtes sans gluten (6,60 à 7,60), à l'exception des pâtes fabriquées à une teneur en eau de 28% et une vitesse de rotation de la vis de 100 tr/min. Ces échantillons ont obtenu les scores les plus faibles (4,07) pour l'acceptabilité sensorielle globale ($p < 0,05$) en raison probablement de la mauvaise structure caractérisée par la présence de trous vides dans les brins de pâtes ce qui a été confirmé par la microscopie électronique à balayage (figure 26B).

Les pâtes sans gluten fabriquées avec une teneur en eau de 30% et une vitesse de rotation de la vis de 80 tr/min ont reçu le score le plus élevé (7,60) pour l'acceptabilité sensorielle globale. Ces résultats concordent avec les résultats de Wójtowicz et Mościcki (2009) pour les pâtes à base de blé tendre fabriquées par les mêmes conditions de cuisson-extrusion.

Tableau 11. Scores obtenus pour l'acceptabilité sensorielle globale (ASG) des pâtes sans gluten fabriquées à base de la formule riz-pois jaune

| Teneur en eau (%) | Vitesse de rotation de la vis (tr/min) | ASG |
|-------------------|--|--------------------------|
| 28 | 60 | 6,73 ± 1,16 ^b |
| | 80 | 6,60 ± 1,12 ^b |
| | 100 | 4,07 ± 0,88 ^a |
| 30 | 60 | 7,20 ± 1,61 ^c |
| | 80 | 7,60 ± 0,74 ^c |
| | 100 | 7,53 ± 1,25 ^c |
| 32 | 60 | 6,80 ± 1,15 ^b |
| | 80 | 6,93 ± 1,03 ^b |
| | 100 | 6,86 ± 1,49 ^b |

^{a - c} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

Partie 2. Effet du type de légume sec et de son taux d'incorporation sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten

2.1. Composition chimique des farines

Le tableau 12 présente la composition chimique des farines utilisées dans la fabrication des pâtes sans gluten. La farine de riz, qui constitue la base des formules, est caractérisée par des teneurs élevées en matières grasses (2,3%) et en glucides (87,1%) et des teneurs faibles en protéines (7,92%), en cendres (1,37%) et en fibres (1,31%) par rapport à celles des farines de légumes secs. La teneur en protéines des farines de légumes secs varie de 17,50% pour la farine de pois chiche à 26,28% pour la farine de lentille ($p < 0,05$). La farine de pois chiche se caractérise par sa richesse en lipides (6,22%) et en fibres (10,73%) contrairement à la farine de pois jaune qui a été caractérisée par des teneurs faibles en lipides (1,23%) et en fibres (3,03%). Des teneurs élevées en fibres ont été aussi observées pour la farine de lentille (7,93%).

Tableau 12. Composition chimique de la farine de riz et des farines de légumes secs (b.s.)

| Farines | Protéines (%) | Lipides (%) | Cendres (%) | Fibres (%) | Glucides (%) |
|-------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|
| Riz | 7,92 ± 0,004 ^a | 2,30 ± 0,01 ^c | 1,37 ± 0,02 ^a | 1,31 ± 0,01 ^a | 87,1 |
| Pois jaune | 23,48 ± 0,02 ^c | 1,23 ± 0,01 ^a | 2,90 ± 0,04 ^d | 3,03 ± 0,03 ^b | 69,35 |
| Pois chiche | 17,50 ± 0,01 ^b | 6,22 ± 0,23 ^d | 2,57 ± 0,09 ^c | 10,73 ± 0,01 ^c | 62,98 |
| Lentille | 26,28 ± 0,13 ^d | 1,67 ± 0,04 ^b | 2,41 ± 0,02 ^b | 7,93 ± 0,01 ^c | 61,71 |

^{a-c} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

2.2. Composition chimique des pâtes sans gluten sèches

La composition chimique des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs est présentée dans le tableau 13. Comme prévu, les teneurs en protéines, en cendres et en fibres ont augmenté avec l'incorporation des farines de légumes secs. Des observations similaires ont été rapportées par Giuberti *et al.* (2015a) pour les spaghettis sans gluten fabriqués avec du riz et différents niveaux de farine d'haricots, et pour les spaghettis fabriqués avec de la semoule de blé dur et différentes farines de légumes secs par Zhao *et al.* (2005), Petitot *et al.* (2010) et Wójtowicz et Mościcki (2014).

La teneur en protéines la plus élevée (13,95%) a été observée pour les pâtes enrichies en lentille qui est le légume sec le plus riche en protéines (tableau 12). La teneur en protéines et la valeur nutritionnelle des protéines des pâtes alimentaires seraient améliorées par l'ajout de légumes secs en raison de la complémentation des acides aminés des céréales et des légumes secs (Gularte *et al.*, 2012).

La plus grande quantité de fibres a été notée pour les pâtes contenant 30% de pois chiche, pour les deux fractions de fibres solubles et insolubles (5,15 et 4,25 respectivement). L'incorporation de fibres alimentaires à partir de légumes secs dans des pâtes alimentaires sans gluten pourrait donc être bénéfique surtout que les personnes cœliaques ont une faible consommation de fibres alimentaires comme rapporté par Stojceska *et al.* (2010).

Par ailleurs, les pâtes sans gluten étaient caractérisées par des teneurs faibles en matières grasses (0,08 à 0,39%). Wójtowicz et Mościcki (2014) ont rapporté une observation similaire. Ce phénomène est expliqué par la réduction du taux d'extraction des lipides due à la formation de complexes d'amylose-lipides lors de la fabrication des pâtes alimentaires par cuisson-extrusion (Camire *et al.*, 1990).

Tableau 13. Composition chimique des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs (b.s.)

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | Protéines (%) | Lipides (%) | Cendres (%) | Fibres insolubles (%) | Fibres solubles (%) |
|-------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Riz | 0 | 8,25±0,01 ^a | 0,09±0,01 ^a | 0,50±0,01 ^a | 2,52±0,48 ^a | 0,69±0,01 ^a |
| Pois jaune | 10 | 10,23±0,04 ^c | 0,13±0,01 ^b | 0,93±0,01 ^f | 3,20±0,01 ^b | 1,11±0,14 ^{bc} |
| | 20 | 11,91±0,04 ^e | 0,16±0,01 ^c | 1,13±0,01 ⁱ | 4,02±0,01 ^{cde} | 1,36±0,01 ^d |
| | 30 | 12,78±0,13 ^f | 0,18±0,01 ^d | 1,29±0,03 ^j | 4,30±0,01 ^e | 1,44±0,01 ^d |
| Pois chiche | 10 | 9,68±0,01 ^b | 0,08±0,01 ^a | 0,74±0,01 ^c | 3,65±0,01 ^{cd} | 1,43±0,01 ^d |
| | 20 | 9,99±0,01 ^{bc} | 0,20±0,01 ^e | 0,81±0,01 ^d | 3,67±0,01 ^{cd} | 1,46±0,01 ^d |
| | 30 | 10,97±0,22 ^d | 0,38±0,01 ^f | 0,99±0,01 ^g | 5,15±0,01 ^f | 4,25±0,01 ^f |
| Lentille | 10 | 10,25±0,01 ^c | 0,08±0,01 ^a | 0,69±0,01 ^b | 2,66±0,01 ^a | 1,09±0,05 ^b |
| | 20 | 11,90±0,01 ^e | 0,08±0,01 ^a | 0,87±0,01 ^e | 3,44±0,01 ^{bc} | 1,28±0,01 ^{cd} |
| | 30 | 13,95±0,01 ^g | 0,39±0,01 ^f | 1,05±0,01 ^h | 3,69±0,33 ^{cd} | 1,70±0,01 ^e |

^{a-i} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes (p > 0,05).

2.3. Taux d'expansion des pâtes sans gluten

Le taux d'expansion était significativement plus élevé pour les pâtes à base de riz (1,55) que pour les pâtes enrichies en farines de légumes secs (de 1,42 à 1,51) (tableau 14). Le taux d'expansion a diminué avec l'augmentation du taux d'incorporation de la farine de pois jaune ($r = -0,68$, $p < 0,001$) et de la farine de lentille ($r = -0,82$, $p < 0,001$). Cela peut être lié à la teneur élevée en protéines et en fibres et à la faible teneur en amidon total dans les formules utilisées (Singh *et al.*, 2007 ; Wójtowicz et Mościcki, 2014). En effet, le processus d'expansion est affecté par la gélatinisation de l'amidon et son dégradation. La structure expansée est formée par l'amidon gélatinisé, tandis qu'une structure moins expansée pourrait résulter d'une dégradation moléculaire excessive des granules d'amidon. L'augmentation de la teneur en protéines et en fibres augmenterait la viscosité de la pâte à l'intérieur de l'extrudeur, ce qui entraînerait un temps de séjour plus long et une vitesse de cisaillement plus élevée, ce qui pourrait provoquer une plus grande dégradation moléculaire des molécules d'amylopectine, ce qui conduisait à une diminution du taux d'expansion (Wang *et al.*, 2012). De plus, au cours du processus de pastification, la pâte enrichie en farines de légumes secs a tendance à être plus visqueuse que celle à base de riz et, par conséquent, la différence de pression entre la valeur générée par la filière et la pression atmosphérique serait plus petite pour les pâtes enrichies, entraînant une réduction du taux d'expansion (Singh *et al.*, 2007).

Tableau 14. Taux d'expansion des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | Taux d'expansion |
|-------------|--------------------|----------------------------|
| Riz | 0 | 1,55 ± 0,03 ^e |
| Pois jaune | 10 | 1,48 ± 0,03 ^{cd} |
| | 20 | 1,43 ± 0,01 ^{ab} |
| | 30 | 1,42 ± 0,03 ^{ab} |
| Pois chiche | 10 | 1,50 ± 0,04 ^{cd} |
| | 20 | 1,48 ± 0,04 ^{cd} |
| | 30 | 1,46 ± 0,03 ^{abc} |
| Lentille | 10 | 1,51 ± 0,03 ^d |
| | 20 | 1,47 ± 0,04 ^{bcd} |
| | 30 | 1,42 ± 0,01 ^a |

^{a-e} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

2.4. Qualité culinaire des pâtes sans gluten

2.4.1. Temps de préparation minimal

Tous les échantillons des pâtes sans gluten ont été prêts à être consommés après 8 à 9 minutes d'hydratation dans l'eau chaude sans cuisson dans l'eau en ébullition (tableau 15). Le temps de préparation minimal pour les pâtes sans gluten était plus élevé que celui rapporté par Wójtowicz et Mościcki (2014) pour les pâtes de blé tendre enrichies en farines de légumes secs (4,5 à 7 minutes) fabriquées dans les mêmes conditions. De plus, le taux d'incorporation des légumes secs n'a pas eu d'effet significatif sur le temps de préparation minimal.

Tableau 15. Temps de préparation minimal (TPM), capacité d'absorption de l'eau (CAE) et pertes à la cuisson (PC) des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | TPM (min) | CAE (g/100g) | PC(%) |
|-------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Riz | 0 | 8 ± 0,01 ^a | 181,53 ± 6,68 ^a | 3,57 ± 0,30 ^a |
| Pois jaune | 10 | 9 ± 0,01 ^a | 186,00 ± 2,35 ^a | 3,77 ± 0,15 ^{ab} |
| | 20 | 8 ± 0,01 ^a | 189,60 ± 5,22 ^{ab} | 4,20 ± 0,20 ^{abc} |
| | 30 | 8 ± 0,01 ^a | 201,33 ± 5,25 ^{bc} | 5,06 ± 0,42 ^d |
| Pois chiche | 10 | 9 ± 0,01 ^a | 194,30 ± 6,55 ^{abc} | 4,37 ± 0,21 ^{bcd} |
| | 20 | 9 ± 0,01 ^a | 202,63 ± 8,81 ^{bc} | 4,60 ± 0,20 ^{cd} |
| | 30 | 9 ± 0,01 ^a | 206,13 ± 2,25 ^c | 5,93 ± 0,06 ^e |
| Lentille | 10 | 9 ± 0,01 ^a | 181,93 ± 1,44 ^a | 3,63 ± 0,06 ^{ab} |
| | 20 | 8 ± 0,01 ^a | 182,60 ± 1,05 ^a | 4,67 ± 0,50 ^{cd} |
| | 30 | 8 ± 0,01 ^a | 191,33 ± 4,80 ^{ab} | 4,93 ± 0,25 ^{cd} |

^{a-e} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

2.4.2. Capacité d'absorption de l'eau

La capacité d'absorption de l'eau des pâtes à base de riz était de 181,53 g/100g. Une augmentation significative a été notée pour les pâtes enrichies avec 30% de farine de pois jaune (201,33 g/100g) et pour les pâtes enrichies avec 20 ou 30% de farine de pois chiche (202,63 g/100g et 206,13 g/100g respectivement). Des observations similaires ont été rapportées par Giuberti *et al.* (2015a) pour les spaghettis à base de riz enrichis avec 20

et 30% de farine d'haricots. La dénaturation des protéines des légumes secs lors de l'hydratation dans l'eau chaude a provoqué une accessibilité accrue pour les groupes d'acides aminés polaires des protéines, ce qui pourrait accroître l'affinité pour l'eau et, par conséquent, une capacité d'absorption de l'eau plus élevée (Alonso *et al.*, 2000).

En outre, la capacité d'absorption de l'eau a augmenté significativement à mesure que le taux d'incorporation de farine de pois jaune augmentait ($r = 0,84$, $p < 0,01$). Au contraire, l'ajout de farine de lentille n'a eu aucun effet significatif sur ce paramètre.

2.4.3. Pertes à la cuisson

Les pertes à la cuisson ont augmenté significativement avec l'augmentation du taux d'incorporation de la farine de pois jaune ($r = 0,90$, $p < 0,001$), de la farine de pois chiche ($r = 0,91$, $p < 0,001$) et de la farine de lentille ($r = 0,86$, $p < 0,01$). Cette augmentation des pertes à la cuisson est due à la faiblesse du réseau d'amidon par la présence de fibres, comme rapporté pour les matrices à base de gluten et les matrices sans gluten (Cabrera-Chávez *et al.*, 2012). Cependant, les valeurs obtenues des pertes à la cuisson (de 3,57% à 5,93%) est inférieure à 10% rapportée comme limite de qualité pour les pâtes, ce qui indique une bonne qualité de tous les échantillons de pâtes (Kim *et al.*, 1996 ; Wang *et al.*, 1999). La chaleur, la pression et le cisaillement mécanique appliqués lors de la cuisson-extrusion ont formé une matrice compacte et homogène de protéines et d'amidon comme confirmée par les images de microscopie électronique à balayage (figure 23). Cette matrice a été capable de maintenir l'intégrité des pâtes pendant l'hydratation dans l'eau chaude et donc de minimiser les pertes à la cuisson. En outre, les liaisons disulfures pourraient participer au mécanisme de texturation lors du processus de cuisson-extrusion et former ainsi une structure compacte dans les pâtes alimentaires (Wójtowicz et Mościcki, 2014).

2.5. Indice d'absorption de l'eau et indice de solubilité dans l'eau

L'indice d'absorption de l'eau reflète la quantité d'eau liée par le produit, tandis que l'indice de solubilité dans l'eau reflète la quantité de petites molécules solubilisées dans l'eau en fonction des dommages moléculaires causés par le procédé (Oikonomou et Krokida, 2011).

Pour l'indice d'absorption de l'eau, nous avons trouvé des valeurs allant de 4,64 g/g pour les pâtes contenant 30% de farine de pois jaune à 5,88 g/g pour les pâtes contenant 10% de farine de lentille (tableau 16). L'incorporation de 20 ou 30% de farine de pois

jaune, 30% de farine de pois chiche ou de farine de lentille a entraîné une augmentation significative de l'indice d'absorption de l'eau des pâtes par rapport aux pâtes au riz.

L'indice de solubilité dans l'eau variait de 1,14% pour les pâtes contenant 10% de farine de lentille à 3,86% pour les pâtes enrichies avec 30% de farine de pois jaune. L'indice de solubilité dans l'eau a augmenté de manière significative avec l'augmentation du taux d'incorporation de la farine de pois jaune ($r = 0,90$, $p < 0,001$), la farine de pois chiche ($r = 0,85$, $p < 0,01$) et la farine de lentille ($r = 0,92$, $p < 0,001$). L'augmentation de l'indice de solubilité dans l'eau avec addition de légumes secs peut être liée à la modification de la composition des pâtes (plus de protéines et de fibres). Cependant, les valeurs obtenues étaient inférieures à 5%, ce qui suggère un faible endommagement des composants lors de la fabrication des pâtes et de la bonne qualité des pâtes sans gluten fabriquées par les conditions choisies (Wójtowicz et Mościcki, 2014).

Tableau 16. Indice d'absorption de l'eau (IAE) et indice de solubilité dans l'eau (ISE) des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | IAE (g/g) | ISE (%) |
|-------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|
| Riz | 0 | 5,74 ± 0,02 ^{bc} | 1,86 ± 0,14 ^{ab} |
| Pois jaune | 10 | 5,36 ± 0,14 ^{abc} | 2,52 ± 0,30 ^{bc} |
| | 20 | 4,67 ± 0,26 ^a | 3,43 ± 0,29 ^{cd} |
| | 30 | 4,64 ± 0,12 ^a | 3,86 ± 0,29 ^{de} |
| Pois chiche | 10 | 5,26 ± 0,31 ^{abc} | 2,47 ± 0,59 ^{bc} |
| | 20 | 5,10 ± 0,02 ^{ab} | 2,67 ± 0,36 ^{bcd} |
| | 30 | 4,74 ± 0,36 ^a | 4,71 ± 0,29 ^e |
| Lentille | 10 | 5,88 ± 0,42 ^c | 1,14 ± 0,01 ^a |
| | 20 | 5,41 ± 0,13 ^{abc} | 2,71 ± 0,62 ^{bcd} |
| | 30 | 4,74 ± 0,44 ^a | 3,81 ± 0,73 ^{de} |

^{a-e} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

2.6. Couleur des pâtes sans gluten

2.6.1. Couleur des pâtes sèches

La couleur des pâtes est un paramètre important pour l'évaluation de la qualité des pâtes alimentaires. Les valeurs de la luminance (valeur de L^*) des pâtes sèches contenant la farine de pois jaune (entre 64,19 et 66,45) ou la farine de lentille (entre 58,77 et 66,83) ont été significativement moins élevées (c.-à-d. une couleur plus sombre) que les pâtes à base de riz (72,29) et les pâtes enrichies en farine de pois chiche (entre 69,97 et 71,61) (tableau 17). Ceci est lié à la couleur blanche de la farine de riz et à la couleur plus claire de la farine de pois chiche par rapport à la farine de pois jaune et la farine de lentille (Zhao *et al.*, 2005).

La luminance des pâtes sèches a diminué à mesure que la quantité de légumes secs dans la pâte augmentait. Cette observation est plus évidente pour les pâtes avec addition de farine de lentille ($r = -0,94$, $p < 0,001$). La diminution des valeurs de la luminance suite à l'incorporation des farines légumes secs a été rapportée par des études précédentes pour les pâtes fabriquées à base de blé dur enrichies en pois, fève, lentille et pois chiche (Zhao *et al.*, 2005 ; Wood, 2009 ; Petitot *et al.*, 2010).

Concernant les valeurs de a^* , les pâtes fabriquées à base de riz ont eu une valeur de - 4,00 indiquant une teinte dans la zone de vert. L'incorporation de 10% de farines de légumes secs n'a pas affecté les valeurs a^* des pâtes sans gluten ($p > 0,05$). Les valeurs de a^* ont augmenté (la teinte verte a diminué et la teinte rouge a augmenté) avec l'augmentation de la quantité de légumes secs. La valeur la plus élevée de a^* a été enregistrée pour les pâtes sèches enrichies en 30% de farine de lentille (2,70) et est attribuée à la couleur rouge de la variété de lentille utilisée dans la fabrication des pâtes.

Pour les valeurs de b^* , les pâtes sèches enrichies en légumes secs ont significativement plus de couleur jaune (entre 36,48 et 42,90) que les pâtes sèches à base de riz (29,25). Cette différence peut être attribuée à la couleur originale et à la présence de pigments dans les farines de légumes secs. De plus, les pâtes enrichies avec 30% de farine de pois jaune avaient la couleur jaune (valeur de b^*) la plus élevée (42,90). Cela est lié à la couleur jaune du pois utilisé dans le présent travail.

Globalement, les pâtes alimentaires sans gluten fabriquées dans notre étude avaient des valeurs de L^* et de b^* proches de celles des pâtes alimentaires à base de blé dur fabriquées par un extrudeur pilote (67,9 pour L^* et 42,7 pour b^*) (Petitot *et al.*, 2010). Pour les pâtes à base de blé fabriquées par les mêmes conditions de cuisson-extrusion, Wójtowicz et Mościcki (2014) ont trouvé des valeurs de L^* plus élevées (91,1) et des valeurs de b^* moins élevées (18,1) que les pâtes sans gluten fabriquées dans notre travail.

Tableau 17. Profil de couleur des pâtes sans gluten sèches à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | L^* | a^* | b^* |
|-------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Riz | 0 | 72,29 ± 0,81 ^f | -4,00 ± 0,33 ^a | 29,25 ± 1,22 ^a |
| Pois jaune | 10 | 66,45 ± 1,05 ^{cd} | -3,24 ± 0,88 ^{ab} | 37,41 ± 1,93 ^{bc} |
| | 20 | 64,75 ± 1,20 ^{bc} | -1,20 ± 0,84 ^c | 40,13 ± 1,15 ^d |
| | 30 | 64,19 ± 1,34 ^b | 1,28 ± 0,88 ^d | 42,90 ± 1,10 ^e |
| Pois chiche | 10 | 71,61 ± 1,53 ^{ef} | -3,74 ± 0,39 ^a | 36,54 ± 2,58 ^{bc} |
| | 20 | 70,52 ± 0,84 ^{ef} | -2,42 ± 0,36 ^b | 36,64 ± 1,33 ^{bc} |
| | 30 | 69,97 ± 1,36 ^e | -0,56 ± 0,74 ^c | 39,04 ± 1,13 ^{cd} |
| Lentille | 10 | 66,83 ± 0,90 ^d | -3,74 ± 0,39 ^a | 36,48 ± 1,73 ^b |
| | 20 | 63,92 ± 1,13 ^b | 0,40 ± 0,53 ^d | 36,62 ± 1,94 ^{bc} |
| | 30 | 58,77 ± 1,46 ^a | 2,70 ± 0,51 ^e | 37,01 ± 2,46 ^{bc} |

^{a-f} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

L^* : luminance ; a^* : (+) rouge et (-) vert ; b^* : (+) jaune et (-) bleu.

2.6.2. Couleur des pâtes hydratées

Concernant les pâtes hydratées, elles se caractérisaient par une luminance (valeur de L^*) plus élevée (entre 72,54 et 79,45), une teinte verte (valeur de a^*) plus élevée (entre -5,26 et -4,70) et une couleur jaune (valeur de b^*) plus faible (entre 13,71 et 25,41) que celles des pâtes sèches (tableau 18).

Des observations similaires ont été rapportées par des études précédentes pour les pâtes à base de blé enrichies en légumes secs (Petitot *et al.*, 2010 ; Wójtowicz et Mościcki, 2014) et pour les pâtes sans gluten à base de riz enrichies en farine d'haricot (Giuberti *et*

al., 2015a). La couleur moins jaune des pâtes hydratées peut résulter de la dégradation et de la dissolution des pigments par l'eau chaude (Giuberti *et al.*, 2015a).

Tableau 18. Profil de couleur des pâtes sans gluten hydratées à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | L* | a* | b* |
|-------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Riz | 0 | 79,07 ± 1,44 ^{de} | -5,26 ± 0,63 ^a | 13,71 ± 0,82 ^a |
| Pois jaune | 10 | 79,45 ± 1,41 ^e | -4,70 ± 0,78 ^a | 19,92 ± 1,16 ^{cd} |
| | 20 | 77,55 ± 1,05 ^{cde} | -4,86 ± 0,66 ^a | 20,66 ± 0,60 ^{de} |
| | 30 | 76,60 ± 1,60 ^c | -4,92 ± 0,44 ^a | 20,78 ± 1,07 ^{de} |
| Pois chiche | 10 | 77,73 ± 0,60 ^{cde} | -4,94 ± 0,63 ^a | 18,25 ± 0,89 ^{bc} |
| | 20 | 77,23 ± 0,55 ^{cd} | -5,05 ± 0,28 ^a | 18,35 ± 1,76 ^{bc} |
| | 30 | 77,15 ± 0,87 ^{cd} | -5,10 ± 0,53 ^a | 20,24 ± 0,93 ^d |
| Lentille | 10 | 76,04 ± 1,78 ^{bc} | -5,26 ± 0,34 ^a | 18,11 ± 1,33 ^b |
| | 20 | 74,31 ± 1,73 ^{ab} | -5,16 ± 0,90 ^a | 22,36 ± 1,56 ^e |
| | 30 | 72,54 ± 2,20 ^a | -5,02 ± 0,80 ^a | 25,41 ± 1,55 ^f |

^{a-f} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

L* : luminance ; a* : (+) rouge et (-) vert ; b* : (+) jaune et (-) bleu.

2.7. Texture des pâtes sans gluten

2.7.1. Dureté des pâtes sèches et des pâtes hydratées

Le tableau 19 montre que la dureté des pâtes sèches est significativement plus élevée pour les pâtes à base de riz (12,12 N) que pour les pâtes enrichies en farines de légumes secs (entre 2,73 et 4,94 N). Des observations similaires ont été notées pour la dureté des pâtes hydratées (0,44 N pour les pâtes à base de riz et entre 0,21 et 0,40 N pour les pâtes enrichies en farines de légumes secs). Les mêmes tendances ont été observées par Wójtowicz et Mościcki (2014) pour les pâtes de blé tendre enrichies en farines de légumes secs en utilisant le même instrument de mesure de texture. Cette diminution de la dureté des pâtes enrichies en légumes secs peut être liée aux fractions de fibres provenant de la farine de légumes secs qui peuvent entraîner la formation de fissures ou de discontinuités à l'intérieur du brin de pâtes ce qui affaiblissent la structure des pâtes (Petitot *et al.*, 2010).

Tableau 19. Dureté des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | Dureté des pâtes sèches (N) | Dureté des pâtes hydratées (N) |
|-------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Riz | 0 | 12,12 ± 1,41 ^c | 0,44 ± 0,02 ^c |
| Pois jaune | 10 | 2,73 ± 0,34 ^a | 0,21 ± 0,01 ^a |
| | 20 | 4,17 ± 0,86 ^{ab} | 0,28 ± 0,02 ^b |
| | 30 | 3,78 ± 0,49 ^{ab} | 0,26 ± 0,01 ^b |
| Pois chiche | 10 | 3,76 ± 0,47 ^{ab} | 0,27 ± 0,02 ^b |
| | 20 | 4,33 ± 0,88 ^{ab} | 0,27 ± 0,04 ^b |
| | 30 | 4,94 ± 0,86 ^b | 0,26 ± 0,02 ^{ab} |
| Lentille | 10 | 4,64 ± 0,90 ^b | 0,33 ± 0,03 ^c |
| | 20 | 4,18 ± 0,82 ^{ab} | 0,40 ± 0,04 ^d |
| | 30 | 4,49 ± 0,70 ^b | 0,30 ± 0,01 ^{bc} |

^{a-d} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

2.7.2. Fermeté et adhésivité des pâtes hydratées

La fermeté des pâtes à base de riz est de 199,50 N. L'incorporation de farines de légumes secs dans les pâtes a augmenté significativement la fermeté des pâtes hydratées (entre 260 et 326,50 N), à l'exception des pâtes enrichies avec 20 et 30% de farine de pois chiche (207 N) (tableau 20). Bahnassey et Khan (1986), Zhao *et al.* (2005) et Petitot *et al.* (2010) ont rapporté des observations similaires pour les pâtes à base de blé dur enrichies en légumes secs. Cette augmentation de la fermeté peut être liée à la teneur élevée en protéines pour les pâtes enrichies par rapport aux pâtes à base de riz (Petitot *et al.*, 2010).

Concernant l'adhésivité des pâtes hydratées, elle a augmenté significativement suite à l'incorporation des farines de légumes secs. L'adhésivité a passé de 2,48 mJ pour les pâtes à base de riz à plus de 11 mJ pour les pâtes contenant des farines de légumes secs. L'adhésivité des pâtes hydratées augmentait à mesure que la quantité de légume sec augmentait. Cette constatation est plus marquée pour les pâtes contenant la farine de lentille ($r = 0,84$, $p < 0,05$). Cette augmentation de l'adhésivité pourrait être due à une teneur en fibres plus élevée et/ou à une plus grande solubilité des composés lessivés à

partir de pâtes enrichies lors de l'hydratation à l'eau chaude, comme cela a été démontré pour les résultats des pertes à la cuisson et l'indice d'absorption de l'eau.

Tableau 20. Fermeté et adhésivité des pâtes sans gluten hydratées à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | Fermeté (N) | Adhésivité (mJ) |
|-------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|
| Riz | 0 | 199,50 ± 0,71 ^a | 2,48 ± 0,13 ^a |
| Pois jaune | 10 | 263,50 ± 3,43 ^c | 11,17 ± 2,80 ^b |
| | 20 | 286,50 ± 2,02 ^{cd} | 16,89 ± 1,24 ^b |
| | 30 | 260,00 ± 8,38 ^{bc} | 17,18 ± 2,20 ^b |
| Pois chiche | 10 | 277,50 ± 8,99 ^{bcd} | 15,20 ± 0,97 ^b |
| | 20 | 207,00 ± 0,01 ^{ab} | 16,84 ± 2,06 ^b |
| | 30 | 207,00 ± 5,66 ^a | 17,56 ± 4,17 ^b |
| Lentille | 10 | 312,50 ± 3,43 ^{cd} | 13,35 ± 0,10 ^b |
| | 20 | 289,00 ± 8,49 ^{cd} | 17,22 ± 0,06 ^b |
| | 30 | 326,50 ± 6,36 ^d | 19,28 ± 3,76 ^b |

^{a-d} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

2.8. Profil sensoriel et acceptabilité sensorielle globale des pâtes sans gluten

Le tableau 21 présente le profil sensoriel et l'acceptabilité sensorielle globale des pâtes sans gluten après hydratation dans l'eau chaude. Tous les échantillons de pâtes ont obtenu des notes allant d'acceptables (note = 3) à bonnes (notes = 4) pour l'apparence (entre 3,87 et 4,47), la couleur (entre 3,27 et 4,40), la flaveur (entre 2,93 et 4,27), le goût (entre 3,13 et 4,27) et l'adhésivité (entre 3,40 et 4,40).

L'ajout de légumes secs n'a pas eu un effet significatif sur les notes attribuées aux pâtes sans gluten. Pour la couleur, les pâtes contenant 30% de pois jaune ont reçu les notes les plus élevées pour la couleur par rapport aux pâtes à base de riz ($p < 0,05$). Ce résultat est confirmé par la mesure de la couleur et attribué à la couleur jaune du pois utilisé dans notre étude. Par ailleurs, des différences légères ont été enregistrées pour les notes attribuées aux pâtes sans gluten pour la flaveur et le goût.

Tableau 21. Profil sensoriel et acceptabilité sensorielle globale (ASG) des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (g/100 g) | Apparence | Couleur | Flaveur | Goût | Adhésivité | ASG |
|-------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Riz | 0 | 4,00±1,13 ^a | 3,27±1,16 ^a | 3,93±1,03 ^{ab} | 3,93±1,03 ^{ab} | 4,13±0,92 ^a | 6,53±1,51 ^a |
| Pois jaune | 10 | 4,40±0,74 ^a | 4,13±0,92 ^{ab} | 3,40±0,12 ^{ab} | 3,73±0,59 ^{ab} | 4,27±0,70 ^a | 5,67±1,50 ^a |
| | 20 | 4,04±0,80 ^a | 3,93±0,88 ^{ab} | 2,93±0,88 ^b | 3,60±0,63 ^{ab} | 3,73±1,16 ^a | 5,13±1,68 ^a |
| | 30 | 4,20±1,01 ^a | 4,40±0,63 ^b | 2,93±1,03 ^b | 3,13±1,25 ^a | 4,20±1,08 ^a | 5,07±1,87 ^a |
| Pois chiche | 10 | 4,47±0,64 ^a | 3,67±0,82 ^{ab} | 3,60±0,74 ^{ab} | 3,73±1,10 ^{ab} | 4,40±0,74 ^a | 6,07±1,22 ^a |
| | 20 | 4,27±0,80 ^a | 4,07±0,80 ^{ab} | 4,13±0,99 ^a | 3,60±1,30 ^{ab} | 4,13±0,83 ^a | 5,87±2,23 ^a |
| | 30 | 3,87±0,64 ^a | 4,07±0,59 ^{ab} | 3,33±0,90 ^{ab} | 3,20±0,86 ^{ab} | 3,40±0,83 ^a | 5,33±1,18 ^a |
| Lentille | 10 | 4,27±0,80 ^a | 3,73±0,80 ^{ab} | 4,27±0,80 ^a | 4,13±0,99 ^{ab} | 4,33±0,62 ^a | 6,40±1,76 ^a |
| | 20 | 4,40±0,74 ^a | 4,13±0,74 ^{ab} | 4,13±0,83 ^a | 4,13±0,93 ^{ab} | 4,00±0,93 ^a | 6,33±1,68 ^a |
| | 30 | 4,07±0,96 ^a | 3,67±1,05 ^{ab} | 3,87±0,83 ^{ab} | 4,27±0,59 ^b | 4,07±0,88 ^a | 6,00±1,13 ^a |

^{a - b} : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

En ce qui concerne l'acceptabilité sensorielle globale, toutes les pâtes alimentaires sans gluten (quelque soit le légume sec et son taux d'incorporation) ont obtenu des scores acceptables (valeurs supérieures à 5 allant de 5,07 à 6,53). En plus, nous avons remarqué que l'acceptabilité sensorielle globale a diminué avec l'augmentation du taux d'incorporation des farine de légumes secs, bien que cette diminution n'a pas été significative ($p > 0,05$).

