



UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1(UFMC1)
INSTITUT DE LA NUTRITION, DE L'ALIMENTATION
ET DES TECHNOLOGIES AGRO-ALIMENTAIRES (I.N.A.T.A.A.)



Département de Technologie alimentaire

N° d'ordre :.....

N° de série :.....

Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité : Technologie Agro-Alimentaire

Thème

Effet des sels alcalins et du lactosérum sur la qualité
technologique et sensorielle des pâtes alimentaires sans
gluten à base de riz et de maïs

présentée par : BOUZIANE Meryem

Soutenue le : 24/01/2023

Devant le jury composé de :

Président :	ZIDOUNE Mohammed Nasreddine	Prof.	I.N.A.T.A.A, UFMC 1
Directeur de thèse :	BOUASLA Abdallah	M.C. A	I.N.A.T.A.A, UFMC 1
Examineurs :	HIDALGO VIDAL Alyssa	Prof.	DeFENS, Univ. Milan
	NOUI Yassine	M.C. A	ISVSA, Univ. Batna 1
	CHEMACHE Loucif	M.C. A	I.N.A.T.A.A, UFMC 1

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à remercier **Allah** Le Tout Puissant et Le Miséricordieux, pour m'avoir donné le courage, la patience et la santé pour mener à terme ma thèse de doctorat.

C'est avec un grand honneur que je remercie mon encadreur, Monsieur **Bouasla Abdallah**, Maître de Conférences Classe A à l'I.N.A.T.A.A pour m'avoir dirigé tout au long de la réalisation de ce travail et pour son esprit scientifique, ses précieux conseils et ses encouragements. Soyez assuré de tout mon respect et de ma profonde gratitude.

Mes vifs remerciements vont également au Madame **Benatallah Leila**, Professeur à l'I.N.A.T.A.A. et Directrice du laboratoire de recherche « Génie Agro-Alimentaire » (GENIAAL) pour m'avoir proposé le thème de la présente thèse, pour ses conseils judicieux et pour son suivi régulier pour l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur **Zidoune Mohammed Nasreddine**, Professeur à l'I.N.A.T.A.A. et Directeur du Laboratoire de Recherche « Nutrition et Technologie Alimentaire » (L.N.T.A.) pour avoir bien voulu présider mon jury de soutenance. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

C'est aussi avec un grand honneur que je remercie Madame **Hydalgo Vidal Alyssa**, Professeur au *Department of Food, Environmental and Nutritional Sciences* (DeFENS) à l'Université de Milan (Italie), pour m'avoir accueillie dans son laboratoire, pour ses conseils, ses orientations et sa confiance.

J'exprime mes vifs remerciements au Monsieur **Noui Yassine**, Maître de Conférences Classe A à l'université Batna 1 et Monsieur **Chemache Loucif** Maître de Conférences Classe A à l'I.N.A.T.A.A, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de faire partie du jury d'évaluation de cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude

Je tiens à exprimer de manière particulière ma profonde gratitude et mes sincères remerciements au Madame **Cappa Carola** et Madame **Agostina Moles** qui ont grandement contribué à la réalisation de la partie expérimentale de cette thèse, Monsieur **Andrea Brandolini** et Monsieur **Barabba Terno** pour m'avoir permis de produire les pâtes sans gluten au sein du Centre de recherche et d'analyse de l'économie agricole - Unité de recherche sur l'élevage et l'aquaculture. Leur bonne humeur et leur gentillesse m'ont beaucoup touché.

Dédicace

Je dédie cette thèse :

A la mémoire de mon père, de mon grand-père et de ma grand-mère, que Dieu les accueille dans son vaste paradis.

A ma très chère mère pour sa tendresse, son amour, son soutien, sa patience et ses sacrifices tout au long de ma vie et de mon parcours. Que Dieu Le Tout Puissant lui donne santé, bonheur et la protège de tout mal.

A toute ma famille que j'aime infiniment.

A mon mari Samir pour son aide et ses encouragements.

A tous mes amis et collègues.

Sommaire

Liste des publications et communications	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction	1
Etude bibliographique	
Chapitre 1. Pâtes alimentaires sans gluten	
1. Généralités sur les pâtes alimentaires	4
2. Fonctionnalité du gluten dans les pâtes alimentaires	5
3. Pâtes alimentaires sans gluten	6
3.1. Céréales utilisées en pastification sans gluten	7
3.1.1. Riz	7
3.1.1.1. Généralités	7
3.1.1.2. Composition chimique	8
3.1.1.3. Classification	8
3.1.1.4. Farine de riz	9
3.1.2. Maïs	10
3.1.2. Généralités	10
3.1.2.1. Composition chimique	10
3.1.2.2. Types de maïs	11
3.1.2.3. Farine de maïs	12
3.2. Utilisation d'additifs et d'ingrédients texturants.....	13
3.2.1. Emulsifiants	13
3.2.2. Hydrocolloïdes	13
3.2.3. Protéines	14
3.2.4. Enzymes	15
3.3. Utilisation des traitements physiques	15
Chapitre 2. Lactosérum	
1. Définition	17
2. Types de lactosérum	17
2.1. Lactosérum acide	17
2.2. Lactosérum doux	18
3. Composition du lactosérum	18
3.1. Lactose	18
3.2. Protéines	19
3.3. Minéraux	21
3.4. Vitamines	22
4. Différents formes de lactosérum	22
4.1. Concentré de protéines de lactosérum	22
4.2. Isolat de protéines de lactosérum	23
4.3. Hydrolysate de protéines de lactosérum.....	23
5. Applications des protéines de lactosérum dans les industries agroalimentaires	24

Chapitre 3. Sels alcalins

1. Généralités	26
2. Sels alcalins dans la production des aliments à base de céréales	27
2.1. Bretzels	27
2.2. Tortillas	27
2.3. Nouilles alcalines	27
3. Carbonates de sodium et de potassium	28
3.1. Carbonates de sodium	28
3.1.1. Sources	28
3.1.2. Utilisations dans l'alimentation	29
3.1.3. Avantages	29
3.1.4. Limitations	29
3.2. Carbonates de potassium	30
3.2.1. Sources	30
3.2.2. Utilisation dans l'alimentation	30
3.2.3. Avantages	30
3.2.4. Limitations	31

Etude expérimentale

Matériel et méthodes.....	32
1. Matières premières.....	32
1.1. Farines de riz et de maïs	32
1.2. Sel.....	32
1.3. Eau d'hydratation	32
1.4. Lactosérum.....	32
1.5. Isolat de protéines de lactosérum	33
1.6. Sels alcalins.....	33
2. Etude de l'effet du lactosérum acide et doux sur la qualité culinaire et sensorielle des spaghettis sans gluten	34
2.1. Caractérisation physico-chimique des farines	34
2.1.1. Distribution granulométrique	34
2.1.2. Détermination de la teneur en eau	34
2.2. Caractérisation physico-chimique du lactosérum	34
2.2.1. pH	34
2.2.2. Acidité.....	35
2.2.3. Extrait sec total.....	35
2.2.4. Matière grasse.....	35
2.2.5. Protéines solubles	36
2.2.6. Lactose	36
2.2.7. Cendres.....	36
2.3. Fabrication des spaghettis sans gluten	36
2.4. Appréciation de la qualité culinaire des spaghettis	39
2.4.1. Temps optimal de cuisson	39
2.4.2. Capacité d'absorption de l'eau	39