2.9. Microstructure des pâtes sans gluten

2.9.1. Microstructure des pâtes sèches

Au cours des observations des pâtes sans gluten sèches par microscopie électronique à balayage, les pâtes à base de riz présentaient une surface lisse ondulée (figure 27a). Nous avons remarqué que la microstructure de la surface des pâtes sans gluten a été influencée par le type de farine de légumes sec incorporée. Les échantillons de pâtes contenant du pois jaune présentaient une surface rugueuse et ondulée (figure 27b, c et d). Les pâtes enrichies en pois chiche ont démontré une surface ondulée (figure 27e, f et g)

et cette surface semble être lisse à un grossissement élevé ($\times 600$), probablement en raison de la teneur élevée en matières grasses dans la farine de pois chiche (6,22%) qui agit comme lubrifiant lors de la fabrication et la formation des brins de pâtes. Pour les échantillons de pâtes enrichies en farine de lentille, ils avaient une surface rugueuse mais non ondulée (figure 27h, i et j).

La quantité et le type de farine de légumes secs n'a pas affecté la microstructure en coupe transversale qui a révélé pour tous les pâtes sans gluten une structure intérieure compacte presque homogène avec une matrice protéines-amidon et peu d'agrégats visibles à un grossissement élevé (figure 28). Cette structure est attribuée à l'effet du procédé de cuisson-extrusion qui a provoqué la gélatinisation de l'amidon et la structure cohérente (Wójtowicz et Mościcki, 2009 ; Wójtowicz, 2011), soutenant les faibles pertes à la cuisson et de l'indice de solubilité dans l'eau obtenues dans notre étude.

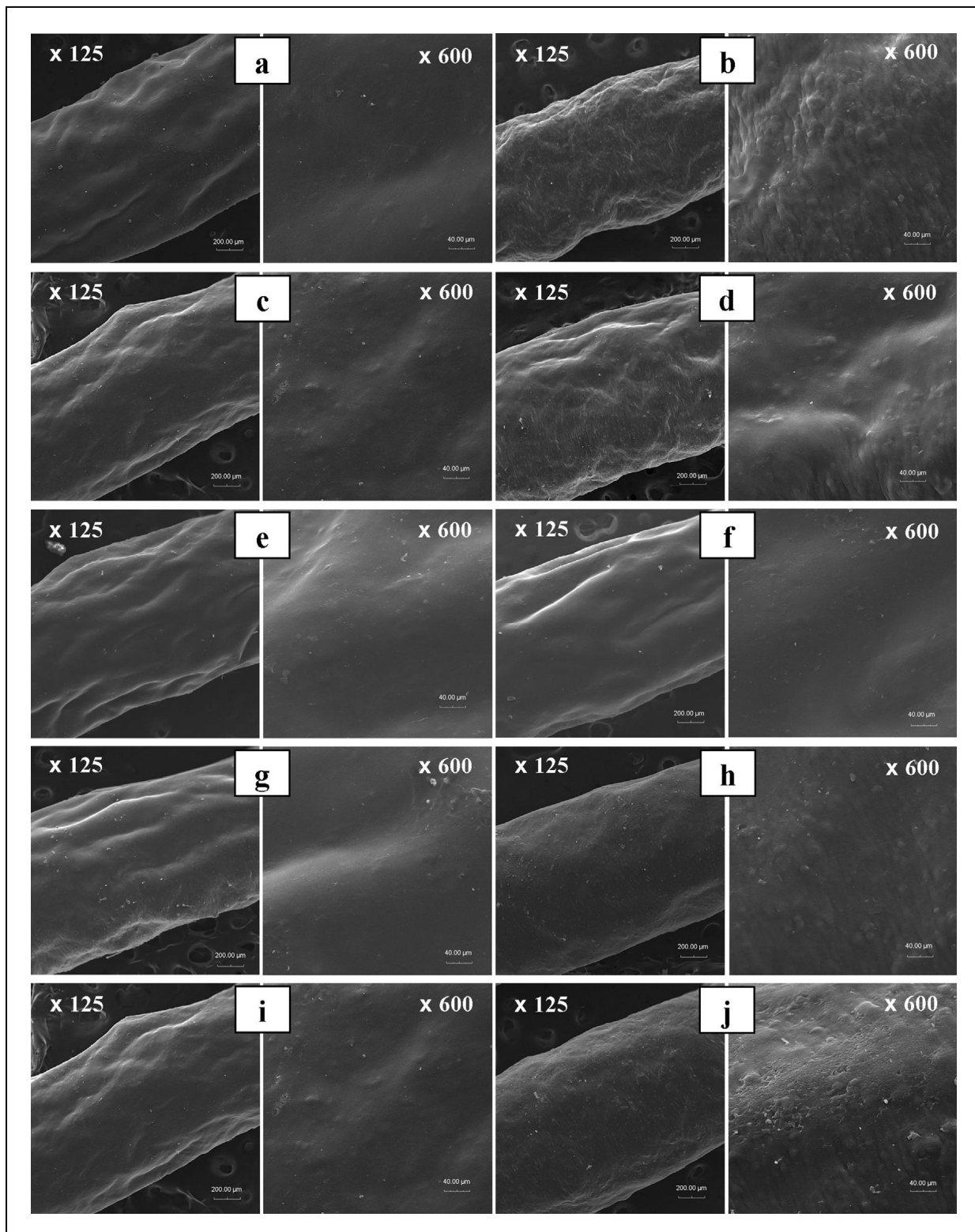


Figure 27. Surface des pâtes sans gluten sèches aux différents grossissements. a : pâtes à base de riz ; b, c, d : pâtes enrichies avec le pois jaune (10%, 20% et 30% respectivement) ; e, f, g : pâtes enrichies avec le pois chiche (10%, 20% et 30% respectivement) ; h, i, j : pâtes enrichies avec la lentille (10%, 20% et 30% respectivement)

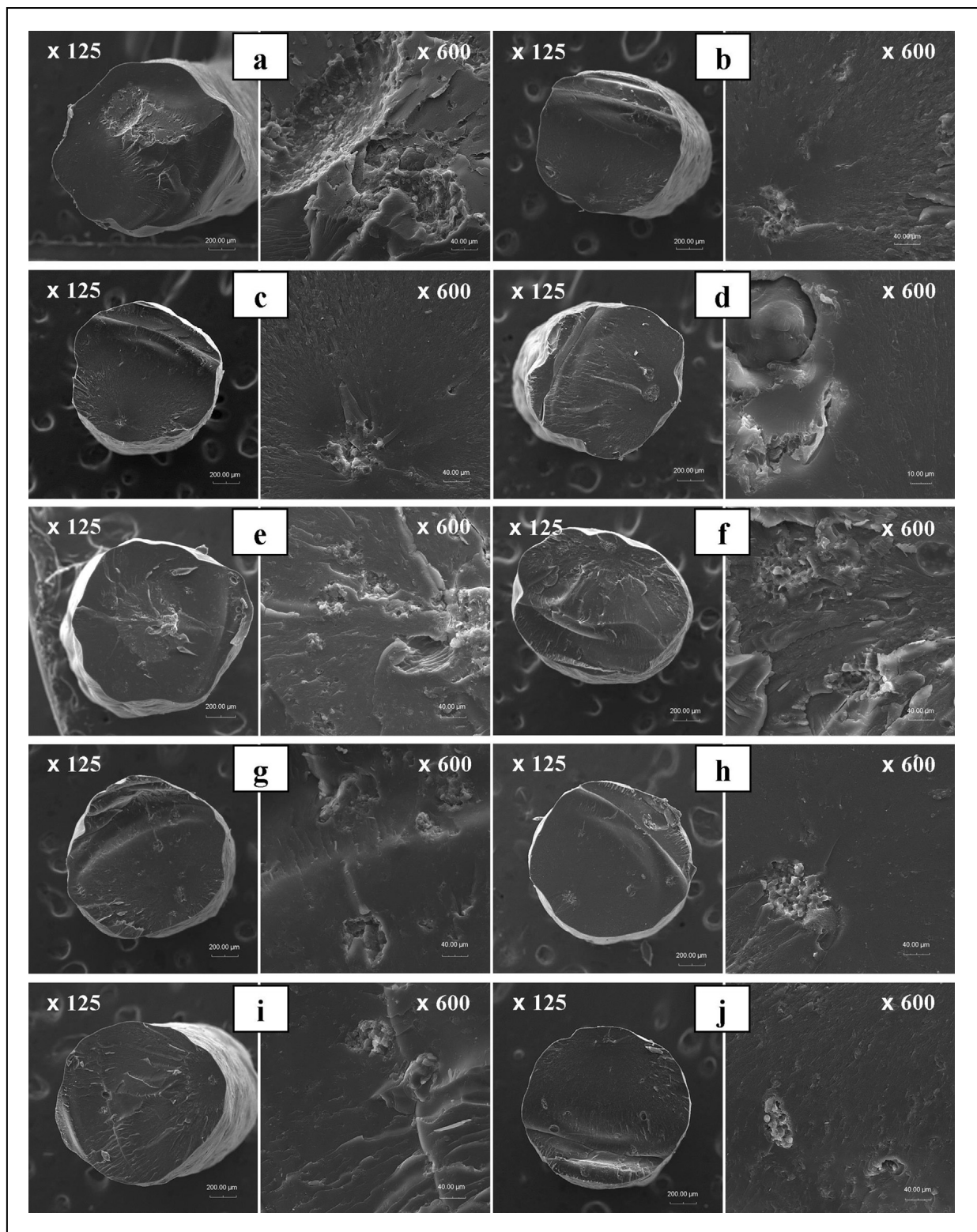


Figure 28. Coupe transversale des pâtes sans gluten sèches aux différents grossissements.
 a : pâtes à base de riz ; b, c, d : pâtes enrichies avec le pois jaune (10%, 20% et 30% respectivement) ; e, f, g : pâtes enrichies avec le pois chiche (10%, 20% et 30% respectivement) ; h, i, j : pâtes enrichies avec la lentille (10%, 20% et 30% respectivement)

2.9.2. Microstructure des pâtes hydratées

Après l'hydratation des pâtes dans l'eau chaude, la surface des pâtes sans gluten a devenue lisse, mais observée à un grossissement élevé, a présenté un mélange de surface continue et non continue (figure 29a et b), probablement en raison de la lixiviation de composés à partir de la surface des pâtes dans l'eau chaude.

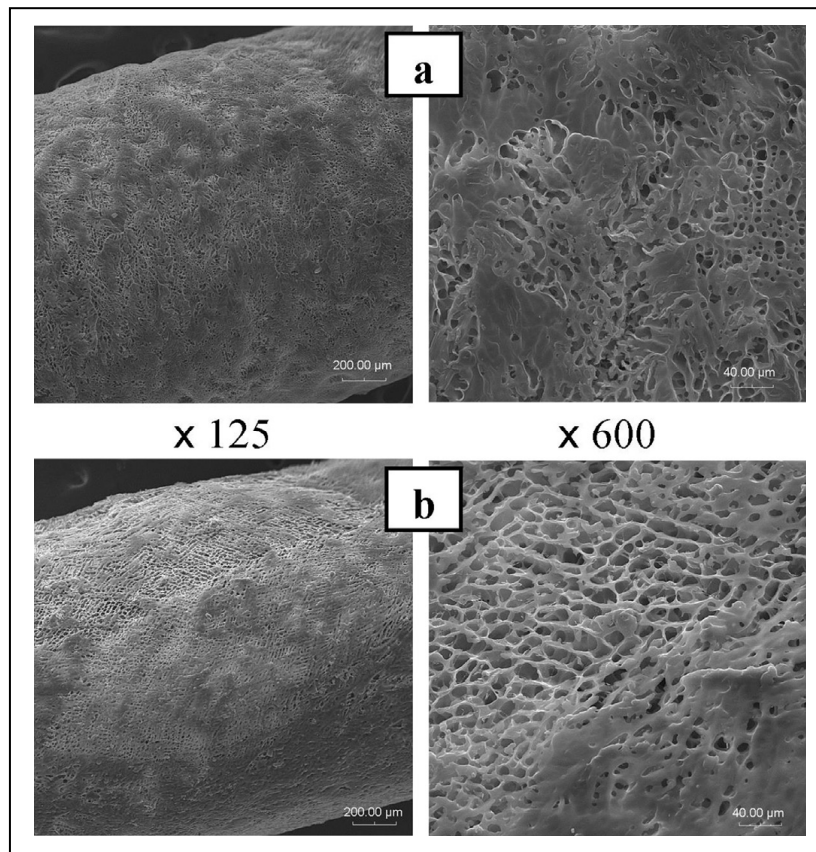


Figure 29. Surface des pâtes sans gluten hydratées : pâtes à base de riz (a) et pâtes enrichies avec 30% de pois chiche (b)

La figure 30 présente la microstructure transversale des pâtes hydratées. Le diamètre du brin de pâtes devient plus grand en raison de l'absorption de l'eau et l'intérieur révèle une structure spongieuse mais uniforme pour les pâtes à base de riz et les pâtes contenant 30% de farine de pois chiche.

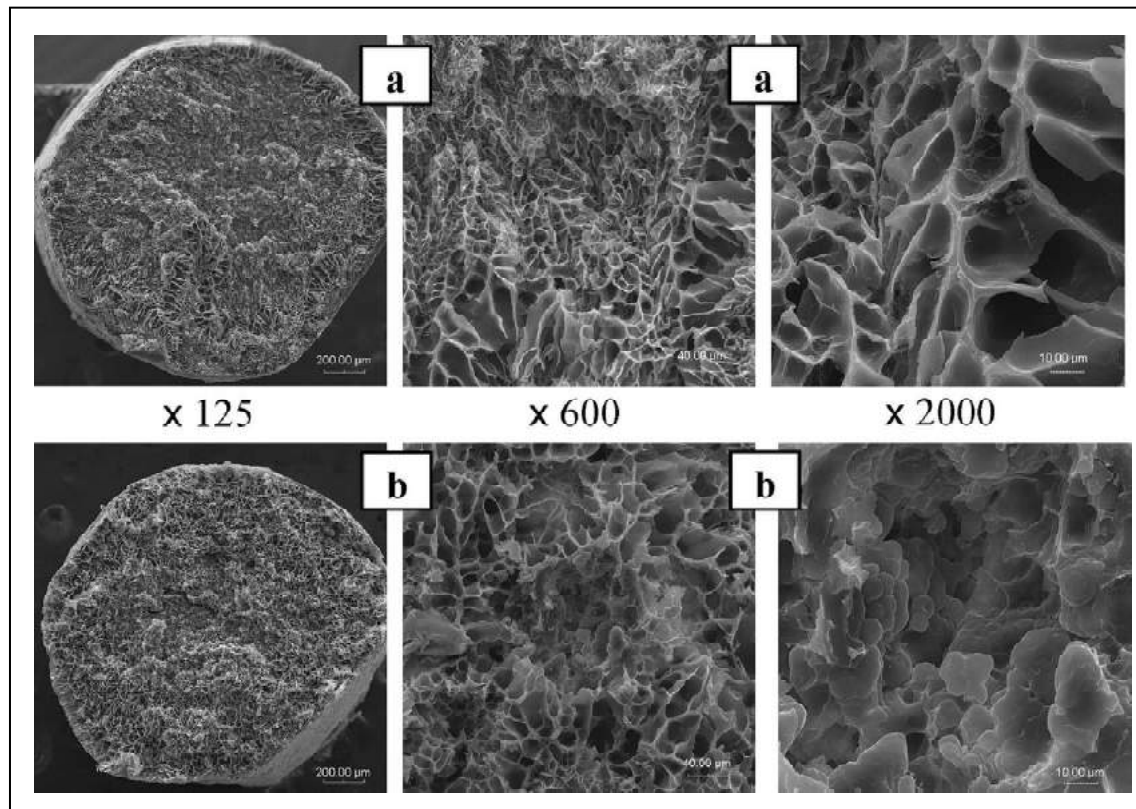


Figure 30. Coupe transversale des pâtes sans gluten hydratées : pâtes à base de riz (a) et pâtes enrichies avec 30% de pois chiche (b)

Partie 3. Effet des conditions de la cuisson-extrusion et de la variation de la formulation sur le rendement du procédé et la consommation d'énergie pendant la fabrication des pâtes alimentaires à base des formules riz-légumes secs

3.1. Effet des conditions de la cuisson-extrusion sur le rendement du procédé et l'énergie mécanique spécifique

3.1.1. Effet sur le rendement

Au cours de la fabrication des pâtes sans gluten à base de la formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1), le rendement du procédé variait de 10,56 kg/h (pour les pâtes sans gluten fabriquées à une teneur en eau de 28% et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min) à 16,80 kg/h (pour les pâtes sans gluten fabriquées avec une teneur en eau de 28% et une vitesse de rotation de la vis de 100 tr/min).

Le rendement du procédé de cuisson-extrusion a augmenté avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la vis ($r = 0,78$, $p < 0,0001$) (figure 31). Cette dernière a eu un effet hautement significatif ($p < 0,001$) sur le rendement comme montré par l'analyse de la variance à deux facteurs.

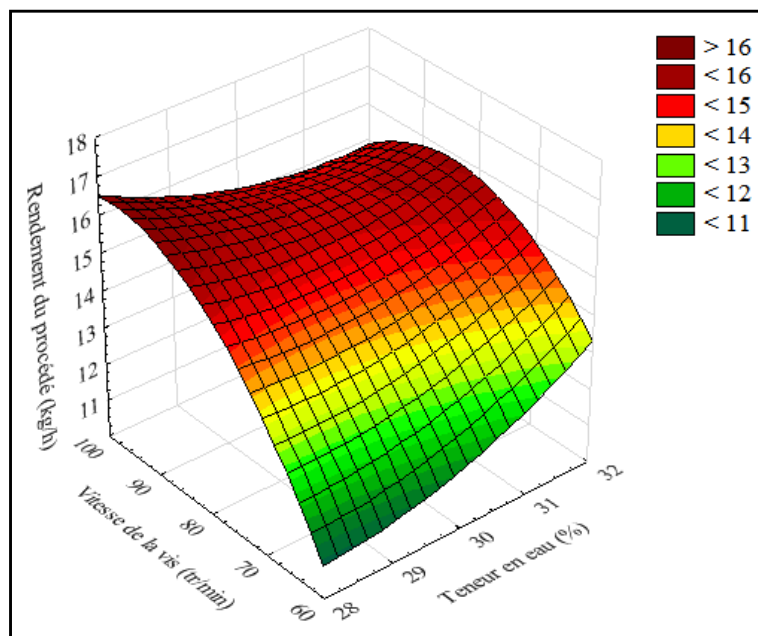


Figure 31. Surface de réponses obtenue pour le rendement du procédé durant la fabrication des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

La teneur en eau a également eu un effet très significatif ($p < 0,01$) sur le rendement lors de la fabrication des pâtes à base de la formule riz-pois jaune. À des vitesses faibles de rotation de la vis, le rendement a augmenté avec l'augmentation de la teneur en eau.

3.1.2. Effet sur l'énergie mécanique spécifique

L'énergie mécanique spécifique (EMS) obtenue pendant la fabrication des pâtes sans gluten à base de la formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1) variaient de 0,14 à 0,35 kWh/kg. La valeur la plus élevée de l'EMS est notée pour les pâtes fabriquées avec une teneur en eau de 30% à 100 tr/min et la valeur la plus basse de l'EMS est notée pour les pâtes fabriquées avec une teneur en eau de 32% à 60 tr/min.

Les résultats de l'analyse de la variance à deux facteurs ont mis en évidence un effet hautement significatif ($p < 0,001$) de la vitesse de rotation de la vis sur l'EMS. Les valeurs de ce paramètre ont augmenté avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la vis ($r = 0,96$, $p < 0,0001$) (figure 32). Des résultats similaires ont été rapportés par Wójtowicz et Mościcki (2008) pour les pâtes à base de blé tendre et par Kręcisz (2016) pour les gruaux de maïs instantanés.

La teneur en eau a eu également un effet très significatif ($p < 0,01$) sur l'EMS lors de la fabrication des pâtes à base de la formule riz-pois jaune. L'EMS a diminué légèrement avec l'augmentation de la teneur en eau. Des observations similaires ont été rapportées dans la littérature (Ryu et Ng, 2001 ; Wójtowicz et Mościcki, 2008 ; Merayo *et al.*, 2011 ; Giménez *et al.*, 2013). Ce phénomène est lié à l'effet lubrifiant causé par la teneur en eau élevée, ce qui entraîne moins de contraintes de frottement et de cisaillement à l'intérieur de l'extrudeur et, par conséquent, moins d'énergie transférée (Pérez *et al.*, 2008 ; Duarte *et al.*, 2009).

L'analyse de la variance à deux facteurs a montré aussi un effet hautement significatif ($p < 0,001$) de l'interaction teneur en eau-vitesse de rotation de la vis sur le rendement du procédé et sur l'EMS.

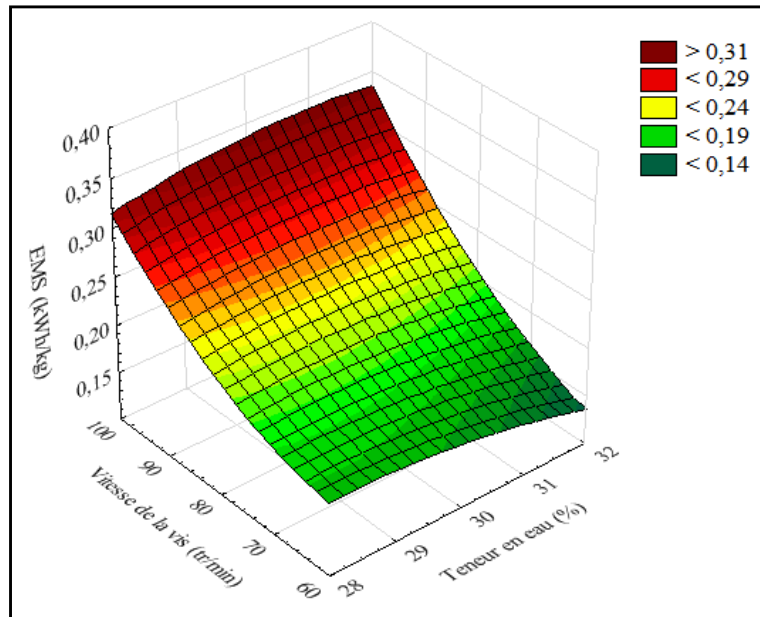


Figure 32. Surface de réponses obtenue pour l’EMS durant la fabrication des pâtes à base de la formule riz-pois jaune

3.2. Effet de la variation de la formulation sur le rendement du procédé et l’énergie mécanique spécifique

Le tableau 23 présente les valeurs du rendement du procédé et de l’EMS obtenues lors de la fabrication des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs. L’augmentation de la quantité de légumes secs dans les formules n’a pas affecté de manière significative le rendement qui variait de 12 à 12,96 kg/h (tableau 22).

Nous avons remarqué aussi que l’augmentation du taux d’incorporation des farines de légumes secs n’a pas affecté significativement les valeurs de l’EMS qui variait de 0,25 à 0,27 kWh/kg. Ces valeurs sont incluses dans l’intervalle obtenu par Wójtowicz et Mościcki (2014) pour les pâtes fabriquées par cuisson-extrusion à partir de farine de blé tendre enrichies en farines d’haricot, de pois jaune ou de lentille (entre 0,22 et 0,30 kWh/kg). Cependant, les valeurs de l’EMS que nous avons obtenu sont supérieures à celles obtenues par Wójtowicz et Mościcki (2014) pour les pâtes à base de blé tendre fabriquées par cuisson-extrusion (0,18 kWh/kg) et largement supérieures à celles obtenues par Abecassis *et al.* (1994) pour les pâtes à base de blé dur fabriquées par un extrudeur mono-vis conventionnel à une température ne dépassant pas 50°C et une vitesse de rotation de la vis de 15 à 30 tr/min (0,01 à 0,03 kWh/kg).

En outre, les valeurs de l'EMS obtenues sont aussi supérieures à celles rapportées dans la littérature lors de la fabrication des pâtes sans gluten. Giménez *et al.* (2013) ont trouvée une EMS de l'ordre de 0,023 kWh/kg pour les pâtes à base d'une formule maïs-fève (70/30) par cuisson-extrusion à une teneur en eau de 28%, une température de 100°C et une vitesse de rotation de la vis de 60 tr/min. Merayo *et al.* (2011) ont obtenu des valeurs de l'EMS de 0,072 et 0,08 kWh/kg pour les pâtes à base de maïs (doux et dur respectivement) par cuisson-extrusion à une teneur en eau de 31%, une température de 100°C et une vitesse de rotation de la vis de 100 tr/min.

Tableau 22. Rendement du procédé (Q) et énergie mécanique spécifique (EMS) des pâtes sans gluten à base de riz et celles enrichies en légumes secs

| Pâtes | Quantité (%) | Q (kg/h) | SME (kWh/kg) |
|-------------|--------------|--------------------|-------------------|
| Riz | 0 | 12,48 ^a | 0,26 ^a |
| Pois jaune | 10 | 12,00 ^a | 0,27 ^a |
| | 20 | 12,00 ^a | 0,27 ^a |
| | 30 | 12,48 ^a | 0,26 ^a |
| Pois chiche | 10 | 12,00 ^a | 0,27 ^a |
| | 20 | 12,00 ^a | 0,27 ^a |
| | 30 | 12,00 ^a | 0,27 ^a |
| Lentille | 10 | 12,00 ^a | 0,27 ^a |
| | 20 | 12,96 ^a | 0,25 ^a |
| | 30 | 12,00 ^a | 0,27 ^a |

^a : les moyennes avec le même exposant dans une colonne ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

CONCLUSION

Conclusion

Le premier objectif de la thèse était de d'étudier l'effet de la teneur en eau de la formule (28%, 30% et 32%) et de la vitesse de rotation de la vis du cuiseur-extrudeur (60, 80 et 100 tr/min) sur certains paramètres de qualité des pâtes alimentaires sans gluten fabriquées à partir d'une formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1). Cette formule est caractérisée par des teneurs plus élevées en protéines (13,11%), en cendres (1,88%) et en fibres alimentaires (1,89%) en comparaison avec la farine de riz seul.

La teneur en eau de la formule et la vitesse de rotation de la vis ont eu des effets significatifs sur les paramètres de qualité des pâtes évalués dans notre étude :

- l'augmentation de la teneur en eau a causé une augmentation de la capacité d'absorption de l'eau, des pertes à la cuisson, de l'adhésivité des pâtes hydratées et des scores de l'acceptabilité sensorielle globale. Au contraire, la diminution de la teneur en eau a entraîné une augmentation des caractéristiques de viscosité, de la dureté des pâtes sèches et des pâtes hydratées.
- l'augmentation de la vitesse de rotation de la vis a causé une augmentation de certaines caractéristiques de la viscosité (température de gélatinisation, viscosité initiale, viscosité maximale et viscosité finale), la dureté et l'adhésivité des pâtes hydratées et les scores de l'acceptabilité sensorielle globale. Au contraire, la diminution de la vitesse de rotation de la vis a entraîné une augmentation de la capacité d'absorption de l'eau.

En outre, les conditions de fabrication ont eu un effet sur la microstructure de la surface et de la section transversale des pâtes sans.

A partir des résultats obtenus, nous avons pu choisir les conditions préférables de fabrication des pâtes sans gluten à base de la formule citée ci-dessus à l'aide du cuiseur-extrudeur utilisé dans notre travail. Une teneur en eau de la formule de 30% avec une vitesse de rotation de la vis de 80 tr/min ont permis de fabriquer des pâtes alimentaires sans gluten présentant des propriétés adéquates : un temps de préparation minimal court (7 min), des pertes à la cuisson faibles (5,3%), une texture ferme (259,5 N), une adhésivité faible (6,35 mJ) et une structure interne régulière et compacte avec le score le plus élevé (7,6) pour l'acceptabilité sensorielle globale. En addition, ces pâtes alimentaires étaient caractérisées par la présence de 8 acides phénoliques (2559,09 ng/g) et une activité anti-radicalaire faible (15,31%).

Le deuxième objectif de la thèse était l'étude de l'effet du type de légume sec (pois jaune, pois chiche et lentille corail) et son taux d'incorporation (10, 20 ou 30%) sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten. L'enrichissement des pâtes à base de riz en légumes secs a augmenté la teneur en protéines, en cendres et en fibres alimentaires.

Le type de légume sec et le taux d'incorporation ont eu un impact sur les caractéristiques de qualité évaluées dans notre travail. Par rapport aux pâtes à base de riz seul, l'addition de farines de légumes secs a diminué le taux d'expansion et la dureté des pâtes sèches et des pâtes hydratées. Au contraire, l'incorporation de farines de légumes secs a augmenté la capacité d'absorption de l'eau, les pertes à la cuisson (sans dépasser 6%), la fermeté et de l'adhésivité. Par ailleurs, les pâtes enrichies en légumes secs ont été caractérisées par une couleur plus couleur jaune que celles à base de riz, et ont reçu des scores acceptables pour l'acceptabilité sensorielle globale (> 5). La microstructure a mis en évidence une structure intérieure compacte et homogène.

Les formules utilisées contenant jusqu'à 30% de farines de légumes secs peuvent être utilisées avec succès pour la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten de bonne qualité par la technique de cuisson-extrusion.

Le troisième objectif de la thèse était de déterminer l'effet de la variation des conditions de fabrication (teneur en eau et vitesse de rotation de la vis) et de la formulation (type du légume sec et son taux d'incorporation) sur le rendement du procédé et la consommation d'énergie lors de la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten à base des formules riz-légumes secs. A partir des résultats obtenus, nous avons pu ressortir les conclusions suivantes :

- selon les conditions de fabrication, le rendement du procédé a varié entre 10,56 et 16,80 kg/h, et l'énergie mécanique spécifique a varié entre 0,14 et 0,35 kWh/kg.
- la teneur en eau a montré un effet très significatif sur le rendement du procédé et l'énergie mécanique spécifique principalement à faible vitesse de rotation de la vis. L'augmentation de la teneur en eau a entraîné une augmentation du rendement du procédé et une diminution de l'énergie mécanique spécifique.
- la vitesse de rotation de la vis a eu un impact hautement significatif sur le rendement du procédé et sur l'énergie mécanique spécifique lors de la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten. Les valeurs des deux paramètres ont augmenté avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la vis.

- l'incorporation de farine de légumes secs jusqu'à 30% dans les formules n'a pas affecté le rendement du procédé (valeurs entre 12 et 12,96 kg/h) et l'énergie mécanique spécifique (valeurs entre 0,25 et 0,27 kWh/kg) lors de la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten à base des formules de riz-légumes secs.

En perspectives, il serait intéressant d'élargir ce travail à :

- l'étude de l'aptitude à la pastification sans gluten d'autres formules.
- l'utilisation d'un cuiseur-extrudeur bi-vis pour la pastification sans gluten.
- l'étude des organisations et/ou réorganisations moléculaires de l'amidon induites par le traitement et leur impact sur la qualité des pâtes alimentaires.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

AACC (1995). Approved methods of the American Association of Cereal Chemists. 9th edition St. Paul, Minn., USA. American Association of Cereal Chemists International.

AACC (2000). Approved methods of the American Association of Cereal Chemists. 10th edition. St. Paul, Minn., USA. American Association of Cereal Chemists International.

Abdel-Aal E.-S. M., Hucl P., Chibbar R. N., Han H. L., & Demeke T. (2002). Physicochemical and structural characteristics of flours and starches from waxy and non waxy wheats. *Cereal Chemistry*, 79, 458–464.

Abecassis J., Faure J., & Feillet P. (1989). Improvement of cooking quality of maize pasta products by heat treatment. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 47, 475–485.

AFNOR (Association Française de Normalisation) (1991). Recueil des normes de contrôle de qualité des produits alimentaires. Céréales et produits céréaliers. 3^{ème} édition, Paris, 360 p.

Ainsworth P. & Ibanoglu S. (2006). Extrusion (pp 251-269). In : Food processing handbook (Brennan J. G., editor). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 582 p.

Alamprese C., Casiraghi E., & Pagani M. A. (2007). Development of gluten-free fresh egg pasta analogues containing buckwheat. *European Food Research Technology*, 225, 205–213.

Alonso R., Aguirre A., & Marzo F. (2000). Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chemistry*, 68, 159–165.

Alvarez-Jubete L., Arendt E. K., & Gallagher E. (2010). Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science and Technology*, 21, 106–113.

AOAC. (2000). Official methods of AOAC International (17th ed.). Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists International.

Asif M., Rooney I. W., Ali R., & Riaz M. N. (2013). Application and opportunities of pulses in food system: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53, 1168–1179.

Baek J.-J. & Lee S. (2014). Functional characterization of brown rice flour in an extruded noodle system. *Journal of Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 57, 435–440.

- Bahnassey Y., & Khan K. (1986). Fortification of spaghetti with edible legumes. II. Rheological, processing and quality evaluation studies. *Cereal Chemistry*, 63, 216–219.
- Barbiroli A., Bonomi F., Casiraghi M. C., Iametti S., Pagani M. A., & Marti A. (2013). Process conditions affect starch structure and its interactions with proteins in rice pasta. *Carbohydrates Polymers*, 92, 1865–1872.
- Benatallah L. (2009). Couscous et pain sans gluten pour malades cœliaques : aptitude technologique de formules à base de riz et de légumes secs. Thèse de Doctorat, INATAA, Université des Frères Mentouri, Constantine, 158 p.
- Benatallah L., Agli A., & Zidoune M. N. (2008). Gluten-free couscous preparation: traditional procedure description and technological feasibility for three rice-leguminous supplemented formulae. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 6, 105–112.
- Benkadri S. (2010). Contribution à la diversification de l'alimentation pour enfants cœliaques : fabrication de farines-biscuits sans gluten. Mémoire de magistère, INATAA, Université des Frères Mentouri, Constantine, 88 p.
- Betrouche A. (2015). *Rechta* sans gluten à base d'une formule riz-pois protéagineux : effet du blanc d'œuf sur l'aptitude technologique et optimisation du procédé. Mémoire de magistère, INATAA, Université des Frères Mentouri, Constantine, 77 p.
- Borges J. T., Ramirez Acheri J. L., Ramirez Ascheri D., Do Nascimento R. E., & Freitas A. S. (2003). Cooking properties and physico-chemical characterization of precooked macaroni of whole quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) flour and rice (*Oryza sativa* L.) flour by extrusion cooking. *Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, 21, 303–322.
- Boucheham N. (2009). Aptitude technologique de trois formules à base de riz pour la fabrication de couscous sans gluten. Mémoire de magistère, INATAA, Université des Frères Mentouri, Constantine, 83 p.
- Boulemkahel S. (2014). Panification sans gluten à base de riz et féverole : effet améliorant d'une adjonction combinée HPMC-Xanthane. Mémoire de magistère, INATAA, Université des Frères Mentouri, Constantine, 100 p.
- Bouziane K. (2014). Pâtes sans gluten pour malades cœliaques algériens : comportement rhéologique et aptitudes culinaire de pâtes liquide : type crêpe. Mémoire de magistère, INATAA, Université des Frères Mentouri, Constantine, 76 p.
- Bruneel C., Pareyt B., Brijs K., & Delcour J. (2010). The impact of the protein network on the pasting and cooking properties of dry pasta products. *Food Chemistry*, 120, 371–378.
- Bustos M. C., Perez G. T., & León, A. E. (2011). Sensory and nutritional attributes of fibre-enriched pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1429–1434.

- Cabrera-Chávez F., Calderón de la Barca A. M., Islas-Rubio A. R., Marti A., Marengo M., Pagani M. A., Bonomi F., & Iametti S. (2012). Molecular rearrangements in extrusion processes for the production of amaranth-enriched, gluten-free rice pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 47(2), 421–426.
- Camire M. E. (2001). Extrusion et qualité nutritionnelle (111–136). In : La cuisson-extrusion, RIA Editions - série agroalimentaire, Dunod, Paris, 218 p.
- Camire M. E., Camire A., & Krumhar K. (1990). Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 29, 35–57.
- Campos-Vega R., Loarca-Piña G., & Oomah B. D. (2010). Minor components of pulses and their potential impact on human health. *Food Research International*, 43, 461–482.
- Caperuto L. C., Amaya-Farfan J., & Camargo C. R. (2001). Performance of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) flour in the manufacture of gluten-free spaghetti. *Journal of Food and Agriculture*, 81, 95–101.
- Cham S., & Suwannaporn P. (2010). Effect of hydrothermal treatment of rice flour on various rice noodles quality. *Journal of Cereal Science*, 51, 284–291.
- Champ M. (1994). Impact nutritionnel de la cuisson-extrusion (pp. 204-229). In : La cuisson-extrusion, Colonna P. et Della Valle (coordonateurs), technique et documentation –Lavoisier, Paris, 545 p.
- Charutigon C., Jitpupakdree J., Namsreem P., & Rungsardthong V. (2008). Effects of processing conditions and the use of modified starch and monoglyceride on some properties of extruded rice vermicelli. *Food Science and Technology*, 41, 642–651.
- Cheftel J. C. (1986). Nutritional effects of extrusion-cooking. *Food chemistry*, 20, 263–283.
- Cheftel J. C. (1994). Destruction des microorganismes par cuisson-extrusion (pp. 232–250). In : La cuisson-extrusion, Colonna P. et Della Valle (coordonateurs), technique et documentation –Lavoisier, Paris, 545 p.
- Chen Z., Sagis L., Legger A., Linssen J. P. H., Schols H. A., & Voragen A. G. J. (2002). Evaluation of starch noodles made from three typical Chinese sweet-potato starches. *Journal of Food Science*, 67, 3342–3347.
- Chillo S., Laverse, J., Falcone P. M., & Del Nobile, M. A. (2007). Effect of carboxymethylcellulose and pregelatinized corn starch on the quality of amaranthus spaghetti. *Journal of Food Engineering*, 83, 492–500.
- Chillo S., Laverse J., Falcone P. M., & Del Nobile, M. A. (2008). Quality of spaghetti in base amaranthus whole meal flour added with quinoa, broad bean and chick pea. *Journal of Food Engineering*, 84, 101–107.

Chillo S., Civica V., Iannetti M., Suriano N., Mastromatteo M., & Del Nobile, M. A. (2009a). Properties of quinoa and oat spaghetti loaded with carboxymethylcellulose sodium salt and pregelatinized starch as structuring agents. *Carbohydrate Polymers*, 78, 932–937.

Chillo S., Suriano N., Lamacchia C., & Del Nobile M. A. (2009b). Effects of additives on the rheological and mechanical properties of non-conventional fresh handmade tagliatelle *Journal of Cereal Science*, 49, 163–170.

Codex Alimentarius (2017a). Norme pour les aliments diététiques ou de régime destinés aux personnes souffrant d'une intolérance au gluten. CODEX STAN 118-1979. http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/fr/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCODEX%2BSTAN%2B118-1979%252FCXS_118f_2015.pdf.

Codex Alimentarius (2017b). Normes pour le riz. CODEX STAN 198-1995. http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/fr/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCODEX%2BSTAN%2B198-1995%252FCXS_198f.pdf.

Codex Alimentarius (2017c). Normes pour certains légumes secs. CODEX STAN 171-1989. http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/fr/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCODEX%2BSTAN%2B171-1989%252FCXS_171f.pdf

D'Egidio M. G., Mariani B. M., Nardi S., Novaro P., & Cubadda R. (1990). Chemical and technological variables and their relationships: a predictive equation for pasta cooking quality. *Cereal Chemistry*, 67, 275–281.

De Clindio B, Gabriele D, Pollini CM, Peressini D, Sensidoni A (2002) Filled snack production by coextrusion-cooking: 1. Rheological modelling of the process. *Journal of Food Engineering*, 52, 67–74.

Dexter J. E., Matsuo R. R., & Mac Gregor A. W. (1985). Relationships of instrumental assessment of spaghetti cooking quality to the type and the amount of material rinsed from cooked spaghetti. *Journal of Cereal Science*, 3, 39–53.

Doxastakis G., Papageorgiou M., Mandelaou D., Irakli M., Papalamprou E., D'Agostina A., *et al.* (2007). Technological properties and non-enzymatic browning of white lupin protein enriched spaghetti. *Food Chemistry*, 101, 57–64.

Duarte, G., Carvalho, C., & Ascheri, J. (2009). Effect of soybean hull, screw speed and temperature on expanded maize extrudates. *Brazilian Journal of Food Technology*, 12, 205–212.

Duranti, M. (2006). Grain legume proteins and nutraceutical properties. *Fitoterapia*, 77, 67–82.

- Eliasson A. C., & Krog N. (1985). Physical properties of amylose-monoglyceride complexes. *Journal of Cereal Science*, 3, 239–248.
- Elli L., Branchi F., Tomba C., Villalta D., Norsa L., Ferretti F., Roncoroni L., & Bardella M. T. (2015). Diagnosis of gluten related disorders: Celiac disease, wheat allergy and non-celiac gluten sensitivity. *World Journal of Gastroenterology*, 21, 7110–7119.
- Fares C, Platani C, Baiano A, Menga V. 2010. Effect of processing and cooking on phenolic acid profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta enriched with debranning fractions of wheat. *Food Chemistry*, 119, 1023–1029.
- Feillet P. (1984). The biochemical basis of pasta cooking quality. Its consequences for durum wheat breeders. *Science Aliments*, 4, 551–566.
- Feillet P. (2000). Le grain de blé, composition et utilisation. Institut national de la recherche agronomique, INRA, Paris, 308 p.
- Feillet P., & Dexter J. E. (1996). Quality requirements of durum wheat for semolina milling and pasta production (pp. 95–131). In: Pasta and noodle technology (Kruger J. E., Matsuo R. R., & Dick J. W. (Editors.)). St. Paul: The American Association of Cereal Chemists.
- Fellows P. (2000). Food processing technology: Principles and Practice. Second edition, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, England, 575 p.
- Ferreira S. M. R., de Mello A. P., dos Anjos M. R., Hecke Krüger C. C., Azoubel P. M., de Oliveira Alves M. A. (2016). Utilization of sorghum, rice, corn flours with potato starch for the preparation of gluten-free pasta. *Food Chemistry*, 191, 147–151.
- Frias J., Koávc E., Sotomayor C., Hedley C., & Vidal-Valverde C. (1997). Processing peas for producing macaroni. *Z Lebensm Unters Forsch A*, 204, 66–71.
- Fiorda F. A., Soares M. S., Jr., da Silva F. A., Grosman M. V. E., & Souto L. R. F. (2013). Microstructure, texture and colour of gluten-free pasta made with amaranth flour, cassava starch and cassava bagasse. *LWT - Food Science and Technology*, 54, 132–138.
- Flores-Silva P. C., Berrios J. D., Pan J., Perla Osorio-Díaz P., & Bello-Pérez L. A. (2014). Gluten-free spaghetti made with chickpea, unripe plantain and maize flours: functional and chemical properties and starch Digestibility. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 1985–1991.
- Gallagher E. (2008). Formulation and nutritional aspects of gluten-free cereal products and infant foods (pp. 321–346). In: Gluten-free cereal products and beverages (Arendt E. K. & Dal Bello, editors). London: Elsevier Applied Science. 545 p.
- Gallagher E., Gormley T. R., & Arendt E. K. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 143–152.

- Galvez F. C. F., Resurreccion A. V. A. (1992). Reliability of the focus group technique in determining the quality characteristics of mung bean noodles. *Journal of Sensorial Studies*, 7, 315–326.
- Giménez M. A., González R. J., Wagner J., Torres R., Lobo M. O., Samman N. C. (2013). Effect of extrusion conditions on physicochemical and sensorial properties of corn-broad beans (*Vicia faba*) spaghetti type pasta. *Food Chemistry*, 136, 538–545.
- Giuberti G., Gallo A., Cerioli C., Fortunati P., & Masoero F. (2015a). Cooking quality and starch digestibility of gluten free pasta using new bean flour. *Food Chemistry*, 175, 43–49.
- Giuberti G., Gallo A., Fiorentini L., Fortunati P., & Masoero F. (2015b). In vitro starch digestibility and quality attributes of gluten free ‘tagliatelle’ prepared with teff flour and increasing levels of a new developed bean cultivar. *Starch/Stärke*, 66, 1–5
- Gobbetti M., Pontonio E., Pasquale Filannino P., Rizzello C. G., De Angelis M., & Di Cagno R. (2017). How to improve the gluten-free diet: the state of the art from a food science perspective. *Food Research International*. Article in press.
- Gómez M., & Sciarini L. S. (2015). Gluten-free bakery products and pasta (pp. 565–604). In: *Advances in the understanding of gluten related pathology and the evolution of gluten-free foods*. Arranz, E., Fernández-Bañares, F., Rosell, C. M., Rodrigo, L., Peña, A. S. (editors). Barcelona, Spain: Omnia Science.
- Grugni G. Mazzini F., Viazzo G., & Viazzo N. (2009). Process for the production of rice pasta and product obtained thereby. EP 2110026 A1.
- Guerairia N. (2011). Pain sans gluten pour maladies cœliaques: Aptitude technologique d'une formule riz-féverole. Mémoire de magistère, INATAA, Université des Frères Mentouri, Constantine, 88 p.
- Gularte M. A., Gómez M., & Rosell C. M. (2012). Impact of legume flours on quality and in vitro digestibility of starch and protein from gluten-free cakes. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 3142–3150.
- Guy R. (2001). La cuisson-extrusion, RIA Editions - série agroalimentaire, Dunod, Paris, 218 p.
- Hagenimana A., Ding X., & Fang T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 43, 38–46.
- Hager A. S., Zannini E., & Arendt, E. K. (2012). Gluten-free pasta: advances in research and commercialization. *Cereal Foods World*, 57, 225–229.
- Halvorsen B. L., Holte K., Myhrstad M. C. W., Barikmo I., Hvattum E., Remberg S. F., Wold A. B., Haffner K., Baugerod H., Andersen L. F., Moskaug J. O., Jacobs D. R., &

- Blomhoff R. (2002). A systematic screening of total antioxidants in dietary plants. *Journal of Nutrition*, 132, 461–471.
- Han H. M., Cho J. H., & Koh B. K. (2011). Processing properties of Korean rice varieties in relation to rice noodle quality. *Food Science Biotechnology*, 20, 1277–1282.
- Harper J. M. (1981). Extrusion of foods. Vol. I. CRC press, Inc., Boca Raton, Florida. 197 p.
- Heo S., Jeon S., & Lee S. (2014). Utilization of *Lentinus edodes* mushroom β -glucan to enhance the functional properties of gluten-free rice noodles. *LWT - Food Science and Technology*, 55, 627–631.
- Horndok R., & Noomhorm A. (2007). Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. *Food Science and Technology*, 40, 1723–1731.
- Huang J. C., Knight S., & Goad C. (2001). Model prediction for sensory attributes of non-gluten pasta. *Journal of Food Quality*, 24, 495–511.
- Inglett G. E., Rose D. J., Chen D., Stevenson D. G., & Biswas A. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of extracts from whole buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) with or without microwave irradiation. *Food Chemistry*, 119, 1216–1219.
- Juliano B. O. (2004). Rice (pp 41–48). In: Encyclopedia of grain science. Wrigley C., Corke H., & Walker C. E. (Editors). Oxford, Elsevier Ltd. 482 p.
- Juško S., Mościcki, L., & Wójtowicz, A. (2009). Cooling-forming section (Sekcja chłodząco-formująca). Design patent, PL 64690 Y1, WUP, 12, p. 3035 (in Polish).
- Kaur L., Singh J., & Singh N. (2005). Effect of glycerol monostearate on the physico-chemical, thermal, rheological and noodle making properties of corn and potato starches. *Food Hydrocolloids*, 19, 839–849.
- Kim Y., Wiesenborn D., Lorenzen J., & Berglund P. (1996). Suitability of edible bean and potato starches for starch noodles. *Cereal Chemistry*, 73, 302–307.
- Kim Y., Kee J. I., Lee S., & Yoo S. H. (2014). Quality improvement of rice noodle restructured with rice protein isolate and transglutaminase. *Food Chemistry*, 145, 409–416.
- Kim J. M., Shin M. (2014). Effects of particle size distributions of rice flour on the quality of gluten-free rice cupcakes. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 526–532.
- Kręcisz, M. (2016). Energy consumption during production of corn extrudates in relation to the process parameters. *Agriculture Engineering*, 20, 195–203.

- Lai H. M. (2001). Effects of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. *Food Chemistry*, 72, 455–463.
- Lai H. M. (2002). Effects of rice properties and emulsifiers on the quality of rice pasta. *Journal of Science and Food Agriculture*, 82, 203–216.
- Lai H. M., & Cheng H. H. (2004). Properties of pregelatinized rice flour made by hot air or gun puffing. *International Journal of Food Science and Technology*, 39, 201–212.
- Laleg K., Cassan D., Barron C., Prabhasankar P., & Micard V. (2016). Structural, culinary, nutritional and anti-nutritional properties of high protein, gluten free, 100% legume pasta. *PLoS ONE*, 11, e0160721.
- Lamacchia C., Camarca A., Picascia S., Di Luccia A., & Ginafrani C. (2014). Cereal based gluten-free food: how to reconcile nutritional and technological properties of wheat proteins with safety for celiac disease patients. *Nutrients*, 6, 575–590.
- Larrosa V., Lorenzo G., Zaritzky N., & Califano A. (2012). Effect of the addition of proteins and hydrocolloids on the water mobility in gluten-free pasta formulations. *Water*, 4, 1–17.
- Larrosa, V., Lorenzo, G., Zaritzky, N., & Califano, A. (2015). Dynamic rheological analysis of gluten-free pasta as affected by composition and cooking time. *Journal of Food Engineering*, 160, 11–18.
- Larrosa V., Lorenzo G., Zaritzky N., & Califano A. (2016). Improvement of the texture and quality of cooked gluten-free pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 70, 96–103.
- Liener I. E. (1994). Implications of Antinutritional Components in Soybean Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 34, 31–67.
- Lii C. Y., & Chang Y. H. (1991). Study of starch in Taiwan. *Food Reviews International*, 7, 185–203.
- Limroongreungrat K. & Huang Y.-W. (2007). Pasta products made from sweet potato fortified with soy protein. *Lebensm. Wiss. Technol.* 40, 200–206.
- López-Barríos L., Gutiérrez-Urbe J. A., & Serna-Saldívar S. O. (2014.) Bioactive peptides and hydrolysates from pulses and their potential use as functional ingredients. *Journal of Food Science*, 79, R273–R283.
- Loubes M. A., Flores S. K., & Tolaba M. P. (2016). Effect of formulation on rice noodle quality: Selection of functional ingredients and optimization by mixture design. *LWT - Food Science and Technology*, 69, 280–286.

- Lucisano M., Cappa C., Fongaro L., Mariotti M. (2012). Characterisation of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: evaluation of the cooking behavior. *Journal of Cereal Science*, 56, 667–675.
- Marconi E., & Carcea M. (2001). Pasta from nontraditional raw materials. *Cereal Foods World*, 46, 522–530.
- Marengo M., Bonomi F., Marti A., Pagani M. A., Elkhalfa E. O., & Iametti S. (2015). Molecular features of fermented and sprouted sorghum flours relate to their suitability as components of enriched gluten-free pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 63, 511–518.
- Mariotti M, Iametti S, Cappa C, Rasmussen P, Lucisano M. 2011. Characterization of glutenfree pasta through conventional and innovative methods: evaluation of uncooked products. *Journal of Cereal Science*, 53, 319–327.
- Marti A., Seetharaman K., & Pagani M. A. (2010). Rice-based pasta: a comparison between conventional pasta-making and extrusion-cooking. *Journal of Cereal Science*, 52, 404–409.
- Marti A. & Pagani M. A. (2013). What can play the role of gluten in gluten free pasta? *Trends in Food Science and Technology*, 31, 63–71.
- Marti A., Caramanico R., Bottega G., Pagani M. A. (2013). Cooking behaviour of rice pasta: effect of thermal treatments and extrusion conditions. *LWT - Food Science and Technology*, 54, 229–235.
- Marti A., Barbiroli A., Marengo M., Fongaro L., Iametti S., Pagani M. A. (2014). Structuring and texturing gluten-free pasta: egg albumen or whey proteins. *European Food Research and Technology*, 238, 217–224.
- Mastromatteo M., Chillo S., Civica V., Iannetti M., Suriano N., & Del Nobile M. A. (2012). A multistep optimization approach for the production of healthful pasta based on nonconventional flours. *Journal of Food Process Engineering*, 35, 601–621.
- Merayo Y. A., González R. J., Drago S. R., Torres R. L., & De Greef D. M. (2011). Extrusion condition and zea mays endosperm affecting gluten-free spaghetti quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 2321–2328.
- Mercier C. (1994). Comment aborder la cuisson-extrusion ?. In : La cuisson-extrusion. Colonna P. et Della Valle (coordonateurs). pp 2-13. Technique et Documentation – Lavoisier, Paris, 545 p.
- Mercier S., Moresoli C., Mondor M., Villeneuve S., and Marcos B. (2016). A meta-analysis of enriched Pasta: what are the effects of enrichment and process specifications on the quality attributes of pasta?. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, 685–704.

- Mestres C., Colonna P., Alexandre M. C., & Matencio F. (1993). Comparison of various processes for making maize pasta. *Journal of Cereal Science*, 17, 277–290.
- Micard V., Brossard C., Champ M., Crenon I., Jourdheuil-Rahmani D., Minier C., Petitot M. (2010). Aliment mixte « blé dur-légumineuse » : influence de la structuration de leurs constituants sur leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques. *Cahiers de nutrition et de diététique*, 45, 237–245.
- Mirhosseini H., Abdul Rashid N. F., Amid B. T., Cheong K. W., Kazemi M., Zulkurnain M. (2015). Effect of partial replacement of corn flour with durian seed flour and pumpkin flour on cooking yield, texture properties, and sensory attributes of gluten free pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 63, 184–190.
- Mitrus M., & Mościcki L. (2012). Pasting properties of extrusion-cooked wheat starch. *Proceedings of the 6th International Congress “Flour-Bread’11”*, Opatija, Croatia, p 328–331.
- Moreira da Silva E. M., Ascheri J. L. R., & Ascheri D. P. R. (2016). Quality assessment of gluten-free pasta prepared with a brown rice and corn meal blend via thermoplastic extrusion. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 698–706.
- Mościcki L. & Van Zuilichem D. J. (2011). Extrusion-cooking and related techniques (pp. 1–24). In: *Extrusion-cooking techniques: applications, theory and sustainability*. Mościcki L. (editor). WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. Weinheim, Germany, 220 p.
- Mościcki L. & Wójtowicz A. (2011). Raw Materials in the Production of Extrudates (pp. 45–64). In: *Extrusion-cooking techniques: applications, theory and sustainability*. Mościcki L. (editor), WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. Weinheim, Germany, 220 p.
- Naqash F., Gani A., Gani A., & Masoodi F. A. (2017). Gluten-free baking: Combating the challenges - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 66, 98–107.
- Nowacka N., Nowak R., Drozd M., Olech M., Los R., & Malm A. (2014). Analysis of phenolic constituents, antiradical and antimicrobial activity of edible mushrooms growing wild in Poland. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 689–694.
- Oikonomou N. A., & Krokida M. K. (2011). Literature data compilation of WAI and WSI of extrudate food products. *International Journal of Food Properties*, 14, 199–240.
- Oniszczyk A., Podgórski R., Oniszczyk T., Zukiewicz-Sobczak W., Nowak R., & Waksmundzka-Hajnos M. (2014). Extraction methods for the determination of phenolic compounds from *Equisetum arvense* L. herb. *Industrial Crops & Products*, 61, 377–381.
- Oniszczyk A., & Podgórski R. (2015). Influence of different extraction methods on the quantification of selected flavonoids and phenolic acids from *Tiliacordata* inflorescence, *Industrial Crops and Products*, 76, 509–514.

- Oniszczyk A., Oniszczyk T., Wójtowicz A., Wojtunik K., Kwaśniewska A., Waksmundzka-Hajnos M. (2015). Radical scavenging activity of extruded corn gruels with addition of linden inflorescence. *Open Chemistry*, 13, 1101–1107.
- Oomah B. D., Caspar F., Malcolmson L. J., & Bellido A.-S. (2011). Phenolics and antioxidant activity of lentil and pea hulls. *Food Research International*, 44, 436–441.
- Ortiz J. A. R., De Carvalho C. W. P., Ascheri D. P. R., Ascheri J. L. R., & De Andrade C. T. (2010). Effect of sugar and water contents on non-expanded cassava flour extrudates. *Ciênc Tecnol Aliment*, 30, 205–212.
- O'Shea N., Arendt E., & Gallagher E. (2014). State of the art in gluten-free research. *Journal of Food Science*, 79, 1067–1076.
- Padalino L., Mastromatteo M., Sepielli G., & Del Nobile M. A. (2011). Formulation optimization of gluten-free functional spaghetti based on maize flour and oat bran enriched in β -glucans. *Materials*, 4, 2119–2135.
- Padalino L., Mastromatteo M., De Vita P., Ficco D. B. M., Del Nobile M. A. (2013a). Effects of hydrocolloids on chemical properties and cooking quality of gluten-free spaghetti. *International Journal of Food Science & Technology*, 48, 972–983.
- Padalino L., Mastromatteo M., Lecce L., Cozzolino F., Del Nobile M. A. (2013b). Manufacture and characterization of gluten-free spaghetti enriched with vegetable flour. *Journal of Cereal Science*, 57, 333–342.
- Padalino L., Conte A., & Del Nobile M. A. (2016). Overview on the general approaches to improve gluten-free pasta and bread. *Foods*, 87, 1–18.
- Pagani M. A. (1986). Pasta products from non-conventional raw materials. In: Pasta and extruded products. pp. 52–68. Mercier C., & Cantarelli . (Editors.). London: Elsevier Applied Science.
- Pagano A. (2006). Whole grains and the gluten-free diet. *Practical Gastroenterology*, 66–78.
- Pérez, A. A., Drago, S. R., Carrara, C. R., De Greef, D. M., Torres, R. L., & González, R. J. (2008). Extrusion cooking of a maize/soybean mixture: Factors affecting expanded product characteristics and flour dispersion viscosity. *Journal of Food Engineering*, 87, 333–340.
- 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, Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques. Supagro Montpellier. Académie de Montpellier. 232 p.

- 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.
- Phongthai S., D'Amico S., Schoenlechner R., Homthawornchoo W., & Rawdkuen S. (2017). Effects of protein enrichment on the properties of rice flour based gluten-free pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 80, 378–385.
- Plugis N. M., & Khosla C. (2015). Therapeutic approaches for celiac disease. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 29, 503–521.
- Ragae S., & Abdel-Aal E.-S. M. (2006). Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chemistry*, 95, 9–18.
- Raina C. S., Singh S., Bawa A. S., & Saxena D. C. (2005). Textural characteristics of pasta made from rice flour supplemented with proteins and hydrocolloids. *Journal of Texture Studies*, 36, 402–420.
- Rao H. G. R. & Thejaswini M. L. (2015). Extrusion Technology: A Novel Method of Food Processing. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 2, 358–369.
- Resmini P., & Pagani M. A. (1983). Ultrastructure studies of pasta: a review. *Food Microstructure*, 2, 1–12.
- Riaz M. N. (2001). Critères de choix de l'extrudeur. In : La cuisson-extrusion. pp 29–50. RIA Editions - série agroalimentaire, Dunod, Paris, 218 p.
- Rosa-Sibakov N., Heiniö R.-L., Cassan D., Holopainen-Mantila U., Micard V., Lantto R., & Sozer N. (2016). Effect of bioprocessing and fractionation on the structural, textural and sensory properties of gluten-free faba bean pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 67, 27–36.
- Rosell C. M., & Marco C. (2008). Rice. In: Gluten-free cereal products and beverages. Arendt E. K. & Dal Bello F. (editors). pp. 81–100. London: Elsevier Applied Science.
- Ross A. (2006). Instrumental measurement of physical properties of cooked Asian wheat flour noodles. *Cereal Chemistry*, 83, 42–51.
- Ryu, G. H., & Ng, P. K. (2001). Effect of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch/Stärke*, 53, 147–154.
- Sakre N., Amit B., Das, A. B., & Srivastav P. P. (2015). Fuzzy logic approach for process optimization of gluten-free pasta. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1-10.

- Sánchez-Chino X., Jiménez-Martínez C., Dávila-Ortiz G., Álvarez-González I., & Madrigal-Bujaidar E. (2015). Nutrient and nonnutrient components of legumes, and its chemopreventive activity: A Review. *Nutrition and Cancer*, 0, 1–10.
- Sarawong C., Gutiérrez Z. C. R., Berghofer E., & Schoenlechner R. (2014). Gluten-free pasta: effect of green plantain flour addition and influence of starch modification on the functional properties and resistant starch content. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 2650–2658.
- Schober T. J., Messerschmidt M., Bean S. R., Park S. H., & Arendt E. K. (2005). Gluten free bread from sorghum: Quality differences among hybrids. *Cereal Chemistry*, 82, 394–404.
- Schoenlechner R., Drausinger J., Ottenschlaeger V., Jurackova K., & Berghofer E. (2010). Functional properties of gluten-free pasta produced from amaranth, quinoa and buckwheat. *Plant for Foods and Human Nutrition*, 65, 339–349.
- Sereewat P., Suthipinittham C., Sumathaluk S., Puttanlek C., Dudsadee U., & Rungsardthong V. (2015). Cooking properties and sensory acceptability of spaghetti made from rice flour and defatted soy flour. *LWT - Food Science and Technology*, 60, 1061–1067.
- Shannahan S., & Leffler D. A. (2017). Diagnosis and updates in celiac disease. *Gastrointestinal Endoscopy Clinics of North America*, 27, 79–92.
- Shimelis E. A., & Rakshit S. K. (2007). Effect of processing on antinutrients and in vitro digestibility of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in East Africa. *Food Chemistry*, 103, 161–172.
- Singh B., Sekhon K. S., & Singh N. (2007). Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry*, 100, 198–202.
- Singh S., Raina C. S., Bawa A. S., & Saxena D. C. (2004). Sweet potato-based pasta product: optimization of ingredient levels using response surface methodology. *International Journal of Food Science and Technology*, 39, 191–200.
- Sozer N. (2009). Rheological properties of rice pasta dough supplemented with proteins and gums. *Food Hydrocolloids*, 23, 849–855.
- Stojceska V., Ainsworth P., Plunkett A., & Ibanoglu S. (2009). The advantage of using extrusion processing for increasing dietary fibre level in gluten-free products. *Food Chemistry*, 121, 156–164.
- Suhendro E. L., Kunez C. F., McDonough C. M., Rooney L. W., & Waniska R. D. (2000). Cooking characteristics and quality of noodles from food sorghum. *Cereal Chemistry*, 77, 96–100.

- Susanna S., & Prabhasankar P. (2013). A study on development of Gluten free pasta and its biochemical and immunological validation. *LWT - Food Science and Technology*, 50, 613–621.
- Tam L. M., Corke H., Tan W. T., Li J., & Collado L. S. (2004). Production of Bihon-type noodles from maize starch differing in amylose content. *Cereal Chemistry*, 81, 475–480.
- Tan H. Z., Li Z. G., & Tan B. (2009). Starch noodles: history, classification, materials, processing, structure, nutrition, quality evaluating and improving. *Food Research International*, 42, 551–576.
- Taylor J. R. N., Schober T. J., & Bean S. R. (2006). Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *Journal of Cereal Science*, 44, 252–271.
- Thompson T. (2009). The nutritional quality of gluten-free foods. In: *Gluten-free food science and technology*. Gallagher E. (Editor.), pp 42–51. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- Tovoli F., Masi C., Guidetti E., Negrini G., Paterini P., & Bolondi L. (2015). Clinical and diagnostic aspects of gluten related disorders. *World Journal of Clinical Cases*, 3, 275–284.
- Tsao T., Beetner G., Lorenz K., & Frey A. (1976). Extrusion processing of instant rice spaghetti. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie*, 9, 96–98.
- Vasanthan T., & Li J. H. (2003). Hypochlorite oxidation of field pea starch and its suitability for noodle making using an extrusion cooker. *Food Research International*, 36, 381–386.
- Vijaykrishnaraj M., Bharath Kumar S., & Prabhasankar P. (2015). Green mussel (*Perna canaliculus*) as a marine ingredient to enrich gluten free pasta: product quality, microstructure and biofunctional evaluation. *Food Measure*, 9, 76–85.
- Wandee Y., Uttapap D., Pucha-arnon S., Puttanlek C., Rungsardthong V., & Wetprasit N. (2014). Enrichment of rice noodles with fibre-rich fractions derived from cassava pulp and pomelo peel. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 2348–2355.
- Wandee Y., Dudsadee Uttapap D., Pucha-arnon S., Puttanlek C., Rungsardthong V., & Wetprasit N. (2015). Quality assessment of noodles made from blends of rice flour and canna starch. *Food Chemistry*, 179, 85–93.
- Wang N., Bhirud P. R., Sosulski F. W., & Tyler R. T. (1999). Pasta-like product from pea flour by twin-screw extrusion. *Journal of Food Science*, 64, 671–678.
- Wang N., & Daun J. K. (2004). The chemical composition and nutritive value of Canadian pulses. Canadian grain commission. 85 p.

- Wang N., Maximiuk L., & Toews R. (2012). Pea starch noodles: Effect of processing variables on characteristics and optimisation of twin-screw extrusion process. *Food Chemistry*, 133, 742–753.
- Wang N., Warkentin T. D., Vandenberg B., & Bing D. J. (2014). Physicochemical properties of starches from various pea and lentil varieties, and characteristics of their noodles prepared by high temperature extrusion. *Food Research International*, 55, 119–127.
- Waniska R. D., Yi T., Lu J., Xue-Ping L., Xu W., & Lin H. (1999). Effects of preheating temperature, moisture, and sodium metabisulfite content on quality of noodles prepared from maize flour or meal. *Food Science and Technology International*, 5, 339–346.
- Wójtowicz, A. (2011). Precooked pasta (pp. 99–117). In: Extrusion-cooking technique. Applications, theory and sustainability.. Mościcki L. (Editor). WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. Weinheim, Germany, 220 p.
- Wójtowicz A. (2012). Influence of process conditions on selected texture properties of precooked buckwheat pasta. *Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 12, 315–322.
- Wójtowicz, A., Mościcki, L. (2008). Energy consumption during extrusion-cooking of precooked pasta. *TEKA. Commission Motorization and Energetics in Agriculture*, 8, 311–216.
- Wójtowicz, A., & Mościcki, L. (2009). Influence of extrusion-cooking parameters on some quality aspects of precooked pasta-like products. *Journal of Food Science*, 74, 226–233.
- Wójtowicz, A., & Mościcki, L. (2014). Influence of legume type and addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 1175–1185.
- Wolf B. (2010). Polysaccharide functionality through extrusion processing. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 15, 50–54.
- 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.
- Yalcin S., & Basman A. (2008a). Effects of gelatinisation level, gum and transglutaminase on the quality characteristics of rice noodle. *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 1637–1644
- Yalcin S., & Basman A. (2008b). Quality characteristics of corn noodles containing gelatinized starch, transglutaminase and gum. *Journal of Food Quality*, 31, 465–479.

Yoenyongbuddhagal S., & Noomhorn A. (2002a). Effect of physicochemical properties of high-amylose thai rice flours on vermicelli quality. *Cereal Chemistry*, 79, 481–485.

Yoenyongbuddhagal S. & Noomhorn A. (2002b). Effect of raw material preparation on rice vermicelli quality. *Starch*, 54, 534–539.

Zandonadi R. P., Assunção Botelho R. B., Gandolfi L., Janini Selva Ginani J S., Montenegro F. M., & Pratesi R. (2012). Green Banana Pasta: An Alternative for Gluten-Free Diets. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 112, 1068–1072.

Zhao, Y. H., Manthey, F. A., Chang, S. K., 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, 371–376.

Zhao, B., & Chang, K. C. (2008). Evaluation of effects of soaking and precooking conditions on the quality of precooked dehydrated pea, lentil and chickpea products. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32, 517–532.