2.4.3. Pertes à la cuisson	40
2.5. Analyses sensorielles	40
2.6. Analyse statistique.....	40
3. Etude de l'effet des sels alcalins et/ou des protéines de lactosérum sur la qualité des macaronis sans gluten	41
3.1. Fabrication des macaronis sans gluten	41
3.2. Caractérisation physico-chimique des macaronis sans gluten.....	42
3.2.1. Humidité.....	42
3.2.2. Protéines.....	42
3.2.3. Furosine.....	44
3.3. Appréciation de la qualité des macaronis sans gluten	44
3.3.1. Propriétés de viscosité	44
3.3.2. Qualité culinaire	46
3.3.3. Couleur des pâtes sèches et des pâtes cuites	46
3.3.4. Caractérisation géométrique	46
3.3.5. Texture	47
3.3.6. Analyses sensorielles	48
3.4. Analyse statistique.....	48
Résultats et discussion.....	49
Partie 1. Effet du lactosérum acide et doux sur la qualité culinaire et sensorielle des spaghettis sans gluten.....	49
1.1. Caractéristiques physico-chimiques des farines	49
1.1.1. Distribution granulométrique	49
1.1.2. Humidité	49
1.2. Caractéristiques physico-chimiques du lactosérum	50
1.3. Qualité culinaire des spaghettis sans gluten	51
1.4. Caractéristiques sensorielles des spaghettis.....	55
Partie 2. Effet des sels alcalins et/ou des protéines de lactosérum sur la qualité des macaronis sans gluten	56
2.1. Caractéristiques physico-chimiques	56
2.2. Propriétés de viscosité	58
2.3. Qualité culinaire	59
2.4. Couleur	63
2.5. Caractéristiques géométriques	65
2.6. Texture	66
2.7. Caractéristiques sensorielles	68
Conclusion.	70
Références bibliographiques.....	72
Annexes	

Liste des publications et communications

Publication scientifique

1. **Bouziane, M.**, Bouasla, A., Bouneb, N., Guamraoui, R., & Benatallah, L. (2021). Gluten free pasta enriched with whey for celiac patients. *Nutrition & santé*, 10 (2), 89-95. *Classe B*

Communications internationales

1. **Bouziane, M.**, Bouneb, N., Guamraoui, R., Benatallah, L., Bouasla, A., & Zidoune, M. N. (2018). «Effet du lactosérum sur la qualité des pâtes alimentaires sans gluten ». Séminaire international des sciences alimentaires SISA, 15 et 16 octobre, institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (I.N.T.A.A), Université Frères Mentouri Constantine1.

2. Bouneb, N., Guamraoui, R., Benatallah, L., **Bouziane, M.**, & Zidoune, M. N. (2018). «Fabrication de pâtes alimentaires sans gluten enrichies par du lactosérum doux destinées aux malades cœliaques ». Séminaire international des sciences alimentaires SISA, 15et 16 octobre, institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (I.N.T.A.A), Université Frères Mentouri Constantine1.

Communication nationale

1. **Bouziane, M.**, Benatallah, L., Bouasla, A., & Zidoune, M. N. (2019). Qualité culinaire de pâtes alimentaires sans gluten enrichies par du lactosérum destinées aux malades cœliaques. Première Journée Nationale Cancer, Environnement et Alimentation. 04 Février, Boumerdès. Algérie.

Liste des abréviations

AACC	American Association of Cereal Chemists
AFNOR	Association Française de Normalisation
ASB	Albumine sérique bovine
β -LG	β lactoglobuline
BS	Base sèche
CAE	Capacité d'Absorption de l'Eau
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hydroxyde de calcium
CMC	Carboxyméthylcellulose
DBO	Demande Biochimique en Oxygène
DG	Distribution Granulométrique
E.N.A sel	Entreprise Nationale Algérienne de sel
GMP	Glycomacropéptide
HPMC	Hydroxyle-Propyl-Méthyl-Cellulose
Igs	Immunoglobulines
α -LA	α -lactalbumine
K_2CO_3	Carbonate de potassium
KDa	Kilodalton
KHCO_3	Bicarbonate de potassium
Lf	lactoferrine
LP	lactopéroxydase
Na_2CO_3	Carbonate de sodium
NaHCO_3	Bicarbonate de sodium
NaOH	Hydroxyde de sodium
PC	Pertes à la Cuisson
pH_i	pH isoélectrique
PP	Protéose-Peptone
OI	Osmose Inverse
TOC	Temps Optimal de Cuisson
CPL	Concentré de Protéines de Lactosérum
HPL	Hydrolysate de Protéines de Lactosérum
IPL	Isolat de Protéines de Lactosérum

Listes des figures

Figure 1. Etapes de récupération du lactosérum acide	33
Figure 2. Diagramme de fabrication des spaghettis sans gluten.....	38
Figure 3. Illustration du test de la ligne blanche utilisé pour la détermination du temps optimal de cuisson.....	39
Figure 4. Etapes de fabrication des macaronis sans gluten	43
Figure 5. Profil typique de viscosité	45
Figure 6. Kramer à 10 lames de l'analyseur de texture TA.HD plus.....	47
Figure 7. Temps optimal de cuisson des spaghettis	52
Figure 8. Capacité d'absorption de l'eau des spaghettis	53
Figure 9. Pertes à la cuisson des spaghettis	54
Figure 10. Capacité d'absorption d'eau des macaronis.....	60
Figure 11. Pertes à la cuisson des macaronis sans gluten	62

Liste des tableaux

Tableau 1. Composition du riz et valeur énergétique du grain de riz et de la farine de riz	8
Tableau 2. Composition en éléments majeurs des principales parties des grains de maïs et des grains entiers.....	11
Tableau 3. Principaux additifs utilisés dans la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten	14
Tableau 4. Composition des différents types de lactosérum.....	18
Tableau 5. Composition protéique et caractéristiques de base des protéines de lactosérum. .	20
Tableau 6. Composition en acides aminés essentiels de lactosérum (en g/100 g de protéines).	21
Tableau 7. Composition moyenne (%) des principaux produits à base de poudre de lactosérum.	24
Tableau 8. Applications alimentaires des protéines de lactosérum (Cheftel et Lorient, 1982).	25
Tableau 9. Composition (en g/100 g de matière sèche) de la farine de riz et de la farine de maïs	32
Tableau 10. Formulations des différents échantillons de spaghettis sans gluten	37
Tableau 11. Formulations des différents échantillons de pâtes sans gluten.....	41
Tableau 12. Granulométrie des farines utilisées dans la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten.....	49
Tableau 13. Caractéristiques physico-chimiques des lactosérums utilisés dans la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten	50
Tableau 14. Profil sensoriel des spaghettis sans gluten avec 50% du lactosérum acide comparativement aux spaghettis témoins commerciales à base de blé et spaghettis témoin sans gluten.....	55
Tableau 15. Humidité, protéines et furosine des macaronis sans gluten	56
Tableau 16. Paramètres de viscosité des macaronis sans gluten	58
Tableau 17. Profil de couleur des macaronis sans gluten secs	63
Tableau 18. Profil de couleur des macaronis sans gluten cuits	64
Tableau 19. Surface et longueur des macaronis sans gluten	65
Tableau 20. Augmentation de la surface et de la longueur des macaronis sans gluten	66
Tableau 21. Fermeté et énergie de compression-extrusion des macaronis sans gluten	67
Tableau 22. Profil sensoriel et acceptabilité sensorielle globale des macaronis sans gluten cuits	68

Introduction

Les pâtes alimentaires sont très populaires et consommées dans le monde entier en raison de leur simplicité de préparation, leur longue durée de conservation et de leur prix accessible (Carini *et al.*, 2013 ; Litardi *et al.*, 2019). Ces caractéristiques ont fait augmenter la production mondiale des pâtes de 7 à 12 millions de tonnes par an au cours de la dernière décennie (Lorenzo *et al.*, 2018 ; Linares-García *et al.*, 2019).