Zhong F., Li Y., Ibanez A. M., Oh M. H., McKenzie K. S., Shoemaker C. (2009). The effect of rice variety and starch isolation method on the pasting and rheological properties of rice starch pastes. *Food Hydrocolloids*, 23, 406–414.

ANNEXE

Annexe. Travaux relatifs à la thèse

Publication dans des revues à comité de lecture

- 1) **Bouasla A.**, Wójtowicz A., Zidoune M. N., Olech M., Nowak R., Mitrus M., & Oniszczyk A. (2016). Gluten-free precooked rice-yellow pea pasta: effect of extrusion-cooking conditions on phenolic acids composition, selected properties and microstructure. *Journal of Food Science*, 81, C1070–C1079.

Les deux figures illustrant la microstructure des pâtes sans gluten obtenues dans cet article ont été présentées dans la page de garde de ce numéro du journal.

- 2) **Bouasla A.**, Wójtowicz A., Zidoune M. N. (2017). Gluten-free precooked rice pasta enriched with legumes flours: Physical properties, texture, sensory attributes and microstructure. *LWT – Food Science and Technology*, 75, 569–577.
- 3) **Bouasla A.**, Wójtowicz A., Juško S., Zidoune M. N. (2017). Energy consumption and process efficiency as affected by extrusion-cooking conditions and recipe formulation during the production of gluten-free rice-legumes products. *Agriculture engineering*, 21 (1), 39–46.

Communication orale

Bouasla A., Wójtowicz A., Zidoune M. N. (2015). Influence of yellow pea flour addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched gluten-free precooked rice pasta. The First International Congress of Nutrition & Food Science “from Bench to Bedside”. 20–22 November. Tlemcen. Algérie.

Communication affichée

Bouasla A., Wójtowicz A., Zidoune M. N. (2016). Quality characteristics of gluten-free precooked rice pasta as affected by the addition of chickpea and lentil flours. ISEKI Food Conference. 6–8 July, Vienna, Autriche.

Journal of Food Science

A Publication of the Institute of Food Technologists

May 2016 | Vol. 81 Nr. 5

Guide to this Issue:

| | | |
|-----------|---|----------|
| R: | Concise Reviews and Hypotheses in Food Science | R365-387 |
| C: | Food Chemistry | C388-430 |
| E: | Food Engineering and Physical Properties | E431-469 |
| M: | Food Microbiology and Safety | M470-501 |
| S: | Sensory and Food Quality | S502-575 |
| N: | Nanoscale Food Science, Engineering, and Technology | N576-582 |
| H: | Health, Nutrition, and Food | H583-608 |
| T: | Toxicology and Chemical Food Safety | T609-615 |

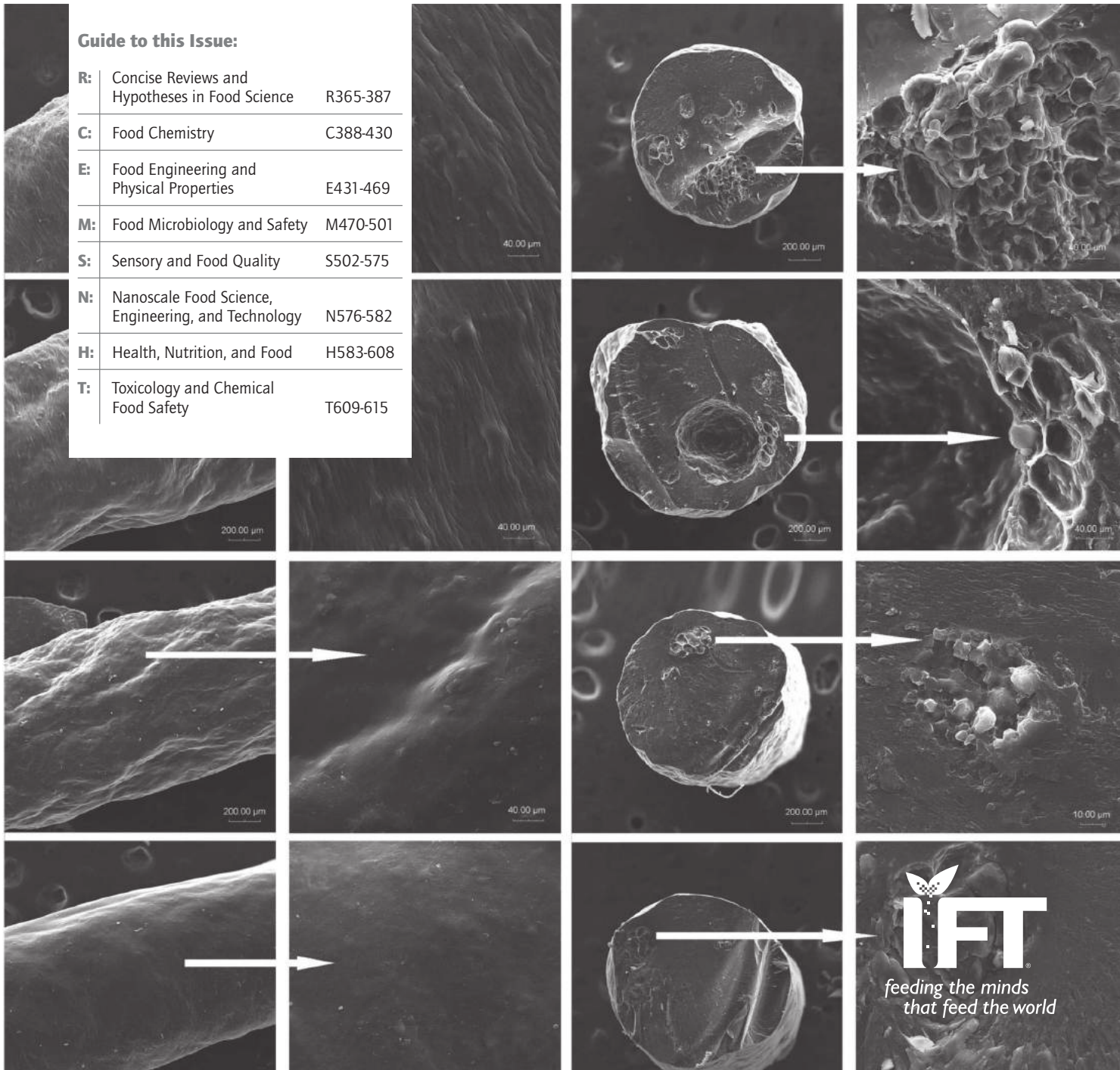


Table of Contents 1039
Industrial Application Briefs 1041

C: FOOD CHEMISTRY

Properties of Cookies Made with Natural Wax-Vegetable Oil Organogels—*Hong-Sik Hwang, Mukti Singh, and Suyong Lee* C1043

Phenolic Profiles and Contribution of Individual Compounds to Antioxidant Activity of Apple Powders—*Lina Raudone, Raimondas Raudonis, Mindaugas Liaudanskas, Jonas Viskelis, Audrius Pukalskas, and Valdimaras Janulis* C1053

Preparation of Methylated Products of A-type Procyanidin Trimers in Cinnamon Bark and Their Protective Effects on Pancreatic β -Cell—*Lu Chen, Liang Chen, Ting Wang, Pulong Yuan, Kaixian Chen, Qi Jia, Heyao Wang, and Yiming Li* C1060

Gluten-Free Precooked Rice-Yellow Pea Pasta: Effect of Extrusion-Cooking Conditions on Phenolic Acids Composition, Selected Properties and Microstructure—*Abdallah Bouasla, Agnieszka Wójciewicz, Mohammed Nasereddine Zidoune, Marta Olech, Renata Nowak, Marcin Mitrus, and Anna Oniszczyk* C1068

Potent Antidiabetic Activity and Metabolite Profiling of *Melicope Lunu-ankenda* Leaves—*Mizher Hezam AL-Zuaidy, Azizah Abdul Hamid, Amin Ismail, Suhaila Mohamed, Ahmad Faizal Abdul Razis, Muhammad Waseem Mumtaz, and Syafiq Zikri Salleh* C1078

Synergistic Effects of *Potentilla fruticosa* L. Leaves Combined with Green Tea Polyphenols in a Variety of Oxidation Systems—*Zehua Liu, Ziwen Luo, Caixia Jia, Dongmei Wang, and Dengwu Li* C1089

Antioxidant Properties of Phenolic Compounds in Renewable Parts of *Crataegus pinnatifida* Inferred from Seasonal Variations—*Meng Luo, Xuan Yang, Jiao-Yang Hu, Jiao Jiao, Fan-Song Mu, Zhuo-Yue Song, Qing-Yan Gai, Qi Qiao, Xin Ruan, and Yu-Jie Fu* C1100

E: FOOD ENGINEERING AND MATERIALS SCIENCE

Initial Droplet Size Impacts pH-Induced Structural Changes in Phase-Separated Polymer Dispersions—*Chutima Thongkaew, Benjamin Zeeb, Monika Gibis, Jörg Hinrichs, and Jochen Weiss* E1108

Sodium Chloride Diffusion in Low-Acid Foods during Thermal Processing and Storage—*Ellen R. Bornhorst, Juming Tang, and Shyam S. Sablani* E1114

Antimicrobial Activity of Nisin and Natamycin Incorporated Sodium Caseinate Extrusion-Blown Films: A Comparative Study with Heat-Pressed/Solution Cast Films—*Basak Yilin Colak, Pierre Peynichou, Sophie Galland, Nadia Oulahal, Frédéric Prochazka, and Pascal Degraeve* E1125

Using Liquid Smoke to Improve Mechanical and Water Resistance Properties of Gelatin Films—*Wenwang Wang, Cong Li, Hongjie Zhang, and Yonghao Ni* E1135

M: FOOD MICROBIOLOGY AND SAFETY

Effects of High Hydrostatic Pressure on the Physical, Microbial, and Chemical Attributes of Oysters (*Crassostrea virginica*)—*Talaysha Lingham, Mu Ye, Haiqiang Chen, Lathadevi Karuna Chintapenta, Eunice Handy, Jing Zhao, Changqing Wu, and Gulnihal Ozbay* M1142

May Online Cover: Magnified surfaces and cross-sections of precooked gluten-free pasta, from "Gluten-Free Precooked Rice-Yellow Pea Pasta: Effect of Extrusion-Cooking Conditions on Phenolic Acids Composition, Selected Properties and Microstructure" by Abdallah Bouasla, Agnieszka Wójciewicz, Mohammed Nasereddine Zidoune, Marta Olech, Renata Nowak, Marcin Mitrus, and Anna Oniszczyk; p. 1068.



Table of Contents continued on next page

R: Concise Reviews
in Food Science

C: Food Chemistry

E: Food Engineering &
Materials Science

M: Food Microbiology
& Safety

S: Sensory & Food
Quality

N: Nanoscale Food
Science

H: Health, Nutrition &
Food

T: Toxicology &
Chemical Food Safety

Characterization, Anti-Inflammatory and Antiproliferative Activities of Natural and Sulfonated Exo-Polysaccharides from *Streptococcus thermophilus* ASCC 1275—*Siqian Li and Nagendra P. Shah*M1151

Efficacy of Neutral Electrolyzed Water, Quaternary Ammonium and Lactic Acid-Based Solutions in Controlling Microbial Contamination of Food Cutting Boards Using a Manual Spraying Technique—*Hamzah M. Al-Qadiri, Mahmoudreza Ovissipour, Nivvin Al-Alami, Byju N. Govindan, Setareh Ghorban Shiroodi, and Barbara Rasco*.....M1161

S: SENSORY AND FOOD QUALITY

Assessment of Important Sensory Attributes of Millet Based Snacks and Biscuits—*Matthew B. McSweeney, Lisa M. Duizer, Koushik Seetharaman, and D. Dan Ramdath* S1168

Tolerance Testing for Cooked Porridge made from a Sorghum Based Fortified Blended Food—*Sirichat Chanadang, Edgar IV Chambers, and Sajid Alavi* S1175

Consumer Acceptance of Bars and Gummies with Unencapsulated and Encapsulated Resveratrol—*Clarissa C. Koga, Soo-Yeun Lee, and Youngsoo Lee* S1187

Sensory and Physicochemical Studies of Thermally Micronized Chickpea (*Cicer arietinum*) and Green Lentil (*Lens culinaris*) Flours as Binders in Low-Fat Beef Burgers—*Shiva Shariati-Ievari, Donna Ryland, Andrea Edel, Tiffany Nicholson, Miyoung Suh, and Michel Aliani* S1195

A Comparison of Flavor Differences between Pecan Cultivars in Raw and Roasted Forms—*Shelby M. Magnuson, Brendan Kelly, Kadri Koppel, and William Reid* S1208

Instrumental and Sensory Texture Attributes of High-Protein Nutrition Bars Formulated with Extruded Milk Protein Concentrate—*J.C. Banach, S. Clark, and B.P. Lamsal* S1219

N: NANOSCALE FOOD SCIENCE

Rapid Detection of Melamine in Tap Water and Milk Using Conjugated “One-Step” Molecularly Imprinted Polymers-Surface Enhanced Raman Spectroscopic Sensor—*Yaxi Hu and Xiaonan Lu* N1228

H: HEALTH, NUTRITION AND FOOD

Antihypertensive Properties of a Pea Protein Hydrolysate during Short- and Long-Term Oral Administration to Spontaneously Hypertensive Rats—*Abraham T. Girgih, Ifeanyi D. Nwachukwu, John O. Onuh, Sunday A. Malomo, and Rotimi E. Aluko*..... H1237

Effects of *Hyriopsis cumingii* Polysaccharides on Mice Immunologic Receptor, Transcription Factor, and Cytokine—*Deliang Qiao, Xiaomei He, Chuanbao Wei, Lunbin Xia, and Lingling Bao* H1244

Cinnamomum camphora Seed Kernel Oil Ameliorates Oxidative Stress and Inflammation in Diet-Induced Obese Rats—*Jing Fu, Cheng Zeng, Zheling Zeng, Baogui Wang, and Deming Gong*..... H1251

T: TOXICOLOGY AND CHEMICAL FOOD SAFETY

Nonclinical Safety Assessment of *Morus alba* L. Fruits: Study of 90-D Toxicity in Sprague Dawley Rats and Genotoxicity in *Salmonella*—*Bo Yoon Chang, Seon Beom Kim, Mi Kyeong Lee, Hyun Park, and Sung Yeon Kim*T1257

Simultaneous Determination of 10 Photoinitiators in Milk by Solid-Phase Microextraction Coupled with Gas Chromatography/Mass Spectrometry—*Pengyan Liu, Chunxia Zhao, Yajing Zhang, and Yanjie Chen*T1265

NOTICE: Page Charges for Publication of Research Papers

There are no page charges for *IFT members*; for *non-IFT-members*, a charge of \$85 per printed page for the first 4 pages (\$120 for each additional page) applies to all manuscripts on original research. Color figures can be included in the print version for a fee of \$500 per figure, or online only for free. When payment is possible only from an author's personal funds, and this means of payment would impose undue financial hardship, a request for **partial or full waiver** of page charges can be made, provided this is done **prior to publication**. In this instance, **a statement certifying** that the author's employer(s) is unable to pay because of financial distress, and that the author cannot personally pay because this would impose an undue financial burden, signed by both the author and the employer, should be sent—**prior to publication**—to: JFS Managing Editor, Institute of Food Technologists, 525W. Van Buren St., Suite 1000, Chicago, IL 60607, USA (E-mail: aferguson@ift.org).

Submission of papers must be made electronically through Scholar One Manuscripts on the Web at: <http://mc.manuscriptcentral.com/jfs>. Submission of manuscripts in paper form is no longer permitted.

Concise Reviews and Hypothesis Papers are exempt from page charges, provided the Scientific Editor (E. Allen Foegeding, allen_foegeding@ncsu.edu) is consulted and issues an invitation in advance of submission.

Gluten-Free Precooked Rice-Yellow Pea Pasta: Effect of Extrusion-Cooking Conditions on Phenolic Acids Composition, Selected Properties and Microstructure

Abdallah Bouasla, Agnieszka Wójtowicz, Mohammed Nasereddine Zidoune, Marta Olech, Renata Nowak, Marcin Mitrus, and Anna Oniszczuk

Abstract: Rice/yellow pea flour blend (2/1 ratio) was used to produce gluten-free precooked pasta using a single-screw modified extrusion-cooker TS-45. The effect of moisture content (28%, 30%, and 32%) and screw speed (60, 80, and 100 rpm) on some quality parameters was assessed. The phenolic acids profile and selected pasta properties were tested, like pasting properties, water absorption capacity, cooking loss, texture characteristics, microstructure, and sensory overall acceptability. Results indicated that dough moisture content influenced all tested quality parameters of precooked pasta except firmness. Screw speed showed an effect only on some quality parameters. The extrusion-cooking process at 30% of dough moisture with 80 rpm is appropriate to obtain rice-yellow pea precooked pasta with high content of phenolics and adequate quality. These pasta products exhibited firm texture, low stickiness, and regular and compact interne structure confirmed by high score in sensory overall acceptability.

Keywords: extrusion-cooking, gluten-free, phenolic acids, precooked pasta, rice-yellow pea

Practical Application: Gluten-free precooked pasta made with a rice/yellow pea flour blend in a 2/1 ratio with the extrusion-cooking showed improved nutritional quality and proper quality characteristics. Based on the presented results, processing of gluten-free precooked pasta may be implemented for SME producers. These products may be nutritionally valuable for celiac disease consumers and convenient because of short preparation time without cooking.

Introduction

Gluten is considered as a fundamental factor of wheat pasta quality during cooking (Bruneel and others 2010). However, the ingestion of gluten by genetically susceptible individuals caused celiac disease (Lamacchia and others 2014). Presently, the only treatment for the disease is a strict life-long adherence to a gluten-free diet that requires the exclusion of all products made from wheat, barley, and rye (Pagano 2006; O'Shea and others 2014).

Many gluten-free products are prepared from rice which is characterized by its bland taste, white color, high digestibility, and hypoallergenic features (Rosell and Marco 2008). However, rice has low protein and low dietary fiber contents (Marti and others 2013).

Legumes are a good source of proteins, fibers, vitamins, and minerals (Duranti 2006). Therefore, the incorporation of legume flour in gluten-free products would enhance their nutritional quality (Arocha Gularte and others 2012). Yellow peas have interesting amounts of protein (20.2 to 27.4 g/100 g d.b.), starch (41.6 to

49 g/100 g d.b.), fiber (5.8 to 11.2 g/100 g d.b.), total phenolics (1.13 to 1.67 mg/g), B vitamins (0.12 to 2.98 mg/100 g), and minerals (2.3 to 3.4 g/100 g d.b.), and are suitable for health-conscious peoples (Wang and others 2003; Wang and Daun 2004; Amarowicz and Pegg 2008).

During the extrusion-cooking raw materials are treated by high temperatures and mechanical shearing at relatively low moisture content (Camire and others 1990). This technique has many advantages, mainly low degradation of food nutrients, improvement of digestibility by starch gelatinization, protein denaturation and deactivation of antinutritional factors (Alonso and others 2000; Shimelis and Rakshit 2007).

Extrusion-cooking technique is suitable for the production of specific precooked pasta or gluten-free pasta (Marti and Pagani 2013; Wójtowicz and Mościcki 2014). Starch gelatinization is the main phenomenon exploited in gluten-free pasta-making. In fact, the disruption of the starch granule organization gives a digestible and malleable product (Marti and Pagani 2013). In addition, changing processing parameters (such as moisture content, screw speed, or temperature) during the extrusion-cooking make it possible to produce pasta products with specific characteristics and functionality (De Clindio and others 2002; Wójtowicz and Mościcki 2009; Wójtowicz 2011).

Rice has been widely used to produce gluten-free pasta, alone (Cham and Suwannaporn 2010; Marti and others 2010) or in combination with other ingredients (Charutigon and others 2008; Cabrera-Chávez and others 2012; Heo and others 2014; Kim and others 2014; Giuberti and others 2015). However, at the authors'

MS 20151891 Submitted 11/13/2015, Accepted 2/27/2016. Authors Bouasla and Zidoune are with Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (LNTA), Inst. de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (INATAA), Univ. des Frères Mentouri Constantine, 25000 Constantine, Algeria. Authors Wójtowicz and Mitrus are with Dept. of Food Process Engineering, Univ. of Life Sciences in Lublin, Doświadczalna 44, 20-280 Lublin, Poland. Author Oniszczuk is with Dept. of Inorganic Chemistry, Medical Univ. in Lublin, Chodźki 4a, 20-093 Lublin, Poland. Authors Olech and Nowak are with Dept. of Pharmaceutical Botany, Medical Univ. in Lublin, Chodźki 1, 20-093 Lublin, Poland. Direct inquiries to author Wójtowicz (E-mail: agnieszka.wojtowicz@up.lublin.pl).

Table 1—Chemical composition of rice flour, yellow pea flour and flour blend used to produce pasta (d.b.).

| Flours | Protein (%) | Fat (%) | Ash (%) | Fiber (%) | Carbohydrates ^a (%) |
|-------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Rice (R) | 7.92 ± 0.004 | 2.3 ± 0.01 | 1.37 ± 0.02 | 1.31 ± 0.01 | 87.1 |
| Yellow pea (YP) | 23.48 ± 0.02 | 1.23 ± 0.01 | 2.9 ± 0.04 | 3.03 ± 0.03 | 69.35 |
| R/YP (2/1) ^b | 13.11 | 1.94 | 1.88 | 1.89 | 81.18 |

^aCarbohydrates estimated by difference.

^bResults obtained by calculation.

knowledge, there are no studies about the application of extrusion-cooking process to manufacture precooked pasta based on rice–yellow pea flour blend.

The aim of this work was to study the influence of dough moisture content and screw speed on phenolics composition and selected characteristics of precooked pasta made from a blend composed of 2/1 (w/w) rice/yellow pea flour.

Materials and Methods

Raw materials

Rice flour was supplied by Lubella S.A. company (Lublin, Poland). Yellow pea (*Pisum sativum* L.) purchased from the local market was ground using laboratory mill LMN-100 (TESTCHEM, Radlin, Poland) to produce flour with particles smaller than 500 μm . The ratio of rice/yellow pea flours used was 2/1 (w/w). Chemical composition of flours was analyzed following the AACC methods (1995) for protein (AACC 46-10), lipid content (AACC 30-10), and ash (AACC 08-01) in 3 replications. Total dietary fiber was determined according to AOAC (2000) procedures (AOAC 993.21) in double. Results of chemical composition of flours and blend are presented in the Table 1.

Pasta processing

The single screw extrusion-cooker type TS-45 (ZMCh Gliwice, Poland) was used to produce gluten-free precooked pasta products with 3 runs. This extrusion-cooker is equipped with additional cooling section with glycol before the die to decrease product temperature and avert its stickiness (Juško and others 2009). Blends consisting of 2/1 (w/w) rice/yellow pea flours were moistened for different dough moisture content (28%, 30%, and 32%). After 30 min the blends were fed into the extruder at a feed flow of 13 kg/h and processed at 90 °C in the first extruder section, 100 °C in the second section and 70 °C in the final section. The extruders' cooling–heating jacket system controlled the temperature and aligned process stability. Rice–yellow pea pasta was processed at different screw speeds of 60, 80, and 100 rpm using the barrel configuration of $L/D = 18:1$ (length to screw diameter). Pasta products were formed through a circular die with 12×0.80 mm round openings for thin spaghetti type. After pasta-making, precooked pasta products were dried in an air oven at 40 °C for 4 h to the moisture content of 12% and were kept in sealed plastic bags at ambient temperature. If necessary, pasta samples were ground with laboratory mill ELDOM MK 100S (Katowice, Poland) and sifted to obtain samples with particle size below 300 μm .

Phenolic compounds analysis

Chemicals and standards. Standards of phenolic acids were purchased from Sigma–Aldrich Fine Chemicals (St. Louis, Mo., U.S.A.). All the chemicals were of analytical grade. LC grade methanol (MeOH) and ethanol (EtOH) were purchased from J.T. Baker (Phillipsburg, NJ, U.S.A.). Water of LC grade was prepared

using a Millipore Direct-Q3 purification system (Bedford, Ma., U.S.A.).

Extraction procedures. Ultrasound assisted extraction was carried out in an ultrasonic bath (J.P. Selecta, Barcelona, Spain; frequency 20 kHz, power 100 W) with a thermostat. Extraction was performed with 2 g of ground pasta sample at constant temperature 60 °C with 40 mL of solvent in each cycle, by 2 cycles for 20 min (40 min). Four different solvent systems (ethanol, methanol, 80% aqueous ethanol, and 80% aqueous methanol) were evaluated for the extraction of phenolic acids. The highest yields of all analyzed compounds were obtained with 80% aqueous solution of ethanol. After evaporation of the extracts, the residues were dissolved in methanol (10 mL). The whole procedure was repeated 3 times for each sample (Oniszczuk and others 2014; Oniszczuk and Podgórski 2015). Before chromatographic analysis the extracts were filtered through a 0.45 μm nylon syringe filter.

HPLC-ESI-MS/MS analysis of phenolic acids. The samples were analyzed by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry (HPLC-ESI-MS/MS) according to previously described method (Nowacka and others 2014). For chromatographic separation, an Agilent 1200 Series HPLC system (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, U.S.A.) equipped with a binary gradient solvent pump, a degasser, an autosampler and column oven was used. Samples were separated on a SB-C18 column (Zorbax, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, U.S.A., 2.1 × 50 mm, 1.8- μm) maintained at 25 °C, using 3 μL injections. The mobile phases were water containing 0.1% HCOOH (A) and methanol containing 0.1% HCOOH (B). The following gradient elution program at a flow rate of 400 $\mu\text{L}/\text{min}$ was applied: 0 to 1 min—5% B; 2 to 4 min—20% B; 8 to 9.5 min—70% B; 11.5 to 15 min—5% B. MS detection was performed in a 3200 QTRAP Mass spectrometer (AB Sciex, Framingham, Ma, U.S.A.) equipped with an electrospray ionisation source (ESI) and a triple quadrupole-ion trap mass analyzer that was controlled by the Analyst 1.5 software. ESI worked in the negative-ion mode and the optimum values of the source parameters were: capillary temperature 400 °C, curtain gas 30 psi, nebulizer gas 60 psi, source voltage –4500 V. Nitrogen was used as curtain and collision gas. For each compound the optimum conditions of Multiple Reaction Mode (MRM) were determined in the infusion mode. All standard solutions and samples were injected 3 times. The analytes were identified by comparing retention time and m/z values obtained by MS and MS² with the mass spectra from corresponding standards tested under the same conditions. The calibration curves obtained in MRM mode were used for quantification of all analyzed compounds. The LC-ESI-MS/MS analytical results of phenolic acids, limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) for analytes and linearity ranges for calibration curves are presented in paper described previously (Oniszczuk and Olech 2016).

DPPH radical-scavenging activity of the analyzed extracts. The radical-scavenging activity of the extracts was

determined spectrophotometrically against DPPH radical (Oniszczuk and others 2015). Concentration of DPPH used for the experiment was equal 0.1 mM (4 mg of the free radical and 100 mL of methanol). Measurement of reference sample of DPPH solution was prepared by mixing 2.0 mL of the solution and 1.0 mL of methanol. Measurement of extracts was done after mixing 2.0 mL of DPPH solution and 1.0 mL of the extracts. Each measurement was repeated 3 times at the wave length 517 nm at room temperature. The final result was the average of 3 replicates. The antioxidant activity was calculated with the formula (1) (Oniszczuk and others 2015):

$$\% \text{ DPPH radical scavenging ability } (\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

where A_0 is the absorbance of the reference sample, A_1 is the absorbance of the sample with tested extracts.

Pasting properties. The pasting properties of ground dry pasta were performed in duplicate according to Mitrus and Mościcki (2012) with minor modification. Suspensions (14% w/w flour moisture basis) of 10 g of sample and 100 mL of distilled water were prepared by continuous stirring. The pasting properties were determined by a micro-viscoamylograph (Brabender OHG, Duisburg, Germany) operated under constant conditions of measuring range (speed: 250 rpm; sensitivity: 235 cmg). The following time-temperature profile was used: heating from 30 °C up to 93 °C; holding at 93 °C for 5 min; cooling from 93 to 50 °C, and holding at 50 °C for 1 min. The heating and cooling rates were 7.5 °C/min. The following characteristics were considered: pasting temperature (°C), temperature at the beginning of viscosity increase; initial viscosity (mPa s), cold viscosity at 30 °C; peak viscosity (PV) (mPa s), the highest viscosity during the heating cycle; breakdown (BD) (mPa s), corresponding to the difference between the PV and the viscosity at the end of the holding period at 93 °C and it is an index of viscosity decrease during holding at 93 °C; setback (mPa s), corresponding to the final viscosity minus the viscosity at the end of the holding period at 93 °C and it is an index of viscosity increase during the cooling cycle; final viscosity (mPa s), viscosity reached at the end of the cooling period.

Cooking quality

Minimal preparation time. Ten grams of each sample of the precooked pasta was hydrated with 200 mL of hot water (98 °C). The minimal preparation time of precooked pasta products corresponded to the moment of disappearance of a white inside core of the pasta strand when squeezing it between 2 Plexiglas plates (Wójtowicz and Mościcki 2014).

Water absorption capacity and cooking loss. Water absorption capacity (WAC) was determined according to the approved method AACC 66-50 (2000) with modification. Briefly, 10 g of each sample was hydrated to minimal preparation time in 200 mL of hot water (98 °C), rinsed with cold water (20 °C), and drained for 5 min. The weight of each hydrated pasta sample was then measured and the WAC was calculated using the equation (2):

$$\text{WAC (g/100 g)} = \frac{\text{weight of hydrated pasta} - \text{weight of dry pasta}}{\text{weight of dry pasta}} \times 100 \quad (2)$$

Cooking loss was evaluated according to Wójtowicz and Mościcki (2009). Ten grams of the precooked pasta samples were

hydrated with 200 mL of hot water (98 °C). After the corresponding minimal preparation time, the hydrated sample was rinsed with 100 mL of cold water (20 °C) and drained for 5 min. Both hydrating and rinsing water were placed in Erlenmeyer glass beaker and then totally evaporated in an air oven at 110 °C. The equation (3) was used to calculate the CL:

$$\text{CL } (\%) = \frac{\text{weight of dry residue}}{\text{weight of dry pasta}} \times 100 \quad (3)$$

All tests were performed in triplicate for each pasta sample.

Texture measurements. Texture measurements of pasta were performed on Zwick-Roel BDO-FB0.5 TH instrument (Zwick GmbH & Co., Ulm, Germany) with the working head of 0.5 kN and the test speed of 3.3 mm/s. The instrument was equipped with Warner-Bratzler's cutting knife for hardness tests of dry and hydrated pasta, and with OTMS cell (Ottawa Texture Measuring System) for firmness and adhesiveness tests of hydrated pasta. Tests of texture measurements were performed as described by Wójtowicz (2012) with minor modifications.

The hardness corresponded to the maximum cutting force (N) required to break a single strand (Charutigon and others 2008) of dry or hydrated pasta (at the corresponding minimal preparation time) by placing it on the testing adapter plate at 90° to the cutting knife. TestXpert®10.11 software was used to record and analyze the values and curves of cutting forces. Results were the average of 5 replications. For firmness and adhesiveness of hydrated precooked pasta, 50 g of hydrated and drained pasta were placed in testing chamber and then compressed under double compression test cycle. Firmness (N) and adhesiveness (mJ) were calculated with TestXpert®10.11 software from 2 evaluations (Martinez and others 2007). Firmness was recorded as a maximum force during compression and adhesiveness as a work required to overcome an adhesion between sample and cell material surface (Ross 2006).

Microstructure of dry pasta. The microstructure of dry gluten-free precooked pasta was characterized using scanning electron microscope (SEM). Small specimens of dry pasta were mounted on carbon discs using a silver tape and sprayed with gold in a vacuum sublimator K-550X (Emitech, R.C, Ashford, England). The VEGA LMU microscope (Tescan, Warrendale, PA, U.S.A.) operating at the accelerating voltage of 10 kV was used to examine the surface samples and their cross-section at different magnifications ($\times 125$ and $\times 600$).

Overall acceptability. Each gluten-free precooked pasta sample was hydrated in hot water (98 °C) for required minimal preparation time, drained and kept in warm conditions until testing. Warm hydrated pasta samples (9 samples) were served in a random order to a semi-trained panel of 15 members who assessed the overall acceptability of each pasta sample using a verbal 9-point hedonic scale, where 1-dislike extremely, 2-dislike very much, 3-dislike moderately, 4-dislike slightly, 5-neither like nor dislike, 6-like slightly, 7-like moderately, 8-like very much, and 9-like extremely. Pasta products with an overall acceptability mean score above 5 were considered as acceptable (Bustos and others 2011).

Statistical analysis. Data were presented as means \pm standard deviations. Statistical differences between the mean values were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) followed by the Tukey's Honest Significant Differences *post hoc* test. Two-way analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effect of extrusion-cooking parameters on precooked pasta quality. Correlations between variables were also performed. Statistica software version 10 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK, U.S.A.) was used to perform the statistical analysis at the 5% significance level.

Results and Discussion

Chemical composition of raw materials

Table 1 presents the chemical composition of rice and yellow pea flours. Rice flour is characterized by high fat (2.3%) and carbohydrates (87.1%) contents and lower protein (7.92%), ash (1.37%), and fiber (1.31%) contents compared to yellow pea flour. Calculation based on the 2/1 ratio of rice and pea flour used showed enhancement in protein (13.11%), ash (1.88%), and fiber (1.89%) contents due to the inclusion of yellow pea flour. A similar observation has been reported for gluten-free couscous manufactured with 2/1 (w/w) rice/Proteaginous pea (*Pisum arvense*) blend by Benatallah and others (2008) and for durum wheat pasta fortified with 35% of split pea flour by Petitot and others (2010). In addition, low intake of dietary fiber has been found in celiac population (Stojceska and others 2009). Thus, the fortification of gluten-free products with dietary fiber from legumes would be beneficial (Lamacchia and other 2014).