Les pâtes de haute qualité se caractérisent généralement par une résistance souhaitable à la cuisson, une faible adhésivité et des pertes à la cuisson limitées (Lucisano *et al.*, 2012 ; Gao *et al.*, 2018). Cela est clairement lié au fait que le gluten est la principale protéine structurante et qu'il est considéré comme un facteur fondamental de la qualité des pâtes de blé pendant la cuisson (Mirhosseini *et al.*, 2015 ; Phongthai *et al.*, 2017). Cependant, le remplacement de la fonctionnalité du gluten dans les pâtes sans gluten est un défi technologique majeur (Marti et Pagani, 2013 ; Morreale *et al.*, 2019). Cela est particulièrement important en raison de la demande croissante pour ce type de produits en relation avec l'augmentation des désordres liés au gluten y compris la maladie cœliaque, l'allergie au blé et la sensibilité au gluten non cœliaque (Conte *et al.*, 2019 ; Culeti *et al.*, 2019 ; Rocchetti *et al.*, 2019 ; Ungureanu-Iuga *et al.*, 2020 ; Witek *et al.*, 2020).

L'allergie au blé est une réaction immunologique aux protéines du blé, particulièrement fréquente chez les enfants (Leonard *et al.*, 2017 ; Melini et Melini, 2019) ; la sensibilité au gluten non cœliaque est le trouble que les individus peuvent présenter lors de l'ingestion du gluten, avec des améliorations lorsque celui-ci est supprimé du régime alimentaire (Leonard *et al.*, 2017 ; Melini et Melini, 2019) ; et la maladie cœliaque est une entéropathie de l'intestin grêle à médiation immunitaire déclenchée par l'ingestion de gluten chez les personnes génétiquement prédisposées (Sosa *et al.*, 2018; Spector Cohen *et al.*, 2019).

L'adhésion stricte à un régime sans gluten à vie constitue le seul traitement efficace connu de la maladie cœliaque (Czaja-Bulsa et Bulsa, 2018; Sosa *et al.*, 2018 ; Spector Cohen *et al.*, 2019). Outre les personnes qui sont obligées de consommer des produits sans gluten, la demande de ces produits a également augmenté pour les personnes qui souhaitent suivre un régime alimentaire sain (Reilly, 2016 ; Culeti *et al.*, 2019 ; Cabanilas, 2020 ; Witek *et al.*, 2020 ; Ungureanu-Iuga *et al.*, 2020).

Pour fabriquer des pâtes sans gluten, il est nécessaire d'utiliser des ingrédients qui offrent des propriétés physiques, sensorielles et technologiques similaires à celles du gluten

dans les pâtes conventionnelles. Différents amidons, émulsifiants, gommés, ou ingrédients à haute teneur en protéines peuvent être utilisés dans cet objectif (Marti et Pagani, 2013 ; Padalino *et al.*, 2016 ; Gao *et al.*, 2018 ; de Lima *et al.*, 2019). De nombreux produits commerciaux sans gluten sont fabriqués à partir de maïs et de riz en raison de leur faible coût et de leur abondance. Cependant, ils sont limités en termes de propriétés nutritionnelles (Giménez *et al.*, 2013 ; Bouasla *et al.*, 2017 ; Boucheham *et al.*, 2019). Il est donc nécessaire de rechercher des alternatives offrant non seulement de bons aspects sensoriels, physiques et technologiques mais aussi une bonne valeur nutritionnelle (de Lima *et al.*, 2019).

L'utilisation de protéines dans la production de pâtes alimentaires sans gluten a un effet positif sur la structure, la texture, les propriétés sensorielles ainsi que sur la qualité nutritionnelle en particulier, en réduisant les déficits en acides aminés (Thompson, 2009 ; Padalino *et al.*, 2016 ; Linares-García *et al.*, 2019). Les isolats protéiques les plus fréquemment utilisés dans les pâtes sans gluten sont les protéines d'œuf, les protéines de lait, les protéines de lactosérum, la farine de soja dégraissée et la poudre de poisson (Gopalakrishnan *et al.*, 2011 ; Padalino *et al.*, 2016 ; Linares-García *et al.*, 2019).

Environ 90% du lait utilisé dans la fabrication du fromage est éliminé sous forme de lactosérum qui est le sous-produit le plus important. Il contient environ 55 g/100 g des ingrédients totaux du lait sous forme de lactose, de protéines solubles, de lipides et de sels minéraux, de sorte qu'il est désormais considéré comme un produit de valeur plutôt que comme un déchet (Khezri *et al.*, 2016).

Le lactosérum peut être incorporé avantageusement dans diverses formulations alimentaires, notamment les biscuits, les pains, les gâteaux, les crackers, les pâtes, les produits de confiserie, les crèmes glacées, les soupes et les sauces, les desserts congelés, les boissons, les préparations alimentaires pour nourrissons et les aliments diététiques spéciaux (Munaza *et al.*, 2012 ; Sellam *et al.*, 2017). Certaines études ont révélé que des pâtes sans gluten de haute qualité avec un fort réseau amidon-protéine étaient obtenues lorsque des protéines de lactosérum étaient ajoutées (Gopalakrishnan *et al.*, 2011 ; Menon *et al.*, 2012 ; Marti *et al.*, 2014 ; Phongthai *et al.*, 2017 ; Kumar *et al.*, 2019).

Malgré son niveau élevé de protéines et ses avantages nutritionnels, le lactosérum est rejeté dans les rivières, les terres ou la mer (sans aucun traitement) en Algérie, ce qui entraîne un grave problème environnemental en raison de ses volumes de production

élevés et de son contenu organique (Sayad *et al.*, 2014). Wissmann *et al.* (2012) ont conclu sur les pertes environnementales et économiques causées par le rejet du lactosérum dans l'environnement que chaque tonne de lactosérum non traité équivaut aux effluents quotidiens d'une agglomération de 470 personnes.

Les sels alcalins sont largement utilisés dans l'industrie des nouilles en Chine, comme essentiellement en tant que conservateurs de pâte ou améliorants de qualité (Fu, 2008 ; Fan *et al.*, 2018). Les carbonates de sodium ou de potassium, ou le mélange des deux (généralement 9:1, kansui) sont les sels alcalins les plus couramment utilisés (Guo *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2018). Il a été signalé que les nouilles ajoutées avec de l'alcali étaient plus élastiques et plus fermes que celles faites avec du NaCl et que l'ajout d'alcali pouvait donner aux nouilles un aspect brillant et jaune (Moss *et al.*, 1986 ; Wang *et al.*, 2011 ; Guo *et al.*, 2017).

Notre étude s'insère dans l'un des axes de recherche du Laboratoire de Génie Agro-Alimentaire de l'INATAA et vise la diversification de l'alimentation des malades cœliaques algériens et l'amélioration de la qualité des pâtes alimentaires sans gluten. Nos objectifs de thèse sont :

1. La valorisation du lactosérum par son incorporation dans la fabrication des pâtes sans gluten et l'étude de son effet sur leur qualité culinaire et sensorielle;
2. L'étude de l'effet des sels alcalins et/ou d'isolat des protéines de lactosérum sur la qualité technologique et sensorielle des pâtes sans gluten.

Etude bibliographique

Chapitre 1

Pâtes alimentaires sans gluten

Chapitre 1. Pâtes alimentaires sans gluten

1. Généralités sur les pâtes alimentaires

les pâtes alimentaires peuvent être décrites comme des produits prêts à l'emploi culinaire, préparés par pétrissage sans fermentation de semoule de blé dur additionnée à l'eau potable et éventuellement d'œufs (140 à 350 g d'œufs frais par kg de semoule), soumis à des traitements physiques appropriés tels que le tréfilage, le laminage et le séchage, ce qui leur donne l'aspect souhaité par les usagers (Feillet, 2000 ; Carini *et al.*, 2010).

Il y a plus de 600 formes de pâtes dont les plus populaires étant les spaghettis, les coudes, les macaronis, les lasagnes et les coquilles (Sissons, 2016 ; Lorenzo *et al.*, 2018).

Le processus de préparation des pâtes se compose de trois opérations principales : (1) hydratation et mélange/malaxage de la semoule, (2) mise en forme de la pâte par extrusion (ou laminage), et (3) stabilisation des morceaux de pâtes mis en forme, généralement par séchage. Le processus d'hydratation et de mélange/malaxage de la semoule produit une pâte hydratée homogène qui est essentielle à la production de pâtes de haute qualité. Après avoir été mélangée, la pâte est transférée dans l'extrudeuse afin d'obtenir une forme spécifique (spaghetti, macaroni, *etc.*) avec le développement d'un réseau continu de protéines de gluten qui entoure les granules d'amidon. Ce processus facilite le maintien de la structure des pâtes pendant la cuisson (Giacco *et al.*, 2016). Le processus de séchage est la dernière opération unitaire de la production de pâtes avant l'emballage final. Il joue un rôle crucial dans la garantie de la qualité du produit final, car les conditions opérationnelles peuvent provoquer des dommages thermiques et mécaniques qui affectent la texture des pâtes. Cette étape doit donc être considérée comme l'une des principales étapes du contrôle de la qualité (Lorenzo *et al.*, 2018). L'objectif du séchage est de réduire la teneur en eau des pâtes d'environ 35% à 12-14%, de sorte que le produit fini soit dur, conserve sa forme et puisse être stocké sans se détériorer. Les pâtes séchées conservées à température ambiante sont stables pendant des années à température ambiante (Giacco *et al.*, 2016).

Les pâtes peuvent être classées en fonction de certains des paramètres suivants : teneur en eau, type de traitement et/ou de forme (Gómez et Sciarini, 2015) :

- Selon la teneur en eau du produit final, les pâtes peuvent être fraîches ou sèches ;

- Selon la technologie employée pour les mettre en forme, les pâtes peuvent être extrudées ou laminées. Elles peuvent également être courtes, longues ou farcies

Sur le plan nutritionnel, les pâtes sont principalement utilisées comme source d'énergie en raison de leur forte teneur en glucides (74-77% base sèche), et elles présentent un indice glycémique plus bas allant en général de 32 à 65 pour différents types de pâtes (Boudalia *et al.*, 2020; Giacco *et al.*, 2016; Sakre *et al.*, 2016), ce qui est favorable au contrôle du poids corporel, des lipides plasmatiques et de la glycémie (Sissons 2016 ; Giacco *et al.*, 2016; Woomer et Adedeji, 2021).

Cependant, les pâtes sont une mauvaise source de protéines (~10,9%) (Giacco *et al.*, 2016). Les protéines des pâtes ont une faible quantité d'acides aminés essentiels comme la lysine et la thréonine qui sont les premiers et seconds acides aminés limitants dans la plupart des produits céréaliers (Boudalia *et al.*, 2020).

2. Fonctionnalité du gluten dans les pâtes alimentaires

La semoule de blé a longtemps été considérée comme un composant essentiel des aliments céréaliers, notamment dans les pâtes alimentaires. Elle contient des protéines de gluten, principalement composées de gluténines et de gliadines (80%) (Laleg *et al.*, 2016). La première produit une pâte rugueuse et caoutchouteuse lorsqu'elle est entièrement hydratée, tandis que la gliadine produit une pâte visqueuse et fluide en hydratation. Le gluten présente donc des propriétés cohésives, élastiques et visqueuses qui combinent les extrêmes des deux composants (Gallagher *et al.*, 2004 ; Susanna et Prabhasankar, 2013).

Le gluten est le principal responsable de la formation de la structure, il est considéré comme le facteur le plus important lié à la qualité de cuisson des pâtes (Sozer, 2009). Pendant le pétrissage de la pâte, le réseau de gluten se forme, créant une structure tridimensionnelle qui apporte de l'élasticité au mélange. Lorsque la pâte est cuite, le réseau se solidifie, ce qui contribue à la stabilité finale du produit (Gallagher, 2009).

Les pâtes ordinaires produites avec du blé ont de meilleurs paramètres de qualité : faibles pertes à la cuisson, structure ferme, adhérence réduite, *etc.*) (Sozer, 2009). Ces paramètres sont d'une importance cruciale pour le choix des pâtes par les consommateurs (Chillo *et al.*, 2010 ; Mirhosseini *et al.*, 2015).

Les caractéristiques des matières premières et les conditions de transformation jouent un rôle clé dans la détermination de la qualité des pâtes finales (De Noni et Pagani, 2010). La quantité et la qualité des protéines ont reçu une attention considérable comme

étant les facteurs les plus importants affectant les propriétés des pâtes ; une teneur élevée en protéines et un gluten "fort" (du point de vue de sa viscoélasticité) sont nécessaires pour transformer la semoule en pâtes alimentaires avec une performance de cuisson optimale (Marti et Pagani, 2013). Au cours de la cuisson des pâtes, deux phénomènes principaux se produisent: d'une part, le réseau de gluten développé lors du malaxage s'hydrate et, lorsque la température augmente, se coagule et devient insoluble, créant ainsi un réseau solide qui piège les granules d'amidon. D'autre part, la diffusion d'eau dans les pâtes et l'élévation de la température entraînent la gélatinisation de l'amidon (Pagani *et al.*, 2007 ; Padalino *et al.*, 2013 ; Gómez et Sciarini, 2015).

La gélatinisation de l'amidon et la coagulation des protéines sont des phénomènes compétitifs puisqu'elles se produisent dans le même intervalle de température et sont toutes deux influencées par la disponibilité de l'eau. Plus la coagulation des protéines est rapide, plus le gonflement de l'amidon est limité et plus la quantité d'amylose qui se lessive des granules est faible, ce qui garantit une texture plus ferme et une adhérence inférieure du produit final (Marti et Pagani, 2013 ; Gómez et Sciarini, 2015). Au contraire, si le réseau protéique manque d'élasticité ou si sa formation est retardée, les granules d'amidon gonflent facilement et une partie de la matière amylacée passera dans l'eau de cuisson, ce qui donnera un produit caractérisé par sa viscosité et sa faible consistance (Marti et Pagani, 2013).