Phenolic acids composition

Results of phenolics composition of rice-yellow pea gluten-free precooked pasta are presented in the Table 2. In the products fifteen phenolic compounds were indicated. These were: Protocatechuic, 4-OH-benzoic, Vanilic, *trans*-p-Coumaric, *cis*-p-Coumaric, *trans*-Ferulic, *cis*-Ferulic, Salicylic, Gentisic, *trans*-Caffeic, *cis*-Caffeic, Syringic, 3-OH-cinnamic, *trans*-Sinapic and *cis*-Sinapic acids. However, concentrations of Gentisic, *trans*-Caffeic, *cis*-Caffeic, Syringic, 3-OH-cinnamic, *trans*-Sinapic, and *cis*-Sinapic acids were lower than the LOQ but higher than the LOD.

Data from spectrophotometric analyses of rice-yellow pea precooked pasta showed low DPPH radicals scavenging ability—maximum 35.8% after 30 min, whereas solution of Caffeic acid in concentration 0.5 mg/ mL possessed 98.2% DPPH radicals scavenging ability. Therefore these products were low in antiradical activity. This could be as a result of low quality and quantity of phenolic acids in gluten-free precooked pasta made by extrusion-cooking. A reduction of free phenolic acids, which are considered as free radical scavengers, has been found by Fares and others (2010) during pasta processing due to oxidative reactions caused by water, oxygen and heat. In addition, yellow pea exhibited weak antioxidant activity as reported by Halvorsen and others (2002) and Oomah and others (2011).

The lowest amount of phenolic acids was evaluated for rice-yellow pea pasta processed with initial moisture content of 28% and 30% at 60 rpm. Higher screw speed, both 80 and 100 rpm, applied during processing resulted higher amount of phenolic acids present in pasta products. Moistening of raw materials up to 32% resulted similar quantitative composition of phenolic acids in pasta products regardless the screw speed used (Table 2). However, when 80 rpm was applied at this moisture content, phenolic compounds were present in samples at the highest level, so those processing conditions gave the best phenolics composition of final products and the lowest impact on phenolic acids stability. This phenomenon may be associated with the fact, that phenolic acids in cereal grains (rice) are primarily bound to cell wall components (Inglett and others 2010). Such lignin complexes are difficult to break down and then lower screw speeds are less efficient. Friction generated by high screw speed, could have released phenolic acids from these complexes. Two-way ANOVA showed high significant effect ($P < 0.001$) of moisture content, screw speed and moisture content-screw speed interactions on all phenolic acids contents.

Table 2—Contents of phenolic acids in rice-yellow pea precooked pasta depend on processing conditions.

| Processing conditions | | Yield of acid \pm SD (ng/g of dry weight) | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|--|--|--|
| Moisture content (%) | Screw speed (rpm) | Protocatechuic | 4-OH-benzoic | Vanilic | <i>trans</i> -p-Coumaric | <i>cis</i> -p-Coumaric | <i>trans</i> -Ferulic | <i>cis</i> -Ferulic | Salicylic | | | | |
| 28 | 60 | 133.67 \pm 1.41 ^c | 344.140 \pm 3.1 ^c | 729.427 \pm 5.29 ^d | 219.327 \pm 0.88 ^c | 242.768 \pm 1.59 ^d | 230.175 \pm 3.17 ^b | 1563.591 \pm 3.53 ^d | 284.289 \pm 3.53 ^d | | | | |
| | 80 | 94.28 \pm 0.07 ^b | 299.851 \pm 2.23 ^b | 552.390 \pm 7.00 ^b | 163.178 \pm 0.09 ^a | 165.222 \pm 2.80 ^a | 168.194 \pm 3.85 ^a | 1073.817 \pm 8.76 ^a | 185.162 \pm 1.58 ^a | | | | |
| | 100 | 215.07 \pm 2.12 ^c | 432.884 \pm 3.31 ^c | 867.01 \pm 8.82 ^c | 308.632 \pm 4.59 ^d | 259.855 \pm 3.0 ^c | 329.840 \pm 6.35 ^c | 1666.667 \pm 7.06 ^c | 328.093 \pm 1.76 ^f | | | | |
| 30 | 60 | 156.82 \pm 2.81 ^d | 382.134 \pm 0.82 ^d | 590.571 \pm 7.02 ^b | 235.732 \pm 0.35 ^c | 221.836 \pm 2.46 ^c | 240.571 \pm 0.18 ^b | 1449.752 \pm 4.39 ^c | 304.466 \pm 1.05 ^c | | | | |
| | 80 | 76.11 \pm 1.97 ^a | 266.021 \pm 1.28 ^a | 403.626 \pm 5.27 ^a | 164.928 \pm 2.11 ^a | 175.608 \pm 1.41 ^a | 159.588 \pm 0.88 ^a | 1107.799 \pm 7.03 ^a | 205.415 \pm 2.46 ^b | | | | |
| 32 | 100 | ND | 339.742 \pm 2.82 ^c | 570.578 \pm 7.02 ^b | 195.361 \pm 0.18 ^b | 213.967 \pm 0.88 ^{b,c} | 177.748 \pm 1.93 ^a | 1327.214 \pm 0.0 ^b | 242.744 \pm 0.88 ^c | | | | |
| | 60 | 394.66 \pm 2.8 ^b | 569.609 \pm 1.85 ^g | 767.804 \pm 5.25 ^d | 459.941 \pm 3.5 ^e | 255.935 \pm 1.75 ^{d,e} | 559.347 \pm 6.29 ^d | 2090.752 \pm 8.74 ^g | 403.684 \pm 6.12 ^g | | | | |
| | 80 | 357.45 \pm 0.7 ^g | 654.114 \pm 2.59 ^h | 856.326 \pm 12.30 ^e | 497.514 \pm 0.53 ^f | 346.756 \pm 5.27 ^f | 563.013 \pm 5.27 ^d | 2851.106 \pm 7.03 ^h | 457.743 \pm 2.99 ^h | | | | |
| 100 | 276.98 \pm 2.11 ^f | 476.131 \pm 1.18 ^f | 658.876 \pm 0.00 ^e | 442.566 \pm 7.03 ^e | 203.754 \pm 2.99 ^b | 573.098 \pm 1.76 ^d | 1854.799 \pm 10.55 ^f | 413.973 \pm 1.76 ^g | | | | | |

^{a,b}Means with the same superscript within a column are not significantly different ($P > 0.05$); ND – not detected.

Pasting properties

Although viscoamylographic test was mainly adopted to characterize the pasting properties of starch and flours, it was also carried out on dry pasta to give information about starch transformations after the extrusion-cooking of pasta products (Marti and others 2014). During the viscoamylographic test the starch that did not retrograde during pasta processing has the possibility to retrograde. So, low SB and FV values reflect high amount of retrograded starch in pasta products. On the contrary, high SB and FV values reflect low amount of retrograded starch in pasta products (Mariotti and others 2011).

Some differences were noted in pasting characteristics of pasta samples according to each extrusion-cooking condition (Table 3). These differences can be due to the modification of starch during the extrusion-cooking and the interactions between protein, starch, and other polysaccharide resulting from the processing (Marti and others 2010).

Generally, for all pasta samples, viscosity values were lower than those reported for native rice flour, pregelatinized rice flour (Marti and others 2013), and pasta made from milled rice using extrusion-cooking technique (Marti and others 2010). The decrease in magnitude of PV indicates greater degradation and gelatinization of starch (Hagenimana and others 2006). In addition, the low setback and final viscosity values of gluten-free pasta samples indicate that the extrusion-cooking process induced a high retrogradation of starch (Mariotti and others 2011).

Pasting temperature (PT) decreased as moisture content increased ($r = -0.78$, $P < 0.001$). This might be due to the higher amount of damaged starch in dry pasta that could rapidly absorb water and its starch granules quickly swelling causing easily starch gelatinization at lower temperature. PT was correlated positively with PV ($r = 0.68$, $P < 0.01$) and BD ($r = 0.64$, $P < 0.01$). Values of initial viscosity (IV) indicate that the starch granules in all pasta samples are partially gelatinized. IV increased as moisture content decreased ($r = -0.84$, $P < 0.001$). The high IV and the low PT in pasta samples could be a result of shearing forces during the extrusion (Ortiz and others 2010), which lead to the molecular modification of the starch granules, resulting in the loss of the integrity of starch granule and destruction of its crystallinity as reported by Lai (2001) and Lai and Cheng (2004). The PV reflects the maximum swelling of the starch granule (Zhong and others 2009). All pasta samples exhibited low PV, mainly for pasta processed at high moisture content ($r = -0.77$, $P < 0.001$) and low screw speed. The low PV of pasta samples may be attributed to the low hydration capacity of the matrix, as a consequence of both starch gelatinization and retrogradation phenomenon taking place during extrusion-cooking (Marti and others 2014). The PV was correlated positively with the setback (SB) ($r = 0.64$, $P < 0.01$) and the final viscosity (FV) ($r = 0.75$, $P < 0.001$). Mariotti and others (2011) were found similar results for commercial gluten-free spaghetti samples.

High temperatures and mechanical shearing applied to the product suspensions during the holding period at 93 °C led to the disruption of starch granule and the leaching of amylose, causing a decrease in viscosity in pasta samples (corresponding to BD) (Barbiroli and others 2013). Pasta samples processed at high moisture content presented significant low BD values ($r = -0.68$, $P < 0.001$). BD was positively correlated with SB ($r = 0.73$, $P < 0.001$). Low values of FV were observed for samples processed at 32% moisture content and screw speed of 60 rpm. The viscosity increased slightly for all pasta samples after cooling to 50 °C. During cooling, amylose molecules, leached out from the starch

granule, are re-associate which led to the formation of viscous paste causing an increase in viscosity (corresponding to setback) (Kim and Shin, 2014). The low SB values of pasta samples reflect low amount of retrograded starch (Abdel-Aal and others 2002; Ragaei and Abdel-Aal 2006). A positive correlation was found between SB and FV ($r = 0.66$, $P < 0.01$).

Two-way ANOVA showed high significant effect ($P < 0.001$) of moisture content on all pasting properties of precooked pasta. Screw speed had high significant effect ($P < 0.001$) on PT and IV and a significant effect ($P < 0.05$) on PV and FV. Moisture content-screw speed interaction was significant ($P < 0.05$) for PT, IV, and FV.

Effect of extrusion-cooking conditions on precooked pasta quality

Minimal preparation time, WAC, and cooking loss.

Moisture content and screw speed had no significant effect on the minimal preparation time of the rice-yellow pea pasta, and 7 to 8 min of hot water hydration sufficed to obtain the proper consistency without conventional cooking. However, the longest minimal preparation time (9 min) was observed for the samples processed with 32% of moisture content and 100 rpm of screw speed. Wang and others (2012) found that cooking time increased as screw speed and moisture content increased for noodles made from pea starch using a twin-screw extruder.

WAC is an important measured index, which depends on the amount of damaged starch and the weakness of its granules (Yoenyongbuddhagal and Noomhorn 2002a,b). Pasta products processed with 32% of moisture content and 60 rpm of screw speed had the highest values of WAC. In addition, WAC was positively correlated with cooking loss ($r = 0.82$, $P < 0.001$). Figure 1A shows that when moisture content increase WAC increases ($r = 0.63$, $P < 0.001$). This behavior suggests that extrusion-cooking at high moisture content led to the formation of a more hydrophilic structure causing higher water absorption as reported by Marti and others (2010). Moreover, low WAC indicates poor quality of cooked pasta due to the chewy texture (Wang and others 2012).

Cooking loss (CL) increased as moisture content of raw materials increased ($r = 0.65$, $P < 0.001$) (Figure 1B). Cooking losses presented in the paper are lower than those found in gluten-free pasta made by extrusion-cooking process with a base of pea flour (Wang and others 1999) and corn-broad beans flour (Gimenez and others 2013), and higher than those found by Marti and others (2010) in pasta obtained from milled rice by extrusion-cooking.

However, the determined values of CL are below 7% to 8% reported for semolina spaghetti (Doxastakis and others 2007), 9% to 10% for starch noodles (Tan and others 2009), and 10% for precooked pasta, indicating good quality of all pasta sample assessed in our study (Kim and others 1996; Wang and others 1999) and suggesting that extrusion-cooking applied to produce rice-yellow pea pasta form a structure with good rate of starch networking which tolerate the stresses during hot water hydration. Giménez and others (2013) have suggested that the extrusion-cooking at high temperature and low moisture content led to the creation of less soluble structure, accounting for the low CL (less than 7% in our study). In addition, starch is often considered as the main structural network in gluten-free pasta due to its functional properties (Lucisano and others 2012). The formation of a strong network of retrograded starch around the gelatinized starch triggers less leaching of gelatinized starch from the surface of gluten-free pasta, therefore, less cooking loss (Resmini and Pagani 1983).

Table 3—Pasting characteristics of the rice-yellow pea precooked pasta samples corresponding to each extrusion-cooking condition.

| Moisture content (%) | Screw speed (rpm) | Pasting temperature (°C) | Initial viscosity (mPa s) | Peak viscosity (mPa s) | Breakdown (mPa s) | Final viscosity (mPa s) | Setback (mPa s) |
|----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 28 | 60 | 58.0 ± 2.83 ^{ab} | 48.5 ± 0.71 ^{ab} | 124.0 ± 4.25 ^{ac} | 65.0 ± 4.24 ^{ab} | 126.5 ± 0.71 ^{abc} | 67.5 ± 0.71 ^{abc} |
| | 80 | 42.5 ± 3.54 ^{bc} | 38.0 ± 4.95 ^{bc} | 134.5 ± 4.95 ^a | 59.0 ± 2.83 ^a | 143.5 ± 2.12 ^d | 68.0 ± 0.0 ^{abc} |
| | 100 | 65.0 ± 9.90 ^a | 56.0 ± 8.46 ^{ab} | 133.5 ± 3.54 ^a | 62.5 ± 4.95 ^{ab} | 133.0 ± 4.24 ^{abd} | 62.0 ± 2.83 ^a |
| 30 | 60 | 40.5 ± 2.12 ^{cd} | 31.0 ± 1.41 ^{cd} | 135.5 ± 7.78 ^a | 75.5 ± 4.95 ^b | 135.5 ± 3.54 ^{ad} | 75.5 ± 4.95 ^c |
| | 80 | 35.5 ± 0.71 ^{cd} | 26.0 ± 0.0 ^{cd} | 128.0 ± 2.83 ^a | 63.5 ± 9.19 ^{ab} | 138.5 ± 2.12 ^d | 74.0 ± 0.0 ^{bc} |
| | 100 | 59.0 ± 4.24 ^a | 48.0 ± 2.83 ^a | 135.5 ± 0.71 ^a | 70.0 ± 0.71 ^{ab} | 132.5 ± 3.54 ^{abd} | 67.0 ± 4.24 ^{abc} |
| 32 | 60 | 25.5 ± 2.12 ^d | 16.5 ± 2.12 ^d | 96.5 ± 2.12 ^b | 37.0 ± 0.0 ^c | 120.0 ± 0.0 ^c | 60.5 ± 2.12 ^a |
| | 80 | 29.5 ± 2.12 ^{cd} | 20.0 ± 2.83 ^d | 103.5 ± 4.95 ^b | 42.0 ± 0.0 ^c | 122.0 ± 4.24 ^{bc} | 60.5 ± 2.12 ^a |
| | 100 | 31.5 ± 2.12 ^{cd} | 21.5 ± 2.12 ^d | 111.0 ± 2.83 ^{bc} | 40.5 ± 2.83 ^c | 134.5 ± 2.12 ^{ad} | 64.0 ± 1.41 ^{ab} |

^{a-d}Means with the same superscript within a column are not significantly different ($P > 0.05$).

Texture of dry precooked pasta. Figure 2A displays the effects of extrusion-cooking variables on hardness of dry precooked pasta. Screw speed had no effect on hardness of dry pasta (HDP). On the contrary, HDP decreased when moisture content increased ($r = -0.79$, $P < 0.001$) and ranged from 7 N if processed at 28% of moisture content up to 3 N at 32%. Pasta products processed at 28% of moisture content were characterized by a strong structure

which is confirmed by the low values of CL and therefore high values of HDP. HDP and CL came out, in fact, to be negatively correlated ($r = -0.63$, $P < 0.001$). A negative correlation was found also between HDP and WAC ($r = -0.65$, $P < 0.001$).

Texture of hydrated precooked pasta. Hardness of hydrated pasta (HHP) decreased as moisture content increased ($r = -0.79$, $P < 0.001$) (Figure 2B). In contrast, HHP increased as

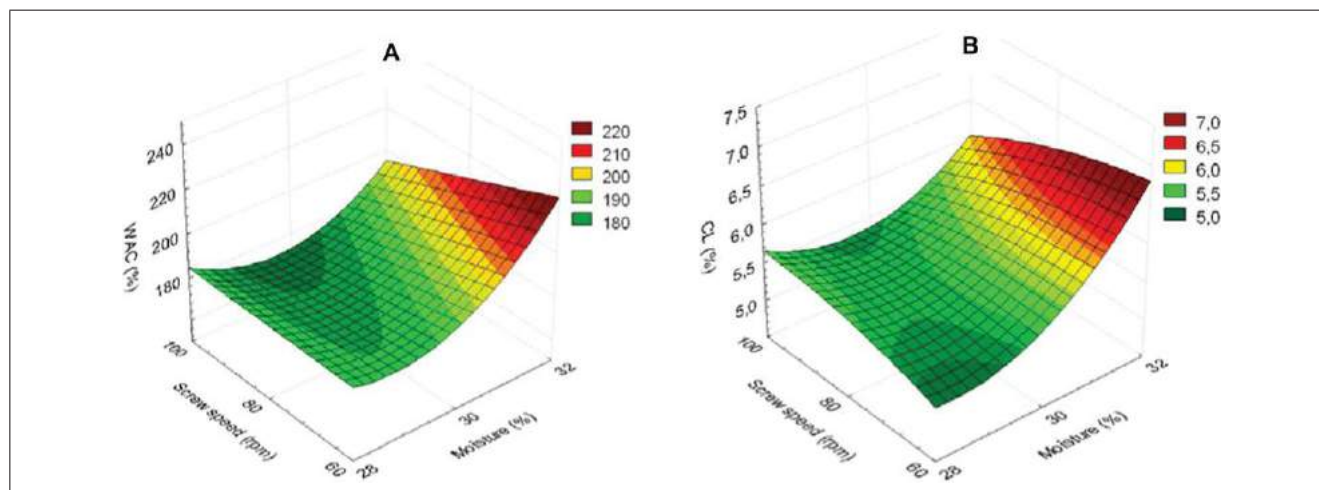


Figure 1—Surface responses obtained for (A) water absorption capacity and (B) cooking loss of rice-yellow pea precooked pasta.

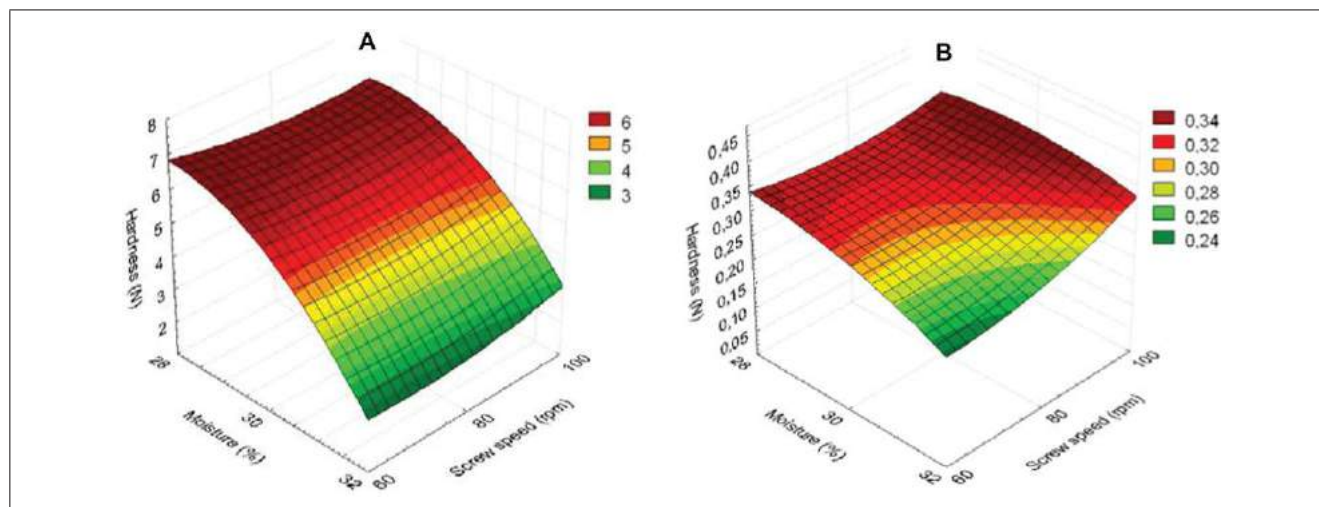


Figure 2—Surface responses obtained for hardness of dry (A) and hydrated (B) rice-yellow pea precooked pasta.

Table 4—Sensory overall acceptability of rice-yellow pea precooked pasta.

| Moisture content (%) | Screw speed (rpm) | Sensory overall acceptability |
|----------------------|-------------------|-------------------------------|
| 28 | 60 | 6.73 ± 1.16 ^b |
| | 80 | 6.60 ± 1.12 ^b |
| | 100 | 4.07 ± 0.88 ^c |
| 30 | 60 | 7.20 ± 1.61 ^a |
| | 80 | 7.60 ± 0.74 ^a |
| | 100 | 7.53 ± 1.25 ^a |
| 32 | 60 | 6.80 ± 1.15 ^b |
| | 80 | 6.93 ± 1.03 ^b |
| | 100 | 6.86 ± 1.49 ^b |

^{a-c}Means with the same superscript within a column are not significantly different ($P > 0.05$).

screw speed increased. The values of HHP are higher than those found by Wójtowicz (2012) for buckwheat precooked pasta, and lower than those reported by Wójtowicz and Mościcki (2009) for precooked pasta made from common wheat. HHP and WAC were correlated negatively ($r = -0.68$, $P < 0.001$).

Texture (firmness and/or adhesiveness) is the most critical parameter for evaluating the overall quality and the consumer acceptance of cooked pasta (Galvez and Resurreccion 1992; Lucisano and others 2012). Initial moisture content of flour blends and screw speed applied during processing had no clear effect on precooked pasta firmness (Figure 3A). However, the highest firmness was recorded for precooked pasta processed at 80 rpm and 30% of moisture content. These pasta samples had the highest notes in sensory overall acceptability (Table 4). The adhesiveness of hydrated pasta increased as moisture content increased ($r = 0.83$, $P < 0.001$) and low values were observed for pasta processed at 60 rpm and moisture content up to 30% (Figure 3B). According to Dexter and others (1985) and Wood (2009), amylose and amylopectin are less degraded in the extrudate processed at high level of moisture content due to the relatively low viscosity of starch in the extruder barrel causing less effect of screw speed on shearing forces. Pasta adhesiveness was affected by both pasta surface structure and amylose leached from the pasta surface during cooking. Adhesiveness was correlated positively with WAC ($r = 0.61$, $P < 0.01$) and with CL ($r = 0.53$, $P < 0.05$).

Using 2-way ANOVA, moisture content showed a high significant effect ($P < 0.001$) on all parameter of pasta quality except of firmness. High significant effect ($P < 0.001$) of screw speed and moisture content-screw speed interaction was observed on WAC and acceptability of cooked pasta while a significant effect ($P < 0.05$) was observed for screw speed on hardness and adhesiveness of cooked pasta. In addition, moisture content-screw speed interaction was significant ($P < 0.05$) for CL and hardness of cooked pasta.

Microstructure of pasta-like products. Dry pasta samples were observed by scanning electron microscopy. The surface and cross-sectional microstructure of precooked pasta were affected by the process conditions. All pasta samples showed a corrugated surface (Figure 4A to D). The same observation was reported by Wójtowicz and Mościcki (2014) for common wheat precooked pasta enriched with yellow pea flour. Moreover, the surface of all pasta samples showed melted materials (Figure 4E to H), due to the influence of the extrusion-cooking technique on starch structure. At high magnification, precooked pasta processed at low moisture content (28%) presented a rough surface (Figure 4E and F). In contrast, samples processed at 30% and 32% of moisture content demonstrated smoother surface (Figure 4G and H).

Cross-sectional microstructure revealed almost homogenous compact inside structure with starch-protein matrix and few aggregates visible at high magnification. This structure characterized samples processed at high moisture content (30% and 32%) regardless screw speed (Figure 5C, G, D, and H). This structure stems from the effect of extrusion-cooking parameters (moisture, shearing forces, and temperature) which triggers the gelatinization of starch and coherent structure (Wójtowicz and Mościcki 2009). Retrograded starch organization is considered as an alternative of the gluten networking because it gives rigidity to cooked pasta, and reduces both pasta adhesiveness and cooking loss (Lucisano and others 2012). However, samples obtained at 28% of initial moisture content and 60 rpm exhibited more irregular inside structure with many aggregates (Figure 5A and E). In addition, samples processed at 28% of moisture content and 100 rpm were characterized by the presence of big empty holes because of insufficient water amount and high shearing during processing (Figure 5B and F). Thus, these samples received the lowest scores for overall acceptability during sensory evaluation.

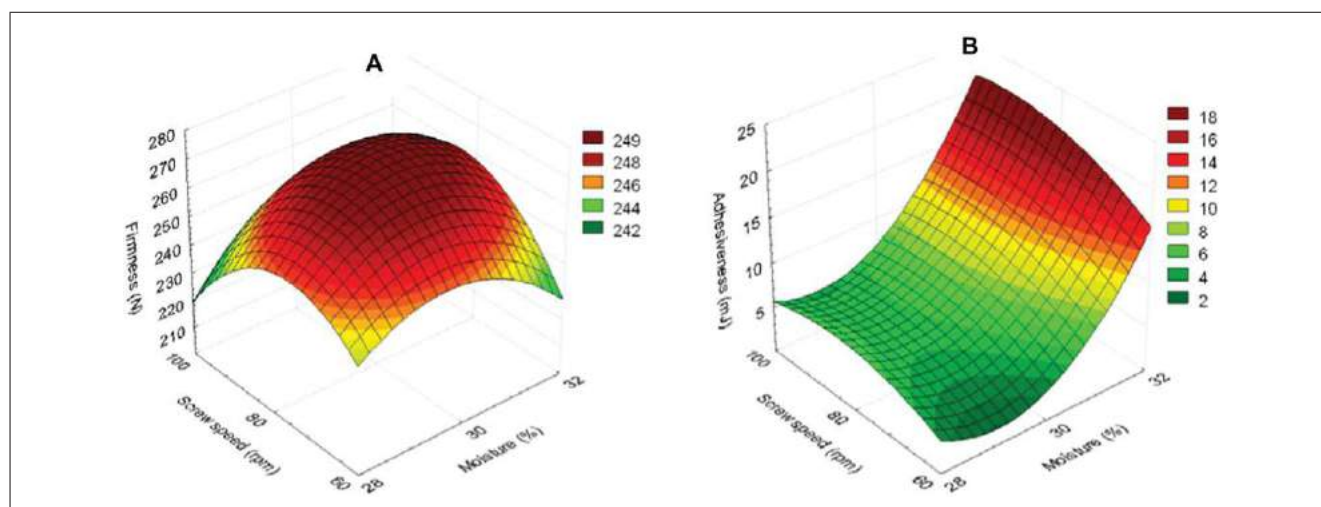


Figure 3—Surface responses obtained for (A) firmness, and (B) adhesiveness of hydrated rice-yellow pea precooked pasta.

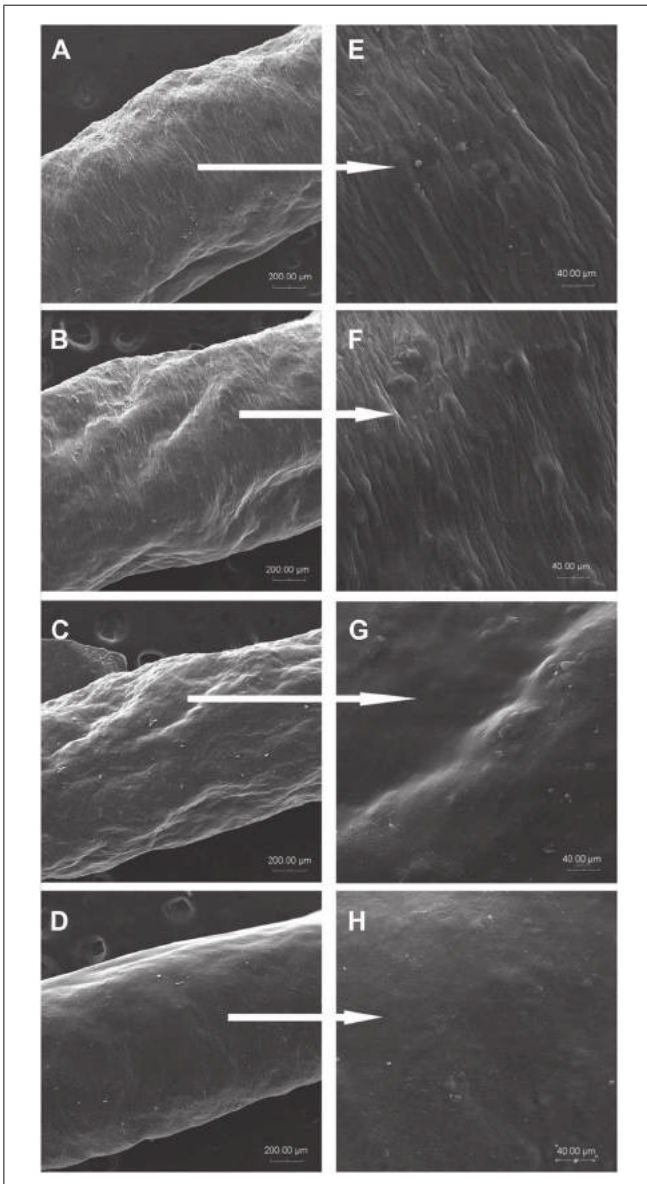


Figure 4—Surface of dry precooked pasta processed at: (A, E) 28% m.c., 60 rpm; (B, F) 28% m.c., 100 rpm; (C, G) 30% m.c., 80 rpm; (D, H) 32% m.c., 100 rpm, in magnification $\times 125$ (A, B, C, and D) and $\times 600$ (E, F, G, and H).

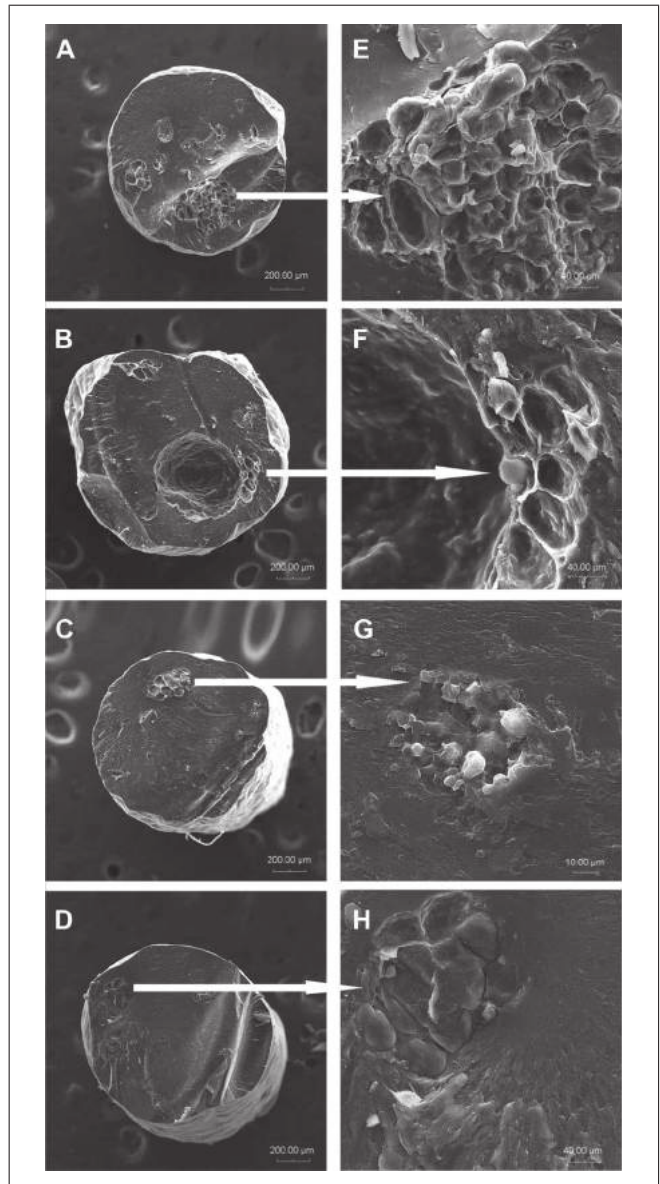


Figure 5—Cross-section of precooked pasta processed at: (A, E) 28% m.c., 60 rpm; (B, F) 28% m.c., 100 rpm; (C, G) 30% m.c., 80 rpm; (D, H) 32% m.c., 100 rpm, in magnification $\times 125$ (A, B, C, and D) and $\times 600$ (E, F, G, and H).

Overall acceptability. Table 4 presents mean values of overall acceptability of rice–yellow pea precooked pasta corresponding to each extrusion-cooking condition (moisture content and screw speed). Overall acceptability presented acceptable values (notes >5) in all the range of moisture content and screw speed, except for samples processed at low moisture content (28%) and high screw speed (100 rpm). These samples present significant lower scores of overall acceptability due to the presence of empty holes in the pasta strands as confirmed by the SEM (Figure 5B). This phenomenon could be attributed to the low moisture content and high shearing involving the evaporation of water inside the pasta strand. Gluten-free pasta processed at 30% of moisture content and 80 rpm exhibited the highest score in the overall acceptability. These results agree with the findings of Wójtowicz and Mościcki (2009) for common wheat precooked pasta as the suitable processing conditions of these types of precooked pasta-like products.