3. Pâtes alimentaires sans gluten

De nombreuses difficultés sont rencontrées dans la préparation des pâtes sans gluten en raison de l'absence de gluten (Ferreira *et al.*, 2016 ; Brites *et al.*, 2018). Les pâtes préparées uniquement à partir de farine sans gluten sont généralement considérées comme de qualité texturale inférieure à celle des pâtes de blé : elles ne tolèrent pas la sur-cuisson, elles sont collantes et, surtout elles sont caractérisées par des pertes à la cuisson importantes (Marti et Pagani, 2013 ; Morreale *et al.*, 2018).

L'inconvénient des farines sans gluten dans la fabrication des pâtes est qu'elles ne peuvent pas créer un réseau suffisamment fort entre leurs protéines et l'amidon pour lier la pâte et produire la qualité requise (Wang *et al.*, 2018 ; Rachman *et al.*, 2019). Par conséquent, il est donc nécessaire d'améliorer le processus ou de développer une nouvelle formulation avec l'ajout d'ingrédients afin de créer des qualités sensorielles et culinaires adéquates (Padalino *et al.*, 2016 ; Rachman *et al.*, 2019).

3.1. Céréales utilisées en pastification sans gluten

Différents substituts de la semoule de blé ont été utilisés pour la production de pâtes alimentaires sans gluten, y compris des céréales (maïs, riz, sorgho, millet, teff), des pseudo-céréales (amarante, quinoa, sarrasin), des légumineuses (pois, lentilles, soja, pois chiche), ainsi que des amidons d'origine diverse (par exemple, l'amidon de maïs) (Schoenlechner *et al.*, 2010 ; Zannini *et al.*, 2012 ; Lamacchia *et al.*, 2014 ; Rosell *et al.*, 2014 ; Giuberti *et al.*, 2015 ; Kahlon et Chiu 2015 ; Ferreira *et al.*, 2016 ; Hosseini *et al.*, 2018 ; El Khoury *et al.*, 2018 ; Kosinski et Cacak-Pietrzak, 2020 ; Culetu *et al.*, 2021 ; Khairuddin et Lasekan, 2021).

Cependant, les matières premières les plus utilisées sont le riz et le maïs (Marti *et al.*, 2010 ; da Silva *et al.*, 2013 ; Cai *et al.*, 2016 ; Rafiq *et al.*, 2017 ; Gao *et al.*, 2018) en raison de leur abondance et de leur faible coût (Gimenez *et al.*, 2013 ; Silva *et al.*, 2016).

Les farines sans gluten sont plus utilisées que les amidons, évitant ainsi l'étape coûteuse de l'extraction de l'amidon des graines. Par ailleurs, 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).

3.1.1. Riz

3.1.1.1. Généralités

Le riz est une graine de la plante monocotylédone du genre *Oryza* et de la famille des graminées (*Poaceae*) qui comprend une vingtaine d'espèces sauvages et deux espèces cultivées : *Oryza sativa* (riz asiatique) et *Oryza glaberrima* (riz africain) (Comino *et al.*, 2013).

Le riz a été, tout au long de l'histoire, l'un des aliments les plus importants dans l'alimentation humaine et l'une des cultures céréalières les plus étendues (9% du sol total cultivé) et il peut être cultivé dans diverses conditions, bien qu'il pousse plus rapidement dans des environnements humides et chauds (Arendt et Dall Bello, 2008). Il est principalement consommé sous forme de grains blancs, mais au cours de la dernière décennie, des dizaines de produits contenant du riz en tant qu'ingrédient sont apparus sur le marché des produits alimentaires (Comino *et al.*, 2013).

3.1.1.2. Composition chimique

Le riz est l'aliment de base principal de nombreux pays, fournissant 20% de l'approvisionnement énergétique alimentaire dans le monde. Ce n'est pas seulement une source d'énergie importante, mais également une bonne source de vitamines B (thiamine, riboflavine et niacine) (Udachan et Sahoo, 2017). Ses protéines sont hautement digestibles et présentent une valeur biologique et un rapport d'efficacité protéique excellent en raison de la concentration plus élevée (~ 4%) de lysine. Des minéraux comme le calcium, le magnésium et le phosphore sont présents, ainsi que des traces de fer, de cuivre, de zinc et de manganèse (Oko *et al.*, 2012) (Tableau 2).

Tableau 1. Composition du riz et valeur énergétique du grain de riz et de la farine de riz (rapporté à 100 g) (Arendt et Dall Bello, 2008)

	Riz Brut	Riz blanchi	Farine complète	farine blanche
Carbohydrates (%)	77,20	79,97	76,50	80,10
Protéines (%)	7,90	7,10	7,20	5,90
Fibre (%)	3,50	1,30	4,60	2,40
Lipides (%)	2,90	0,70	2,80	1,40
Minéraux (%)	1,50	0,60	1,50	0,60
Vitamines				
Vitamine E (mg)	1,20	0,10	1,20	0,10
Vitamine K (mg)	1,90	0,10	–	0,00
Thiamine (mg)	0,40	0,10	0,40	0,10
Riboflavine (mg)	0,10	0,00	0,10	0,00
Niacine (mg)	5,10	1,60	6,30	2,60
Pyridoxine (mg)	0,50	0,20	0,70	0,40
Folate (µg)	20,00	8,00	16,00	4,00
Acide pantothénique (mg)	1,50	1,00	1,60	0,80

3.1.1.3. Classification du riz

Les variétés de riz peuvent être classées en fonction de leur zone de culture d'origine, leur granulométrie et leur teneur en amylose. La teneur en amylose diffère entre le riz cireux (moins de 1% d'amylose) et non cireux (plus de 10% d'amylose) (Arendt et Dall Bello, 2008). Le comité de la Commission du *Codex Alimentarius* (1995) propose une classification de riz usiné selon la longueur et le rapport longueur/largeur du grain :

- **Le riz à grain long** a une longueur moyenne du grain de plus de 6 mm et un rapport longueur/largeur de 3 ou plus.

- **Le riz à grain moyen** a des grains d'une longueur supérieure à 5,2 mm mais inférieure ou égale à 6 mm et un rapport longueur/largeur de moins de 3 ;
- **Le riz à grain court** a des grains d'une longueur moyenne de 5,2 mm ou moins et un rapport longueur/largeur de moins de 2.

3.1.1.4. Farine de riz

La farine de riz peut être obtenue à partir de grains entiers, mais elle est généralement produite à partir des grains cassés pendant le processus de mouture parce que leur coût est inférieur à celui des grains entiers moulus. Habituellement, les farines de riz ont la même composition chimique que les grains de riz broyées. Les caractéristiques des farines de riz sont régies par les variétés de cultivars inhérentes, les variations environnementales, les méthodes de broyage et leurs traitements précédents (Arendt et Dall Bello, 2008).

La farine de riz est largement utilisée comme matière première pour préparer des produits sans gluten pour sa saveur douce, sa couleur blanche, sa haute digestibilité et ses propriétés hypoallergéniques (Rosell et Marco, 2008 ; Marti *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2016 ; Culetu *et al.*, 2021). En outre, d'autres attributs tels que la faible teneur en protéines et en sodium, les faibles niveaux de prolamine et la présence de glucides faciles à digérer font du riz la meilleure céréale pour les patients souffrant d'allergies (Arendt et Dall Bello, 2008). Cependant, malgré ses avantages, le riz est pauvre en protéines et possède des propriétés technologiques relativement faibles pour interagir et développer un réseau cohésif (Marti *et al.*, 2013; Fradinho *et al.*, 2019). Pour ces raisons, des techniques de transformation et des ingrédients et/ou additifs spécifiques sont nécessaires afin d'améliorer les propriétés texturales et les caractéristiques nutritionnelles du produit final (Foschia *et al.*, 2017).

Habituellement, la farine obtenue à partir de grains longs est préférée car elle présente une teneur élevée en amylose. De plus, les grains étuvés ont de bonnes performances pour la fabrication de pâtes alimentaires car, pendant l'étuvage, l'amidon gélatinise et le complexe amylose-lipide se forme. Ces modifications de la structure de l'amidon limitent le gonflement de l'amidon et la perte d'amylose lors de la cuisson des pâtes (Gómez et Sciarini, 2015).

3.1.2. Maïs

3.1.2.1. Généralités

Le maïs (*Zea mays*), appelé aussi blé d'Inde au Canada est une plante tropicale herbacée annuelle de la famille des Poacées (graminées) produite et consommée en grande quantité dans le monde entier (Pétrus *et al.*, 2009).

C'est l'une des trois cultures céréalières les plus importantes au monde (Vikal et Chawla, 2014 ; Faostat, 2018), fournissant des nutriments aux humains et aux animaux (Ngom *et al.*, 2021). Le maïs est communément appelé la reine des céréales grâce à son potentiel de rendement génétique élevé par rapport aux autres céréales (Kannan *et al.*, 2013 ; Gezahegn, 2021).

En raison de sa large distribution mondiale, de son faible prix par rapport aux autres céréales, de ses divers types de grains, et de son large éventail de propriétés biologiques et industrielles, le maïs a un éventail d'utilisations plus large que n'importe quelle autre céréale : en tant que nourriture humaine, en tant que céréale fourragère, en tant que culture fourragère, et pour des centaines d'utilisations industrielles (Kemboi *et al.*, 2021) ; il constitue une source de matières premières pour la production d'édulcorants alimentaires, de boissons alcoolisées, de protéines, d'huile et d'amidon, ainsi qu'une source de biocarburants (Gezahegn, 2021).

3.1.2.2. Composition chimique

Quelques composants chimiques des principales parties du grain de maïs et du grain entier sont résumés dans le tableau 3. Le grain entier est composé principalement d'amidon (64-78%, base sèche), de protéines (7-12%), de lipides (4-6%), de sucres (1,0-3,0%), de substances minérales (1,0-1,5%), de fibres (2,0-2,5%), et de vitamines (Semassa *et al.*, 2016).

La composition chimique des principales parties du grain de maïs montre des différences importantes (Semassa *et al.*, 2016). L'endosperme où l'albumen est le composant le plus important (80–85%), suivi du germe (9–10%) et du péricarpe (5–6%). Il est principalement composé d'amidon (70%) suivi de petites concentrations (8-10%) de protéines. La teneur en graisse de l'endosperme est relativement faible (Chaudhary, 2013).

Le germe contient une forte teneur en matières grasses brutes avec une valeur moyenne de 33% et des concentrations relativement élevées de protéines (18-19%) et de

minéraux (Chaudhary, 2013), il contient également des vitamines du groupe B et des antioxydants tels que la vitamine E (Gwirtz et Garcia-Casal, 2014).

Le péricarpe est la couche la plus externe qui se caractérise par une teneur élevée en fibres brutes, composée principalement d'hémicellulose, de cellulose et de lignine (Chaudhary, 2013).

Tableau 2. Composition en éléments majeurs des principales parties des grains de maïs et des grains entiers (Semassa et al., 2016).

Composant chimique (% BS)	Péricarpe	Albumen	Germe	Grains entiers de maïs
Protéines	3,7	8,0	18,4	7-12
Matières grasses	1,0	0,8	33,2	4-6
Fibres brutes	86,7	2,7	8,8	2-2,5
Cendres	0,8	0,3	10,5	1-1,5
Amidon	7,3	87,6	8,3	64-78
Sucres	0,34	0,62	10,8	1-3

3.1.2.3. Types de maïs

Différents types de maïs sont cultivés à travers le monde, une différence importante étant la couleur. Les grains de maïs peuvent être de différentes couleurs allant du blanc au jaune en passant par le rouge et le noir (Ranum *et al.*, 2014). Le maïs blanc a un endosperme blanc contenant des quantités plus élevées d'endosperme vitreux que d'endosperme farineux et est préféré pour les produits nixtamalisés comme les tortillas. Les grains de maïs bleu, violet et rouge sont riches en anthocyanines avec des propriétés antioxydantes et bioactives bien établies (Singh *et al.*, 2019).

Bien qu'il existe des centaines de cultivars de maïs, les variétés cultivées à des fins commerciales spécifiquement pour la consommation humaine comprennent (Nuss et Tanumihardjo, 2010) :

- Le maïs denté (*Zea mays Indentata*) est de couleur jaune ou blanche, avec une cime déprimée ;
- Le maïs flint (*Zea mays Indurata*) également connu sous le nom de maïs indien, a un amidon doux au milieu, entouré d'une coquille dure et sa couleur varie du blanc au rouge ;

- Le maïs farineux (*Zea mays* var. *Amylacea*.) également connu sous le nom de maïs doux, présente principalement des grains blancs à couronnes arrondies ou plates, composés presque entièrement d'amidon mou et d'une petite partie d'amidon dur ;
- Le maïs sucré (*Zea mays saccharata* et *Zea mays rugosa*) a une teneur en sucre plus élevée que les autres types de maïs et il est consommé sous différentes formes (bouilli, rôti, congelé, ou en conserve) ;
- Le maïs pop (*Zea mays everta*) est principalement utilisé pour le pop-corn et a une plus grande capacité à éclater, qui est liée à la densité de l'amidon dans l'endosperme ;
- Le maïs waxy (*Zea mays ceratina*) contient de l'amidon principalement à base d'amylopectine (99%), et l'amylose est présent en très petites quantités. La fécule de maïs cireuse produit une pâte qui a une faible tendance à la rétrogradation, une transmittance élevée et qui ressemble à la fécule de pomme de terre. La fécule de maïs cireuse est utilisée dans de nombreux aliments (par exemple, tartes aux fruits, aliments en conserve, aliments surgelés et produits laitiers) et dans les applications non alimentaires (rubans gommés) (Singh *et al.*, 2019).

3.1.2.4. Farine de maïs

La farine de maïs est obtenue par mouture sèche des grains de maïs. Sa valeur énergétique est de 359 calories pour 100 g. Sa composition chimique est la suivante : protides (9 g), glucides (74 g), lipides (3 g). Ses utilisations sont nombreuses, en particulier la fabrication du pain, de la polenta, de la tortilla et de la miche. Il faut la conserver au froid pour éviter l'agglutination (Pétrus *et al.*, 2009).