Conclusion

Gluten-free precooked pasta was successfully prepared from rice–yellow pea blend flour by extrusion-cooking process. Protein, ash, and dietary fiber contents were improved in the blend due to the rice–yellow pea complementation. Both dough moisture content and screw speed had significant effects on the quality parameters assessed in our study. Preferable process conditions for good quality of rice–yellow pea precooked pasta made with a modified single screw extrusion-cooker were 30% of dough moisture content and 80 rpm of screw speed. Gluten-free precooked rice–yellow pea pasta prepared at the above-cited processing conditions exhibited high level of phenolic acids and adequate properties of precooked pasta including firm texture, low stickiness, and regular and compact interne structure confirmed by sensory analysis.

Acknowledgments

Phenolic acids composition was performed using the equipment purchased within the Project "The equipment of innovative laboratories doing research on new medicines used in the therapy of civilization and neoplastic diseases" within the Operational Program Development of Eastern Poland 2007–2013, Priority Axis I Modern Economy, Operations I.3 Innovation Promotion.

Authors' Contributions

A. Bouasla collected test data, interpreted the results, planned and writing the manuscript. A. Wójtowicz substantive supervision of research, designed the study, precooked pasta processing, and initial proofreading. M.N. Zidoune revised the manuscript. M. Olech performed measurements of phenolic acids. R. Nowak performed LC-ESI-MS/MS analytical method. M. Mitrus performed pasting properties. A. Oniszczuk analyzed and described results of phenolic acids.

References

- AACC. 1995. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists. 9th ed. St. Paul, Minn., U.S.A.: AACC.
- AACC International. 2000. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists. 10th ed. St. Paul, Minn.: American Association of Cereal Chemists International.
- Abdel-Aal E-SM, Hucl P, Chibbar RN, Han HL, Demeke T. 2002. Physicochemical and structural characteristics of flours and starches from waxy and nonwaxy wheats. *Cereal Chem* 79(3): 458–64. doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.3.458.
- Alonso R, Aguirre A, Marzo F. 2000. Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chem* 68:159–65. doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00169-7.
- Amarowicz R, Pegg RB. 2008. Legumes as a source of natural antioxidants. *Eur J Lipid Sci Technol* 110: 865–78. doi: 10.1002/ejlt.200800114.
- AOAC Intl. 2000. Official methods of analysis of AOAC International. 17th ed. Gaithersburg, Md.: Association of Official Analytical Chemists.
- Arocha Gularte M, Gomez M, Rosell CM. 2012. Impact of legume flours on quality and in vitro digestibility of starch and protein from gluten-free cakes. *Food Bioprocess Technol* 5:3142–50. doi: 10.1007/s11947-011-0642-3.
- Barbiroli A, Bonomi F, Casiraghi MC, Iametti S, Pagani MA, Marti A. 2013. Process conditions affect starch structure and its interactions with proteins in rice pasta. *Carbohydr Polym* 92:1865–72. doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.047.
- Benatallah L, Agli A, Zidoune MN. 2008. Gluten-free couscous preparation: traditional procedure description and technological feasibility for three rice-leguminous supplemented formulae. *J Food Agric Environ* 6(2):105–12.
- Bruneel C, Pareyt B, Brijs K, Delcour JA. 2010. The impact of the protein network on the pasting and cooking properties of dry pasta products. *Food Chem* 120:371–8. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.09.069.
- Bustos MC, Perez GT, León AE. 2011. Sensory and nutritional attributes of fibre-enriched pasta. *LWT - Food Sci Technol* 44:1429–34. doi: 10.1016/j.lwt.2011.02.002.
- Cabrera-Chávez F, Calderón de la Barca AM, Islas-Rubio AR, Marti A, Marengo M, Pagani MA, Bonomi F, Iametti S. 2012. Molecular rearrangements in extrusion processes for the production of amaranth-enriched, gluten-free rice pasta. *LWT - Food Sci Technol* 47:421–26. doi: 10.1016/j.lwt.2012.01.040.
- Camire ME, Camire A, Krumhar K. 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Food Sci Nutr* 29(1):35–57.
- Cham S, Suwannaporn P. 2010. Effect of hydrothermal treatment of rice flour on various rice noodles quality. *J Cereal Sci* 51:284–91. doi: 10.1016/j.jcs.2010.01.002.
- Charutigon C, Jitpupakdree J, Namsree P, Rungsardthong V. 2008. Effects of processing conditions and the use of modified starch and monoglyceride on some properties of extruded rice vermicelli. *LWT - Food Sci Technol* 41:642–51. doi: 10.1016/j.lwt.2007.04.009.
- De Clindio B, Gabriele D, Pollini CM, Peressini D, Sensidoni A (2002) Filled snack production by coextrusion-cooking: 1. Rheological modelling of the process. *J Food Eng* 52:67–74. doi: 10.1016/S0260-8774(01)00087-5.
- Dexter JE, Matsuo RR, MacGregor AW. 1985. Relationships of instrumental assessment of spaghetti cooking quality to the type and the amount of material rinsed from cooked spaghetti. *J Cereal Sci* 3:39–53.
- Doxastakis G, Papageorgiou M, Mandelau D, Irakli M, Papalamprou E, D'Agostina A, et al. 2007. Technological properties and non-enzymatic browning of white lupin protein enriched spaghetti. *Food Chem* 101(1):57–64. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.12.054.
- Duranti M. 2006. Grain legume proteins and nutraceutical properties. *Fitoterapia* 77 (2):67–82. doi: 10.1016/j.fitote.2005.11.008.
- Fares C, Platani C, Baiano A, Menga V. 2010. Effect of processing and cooking on phenolic acid profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta enriched with debranning fractions of wheat. *Food Chem* 119:1023–9. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.08.006.
- Galvez FCF, Resurreccion AVA. 1992. Reliability of the focus group technique in determining the quality characteristics of mung bean noodles. *J Sens Stud* 7:315–26. doi: 10.1111/j.1745-459X.1992.tb00197.x.
- Giménez MA, González RJ, Wagner J, Torres R, Lobo MO, Samman NC. 2013. Effect of extrusion conditions on physicochemical and sensorial properties of corn-broad beans (*Vicia faba*) spaghetti type pasta. *Food Chem* 136:538–45. doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.08.068.
- Giuberti G, Gallo A, Cerioli C, Fortunati P, Masoero F. 2015. Cooking quality and starch digestibility of gluten free pasta using new bean flour. *Food Chem* 175:43–9. doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.127.
- Hagenimana A, Ding X, Fang T. 2006. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *J Cereal Sci* 43:38–46.
- Halvorsen BL, Holte K, Myhrstad MCW, Barikmo I, Hvattum E, Remberg SF, Wold AB, Haffner K, Baugerod H, Andersen LF, Moskaug JO, Jacobs DR, Blomhoff R. 2002. A systematic screening of total antioxidants in dietary plants. *J Nutr* 132:461–71.
- Heo S, Jeon S, Lee S. 2014. Utilization of *Lentinus edodes* mushroom β -glucan to enhance the functional properties of gluten-free rice noodles. *LWT - Food Sci Technol* 55:627–31. doi.org/10.1016/j.lwt.2013.10.002.
- Inglett GE, Rose DJ, Chen D, Stevenson DG, Biswas A. 2010. Phenolic content and antioxidant activity of extracts from whole buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Mönch) with or without microwave irradiation. *Food Chem* 119: 1216–9. doi:10.1016/j.foodchem.2009.07.041.
- Jusko S, Mościcki L, Wójtowicz A. 2009. Cooling-forming section, Design Patent PL64690Y1, Patent Office Bulletin (BUP), 2(195), p. 25.
- Kim JM, Shin M. 2014. Effects of particle size distributions of rice flour on the quality of gluten-free rice cupcakes. *LWT - Food Sci Technol* 59:526–32. doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.042.
- Kim Y, Kee JI, Lee S, Yoo SH. 2014. Quality improvement of rice noodle restructured with rice protein isolate and transglutaminase. *Food Chem* 145:409–16. doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.078.
- Kim Y, Wiesenborn D, Lorenzen J, Berglund P. 1996. Suitability of edible bean and potato starches for starch noodles. *Cereal Chem* 73(3):302–7.
- Lai HM, Cheng HH. 2004. Properties of pregelatinized rice flour made by hot air or gun puffing. *Int J Food Sci Technol* 39:201–12.
- Lai HM. 2001. Effects of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. *Food Chem* 72:455–63.
- Lamacchia C, Camarca A, Picascia S, Di Luccia A, Ginafrani C. 2014. Cereal based gluten-free food: how to reconcile nutritional and technological properties of wheat proteins with safety for celiac disease patients. *Nutrients* 6:575–90. doi: 10.3390/nu6020575.
- Lucisano M, Cappa C, Fongaro L, Mariotti M. 2012. Characterisation of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: evaluation of the cooking behavior. *J Cereal Sci* 56:667–75. doi.org/10.1016/j.jcs.2012.08.014.
- Mariotti M, Iametti S, Cappa C, Rasmussen P, Lucisano M. 2011. Characterization of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: evaluation of uncooked products. *J Cereal Sci* 53:319–27. doi: 10.1016/j.jcs.2011.02.001.
- Marti A, Barbiroli A, Marengo M, Fongaro L, Iametti S, Pagani MA. 2014. Structuring and texturing gluten-free pasta: egg albumen or whey proteins. *Eur Food Res Technol* 238:217–24. doi: 10.1007/s00217-013-2097-4.
- Marti A, Caramanico R, Bottega G, Pagani MA. 2013. Cooking behaviour of rice pasta: effect of thermal treatments and extrusion conditions. *LWT - Food Sci Technol* 54:229–35. doi.org/10.1016/j.lwt.2013.05.008.
- Marti A, Pagani MA. 2013. What can play the role of gluten in gluten free pasta? *Trends Food Sci Technol* 31:63–71. doi: 10.1016/j.tifs.2013.03.001.
- Marti A, Seetharaman K, Pagani MA. 2010. Rice-based pasta: a comparison between conventional pasta-making and extrusion-cooking. *J Cereal Sci* 52:4–9. doi: 10.1016/j.jcs.2010.07.002.
- Martinez C, Ribotta P, León A, Añón C. 2007. Physical, sensory and chemical evaluation of cooked spaghetti. *J Texture Stud* 38:666–83. doi: 10.1111/j.1745-4603.2007.00119.x.
- Mitrus M, Mościcki L. 2012. Pasting properties of extrusion-cooked wheat starch. Proceedings of the 6th International Congress "Flour-Bread'11", Opatjina, Croatia, p 328–31.
- Nowacka N, Nowak R, Drozd M, Olech M, Los R, Malm A. 2014. Analysis of phenolic constituents, antiradical and antimicrobial activity of edible mushrooms growing wild in Poland. *LWT - Food Sci Technol* 59:689–94. doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.041.
- O'Shea N, Arendt E, Gallagher E. 2014. State of the art of gluten-free research. *J Food Sci* 79:1067–76. doi: 10.1111/1750-3841.12479.
- Oniszczuk A, Olech M. 2016. Optimization of ultrasound-assisted extraction and LC-ESI-MS/MS analysis of phenolic acids from *Brassica oleracea* L. var. *sabellica*. *Ind Crop Prod* 83:359–63. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.01.015.
- Oniszczuk A, Oniszczuk T, Wójtowicz A, Wojtunik K, Kwaśniewska A, Waksmundzka-Hajnos M. 2015. Radical scavenging activity of extruded corn gruels with addition of linden inflorescence. *Open Chem* 13:1101–07. doi: 10.1515/chem-2015-0118.
- Oniszczuk A, Podgórski R. 2015. Influence of different extraction methods on the quantification of selected flavonoids and phenolic acids from *Tiliacordata* inflorescence. *Ind Crop Prod* 76:509–14. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.07.003.
- Oniszczuk A, Podgórski R, Oniszczuk T, Zukiewicz-Sobczak W, Nowak R, Waksmundzka-Hajnos M. 2014. Extraction methods for the determination of phenolic compounds from *Equisetum arvense* L. herb. *Ind Crop Prod* 61:377–81. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.07.036.
- Oomah BD, Caspar F, Malcolmson LJ, Bellido A-S. 2011. Phenolics and antioxidant activity of lentil and pea hulls. *Food Res Intl* 44:436–41. doi: 10.1016/j.foodres.2010.09.027.
- Ortiz JAR, De Carvalho CWP, Ascheri DPR, Ascheri JLR, De Andrade CT. 2010. Effect of sugar and water contents on non-expanded cassava flour extrudates. *GiencTecnol Aliment, Campinas* 30(1):205–12.
- Pagano AE. 2006. Whole grains and the gluten-free diet. *Pract Gastroenterol* 29:66–78.
- 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 Res Intl* 43:634–41. doi: 10.1016/j.foodres.2009.07.020.
- Ragae S, Abdel-Aal E-SM. 2006. Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chem* 95:9–18. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.12.012.
- Resmini P, Pagani MA. 1983. Ultrastructure studies of pasta, a review. *Food Microstruct* 2:1–12.
- Rosell CM, Marco C. 2008. Rice. In: Arendt EK, Dal Bello F, editors. *Gluten-free cereal products and beverages*. London: Elsevier Applied Science, p 81–100.
- Ross A. 2006. Instrumental measurement of physical properties of cooked Asian wheat flour noodles. *Cereal Chem* 83(1):42–51. doi.org/10.1094/CC-83-0042.
- Shimelis EA, Rakshit SK. 2007. Effect of processing on antinutrients and in vitro digestibility of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in East Africa. *Food Chem* 103:161–72. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.08.005.
- Stojceska V, Ainsworth P, Plunkett A, Ibanoglu S. 2009. The advantage of using extrusion processing for increasing dietary fibre level in gluten-free products. *Food Chem* 121:156–64. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.12.024.

- Tan H-Z, Li Z-G, Tan B. 2009. Starch noodles: history, classification, materials, processing, structure, nutrition, quality evaluating and improving. *Food Res Intl* 42:551–76. doi:10.1016/j.foodres.2009.02.015.
- Wang N, Bhirud PR, Sosulski FW, Tyler RT. 1999. Pasta-like product from pea flour by twin-screw extrusion. *J Food Sci* 64(4):671–78.
- Wang N, Daun JK, Malcolmson LJ. 2003. Relationship between physicochemical and cooking properties, and effects of cooking on antinutrients, of yellow field peas (*Pisum sativum*). *J Sci Food Agric* 83:1228–37. doi:10.1002/jsfa.1531.
- Wang N, Daun JK. 2004. The chemical composition and nutritive value of Canadian pulses. Canadian grain commission. p 85.
- Wang N, Maximiuk L, Toews R. 2012. Pea starch noodles: effect of processing variables on characteristics and optimisation of twin-screw extrusion process. *Food Chem* 133:742–53. doi:10.1016/j.foodchem.2012.01.087.
- Wójtowicz A. 2011. Precooked pasta. In: Moscicki L, editor. *Extrusion-cooking technique. Applications, theory and sustainability*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. p 99–118.
- Wójtowicz A. 2012. Influence of process conditions on selected texture properties of precooked buckwheat pasta. *Teka Commision of Motorization and Energetics in Agriculture* 12(1):315–22.
- Wójtowicz A, Mościcki L. 2009. Influence of extrusion-cooking parameters on some quality aspects of precooked pasta-like products. *J Food Sci* 74(5):226–33. doi:10.1111/j.1750-3841.2009.01168.x.
- Wójtowicz A, Mościcki L. 2014. Influence of legume type and addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *LWT - Food Sci Technol* 59:1175–85. doi:10.1016/j.lwt.2014.06.010.
- Wood JA. 2009. Texture, processing and organoleptic properties of chickpea-fortified spaghetti with insights to the underlying mechanisms of traditional durum pasta quality. *J Cereal Sci* 49:128–33. doi:10.1016/j.jcs.2008.07.016.
- Yoenyongbuddhagal S, Noomhorn A, 2002a. Effect of physicochemical properties of high-amylose Thai rice flours on vermicelli quality. *Cereal Chem* 79(4):481–85.
- Yoenyongbuddhagal S, Noomhorn A, 2002b. Effect of raw material preparation on rice vermicelli quality. *Starch* (54):534–39. doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.4.481.
- Zhong F, Li Y, Ibanez AM, Oh MH, McKenzie KS, Shoemaker C. 2009. The effect of rice variety and starch isolation method on the pasting and rheological properties of rice starch pastes. *Food Hydrocoll* 23:406–14. doi:10.1016/j.foodhyd.2008.02.003.



Gluten-free precooked rice pasta enriched with legumes flours: Physical properties, texture, sensory attributes and microstructure



Abdallah Bouasla^a, Agnieszka Wójtowicz^{b,*}, Mohammed Nasereddine Zidoune^a

^a Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (LNTA), Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (INATAA), Université des Frères Mentouri Constantine, 25000, Constantine, Algeria

^b Department of Food Process Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Doświadczalna 44, 20-280 Lublin, Poland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 June 2016

Received in revised form

30 September 2016

Accepted 2 October 2016

Available online 4 October 2016

Keywords:

Extrusion-cooking

Gluten-free pasta

Physical properties

Texture

Microstructure

ABSTRACT

The use of rice/leguminous blend may be nutritionally convenient in gluten-free product manufacturing. This study evaluated selected properties of precooked rice pasta enriched with different levels (10 g/100 g, 20 g/100 g and 30 g/100 g) of legumes flours (yellow pea, chickpea and lentil). Gluten-free spaghetti-type pasta was made using a modified single-screw extrusion-cooker, TS-45 (Polish design). Chemical composition, physical properties (expansion ratio, minimal preparation time, water absorption capacity, cooking loss, water absorption index, water solubility index, and color), texture properties (hardness, firmness and adhesiveness), and sensory attributes were evaluated. Microstructure of pasta products was examined with scanning electron microscope. Results showed that the addition of legumes flours decreased the expansion ratio, the hardness, and the lightness, and increased the yellowness, the firmness and the adhesiveness, without affecting the minimal preparation time. Obtained results showed also that gluten-free pasta products had low cooking loss (<6%) and acceptable scores for all sensory attributes and the overall quality. Concerning microstructure, all pasta products presented a compact internal structure. The precooked pasta products enriched with legumes flours up to 30 g/100 g had very good quality and these blends can successfully be used in nutritionally valuable gluten-free pasta formulation.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Celiac disease is a life-long autoimmune enteropathy specifically associated with gluten-containing foods (wheat, barley and rye) (Fiorda, Soares, da Silva, Grosman, & Souto, 2013; Plugis & Khosla, 2015). Currently, a life-long adherence to a gluten-free diet is the only treatment for the disease (Pagano, 2006; O'Shea, Arendt, & Gallagher, 2014). Many of the commercial gluten-free products are made from corn and rice due to its low cost and its abundance. However, it has low nutritional value, including low protein and dietary fiber contents (Giménez et al., 2013).

Due to its large consumption all over the world, pasta is considered as a good product for the addition of highly nutritious raw materials. This enrichment aims mainly to increase the nutritional quality of pasta as regards protein, dietary fiber, vitamins and minerals contents (Chillo, Laverse, Falcone, & Del Nobile, 2008;

Marconi & Carcea, 2001). Amongst these raw materials, legumes represent an interesting source of proteins, fibers, vitamins and minerals (Campos-Vega, Loarca-Piña, & Oomah, 2010; Duranti, 2006; Zhao & Chang, 2008) and it can be added to gluten-free products to enhance their nutritional quality (Giménez et al., 2013; Gualarte, Gómez, & Rosell, 2012; Miñarro, Albanell, Aguilar, Guamis, & Capellas, 2012).

Extrusion-cooking technique is one of the most suitable technologies for gluten-free pasta-making (Cabrera-Chávez et al., 2012; Marti & Pagani, 2013; Marti, Seetharaman, & Pagani, 2010; Wójtowicz, 2011, pp. 99–118). It is a high-temperature-short-time treatment known to be efficient for deactivating anti-nutritional factors present in legumes and pulses (Alonso, Aguirre, & Marzo, 2000; Kadlec et al., 2001; Zhao, Manthey, Chang, Hou, & Yuan, 2005).

Different grains have been used to enrich rice pasta: buckwheat (Alamprese, Casiraghi, & Pagani, 2007), amaranth (Cabrera-Chávez et al., 2012), sorghum (Marengo et al., 2015), common bean (Giuberti, Gallo, Cerioli, Fortunati, & Masoero, 2015), and yellow pea (Bouasla et al., 2016). Various levels of supplementary

* Corresponding author.

E-mail address: agnieszka.wojtowicz@up.lublin.pl (A. Wójtowicz).

components that can be added to rice flour represents a compromise between nutritional improvement of the pasta and achievement of satisfactory sensory and functional properties of final products. However, at the authors' knowledge, there are no studies about the production of gluten-free pasta based on rice and different levels of legumes flours by the extrusion-cooking technique. Therefore, yellow pea, chickpea and lentil flours were used to enrich rice pasta.

The aim of this work was to evaluate the chemical composition, physical properties, texture, microstructure and sensory of gluten-free rice pasta enriched with different levels of the above-mentioned legumes.

2. Materials and methods

2.1. Raw materials

Rice flour was provided by Lubella S.A. company (Lublin, Poland). Yellow pea (*Pisum sativum* L.), chickpea (*Cicer arietinum* L.), and red lentil (*Lens culinaris* L.) bought from a local market were ground by a laboratory mill LMN-100 (TESTCHEM, Radlin, Poland) and sifted to obtain flours with particles size less than 0.5 mm. AACC methods (1995) were applied to evaluate the chemical composition of raw materials and pasta products. Protein (AACC 46–10), lipid content (AACC 30–10) and ash (AACC 08–01) were determined in three replications. AOAC (2000) procedure (AOAC 993.21) was applied to determine the total dietary fiber and its fractions in double.

The chemical composition per 100 g dry raw materials was as follow: rice flour - protein 7.92 g, fat 2.30 g, ash 1.37 g, fiber 1.31 g; yellow pea flour - protein 23.48 g, fat 1.23 g, ash 2.9 g, fiber 3.03 g; chickpea flour - protein 17.5 g, fat 6.22 g, ash 2.57 g, fiber 10.73 g; lentil flour - protein 26.28 g, fat 1.67 g, ash 2.41 g, fiber 7.93 g.

2.2. Pasta production

Rice flour was used to produce rice pasta (control) and blends containing rice flour with different amounts of yellow pea flour, chickpea flour, or lentil flour (10 g/100 g, 20 g/100 g and 30 g/100 g) were prepared following the literature recommendations (Giménez et al., 2013; Wójtowicz & Mościcki, 2014). Rice flour and blends were moistened up to 30 g/100 g of dough moisture content and rested for 30 min. Gluten-free pasta products were produced using the single screw extrusion-cooker type TS-45 (ZMCh, Gliwice, Poland) equipped with additional cooling section with glycol before the die to decrease product temperature and prevent its stickiness (Juško, Mościcki, & Wójtowicz, 2009). Based on the previous studies presented by Bouasla et al. (2016) the temperature was set at 90 °C in the first extruder section, 100 °C in the second section and 70 °C in the final section; these conditions allow to pregelatinize starch and products become precooked inside the extruder. Gluten-free pasta products were processed at 80 rpm using the barrel configuration of L:D = 18:1. Spaghetti-type pasta was formed through a circular die with 12 × 0.80 mm round openings and cut to 50 cm of length as it exited the die. After pasta-making, pasta products were dried at 40 °C for 4 h in an air oven to the moisture content below 12 g/100 g and were kept in sealed plastic bags. Results of the chemical composition of pasta products are presented in Table 1.

2.3. Physical properties

2.3.1. Expansion ratio

Pasta diameter was measured with a digital caliper on ten pieces

of sample, and expansion ratio (ER) was determined as the ratio of dry product diameter and die diameter (Wójtowicz & Mościcki, 2014).

2.3.2. Minimal preparation time, water absorption capacity and cooking loss

The minimal preparation time (MPT) was determined as described by Wójtowicz and Mościcki (2014) with hot water hydration instead of traditional cooking procedure. Ten grams of each pasta sample was hydrated under the cover with 200 mL of hot water (~98 °C). The minimal preparation time corresponded to the moment of disappearance of a white inside core of the pasta strand when squeezing it between two Plexiglas plates. The test was performed in triplicate.

Water absorption capacity (WAC) and cooking loss (CL) were determined in triplicate according to Wójtowicz and Mościcki (2009). Briefly, 10 g of each sample was hydrated with 200 mL of hot water to minimal preparation time, rinsed with tap water (20 °C), and drained for 5 min. The weight of each hydrated pasta sample was then measured and both hydrating and rinsing water were placed in Erlenmeyer glass beaker for total water evaporation in an air oven at 110 °C. equations (1) and (2) were used to calculate the water absorption capacity (WAC) and the cooking loss (CL), respectively:

$$\text{WAC} \left(\frac{\text{g}}{100 \text{ g}} \right) = \frac{\text{weight of hydrated pasta} - \text{weight of dry pasta}}{\text{weight of dry pasta}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{CL} (\%) = \frac{\text{weight of dry residue}}{\text{weight of dry pasta}} \times 100 \quad (2)$$

2.3.3. Water absorption index and water solubility index

Water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI) were determined following the method described by Wójtowicz and Mościcki (2014). In test-tube, 7 mL of distilled water was added to 0.7 g of ground pasta. After 5 min of rest, the sample was hydrated for 10 min and mixed every minute for uniform reconstitution, followed by centrifugation (12577 g, 10 min, 21 °C) in a T24 Centrifuge (VEB MLW MEDIZINETECHNIK, Leipzig, Germany). The supernatant was collected and dried in an air oven at 105 °C until constant weight. Tests were carried out in triplicate. WAI and WSI were calculated using equations (3) and (4), respectively:

$$\text{WAI} \left(\frac{\text{g}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Wet sediment weight}}{\text{Dry sample weight}} \quad (3)$$

$$\text{WSI} (\%) = \frac{\text{Dry supernatant weight}}{\text{Dry sample weight}} \times 100 \quad (4)$$

2.3.4. Color measurements

Color and Appearance Measurements System Lovibond CAM-System 500 (The Tintometer Ltd., Amesbury, UK) was used to evaluate the color profile of dry and hydrated shaped pasta products in 10 replications using CIE-Lab color scale. L^* values measure lightness (0 black to 100 white); a^* values measure redness when positive and greenness when negative; b^* values measure yellowness when positive and blueness when negative.

Table 1
Chemical composition of gluten-free pasta (g/100 g db).

| | Amount (g/100 g) | Protein ^a | Fat ^a | Ash ^a | Insoluble fiber ^b | Soluble fiber ^b |
|------------|------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Rice pasta | 0 | 8.25 ± 0.01 ^D | 0.09 ± 0.01 ^A | 0.50 ± 0.01 ^A | 2.52 ± 0.48 ^C | 0.69 ± 0.01 ^D |
| Yellow pea | 10 | 10.23 ± 0.04 ^A | 0.13 ± 0.01 ^C | 0.93 ± 0.01 ^F | 3.20 ± 0.01 ^D | 1.11 ± 0.14 ^{BC} |
| | 20 | 11.91 ± 0.04 ^C | 0.16 ± 0.01 ^D | 1.13 ± 0.01 ^I | 4.02 ± 0.01 ^{BE} | 1.36 ± 0.01 ^A |
| | 30 | 12.78 ± 0.13 ^F | 0.18 ± 0.01 ^E | 1.29 ± 0.03 ^J | 4.30 ± 0.01 ^E | 1.44 ± 0.01 ^A |
| Chickpea | 10 | 9.68 ± 0.01 ^B | 0.08 ± 0.01 ^A | 0.74 ± 0.01 ^C | 3.65 ± 0.01 ^{AB} | 1.43 ± 0.01 ^A |
| | 20 | 9.99 ± 0.01 ^{AB} | 0.20 ± 0.01 ^F | 0.81 ± 0.01 ^D | 3.67 ± 0.01 ^{AB} | 1.46 ± 0.01 ^A |
| | 30 | 10.97 ± 0.22 ^E | 0.38 ± 0.01 ^B | 0.99 ± 0.01 ^G | 5.15 ± 0.01 ^F | 4.25 ± 0.01 ^F |
| Lentil | 10 | 10.25 ± 0.01 ^A | 0.08 ± 0.01 ^A | 0.69 ± 0.01 ^B | 2.66 ± 0.01 ^C | 1.09 ± 0.05 ^B |
| | 20 | 11.90 ± 0.01 ^C | 0.08 ± 0.01 ^A | 0.87 ± 0.01 ^E | 3.44 ± 0.01 ^{AD} | 1.28 ± 0.01 ^{AC} |
| | 30 | 13.95 ± 0.01 ^G | 0.39 ± 0.01 ^B | 1.05 ± 0.01 ^H | 3.69 ± 0.33 ^{AB} | 1.70 ± 0.01 ^E |

^{A–J} Means with the same superscript within a column are not significantly different ($p > 0.05$).

^a means of 3 replications.

^b means of 2 replications.

2.4. Texture measurements

Tests of texture measurements were carried out on Zwick-Roell BDO-FB0.5 TH instrument (Zwick GmbH & Co., Ulm, Germany) as described by Bouasla et al. (2016). The hardness of dry and hydrated pasta (at the corresponding MPT) was determined in five replications by placing a single strand of sample on the testing adapter plate at 90° to the Warner-Bratzler's cutting knife. Firmness and adhesiveness of hydrated pasta were determined in duplicate by placing 50 g of hydrated and drained pasta in OTMS cell (Ottawa Texture Measuring System) and then compressed under double compression test cycle up to 50% of sample volume. TestXpert[®] 10.11 software was used to record and analyze the values and curves of cutting forces, firmness and adhesiveness.

2.5. Sensory evaluation

Each pasta sample was hydrated in hot water for required MPT, drained and served in a random order. A semi-trained panel of 15 members assessed each sample for appearance, color, flavor, taste, and stickiness using a 5-point scale where 1 = poor and 5 = good (Wójtowicz & Mościcki, 2014). The same panel evaluated overall acceptability of each pasta sample using a verbal nine-point hedonic scale, and the rating was converted to numerical scores, where 1 = dislike extremely, and 9 = like extremely. Pasta products with an overall acceptability mean score above 5 were considered as acceptable (Bustos, Perez, & León, 2011).

2.6. Microstructure of dry and hydrated pasta

Scanning electron microscope (SEM) was used to characterize

the microstructure of dry and hydrated pasta at different magnifications ($\times 125$, $\times 600$, and $\times 2000$). Hydrated pasta were immersed in liquid nitrogen and lyophilized before characterization. Pasta specimens of 5 mm were mounted on carbon discs using a silver tape and sprayed with gold in a vacuum sublimator K-550 \times (Emitech, Ashford, Kent, UK). The surface of samples and their cross-sections were examined by VEGA LMU microscope (Tescan, USA) operating at the accelerating voltage of 10 kV.

2.7. Statistical analysis

The data were analyzed by one-way analysis of variance (ANOVA) followed by the Tukey's HSD post hoc test to determine the significant differences between pasta samples ($p < 0.05$). Statistica software version 10 (StatSoft, Inc., USA) was used to perform the statistical analysis of the data.

3. Results and discussion

3.1. Chemical composition

The chemical composition of processed gluten-free pasta is presented in Table 1. As expected, protein, ash and fiber contents increased with the incorporation of legumes flours. Similar observations have been reported for gluten-free spaghetti made with rice and different levels of bean flour by Giuberti et al. (2015), for gluten-free precooked rice-yellow pea pasta by Bouasla et al. (2016), and for spaghetti made with wheat semolina and different legumes flours by Zhao et al. (2005), Petitot, Boyer, Minier, and Micard (2010), and Wójtowicz and Mościcki (2014).

Gluten-free pasta products were characterized by low fat

Table 2
Physical properties of rice pasta and pasta enriched with legumes flours.

| | Amount (g/100 g) | ER ^a (–) | MPT ^b (min) | WAC ^b (g/100 g) | CL ^b (%) | WAI ^b (g/g) | WSI ^b (%) |
|------------|------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Rice | 0 | 1.55 ± 0.03 ^E | 8 ± 0.01 ^A | 181.53 ± 6.68 ^A | 3.57 ± 0.30 ^C | 5.74 ± 0.02 ^{BC} | 1.86 ± 0.14 ^{AE} |
| Yellow pea | 10 | 1.48 ± 0.03 ^{AB} | 9 ± 0.01 ^A | 186.00 ± 2.35 ^A | 3.77 ± 0.15 ^{CD} | 5.36 ± 0.14 ^{ABC} | 2.52 ± 0.30 ^{AB} |
| | 20 | 1.43 ± 0.01 ^{CD} | 8 ± 0.01 ^A | 189.60 ± 5.22 ^{AB} | 4.20 ± 0.20 ^{ACD} | 4.67 ± 0.26 ^A | 3.43 ± 0.29 ^{BC} |
| | 30 | 1.42 ± 0.03 ^{CD} | 8 ± 0.01 ^A | 201.33 ± 5.25 ^{BC} | 5.06 ± 0.42 ^B | 4.64 ± 0.12 ^A | 3.86 ± 0.29 ^{CD} |
| Chickpea | 10 | 1.50 ± 0.04 ^{AB} | 9 ± 0.01 ^A | 194.30 ± 6.55 ^{ABC} | 4.37 ± 0.21 ^{ABD} | 5.26 ± 0.31 ^{ABC} | 2.47 ± 0.59 ^{AB} |
| | 20 | 1.48 ± 0.04 ^{AB} | 9 ± 0.01 ^A | 202.63 ± 8.81 ^{BC} | 4.60 ± 0.20 ^{AB} | 5.10 ± 0.02 ^{AB} | 2.67 ± 0.36 ^{ABC} |
| | 30 | 1.46 ± 0.03 ^{ACD} | 9 ± 0.01 ^A | 206.13 ± 2.25 ^C | 5.93 ± 0.06 ^E | 4.74 ± 0.36 ^A | 4.71 ± 0.29 ^D |
| Lentil | 10 | 1.51 ± 0.03 ^B | 9 ± 0.01 ^A | 181.93 ± 1.44 ^A | 3.63 ± 0.06 ^{CD} | 5.88 ± 0.42 ^C | 1.14 ± 0.01 ^E |
| | 20 | 1.47 ± 0.04 ^{ABD} | 8 ± 0.01 ^A | 182.60 ± 1.05 ^A | 4.67 ± 0.50 ^{AB} | 5.41 ± 0.13 ^{ABC} | 2.71 ± 0.62 ^{ABC} |
| | 30 | 1.42 ± 0.01 ^C | 8 ± 0.01 ^A | 191.33 ± 4.80 ^{AB} | 4.93 ± 0.25 ^{AB} | 4.74 ± 0.44 ^A | 3.81 ± 0.73 ^{CD} |

^{A–E} Means with the same superscript within a column are not significantly different ($p > 0.05$).