La farine de maïs est également recommandée comme aliment sain pour les patients cœliaques car elle ne contient pas de gluten et peut être utilisée dans la production de pâtes. Lorsque la farine de maïs est le seul matériau utilisé dans la production de pâtes alimentaires, il nécessite une nouvelle et efficace organisation amidonnière capable de remplacer le réseau de gluten dans le produit final (Padalino *et al.*, 2013 ; Padalino *et al.*, 2015).

Bien que la farine de maïs fournisse de nombreux micro- et macronutriments, des quantités de certains nutriments essentiels sont insuffisantes. Par conséquent, la consommation de ces produits ne génère que de faibles quantités de protéines, de minéraux et de fibres alimentaires, augmentant ainsi le risque de carences nutritionnelles liées à la

maladie cœliaque (Padalino *et al.*, 2016). Il a été signalé que les pâtes à base de farine de maïs enrichie de 15 % de farine de pois chiche présentent une augmentation des teneurs en fibres alimentaires totales, en protéines et en graisses en comparaison avec les pâtes témoins (100 % de farine de maïs) (Padalino *et al.*, 2015).

3.2. Utilisation d'additifs et d'ingrédients texturants

La formulation des pâtes sans gluten nécessite, en premier lieu, une connaissance approfondie des propriétés des composants des farines et amidons sans gluten. Ensuite, des additifs appropriés peuvent être choisis pour favoriser une masse cohésive dans le produit (tableau 1) (Silva *et al.*, 2016).

3.2.1. Emulsifiants

Les émulsifiants agissent comme lubrifiants dans le processus d'extrusion et fournissent une consistance plus ferme et une surface moins collante (Marti et Pagani, 2013). De plus, lorsque l'émulsifiant est ajouté, le gonflement de l'amidon et la lixiviation de l'amylose sont réduits lorsqu'il est chauffé et, par conséquent, les pertes à la cuisson sont réduites (Gómez et Sciarini, 2015). Les lécithines, les mono et diglycérides sont les émulsifiants les plus utilisés (Lai, 2002 ; Kaur *et al.*, 2005 ; Charutigon *et al.*, 2008 ; Chillo *et al.*, 2008 ; Schoenlechner *et al.*, 2010 ; Jakub et Grażyna, 2020).

3.2.2. Hydrocolloïdes

L'incorporation d'hydrocolloïdes peut être une solution facile pour améliorer la fermeté et la qualité de cuisson des pâtes sans gluten en raison de leur capacité à faire un gel en petite quantité qui offre une consistance élevée à la température ambiante (Padalino *et al.*, 2016). De plus, en raison de leur capacité à lier l'eau, les gommes peuvent augmenter le taux de réhydratation des pâtes (Sozer, 2009 ; Woomer et Adedeji, 2021). Les hydrocolloïdes les plus couramment utilisées sont la gomme arabique, la gomme de xanthane, la gomme de caroube, le carboxyméthylcellulose (CMC) (Sozer, 2009 ; Marti et Pagani, 2013).

Tableau 3. Principaux additifs utilisés dans la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten

Additifs	%	Effets	Références
Hydrocolloïdes			
Chitosan	2	Diminution de l'adhérence et de la viscosité.	Padalino <i>et al.</i> (2011)
CMC	2		
Xanthane	2	Diminution de la gélatinisation de l'amidon	Padalino <i>et al.</i> (2011)
HPMC	2		
Gomme gellane	2	Modifications des propriétés rhéologiques du réseau d'amidon.	Padalino <i>et al.</i> (2013)
CMCe	2		
Pectine	2		
Gélose	2		
Poudre de protéine d'œuf	2		
Amidon de tapioca	2		
Farine de graines de guar	2		
Chitosan			
Gomme de guar	0,5	Augmentation de la dureté.	Silva <i>et al.</i> (2013)
Protéines et Enzymes			
Protéines de lait	1	Amélioration de la texture et de la qualité culinaire des pâtes	Schoenlechner <i>et al.</i> (2010) ; Sozer, (2009) ; Phongthai <i>et al.</i> (2017)
Protéines d'œufs	1- 6		
Protéines de lactosérum	6-9		
Transglutaminase	0,5	-Amélioration de la machinabilité de la pâte -Amélioration de la cohésion, de la malléabilité, de l'élasticité, de la résilience et de la dureté.	Yalcin et Basman, (2008) ; Kumar <i>et al.</i> (2019)
	1		

3.2.3. Protéines

Néanmoins, malgré les effets positifs largement rapportés de l'ajout des émulsifiants et des hydrocolloïdes, les consommateurs associent souvent leur présence dans les pâtes sans gluten à un aliment "non naturel". En effet ces additifs sont obtenus par synthèse chimique ou sont extraits de sources autres que les céréales (Marti *et al.*, 2014 ; Gómez et Sciarini, 2015 ; Morreale *et al.*, 2019). Par conséquent, l'utilisation des protéines comme ingrédients structurants représente une alternative intéressante pour la production de pâtes sans gluten, en plus de leur rôle positif dans l'amélioration de la valeur nutritionnelle du produit (Marti et Pagani, 2013 ; Padalino *et al.*, 2016).

Les pâtes sans gluten contenant des protéines d'œuf présentent de bonnes caractéristiques de texture, notamment en ce qui concerne leur comportement viscoélastique (élasticité, résistance et adhésivité), tandis que l'élasticité est principalement affectée par l'humidité de la pâte (Gopalakrishnan *et al.*, 2011 ; Gao *et al.*, 2018). L'ajout de concentré de protéines de lactosérum (10% et 20%) à la farine de patate douce produit

des pâtes de haute qualité et une faible digestibilité de l'amidon en raison de la formation d'un fort réseau amidon-protéine (Gopalakrishnan *et al.*, 2011). Marti *et al.* (2014) ont signalé une amélioration de la structure et de la texture des pâtes après l'ajout de 3% de protéines de lactosérum.

3.2.4. Enzymes

D'autres additifs utilisés avec succès dans plusieurs aliments sans gluten sont les enzymes pour leur capacité unique à modifier la fonctionnalité des protéines et à promouvoir la réticulation des protéines. L'ajout d'enzymes dans la pâte sans gluten améliore les caractéristiques rhéologiques, les propriétés de manipulation et la durée de conservation. Des enzymes telles que la glucose oxydase et la transglutaminase, ainsi que de nombreuses autres enzymes, sont utilisées dans les applications sans gluten (Padalino *et al.*, 2016).

3.3. Utilisation des traitements physiques

L'approche la plus courante pour améliorer la qualité des pâtes sans gluten consiste à modifier la fonctionnalité de l'amidon et sa structure macromoléculaire. L'amidon joue un rôle clé dans la production d'aliments sans gluten car c'est l'ingrédient principal des matières premières sans gluten. La technologie alimentaire sans gluten repose principalement sur des opérations de chauffage et de refroidissement de la pâte qui exploitent deux phénomènes : la pré-gélatinisation de l'amidon et, ensuite, sa rétrogradation (Padalino *et al.*, 2016).