ER – expansion ratio, MPT – minimal preparation time, WAC – water absorption capacity, CL – cooking loss, WAI – water absorption index, WSI – water solubility index.

^a means of 10 replications.

^b means of 3 replications.

Table 3
Color profile of dry and hydrated gluten-free pasta.

| | Amount (g/100 g) | Dry pasta | | | Hydrated pasta | | |
|------------|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | | L^* | a^* | b^* | L^* | a^* | b^* |
| Rice | 0 | 72.29 ± 0.81 ^C | -4.00 ± 0.33 ^A | 29.25 ± 1.22 ^D | 79.07 ± 1.44 ^{BC} | -5.26 ± 0.63 ^A | 13.71 ± 0.82 ^E |
| Yellow pea | 10 | 66.45 ± 1.05 ^{DE} | -3.24 ± 0.88 ^{AB} | 37.41 ± 1.93 ^{AB} | 79.45 ± 1.41 ^C | -4.70 ± 0.78 ^A | 19.92 ± 1.16 ^{AC} |
| | 20 | 64.75 ± 1.20 ^{AD} | -1.20 ± 0.84 ^C | 40.13 ± 1.15 ^C | 77.55 ± 1.05 ^{ABC} | -4.86 ± 0.66 ^A | 20.66 ± 0.60 ^{AD} |
| | 30 | 64.19 ± 1.34 ^A | 1.28 ± 0.88 ^D | 42.90 ± 1.10 ^E | 76.60 ± 1.60 ^A | -4.92 ± 0.44 ^A | 20.78 ± 1.07 ^{AD} |
| Chickpea | 10 | 71.61 ± 1.53 ^{BC} | -3.74 ± 0.39 ^A | 36.54 ± 2.58 ^{AB} | 77.73 ± 0.60 ^{ABC} | -4.94 ± 0.63 ^A | 18.25 ± 0.89 ^{BC} |
| | 20 | 70.52 ± 0.84 ^{BC} | -2.42 ± 0.36 ^B | 36.64 ± 1.33 ^{AB} | 77.23 ± 0.55 ^{AB} | -5.05 ± 0.28 ^A | 18.35 ± 1.76 ^{BC} |
| | 30 | 69.97 ± 1.36 ^B | -0.56 ± 0.74 ^C | 39.04 ± 1.13 ^{BC} | 77.15 ± 0.87 ^{AB} | -5.10 ± 0.53 ^A | 20.24 ± 0.93 ^A |
| Lentil | 10 | 66.83 ± 0.90 ^E | -3.74 ± 0.39 ^A | 36.48 ± 1.73 ^A | 76.04 ± 1.78 ^{AE} | -5.26 ± 0.34 ^A | 18.11 ± 1.33 ^B |
| | 20 | 63.92 ± 1.13 ^A | 0.40 ± 0.53 ^D | 36.62 ± 1.94 ^{AB} | 74.31 ± 1.73 ^{DE} | -5.16 ± 0.90 ^A | 22.36 ± 1.56 ^D |
| | 30 | 58.77 ± 1.46 ^F | 2.70 ± 0.51 ^E | 37.01 ± 2.46 ^{AB} | 72.54 ± 2.20 ^D | -5.02 ± 0.80 ^A | 25.41 ± 1.55 ^F |

L^* – lightness, a^* – (+) red and (-) green, b^* – (+) yellow and (-) blue, means of 10 replications.

^{A-C}Means with the same superscript within a column are not significantly different ($p > 0.05$).

Table 4
Textural properties of rice pasta and pasta enriched with legumes flours.

| | Amount (g/100 g) | Hardness of dry pasta ^a (N) | Hardness of hydrated pasta ^a (N) | Firmness ^b (N) | Adhesiveness ^b (mJ) |
|------------|------------------|--|---|-----------------------------|--------------------------------|
| Rice | 0 | 12.12 ± 1.41 ^C | 0.44 ± 0.02 ^E | 199.50 ± 071 ^C | 2.48 ± 0.13 ^A |
| Yellow pea | 10 | 2.73 ± 0.34 ^B | 0.21 ± 0.01 ^B | 263.50 ± 3.43 ^A | 11.17 ± 2.80 ^B |
| | 20 | 4.17 ± 0.86 ^{AB} | 0.28 ± 0.02 ^A | 286.50 ± 2.02 ^{AB} | 16.89 ± 1.24 ^B |
| | 30 | 3.78 ± 0.49 ^{AB} | 0.26 ± 0.01 ^A | 260.00 ± 8.38 ^{AD} | 17.18 ± 2.20 ^B |
| Chickpea | 10 | 3.76 ± 0.47 ^{AB} | 0.27 ± 0.02 ^A | 277.50 ± 8.99 ^{AB} | 15.20 ± 0.97 ^B |
| | 20 | 4.33 ± 0.88 ^{AB} | 0.27 ± 0.04 ^A | 207.00 ± 0.01 ^{CD} | 16.84 ± 2.06 ^B |
| | 30 | 4.94 ± 0.86 ^A | 0.26 ± 0.02 ^{AB} | 207.00 ± 5.66 ^{CD} | 17.56 ± 4.17 ^B |
| Lentil | 10 | 4.64 ± 0.90 ^A | 0.33 ± 0.03 ^C | 312.50 ± 3.43 ^{AB} | 13.35 ± 0.10 ^B |
| | 20 | 4.18 ± 0.82 ^{AB} | 0.40 ± 0.04 ^D | 289.00 ± 8.49 ^{AB} | 17.22 ± 0.06 ^B |
| | 30 | 4.49 ± 0.70 ^A | 0.30 ± 0.01 ^{AC} | 326.50 ± 6.36 ^B | 19.28 ± 3.76 ^B |

^{A-C}Means with the same superscript within a column are not significantly different ($p > 0.05$).

^a means of 5 replications.

^b means of 2 replications.

content. Wójtowicz and Mościcki (2014) reported similar observation which was explained by the reduction of lipids extractability due to the formation of amylose-lipids complexes during pasta making by extrusion-cooking (Camire, Camire, & Krumhar, 1990).

The protein content and the protein nutritional value of pasta products would be improved by the addition of legumes flours due to the complementation of cereal and legumes amino acid (Gularte et al., 2012). The highest protein content was observed for products enriched with lentil addition (Table 1). Moreover, celiac people have low intake of dietary fiber (Stojceska, Ainsworth, Plunkett, & Ibanoglu, 2010). The highest amount of fiber was evaluated for pasta with 30 g/100 g of chickpea, both as soluble and insoluble fiber fractions. The incorporation of dietary fiber from legumes in gluten-free products could thus be beneficial (Lamacchia, Camarica, Picascia, Di Luccia, & Gianfrani, 2014).

3.2. Physical properties of gluten-free pasta

Physical properties of gluten-free pasta products are shown in Table 2. Expansion ratio was significantly higher for rice precooked pasta (1.55) compared the pasta samples enriched with legumes flours (from 1.42 to 1.51). ER decreased with increasing amount of yellow pea flour ($r = -0.68$, $p < 0.001$) and lentil flour ($r = -0.82$, $p < 0.001$). This may be related to the high content of protein and fiber and low content of total starch in raw materials (Wójtowicz & Mościcki, 2014; Singh, Sekhon, & Singh, 2007). Expansion process is affected by starch gelatinization and starch breakdown. The expanded structure is formed by the gelatinized starch while low expanded structure could be the result of excessive molecular degradation of starch granules. Increasing protein and fiber contents would increase the viscosity of the dough inside the extruder

Table 5
Sensory evaluation and overall acceptability of gluten-free pasta.

| | Amount (g/100 g) | Appearance ^a | Color ^a | Flavor ^a | Taste ^a | Stickiness ^a | Overall acceptability ^b |
|------------|------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Rice | 0 | 4.00 ± 1.13 ^A | 3.27 ± 1.16 ^A | 3.93 ± 1.03 ^{AB} | 3.93 ± 1.03 ^{AB} | 4.13 ± 0.92 ^A | 6.53 ± 1.51 ^A |
| Yellow pea | 10 | 4.40 ± 0.74 ^A | 4.13 ± 0.92 ^{AB} | 3.40 ± 0.12 ^{AB} | 3.73 ± 0.59 ^{AB} | 4.27 ± 0.70 ^A | 5.67 ± 1.50 ^A |
| | 20 | 4.04 ± 0.80 ^A | 3.93 ± 0.88 ^{AB} | 2.93 ± 0.88 ^B | 3.60 ± 0.63 ^{AB} | 3.73 ± 1.16 ^A | 5.13 ± 1.68 ^A |
| | 30 | 4.20 ± 1.01 ^A | 4.40 ± 0.63 ^B | 2.93 ± 1.03 ^B | 3.13 ± 1.25 ^A | 4.20 ± 1.08 ^A | 5.07 ± 1.87 ^A |
| Chickpea | 10 | 4.47 ± 0.64 ^A | 3.67 ± 0.82 ^{AB} | 3.60 ± 0.74 ^{AB} | 3.73 ± 1.10 ^{AB} | 4.40 ± 0.74 ^A | 6.07 ± 1.22 ^A |
| | 20 | 4.27 ± 0.80 ^A | 4.07 ± 0.80 ^{AB} | 4.13 ± 0.99 ^A | 3.60 ± 1.30 ^{AB} | 4.13 ± 0.83 ^A | 5.87 ± 2.23 ^A |
| | 30 | 3.87 ± 0.64 ^A | 4.07 ± 0.59 ^{AB} | 3.33 ± 0.90 ^{AB} | 3.20 ± 0.86 ^{AB} | 3.40 ± 0.83 ^{ADE} | 5.33 ± 1.18 ^A |
| Lentil | 10 | 4.27 ± 0.80 ^A | 3.73 ± 0.80 ^{AB} | 4.27 ± 0.80 ^A | 4.13 ± 0.99 ^{AB} | 4.33 ± 0.62 ^A | 6.40 ± 1.76 ^A |
| | 20 | 4.40 ± 0.74 ^A | 4.13 ± 0.74 ^{AB} | 4.13 ± 0.83 ^A | 4.13 ± 0.93 ^{AB} | 4.00 ± 0.93 ^A | 6.33 ± 1.68 ^A |
| | 30 | 4.07 ± 0.96 ^A | 3.67 ± 1.05 ^{AB} | 3.87 ± 0.83 ^{AB} | 4.27 ± 0.59 ^B | 4.07 ± 0.88 ^A | 6.00 ± 1.13 ^A |

^{A-B}Means with the same superscript within a column are not significantly different ($p > 0.05$).

^a 5-point scale.

^b 9-point hedonic scale; (n = 15).

resulting in longer residence time and higher shearing rate, which may cause a molecular degradation of amylopectin molecules (higher extent of starch breakdown), which lead to a decrease in ER (Wang, Maximiuk, & Toews, 2012).

Moreover, pasta dough enriched with legumes flours tend to be more viscous than those with rice flour and, therefore, the pressure differential between the value generated by the die and the atmospheric pressure would be smaller for enriched pasta, causing a reduction of expansion ratio (Singh et al., 2007).

All pasta samples have been ready for consumption after 8–9 min of hot water hydration without cooking. Minimal preparation time for gluten-free pasta was comparable to the results reported by Bouasla et al. (2016) for rice-yellow pea precooked pasta produced with similar conditions, but higher than reported by Wójtowicz and Mościcki (2014) for common wheat pasta enriched with legumes flours (4.5–7 min). In addition, the level of legumes had no significant effect on this parameter.

Addition of 30 g/100 g of yellow pea flour, and 20 and 30 g/100 g

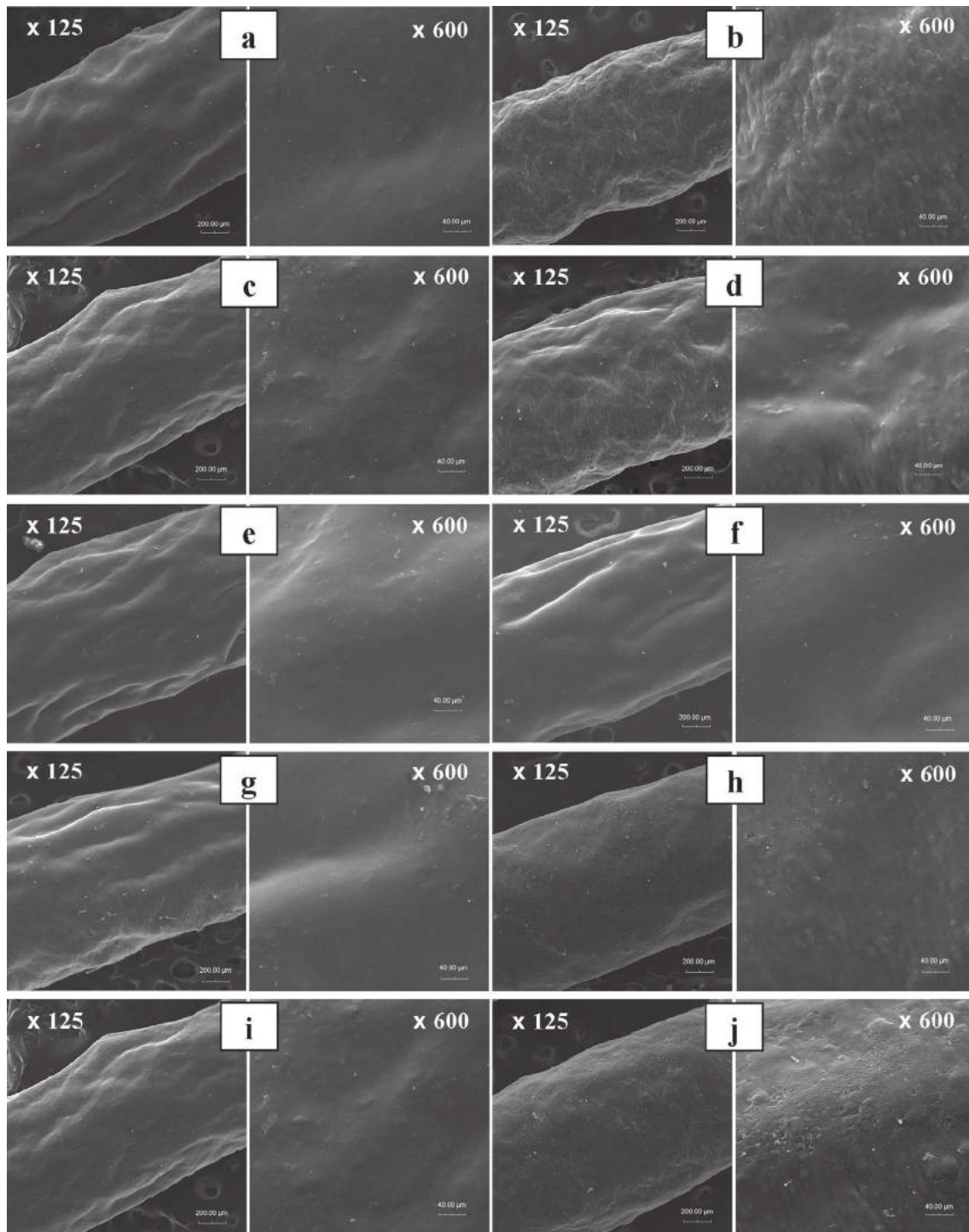


Fig. 1. Surface of dry gluten-free pasta at different magnifications. A: rice pasta; b, c, d: rice pasta with yellow pea (10 g/100 g, 20 g/100 g, 30 g/100 g, respectively); e, f, g: rice pasta with chickpea (10 g/100 g, 20 g/100 g, 30 g/100 g, respectively); h, i, j: rice pasta with lentil (10 g/100 g, 20 g/100 g, 30 g/100 g, respectively).

of chickpea flour increased significantly the WAC with respect to rice precooked pasta. Similar observations have been reported by Giuberti et al. (2015) for rice spaghetti enriched with 20 and 30 g/100 g of bean flour. Legume proteins denaturation during hot water hydration caused an increased accessibility for polar amino-acid groups of proteins, this could increase the affinity for water (Alonso et al., 2000) and therefore higher WAC. Moreover, WAC significantly increased as yellow pea flour level increased ($r = 0.84$,

$p < 0.01$). In the reverse, addition of lentil flour had no significant effect on this parameter.

Cooking loss significantly increased with increasing amounts of yellow pea flour ($r = 0.90$, $p < 0.001$), chickpea flour ($r = 0.91$, $p < 0.001$) and red lentil flour ($r = 0.86$, $p < 0.01$). This increase in CL is due to the weakness of the starch network by the presence of fiber, as reported for gluten-based matrices and gluten free matrices (Cabrera-Chávez et al., 2012). However, obtained range of

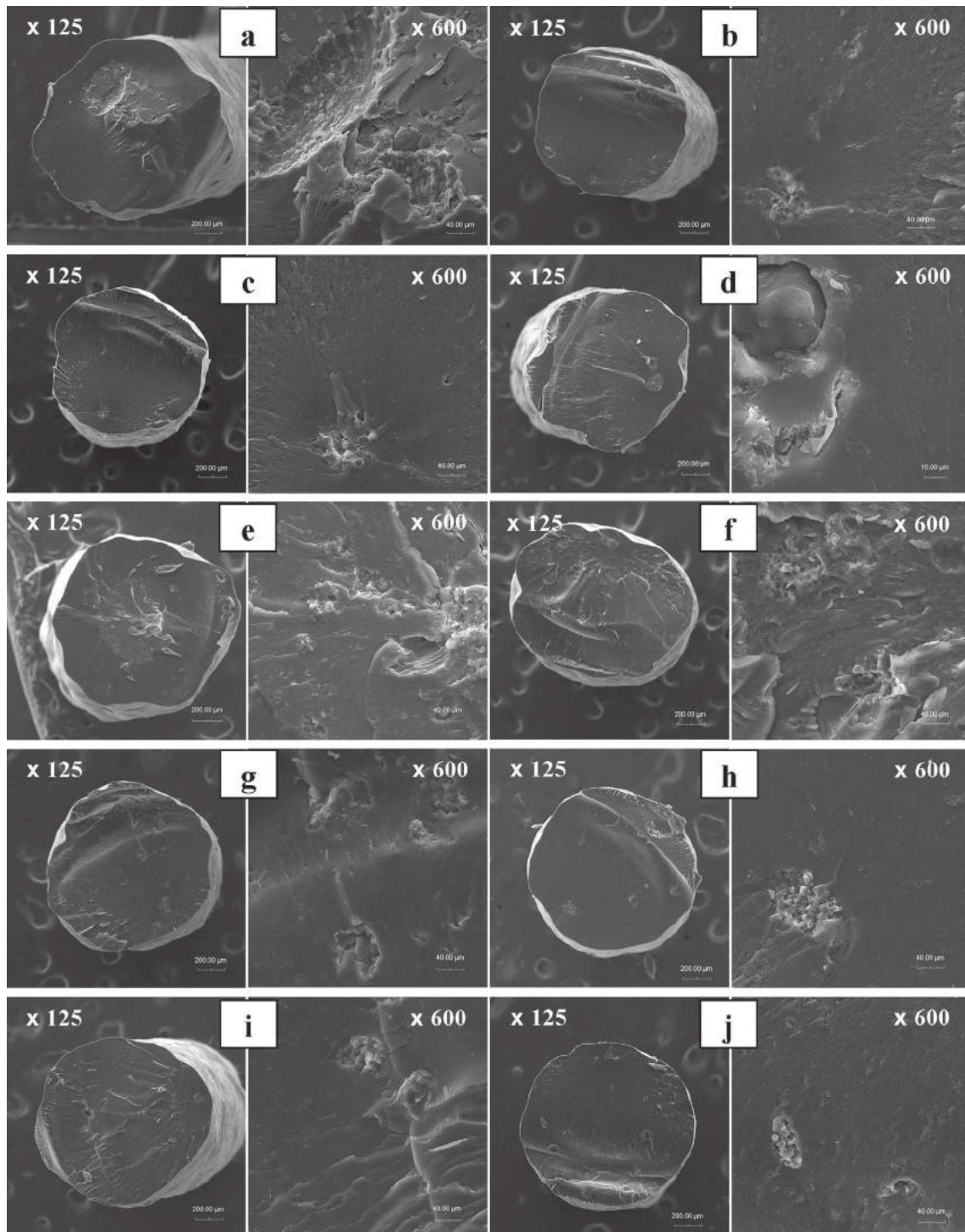


Fig. 2. Cross-section of dry gluten-free pasta at different magnifications. A: rice pasta; b, c, d: rice pasta with yellow pea (10 g/100 g, 20 g/100 g, 30 g/100 g, respectively); e, f, g: rice pasta with chickpea (10 g/100 g, 20 g/100 g, 30 g/100 g, respectively); h, i, j: rice pasta with lentil (10 g/100 g, 20 g/100 g, 30 g/100 g, respectively).

CL (from 3.57% to 5.93%) is lower than 10% reported as quality limit for pasta, indicating good quality of all pasta samples evaluated in our study (Kim, Wiesenborn, Lorenzen, & Berglund, 1996; Wang, Bhirud, Sosulski, & Tyler, 1999). Heat, pressure, and mechanical shearing applied during the extrusion-cooking formed a compact and homogenous starch-protein matrix as confirmed by SEM pictures (Fig. 2). This matrix was able to maintain the integrity of pasta during hydration in hot water and therefore minimize CL. Moreover, disulfide bonds could participated in the texturization mechanism during the extrusion-cooking process and form compact structure of pasta products (Wójtowicz & Mościcki, 2014).

WAI reflects the amount of water bound by the product, while WSI reflects the amount of small molecules solubilized in water according to molecular damage caused by the process (Oikonomou & Krokida, 2011). Increasing level of legumes flours in the pasta recipes had no significant effect on WAI of tested samples. On the contrary, WSI increased significantly with increasing amount of yellow pea flour ($r = 0.90$, $p < 0.001$), chickpea flour ($r = 0.85$, $p < 0.01$), and lentil flour ($r = 0.92$, $p < 0.001$). WSI ranged from 1.14% for pasta containing 10 g/100 g of lentil flour to 3.86% for pasta with 30 g/100 g of yellow pea flour. The increase of WSI with addition of legumes flours can be related to change in pasta composition. However, the resulting values were below 5%, suggesting low damage of components during pasta making and good quality of gluten-free precooked pasta (Wójtowicz & Mościcki, 2014).

Pasta color is an important parameter for pasta quality assessment (Petitot et al., 2010). Color profile of dry and hydrated pasta is presented in the Table 3. Dry pasta containing yellow pea flour and lentil flour were much darker ($p < 0.05$) than dry rice pasta and dry pasta enriched with chickpea flour. This is related to the lighter color (L^* value) of chickpea flour compared to yellow pea flour and lentil flour (Zhao et al., 2005). Lightness of dry pasta samples decreased as the amount of legumes flours in the recipe increased. This observation is more evident for pasta with addition of lentil flour ($r = -0.94$, $p < 0.001$). Incorporation of 10 g/100 g of legumes flours did not affect a^* values of rice pasta samples ($p > 0.05$). a^* values increased (greenness decreased and redness increased) as the amount of legumes flours increased. The significant increase in red tint for dry pasta enriched with 30 g/100 g of lentil flour was attributed to the red color of the lentil variety used in our study. In general, dry pasta containing legumes flours had significantly more yellow color than dry rice pasta. This difference can be attributed to the original color and the presence of pigments in legumes flours. Moreover, pasta enriched with 30 g/100 g of yellow pea had the highest yellow color (b^*). This value is related to the yellow color of the pea used in the present work.

Concerning hydrated pasta, it was characterized by higher lightness, higher greenness and lower yellowness than dry pasta. The less yellow color of hydrated pasta may be the result of degradation and dissolution of pigments by hot water (Giuberti et al., 2015). Differences between color coordinates were smaller than for dry pasta not dependently the type of legume used.

3.3. Texture of gluten-free pasta

Hardness of dry pasta was significantly higher for rice pasta (12.12 N) than for rice pasta enriched with legumes flours (from 2.73 to 4.94 N). As shown in the Table 4, similar observations were noted for hardness of hydrated pasta (0.44 N for rice pasta, and from 0.21 N to 0.40 N for pasta enriched with legumes flours). The same tendencies were observed by Wójtowicz and Mościcki (2014) for common wheat precooked pasta enriched with legumes flours.

The fiber fractions from legumes flour may lead to the formation of cracks or discontinuities inside the pasta strand which weakened

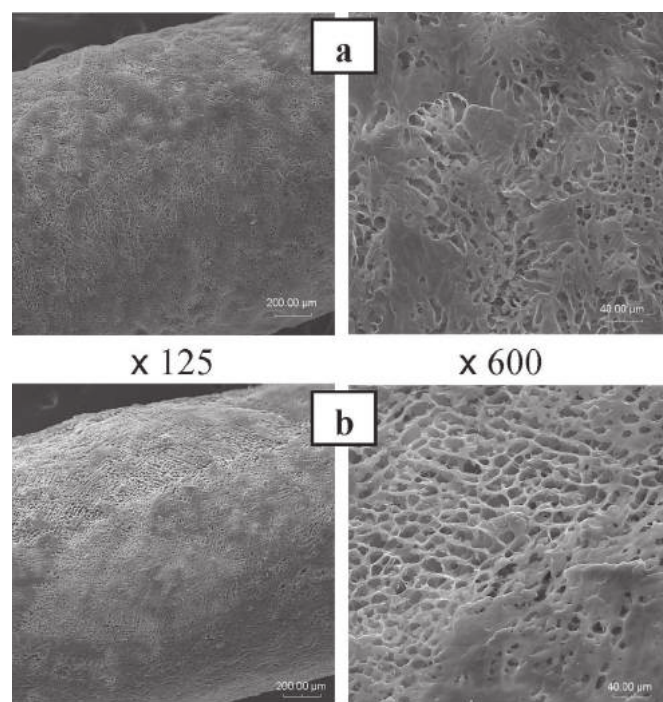


Fig. 3. Surface of hydrated gluten-free pasta: rice pasta (a) and rice pasta enriched with 30 g/100 g of chickpea (b).

pasta structure (Petitot et al., 2010).

The incorporation of legumes flours in recipes increased the firmness of hydrated pasta except for products enriched with 20 and 30 g/100 g of chickpea flour. This can be related to the higher protein content for enriched pasta compared to rice pasta. Our results are in agreement with Zhao et al. (2005) for durum wheat spaghetti fortified with green pea (Toledo and Majorette variety), yellow pea (Interga and Minot variety), chickpea (Sanford variety) and lentil (Richlea variety). In addition, Bahnssey and Khan (1986) reported an increase in firmness of wheat pasta containing navy bean, pinto bean, and lentil flours.

Addition of legumes flours in recipes increased the adhesiveness of pasta. It passed from 2.48 mJ for rice pasta to more than 11 mJ for pasta containing legumes flours. Adhesiveness of pasta increased as the amount of lentil increased ($r = 0.84$, $p < 0.05$). This adhesiveness extension could be related to higher fiber content and/or higher solubility of compounds leached from enriched pasta during hot water hydration, as showed for CL and WSI results.

3.4. Sensory attributes

Table 5 presents the sensory attributes of hydrated pasta. All pasta samples exhibited high scores for appearance and stickiness, and acceptable scores for color, flavor and taste. Pasta products containing 30 g/100 g of yellow pea had the highest notes for intensive yellow color ($p < 0.05$). This result is confirmed by color measurement and attributed to the yellow color of pea used in our study. All pasta products presented acceptable scores (values > 5) for overall acceptability, which decreases with increasing amount of legume flour addition, although this decrease was not significant ($p > 0.05$).

3.5. Microstructure of gluten-free pasta

During observations of dry products, rice pasta showed a

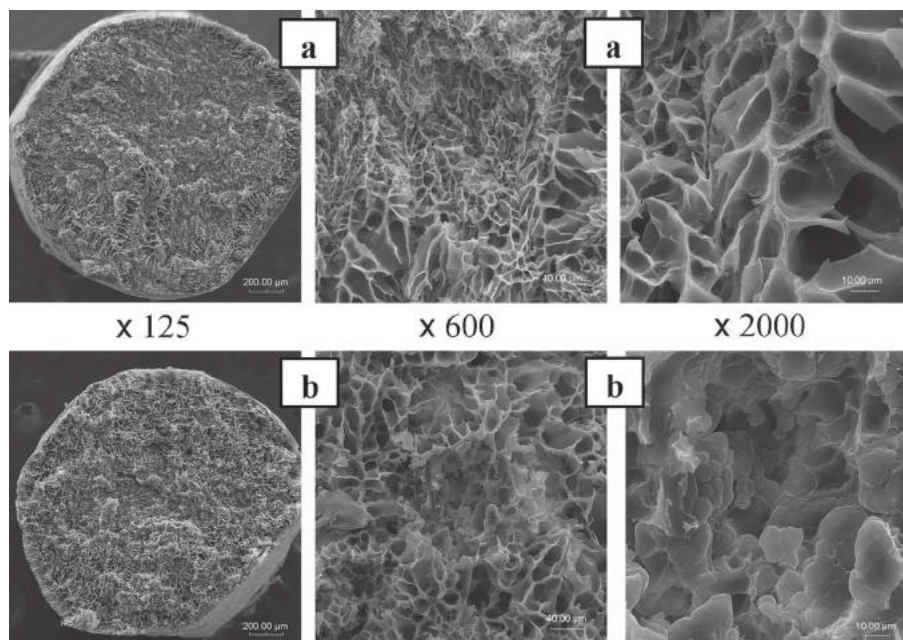


Fig. 4. Cross-section of hydrated gluten-free pasta: rice pasta (a) and rice pasta enriched with 30 g/100 g of chickpea (b).

corrugated smooth surface (Fig. 1a). The surface microstructure of gluten-free pasta was influenced by the type of legumes flours. Pasta samples containing yellow pea showed a rough and corrugated surface (Fig. 1b, c, and d). Pasta with chickpea demonstrated a corrugated surface (Fig. 1e, f, and g) and this surface seems to be smooth at high magnification probably due to the high fat content in chickpea flour, acting as a lubricant during processing and forming of pasta strands. Pasta samples enriched with lentil flour had a rough but not corrugated surface (Fig. 1h, i, and j).

The amount and type of legume flour did not affected the cross-sectional microstructure which revealed for all pasta products almost homogenous compact inside structure with starch-protein matrix and few aggregates visible at high magnification (Fig. 2). This structure was attributed to the effect of extrusion-cooking process which caused the starch gelatinization and coherent structure (Bouasla et al., 2016; Wójtowicz & Mościcki, 2009; Wójtowicz, 2011, pp. 99–118), supporting the low values of CL and WSI found in our study.

After hydration in hot water, the surface of pasta became smooth, but observed at high magnification presented a mixture of continuous and not continuous surface (Fig. 3a and b), probably due to the leaching of unbounded compounds to hot water from pasta surface. Fig. 4 exhibits the cross-sectional microstructure of hydrated pasta, the pasta strand diameter become bigger due to the absorption of water and the inside revealed a spongy but uniform structure for both rice pasta and pasta containing 30 g/100 g of chickpea flour.

4. Conclusion

Good quality gluten-free pasta was successfully prepared from rice and different levels of legume flour by extrusion-cooking technique. This technique was involved in the development of pasta characteristics as well as pasta composition (mainly starch, proteins and fiber). The fortification of rice pasta with yellow pea, chickpea and red lentil improved the protein, ash, and dietary fiber contents. Both the amount and the type of legumes had an impact on the quality characteristics presented in this work. If compared to

rice pasta, addition of legumes flours decreased ER, increased WAC as well as CL without exceeding 6%. The hardness of dry and hydrated pasta decreased for enriched pasta with an increase in firmness and adhesiveness. The enriched pasta had more yellow color and received acceptable scores for overall acceptability, and the microstructure highlighted a compact and homogenous inside structure.

References

- AACC. (1995). Approved methods of the american association of cereal chemists (9th ed.). St. Paul, USA.
- Alamprese, C., Casiraghi, E., & Pagani, M. A. (2007). Development of gluten-free fresh egg pasta analogues containing buckwheat. *European Food Research and Technology*, 225, 205–213.
- Alonso, R., Aguirre, A., & Marzo, F. (2000). Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chemistry*, 68, 159–165.
- AOAC. (2000). *Official methods of AOAC International* (17th ed.). Gaithersburg, MD, USA: AOAC International.
- Bahnassey, Y., & Khan, K. (1986). Fortification of spaghetti with edible legumes. II. Rheological, processing and quality evaluation studies. *Cereal Chemistry*, 63, 216–219.
- Bouasla, A., Wójtowicz, A., Zidoune, M. N., Olech, M., Nowak, R., Mitrus, M., et al. (2016). Gluten-free precooked rice-yellow pea pasta: Effect of extrusion-cooking conditions on phenolic acids composition, selected properties and microstructure. *Journal of Food Science*, 81, C1070–C1079.
- Bustos, M. C., Perez, G. T., & León, A. E. (2011). Sensory and nutritional attributes of fibre-enriched pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1429–1434.
- Cabrera-Chávez, F., Calderón de la Barca, A. M., Islas-Rubio, A. R., Marti, A., Marengo, M., Pagani, M. A., et al. (2012). Molecular rearrangements in extrusion processes for the production of amaranth-enriched, gluten-free rice pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 47, 421–426.
- Camire, M. E., Camire, A., & Krumhar, K. (1990). Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 29, 35–57.
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., & Oomah, B. D. (2010). Minor components of pulses and their potential impact on human health. *Food Research International*, 43, 461–482.
- Chillo, S., Laverse, J., Falcone, P. M., & Del Nobile, M. A. (2008). Quality of spaghetti in base amaranthus wholemeal flour added with quinoa, broad bean and chick pea. *Journal of Food Engineering*, 84, 101–107.
- Duranti, M. (2006). Grain legume proteins and nutraceutical properties. *Fitoterapia*, 77, 67–82.
- Fiorda, F. A., Soares, M. S., Jr., da Silva, F. A., Grosmann, M. V. E., & Souto, L. R. F. (2013). Microstructure, texture and colour of gluten-free pasta made with amaranth flour, cassava starch and cassava bagasse. *LWT - Food Science and Technology*, 54, 132–138.

- Giménez, M. A., González, R. J., Wagner, J., Torres, R., Lobo, M. O., & Samman, N. C. (2013). Effect of extrusion conditions on physicochemical and sensorial properties of corn-broad beans (*Vicia faba*) spaghetti type pasta. *Food Chemistry*, *136*, 538–545.
- Giuberti, G., Gallo, A., Cerioli, C., Fortunati, P., & Masoero, F. (2015). Cooking quality and starch digestibility of gluten free pasta using new bean flour. *Food Chemistry*, *175*, 43–49.
- Gularte, M. A., Gómez, M., & Rosell, C. M. (2012). Impact of legume flours on quality and in vitro digestibility of starch and protein from gluten-free cakes. *Food and Bioprocess Technology*, *5*, 3142–3150.
- Juško, S., Mościcki, L., & Wójtowicz, A. (2009). Cooling-forming section (Sekcja chłodząco-formująca). Design patent, PL 64690 Y1, WUP, 12, p. 3035 (in Polish).
- Kadlec, P., Rubecova, A., Hinkova, A., Kaasova, J., Bubnik, Z., & Pour, V. (2001). Processing of yellow pea by germination, microwave treatment and drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *2*, 133–137.
- Kim, Y. S., Wiesenborn, D. P., Lorenzen, J. H., & Berglund, P. (1996). Suitability of edible bean and potato starches for starch noodles. *Cereal Chemistry*, *73*, 302–308.
- Lamacchia, C., Camarca, A., Picascia, S., Di Luccia, A., & Gianfrani, C. (2014). Cereal-based gluten-free food: How to reconcile nutritional and technological properties of wheat proteins with safety for celiac disease patients. *Nutrients*, *6*, 575–590.
- Marconi, E., & Carcea, M. (2001). Pasta from non traditional materials. *Cereal Food World*, *46*, 522–530.
- Marengo, M., Bonomi, F., Marti, A., Pagani, M. A., Elkhalfa, E. O., & Iametti, S. (2015). Molecular features of fermented and sprouted sorghum flours relate to their suitability as components of enriched gluten-free pasta. *LWT – Food Science and Technology*, *63*, 511–518.
- Marti, A., & Pagani, M. A. (2013). What can play the role of gluten in gluten free pasta? *Trends in Food Science and Technology*, *31*, 63–71.
- Marti, A., Seetharaman, K., & Pagani, M. A. (2010). Rice-based pasta: A comparison between conventional pasta-making and extrusion-cooking. *Journal of Cereal Science*, *52*, 404–409.
- Miñarro, B., Albanell, E., Aguilar, N., Guamis, B., & Capellas, M. (2012). Effect of legume flours on baking characteristics of gluten-free bread. *Journal of Cereal Science*, *56*, 476–481.
- Oikonomou, N. A., & Krokida, M. K. (2011). Literature data compilation of WAI and WSI of extrudate food products. *International Journal of Food Properties*, *14*, 199–240.
- O'Shea, N., Arendt, E., & Gallagher, E. (2014). State of the art in gluten-free research. *Journal of Food Science*, *79*, 1067–1076.
- Pagano, A. (2006). Whole grains and the gluten-free diet. *Practical Gastroenterology*, *66*–78.
- 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.
- Plugis, N. M., & Khosla, C. (2015). Therapeutic approaches for celiac disease. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, *29*, 503–521.
- Singh, B., Sekhon, K. S., & Singh, N. (2007). Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry*, *100*, 198–202.
- Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A., & Ibanoglu, S. (2010). The advantage of using extrusion processing for increasing dietary fibre level in gluten-free products. *Food Chemistry*, *121*, 156–164.
- Wang, N., Bhirud, P. R., Sosulski, F. W., & Tyler, R. T. (1999). Pasta-like product from pea flour by twin-screw extrusion. *Journal of Food Science*, *64*, 671–678.
- Wang, N., Maximiuk, L., & Toews, R. (2012). Pea starch noodles: Effect of processing variables on characteristics and optimisation of twin-screw extrusion process. *Food Chemistry*, *133*, 742–753.
- Wójtowicz, A. (2011). Precooked pasta. In L. Mościcki (Ed.), *Extrusion-cooking technique. Applications, theory and sustainability*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- Wójtowicz, A., & Mościcki, L. (2009). Influence of extrusion-cooking parameters on some quality aspects of precooked pasta-like products. *Journal of Food Science*, *74*, 226–233.
- Wójtowicz, A., & Mościcki, L. (2014). Influence of legume type and addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *LWT - Food Science and Technology*, *59*, 1175–1185.
- Zhao, B., & Chang, K. C. (2008). Evaluation of effects of soaking and precooking conditions on the quality of precooked dehydrated pea, lentil and chickpea products. *Journal of Food Processing and Preservation*, *32*, 517–532.
- Zhao, Y. H., Manthey, F. A., Chang, S. K., 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*, 371–S376.



ENERGY CONSUMPTION AND PROCESS EFFICIENCY AS AFFECTED BY EXTRUSION-COOKING CONDITIONS AND RECIPE FORMULATION DURING THE PRODUCTION OF GLUTEN-FREE RICE-LEGUMES PRODUCTS

Abdallah Bouasla^a, Agnieszka Wójtowicz^{b*}, Stanisław Juško^b,
Mohammed Nasreddine Zidoune^a

^a Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (LNTA),
Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (INATAA),
Université des Frères Mentouri Constantine, Algeria

^b Department of Food Process Engineering, University of Life Sciences in Lublin

* Corresponding author: e-mail: agnieszka.wojtowicz@up.lublin.pl

ARTICLE INFO

Article history:

Received: October 2016

Received in the revised form:
December 2016

Accepted: January 2017

Key words:

extrusion-cooking,
gluten-free products,
process efficiency,
SME

ABSTRACT

The objective of the study was to determine the effect of extrusion-cooking conditions (moisture content and screw speed) and recipe formulation on process efficiency and energy consumption during the extrusion-cooking of gluten-free rice-legumes products, shaped for spaghetti-type pasta. Process efficiency (Q) was determined through measurement of the pasta weight and energy consumption was determined using specific mechanical energy consumption (SME). According to the obtained results, screw speed had a great significant impact on Q and SME values which increased as screw speed increased. Moisture content of raw materials had also a significant effect on Q and SME mainly at low screw speed applied. The process efficiency increased with the increase of raw materials moisture content while reverse observations were noted for the energy consumption. On the contrary, variations of recipe formulations did not affect the measured parameters.

Introduction

Gluten-free products, usually made of rice and corn, have weak nutritional composition including low protein and low fiber content (Thompson, 2009). Due to their interesting amount of protein, fiber, vitamins and minerals, legumes could be incorporated in gluten-free food to enhance their nutritional quality (Duranti, 2006; Gularte et al., 2012).

Extrusion-cooking represents a suitable technique for the production of gluten-free pasta (Marti and Pagani, 2013; Bouasla et al., 2016). Extrusion-cooking is a high-temperature-short-time treatment which has a significant positive impact on the nutritional quality of the products (Alonso et al., 2000; Shimelis and Rakshit, 2007). In addition, products characteristics are related to recipe formulation and the extrusion-cooking conditions (Wójtowicz and Mościcki, 2009; Wójtowicz and Mościcki, 2014).

The objective of the study was to determine the effect of extrusion-cooking conditions (moisture content and screw speed) and recipe formulation on process efficiency and energy consumption during the processing of rice-legumes pasta products.

Materials and methods

Raw materials

Raw materials used in this study were rice flour (purchased from Lubella Sp. z o.o. S. K., Lublin, Poland) and legumes seeds (yellow pea, chickpea, and red lentil) bought from local market. These seeds were ground with laboratory grinder TestChem (Radlin, Poland) and sifted to obtain flours with granulation below 0.5 mm.

Pasta processing

Blends containing 2/1 (w/w) rice/yellow pea flours were prepared to determine the effect of extrusion-cooking conditions on energy consumption during the processing of rice-yellow pea pasta. For this purpose, flours were moistened with three different moisture contents (28, 30, and 32%) and were produced using three screw speeds (60, 80, and 100 rpm).

Regarding the determination of the effect of the recipe formulation on energy consumption, nine recipes were prepared by mixing rice flour with different amounts of yellow pea flour, chickpea flour, or lentil flour (10, 20, and 30%). Rice flour was considered as control. All blends were moistened up to 30% of dough moisture content and processed at 80 rpm.

The modified single screw extrusion-cooker type TS-45 (ZMCh Gliwice, Poland) was used to produce all gluten-free pasta products (Juško et al., 2009). Using the barrel configuration of L/D=18:1, the temperatures were set at 90/100/70°C in the first/second/final extruder sections. Spaghetti-type pasta products were formed and then dried to the moisture content below 12% (Bouasla et al., 2016; Bouasla et al., 2017).

Process efficiency

The efficiency of extrusion-cooking of rice-legumes pasta products was determined in triple by measuring the mass of each pasta product at a specified time for every change in the process conditions (screw speed and moisture content of raw materials) and for each blend. The process efficiency (Q) was calculated according to the formula (Kręcisz, 2016):

$$Q = \frac{m}{t} \quad (\text{kg h}^{-1}) \quad (1)$$

where:

- m – mass of pasta obtained during the measurement, (kg)
- t – measurement time, (h)

Specific mechanical energy

A standard register connected to the extruder's motor was used to measure the power consumption at each variation in the extrusion-cooking conditions and for each blend in three replications. The motor load was determined according to the extruder characteristics. The specific mechanical energy consumption (*SME*) was calculated with the method described by Ryu and Ng (2001) using the following formula:

$$SME = \frac{n}{N} \cdot \frac{L}{100} \cdot \frac{P}{Q} \text{ (kWh}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

where:

- n* – screw speed used, (rpm)
- N* – maximum screw speed, (rpm)
- L* – motor load, (%)
- P* – motor electrical power, (kW)
- Q* – process efficiency, (kg h⁻¹)

Statistical analysis

One-way analysis of variance (ANOVA) followed by the Tukey's test was used to analyze the statistical differences between the mean values. Two-way ANOVA was used to determine the effect of extrusion-cooking conditions on energy consumption during the processing of rice-legumes pasta. Statistical analysis was carried out with Statistica 10 (StatSoft. Inc., Tulsa, OK, USA) at the $\alpha=0.05$ significance level.

Results and discussion

Effect of extrusion-cooking conditions on *Q* and *SME* during the processing of rice-yellow pea pasta products

During the processing of rice-yellow pea pasta products, the process efficiency varied from 10.56 to 16.8 kg·h⁻¹. The highest value was recorded for pasta processed at 28% of moisture content and 100 rpm while the lowest one was recorded for pasta products produced from raw materials with moisture content of 28% and screw speed of 60 rpm. Two-way ANOVA showed a high significant effect of screw speed on process efficiency (Table 1). *Q* values increased with the increase of screw speed used ($r=0.78$, $p<0.0001$) (Fig. 1).

SME during the processing of rice-yellow pea pasta ranged from 0.14 to 0.35 kWh·kg⁻¹. The highest value of *SME* reported for pasta processed at 30% of moisture content and 100 rpm. The lowest value of *SME* was reported for pasta produced at 32% of moisture content and 60 rpm. The results of two-way ANOVA highlighted a high significant effect of screw speed on *SME*. This parameter increased as screw speed increased ($r=0.96$, $p<0.0001$) (Fig. 2). Similar results were reported by Wójtowicz and Mościcki (2008) for extruded precooked wheat pasta and by Kręcisz (2016) for extruded instant corn gruels.

Table 1.
Two-way ANOVA for process efficiency (Q) and specific mechanical energy (SME)

| Parameter | Source of variation | DF | SS | MS | F | p-value |
|-----------------------------------|--------------------------|----|----------|----------|--------|----------|
| Q (kg h^{-1}) | Moisture content (M) | 2 | 2.342 | 1.171 | 10.23 | 0.001078 |
| | Screw speed (S) | 2 | 74.458 | 37.229 | 325.14 | 0.000000 |
| | $M \times S$ | 4 | 16.896 | 4.224 | 36.89 | 0.000000 |
| | Error | 18 | 2.061 | 0.115 | | |
| SME (kWh kg^{-1}) | Moisture content (M) | 2 | 0.001119 | 0.000559 | 6.04 | 0.009839 |
| | Screw speed (S) | 2 | 0.132985 | 0.066493 | 718.12 | 0.000000 |
| | $M \times S$ | 4 | 0.003504 | 0.000876 | 9.46 | 0.000267 |
| | Error | 18 | 0.001667 | 0.000093 | | |

Moisture content had also a significant effect on Q and SME during the production of rice-yellow pea pasta. At low screw speed, Q increased as moisture content increased. On the contrary, SME decreased slightly with the increase of moisture content. Similar observations were reported in literature (Ryu and Ng, 2001; Wójtowicz and Mościcki, 2008; Giménez et al., 2013). This phenomenon is related to the lubricant effect caused by high moisture, resulting in less friction and shearing stress inside the extruder, and, as a consequence, less transferred energy (Duarte et al., 2009; Pérez et al., 2008).

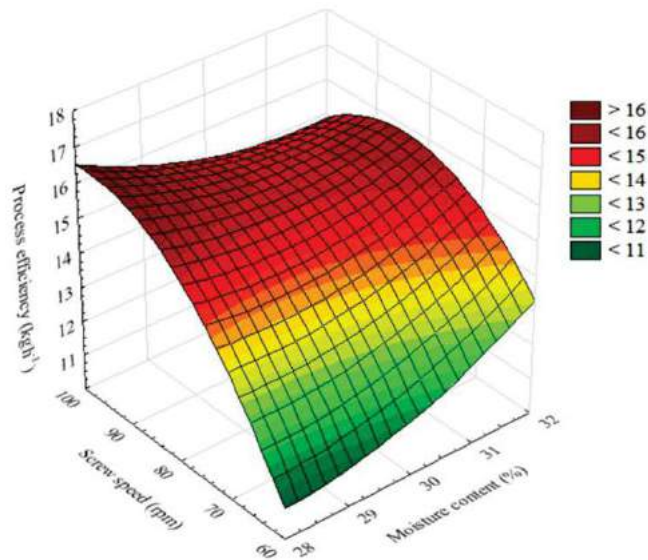


Figure 1. Process efficiency during the processing of rice-yellow pea pasta products as affected by moisture content and screw speed.

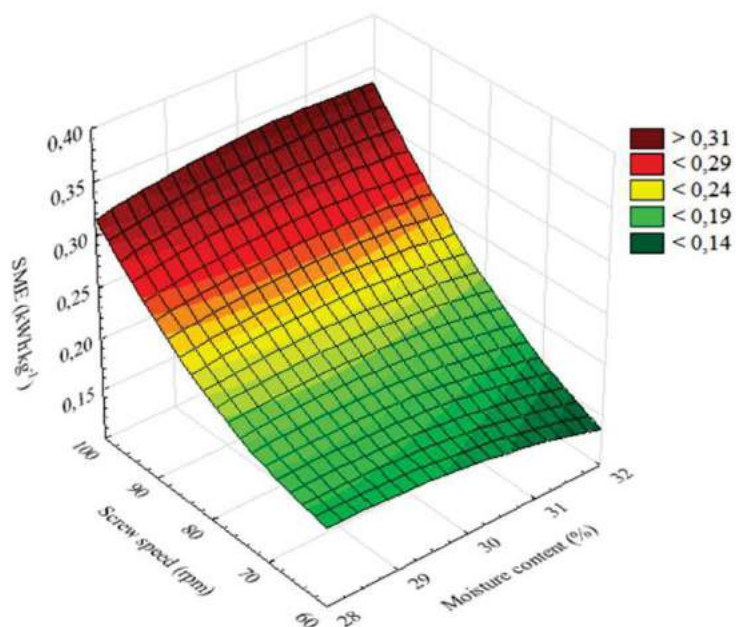


Figure 2. Specific mechanical energy during the processing of rice-yellow pea pasta products as affected by moisture content and screw speed.

Effect of recipe formulation on Q and SME during the processing of rice-legumes pasta products

Table 2 shows process efficiency and SME values during the extrusion-cooking of rice pasta and rice pasta enriched with legumes flours. Increasing the amount of legumes flours in the recipes did not affect significantly the process efficiency and the SME during the processing of gluten-free pasta. Process efficiency ranged from 12.00 to 12.96 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, while SME ranged from 0.25 to 0.27 $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Similar observations were reported by Wójtowicz and Mościcki (2014) for precooked pasta produced from wheat flour with yellow pea and lentil flours.

Table 2.
Process efficiency and specific mechanical energy of rice pasta and rice pasta products enriched with legumes flours

| | Amount (%) | Q (kg h ⁻¹) | SME (kWh kg ⁻¹) |
|------------|------------|---------------------------|-------------------------------|
| Rice | 0 | 12.48 ^a | 0.26 ^a |
| Yellow pea | 10 | 12.00 ^a | 0.27 ^a |
| | 20 | 12.00 ^a | 0.27 ^a |
| | 30 | 12.48 ^a | 0.26 ^a |
| | 10 | 12.00 ^a | 0.27 ^a |
| Chickpea | 20 | 12.00 ^a | 0.27 ^a |
| | 30 | 12.00 ^a | 0.27 ^a |
| | 10 | 12.00 ^a | 0.27 ^a |
| Lentil | 20 | 12.96 ^a | 0.25 ^a |
| | 30 | 12.00 ^a | 0.27 ^a |

a, b – the same letters in columns indicate homogeneous groups according to Tukey's test

Conclusions

According to the presented results, we obtained the following conclusions:

1. Screw speed had a great significant impact on both process efficiency and SME during gluten-free pasta processing with the extrusion-cooking. The two parameters values increased with the increase of screw speed.
2. Moisture content showed also significant impact on process efficiency and SME mainly at low screw speed. Increasing the moisture content caused an increase in process efficiency while increased moisture content decreased the SME .
3. Addition of legumes flour up to 30% in blends did not affect the process efficiency and the SME during the processing of rice-legumes pasta.

References

- Alonso, R., Aguirre, A., Marzo, F. (2000). Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chemistry*, 68, 159-165.
- Bouasla, A., Wójtowicz, A., Zidoune, M. N., Olech, M., Nowak, R., Mitrus, M., Oniszczyk, A. (2016). Gluten-free precooked rice-yellow pea pasta: effect of extrusion-cooking conditions on phenolic acids composition, selected properties and microstructure. *Journal of Food Science*, 81(5), 1070-1079.
- Bouasla, A., Wójtowicz, A., Zidoune, M. N. (2017). Gluten-free precooked rice pasta enriched with legumes flours: Physical properties, texture, sensory attributes and microstructure, *LWT - Food Science and Technology*, 75, 569-577.
- Duarte, G., Carvalho, C., Ascheri, J. (2009). Effect of soybean hull, screw speed and temperature on expanded maize extrudates. *Brazilian Journal of Food Technology*, 12, 205-212.

- Duranti, M. (2006). Grain legume proteins and nutraceutical properties. *Fitoterapia*, 77(2), 67-82.
- Giménez, M. A., González, R. J., Wagner, J., Torres, R., Lobo, M. O., Samman, N. C. (2013). Effect of extrusion conditions on physicochemical and sensorial properties of corn-broad beans (*Vicia faba*) spaghetti type pasta. *Food Chemistry*, 136, 538-545.
- Gularte, A. M., Gomez, M., Rosell, C.M. (2012). Impact of legume flours on quality and in vitro digestibility of starch and protein from gluten-free cakes. *Food Bioprocess Technology*, 5, 3142-3150.
- Juško S., Mościcki L., Wójtowicz A. (2009). Cooling-forming section. Design Patent PL64690Y1. *Patent Office Bulletin (BUP)*, 2(195), 25.
- Kręcisz, M. (2016). Energy consumption during production of corn extrudates in relation to the process parameters. *Agriculture Engineering*, 20(7), 195-203.
- Marti, A., Paganí, M. A. (2013). What can play the role of gluten in gluten free pasta? *Trends in Food Science and Technology*, 31, 63-71.
- Pérez, A. A., Drago, S. R., Carrara, C. R., De Greef, D. M., Torres, R. L., González, R. J. (2008). Extrusion cooking of a maize/soybean mixture: Factors affecting expanded product characteristics and flour dispersion viscosity. *Journal of Food Engineering*, 87, 333-340.
- Ryu, G. H., Ng, P. K. (2001). Effect of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch/Stärke*, 53, 147-154.
- Shimelis, E. A., Rakshit, S. K. (2007). Effect of processing on antinutrients and in vitro digestibility of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in East Africa. *Food Chemistry*, 103, 161-172
- Thompson, T. (2009). *The nutritional quality of gluten-free foods*. In E. Gallagher (Ed.), *Gluten-free food science and technology* (pp. 42-51). London: Blackwell Publishing Ltd.
- Wójtowicz, A., Mościcki, L. (2008). Energy consumption during extrusion-cooking of precooked pasta. *TEKA. Commission Motorization and Energetics in Agriculture*, 8, 311-216.
- Wójtowicz, A., Mościcki, L. (2009). Influence of extrusion-cooking parameters on some quality aspects of precooked pasta-like products. *Journal of Food Science*, 74, 226-233
- Wójtowicz, A., Mościcki, L. (2014). Influence of legume type and addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 1175-1185.

ZAPOTRZEBOWANIE ENERGII I WYDAJNOŚĆ PROCESU W ZALEŻNOŚCI OD PARAMETRÓW EKSTRUZJI I SKŁADU SUROWCOWEGO PODCZAS WYTWARZANIA RYŻOWO-STRĄCZKOWYCH WYROBÓW BEZGLUTENOWYCH

Streszczenie. Celem pracy było wyznaczenie wpływu parametrów procesu ekstruzji (poziomu dowilżenia i prędkości obrotowej ślimaka) a także składu surowcowego receptury na wydajność procesu oraz zapotrzebowanie energii podczas ekstruzji bezglutenowych mieszanek ryżowo-strączkowych w postaci nitek makaronowych. Wydajność procesu (Q) wyznaczono przez pobranie masy wytworzonego ekstrudatu w określonym czasie, zaś energochłonność procesu wyznaczono przez wyliczenie jednostkowego zapotrzebowania energii mechanicznej (SME). Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że prędkość obrotowa ślimaka miała bardziej istotny wpływ na wartości Q i SME niż zmienny poziom dowilżenia mieszanek surowcowych oraz interakcje pomiędzy tymi parametrami. Wartości Q i SME zwiększały się wraz ze zwiększaniem prędkości ślimaka podczas ekstruzji. Poziom dowilżenia surowców miał również istotny wpływ na wydajność i energochłonność wytwarzania ekstrudowanych makaronów bezglutenowych, zwłaszcza przy niskich prędkościach ślimaka. Wydajność procesu ekstruzji zwiększała się wraz ze zwiększaniem poziomu dowilżenia mieszanek surowcowych, te zależności nie były jednak obserwowane podczas wyznaczania energochłonności procesu. Zastosowanie zróżnicowanych receptur surowcowych przy jednakowych parametrach wytwarzania nie miało wpływu zarówno na wydajność, jak i energochłonność procesu ekstruzji wyrobów bezglutenowych.

Słowa kluczowe: ekstruzja, produkty bezglutenowe, wydajność procesu, SME

ملخص

الهدف الأول للأطروحة هو معرفة مدى تأثير محتوى الماء في التركيبة (28٪، 30٪ و 32٪) وسرعة دوران البرغي (60، 80، 100 دورة/الدقيقة) على بعض معايير الجودة للمعكرونة الخالية من الغلوتين المصنوعة من الأرز و البازلاء الصفراء (نسبة 1/2)؛ إذ تم تقييم محتوى الأحماض الفينولية، والنشاط المضادة للأكسدة وبعض خصائص المعكرونة، مثل اللزوجة، القدرة على امتصاص الماء، كمية المادة المفقودة أثناء الطهي، خصائص القوام (texture)، البنية المجهرية و القبول الحسي العام. أظهرت النتائج إلى أن محتوى الماء أثر على كل معايير الجودة المختبرة باستثناء تماسك المعكرونة (fermeté)؛ كما بينت النتائج أيضا أن سرعة دوران البرغي أثرت على بعض المعايير فقط. إن تقنية cuisson-extrusion مع محتوى الماء قدره 30٪ و سرعة دوران البرغي قدرها 80 دورة/الدقيقة كانت مناسبة للحصول على معكرونة خالية من الغلوتين ذات جودة مناسبة. هذه المعكرونة تميزت بمستوى منخفض في كمية المادة المفقودة أثناء الطهي (أقل من 6 ٪)، قوام متماسك، التصاق منخفض و بنية داخلية منتظمة مع نقاط عالية في القبول الحسي عام (7.6).

بعد اختيار أفضل ظروف الإنتاج (محتوى الماء 30٪ مع 80 دورة/الدقيقة)، قمنا بدراسة تأثير مستوى الإضافة (10٪، 20٪ و 30٪) من طحين البقول الجافة (البازلاء الصفراء، الحمص والعدس الأحمر) على جودة المعكرونة و كان ذلك من خلال دراسة التركيب الكيميائي، الخصائص الفيزيائية (نسبة التوسع، الوقت الأدنى للإعداد، القدرة على امتصاص الماء، كمية المادة المفقودة أثناء الطهي، مؤشر امتصاص الماء، مؤشر الذوبان في الماء واللون)، خصائص القوام (الصلابة، التماسك والالتصاق)، النوعية الحسية والبنية المجهرية. أظهرت النتائج أن إضافة دقيق البقول الجافة خفضت نسبة التوسع، الصلابة و السطوح، و رفعت مؤشر الاصفرار والتماسك والالتصاق دون أن يؤثر ذلك الوقت الأدنى للإعداد (8-9 دقائق). كما أظهرت النتائج أن المعكرونة الخالية من الغلوتين تميزت بانخفاض كمية المادة المفقودة أثناء الطهي (أقل من 6٪) ونقاط مقبولة لجميع الصفات الحسية والقبول الحسي العام. وفيما يتعلق بالبنية المجهرية، كل عينات المعكرونة كان لها بنية داخلية مدمجة. إن التركيبات التي تحتوي على طحين البقول الجافة حتى نسبة 30٪ يمكن استخدامها بنجاح لصناعة معكرونة خالية من الغلوتين ذات نوعية جيدة.

وكان الهدف الأخير للأطروحة تحديد تأثير تغيير ظروف الإنتاج (محتوى الماء و سرعة دوران البرغي) وتغيير تركيبة المعكرونة على مردود تقنية cuisson-extrusion واستهلاكها للطاقة أثناء تصنيع المعكرونة الخالية من الغلوتين المكونة من الأرز والبقول الجافة. مردود العملية تراوح بين 10.56 و 16.80 كغ/ساعة، بينما الطاقة الميكانيكية الخاصة (ط.م.خ.) تراوحت بين 0.14 و 0.35 كيلو واط/كغ. و أظهرت النتائج أن سرعة دوران البرغي كان لها تأثير كبير على المردود و ال ط.م.خ.، و اللذان زادا مع زيادة سرعة دوران البرغي. وقد كان لمحتوى الماء أيضا تأثير كبير على المردود و الط.م.خ. خاصة عند سرعة الدوران المنخفضة. المردود زاد بزيادة محتوى الماء بينما سجلت ملاحظات عكسية بالنسبة للط.م.خ.. و على العكس من ذلك فإن التغيير في نوع البقول الجاف و نسبة إدماجه لم يؤثر على المعايير المدروسة.

كلمات مفتاحية : المعكرونة الخالية من الغلوتين، الأرز، البقول الجافة، cuisson-extrusion، محتوى الماء، سرعة دوران البرغي، الجودة، المردود، الطاقة الميكانيكية الخاصة.

Abstract

The first objective of the thesis was to study the effect of the moisture content of the formula (28%, 30% and 32%) and the screw speed (60, 80 and 100 rpm) on some quality parameters of gluten-free pasta made from a rice-yellow pea formula (mass ratio 2/1). The phenolic acid composition, anti-radical activity and some properties of pasta were evaluated, such as pasting properties, water absorption capacity, cooking losses, texture characteristics, microstructure and overall sensory acceptability. The results showed that the moisture content significantly influenced all quality parameters tested except firmness. Screw speed showed a significant effect on only some quality parameters. The extrusion cooking process with a moisture content of 30% and a screw speed of 80 rpm was suitable for obtaining gluten-free pasta with adequate quality. These pasta had low cooking losses (< 6%), firm texture, low stickiness and a regular and compact internal structure with high scores for overall sensory acceptability (7.6).

After selecting the best processing conditions (moisture content of 30% at 80 rpm), the effect of addition level (10%, 20% and 30%) of legumes flours (yellow pea, chickpea and red lentil) on pasta quality has been approached by chemical composition, physical properties (expansion ratio, minimal preparation time, water absorption capacity, cooking losses, water absorption index, water solubility index and color), texture characteristics (hardness, firmness and adhesiveness), sensory quality and microstructure of pasta. The results revealed that the addition of legumes decreased expansion ratio, hardness and brightness, and increased the yellowness, firmness and stickiness, without affecting the minimum preparation time (8-9 min). The results also showed that gluten-free pasta had low cooking losses (< 6%) and acceptable scores for all sensory attributes and overall sensory acceptability. Concerning the microstructure, all gluten-free pasta had a compact internal structure. Formulas containing up to 30% of legumes flours can be used successfully for the processing of good quality gluten-free pasta.

The final objective of the thesis was to determine the effect of processing conditions variation (water content and VRV) and formulation variation on the efficiency of the extrusion cooking process and the energy consumption during the processing of gluten-free pasta based on rice-legumes formulas. The process efficiency varied between 10.56 and 16.80 kg/h, and the specific mechanical energy (SME) varied between 0.14 and 0.35 kWh/kg. The results obtained showed that screw speed had a significant effect on process efficiency and SME values, which increased as the screw speed increased. The moisture content of the formulas also had a significant effect on process efficiency and on SME mainly at low screw speed. The process efficiency increased with the increase of the moisture content while inverse observations were noted for the SME. On the contrary, the variation in the type of legumes and its addition level did not affect the measured parameters.

Key words: gluten-free pasta, rice, legumes, extrusion-cooking, moisture content, screw speed, quality, process efficiency, SME.

Résumé

Le premier objectif de la thèse était d'étudier l'effet de la teneur en eau de la formule (28%, 30% et 32%) et de la VRV (60, 80 et 100 tr/min) sur certains paramètres de qualité des pâtes sans gluten fabriquées à partir d'une formule riz-pois jaune (rapport massique 2/1). La composition en acides phénoliques, l'activité anti-radicalaire et certaines propriétés des pâtes alimentaires ont été évaluées, comme les propriétés de viscosité, la capacité d'absorption de l'eau, les pertes à la cuisson, les caractéristiques de texture, la microstructure et l'acceptabilité sensorielle globale. Les résultats ont montré que la teneur en eau a influencé significativement tous les paramètres de qualité testés sauf la fermeté. La VRV a montré un effet significatif sur seulement certains paramètres de qualité. Le procédé de cuisson-extrusion avec une teneur en eau de 30% et une vitesse de rotation de la vis de 80 tr/min était approprié pour obtenir des pâtes sans gluten avec une qualité adéquate. Ces pâtes alimentaires présentaient des pertes à la cuisson faibles (< 6%), une texture ferme, une adhésivité faible et une structure interne régulière et compacte avec des scores élevées pour l'acceptabilité sensorielle globale (7,6).

Après avoir choisi les meilleures conditions de fabrication (teneur en eau de 30% à 80 tr/min), l'effet du taux d'incorporation (10%, 20% et 30%) des farines de légumes secs (pois jaune, pois chiche et lentille corail) sur la qualité des pâtes a été approché par la composition chimique, les propriétés physiques (ratio d'expansion, temps de préparation minimal, capacité d'absorption de l'eau, pertes à la cuisson, indice d'absorption de l'eau, indice de solubilité dans l'eau et couleur), les caractéristiques de texture (dureté, fermeté et adhésivité), la qualité sensorielle et la microstructure des pâtes. Les résultats ont révélé que l'ajout de farines de légumes secs a diminué le ratio d'expansion, la dureté et la luminance, et a augmenté l'indice de jaune, la fermeté et l'adhésivité, sans affecter le temps de préparation minimal (8 à 9 min). Les résultats obtenus ont également montré que les pâtes sans gluten avaient des pertes à la cuisson faibles (< 6%) et des scores acceptables pour tous les attributs sensoriels et l'acceptabilité sensorielle globale. En ce qui concerne la microstructure, toutes les pâtes sans gluten présentaient une structure interne compacte. Les formules contenant des farines de légumes secs jusqu'à 30% peuvent être utilisées avec succès pour la fabrication de pâtes alimentaires sans gluten de bonne qualité.

Le dernier objectif de la thèse était de déterminer l'effet de la variation des conditions de fabrication (teneur en eau et VRV) et de la formulation sur le rendement du procédé de cuisson-extrusion et la consommation d'énergie lors de la fabrication des pâtes sans gluten à base des formules riz-légumes secs. Le rendement du procédé a varié entre 10,56 et 16,80 kg/h, et l'énergie mécanique spécifique (EMS) a varié entre 0,14 et 0,35 kWh/kg. Les résultats obtenus ont montré que la VRV a eu un impact significatif sur les valeurs du rendement et de l'EMS qui ont augmenté avec l'augmentation de la vitesse de la vis. La teneur en eau des formules a eu également un effet significatif sur le rendement et sur l'EMS principalement à faible VRV. Le rendement du procédé a augmenté avec l'augmentation de la teneur en eau tandis que des observations inverses ont été notées pour l'EMS. Au contraire, la variation du type de légume sec et de son taux d'incorporation n'a pas affecté les paramètres mesurés.

Mots clés : pâtes sans gluten, riz, légumes secs, cuisson-extrusion, teneur en eau, VRV, qualité, rendement, EMS.