La première approche technologique utilisée pour la production des pâtes sans gluten est axée sur l'utilisation de farines traitées thermiquement (Padalino *et al.*, 2016) où l'amidon est pré-gélatinisé par des étapes de chauffage et de refroidissement, formant ainsi un réseau rigide basé sur l'amidon rétrogradé (Cabrera-Chavez *et al.*, 2012 ; Larrosa *et al.*, 2016). Cette technique a été appliquée par plusieurs chercheurs : Mastromatteo *et al.* (2011) ont optimisé la formulation de pâtes sans gluten à l'aide de farines de quinoa et de soja contenant différentes fractions d'amidon de maïs pré-gélatinisé. Fiorda *et al.* (2013) ont inclus la farine pré-gélatinisée produite à partir d'amidon de manioc et de bagasse de manioc pour augmenter la valeur nutritive des pâtes sans gluten et ont obtenu un produit ayant une couleur, une texture et une valeur nutritive adéquate.

Cependant, l'une des technologies les plus appropriées pour la fabrication de pâtes sans gluten est le procédé de cuisson-extrusion dans lequel la farine native est extrudée à

haute température (plus de 100°C) pendant une courte durée afin de favoriser la gélatinisation de l'amidon directement dans l'extrudeuse (Padalino *et al.*, 2016 ; Silva *et al.*, 2016). En effet, l'organisation des granules d'amidon est perturbée pour les rendre digestibles et pour produire un produit malléable. En d'autres termes, les macromolécules d'amidon cristallin sont converties en un matériau plus amorphe (Wolf, 2010 ; Marti et Pagani, 2013). En plus de la gélatinisation partielle de l'amidon, cette méthode permet aussi de dénaturer partiellement les protéines, ce qui entraîne une restructuration dans la pâte extrudée (Gómez et Sciarini, 2015). Par conséquent, les pâtes obtenues par cuisson-extrusion présentent une fermeté et une texture supérieures après cuisson, comparativement aux pâtes préparées à partir de la même farine avec une extrudeuse conventionnelle (Wang *et al.*, 1999 ; Padalino *et al.*, 2016).

Tsao (1976) a été l'un des premiers auteurs à appliquer l'extrusion-cuisson pour faire des spaghettis de riz. La cuisson par extrusion a été utilisée avec succès pour la production de pâtes à partir de maïs (Merayo *et al.*, 2011 ; Gimenez *et al.*, 2013). Des études comparant l'extrusion conventionnelle (50°C) à la cuisson par extrusion (115°C) ont montré que la cuisson par extrusion améliore la qualité de cuisson des pâtes à base de riz (pertes à la cuisson et adhésivité) (Marti *et al.*, 2010 ; Marti *et al.*, 2011).

Chapitre 2
Lactosérum

Chapitre 2. Lactosérum

1. Définition

Le lactosérum plus simplement appelé sérum ou petit lait (Bauer *et al.*, 2010) est le liquide de couleur jaune verdâtre qui est séparé du caillé coagulé lors de la fabrication du fromage. Il a un goût désagréable, une saveur docile mais il s'oxyde rapidement (Tariq *et al.*, 2013). Sa couleur jaunâtre est liée à des quantités considérables de riboflavine (vitamine B₂) (Barukčić *et al.*, 2019).

Le lactosérum est produit à partir de tous les types de lait, mais le lait de vache est le plus courant dans les pays occidentaux. Dans certaines régions du monde, le lait de chèvre, de brebis et de chameau est également utilisé dans la production de fromage et de lactosérum (Smithers, 2008 ; Yadav *et al.*, 2015).

Le lactosérum représente 80 à 90 % du volume total du lait et contient environ 50% de ses éléments nutritifs (Barukčić *et al.*, 2019). Il a une demande biochimique en oxygène (DBO) d'au moins 30000 mg/g (Gupta *et al.*, 2019).

2. Types de lactosérum

Selon la technique de traitement utilisée pour éliminer la caséine du lait, deux principaux types de lactosérum peuvent être obtenus : le lactosérum doux et le lactosérum acide (Barukčić *et al.*, 2019). Les principales différences entre les deux types de lactosérum se situent au niveau de leur teneur en minéraux, leur acidité et leur teneur en fraction protéique (Panesar et Kennedy, 2012 ; Yadav *et al.*, 2015).

2.1. Lactosérum acide

Le lactosérum acide (pH < 5) est issu de procédés utilisant la fermentation, l'addition d'acides organiques ou d'acides minéraux pour coaguler la caséine, comme dans la fabrication du fromage frais ou de la plupart des caséines industrielles (Macwan *et al.*, 2016).

Le lactosérum acide, également appelé salé, a une teneur en sel plus élevée et une teneur en protéines plus faible que le lactosérum doux. En raison de sa forte salinité, le lactosérum salé est plus difficile à transformer et a des coûts d'élimination plus élevés que le lactosérum doux. Leur utilisation dans les aliments est plus limitée que celle du lactosérum doux, en raison de leur goût acide et de leur teneur élevée en sels (Spălățelu, 2012).

2.2. Lactosérum doux

Le lactosérum doux est issu de la fabrication du fromage ou de la caséine par coagulation présure du lait à un pH d'environ 6,0-6,5. Il est généralement issu de la production de fromages à pâte dure ou semi-dure, tels que le cheddar (Khezri *et al.*, 2016).

Le lactosérum doux contient environ 93% d'eau et 6,35% de matières solides, dont environ 76% de lactose (Keservini *et al.*, 2019 ; Gupta *et al.*, 2019).

3. Composition du lactosérum

La composition et les caractéristiques sensorielles du lactosérum varient en fonction du type de lactosérum (acide ou doux), de la source du lait (lait de vache, lait de brebis, *etc.*) et de l'alimentation de l'animal qui a produit le lait, du traitement du fromage utilisé, période de l'année et le stade de la lactation (Barukčić *et al.*, 2019).

Le lactosérum contient généralement environ 50% de composants du lait, tels que le lactose (~ 70% ; c'est-à-dire en fonction de l'acidité du lactosérum), les protéines (~ 14%), les minéraux et certaines graisses. Les principales différences concernent les teneurs en calcium, phosphate, acide lactique et lactate, qui sont plus élevées dans le lactosérum acide que dans le lactosérum doux (Tableau 4) (Božanić *et al.*, 2014).

Tableau 4. Composition des différents types de lactosérum (Božanić *et al.*, 2014; Yadav *et al.*, 2015).

Constituants	Lactosérum doux (g/L)	Lactosérum acide (g/L)
Solides totaux	63,0-70,0	63,0-70,0
Lactose	46,0-52,0	44,0-46,0
Protéines	6,0-10,0	6,0-8,0
Graisse	5,0	0,4
Lactate	2,0	6,4
Cendres	5,0	8,0
Calcium	0,4-0,6	1,2-1,6
Phosphate	1,0-3,0	2,0-4,5
Chlorure	1,1	1,1

3.1. Lactose

Le plus important constituant du lactosérum est le lactose (environ 70% sur la base de la matière sèche). Incidemment, la plupart des glucides du lait passent dans le lactosérum après la fabrication du fromage, dont 90% est du lactose, y compris une

certaine quantité de glucose, de galactose, d'oligosaccharides et de sucres aminés (Božanić *et al.*, 2014). Le lactose est une source d'énergie très importante et joue de multiples rôles (Kwak *et al.*, 2012 ; Božanić *et al.*, 2014; Barukčić *et al.*, 2019) :

- Stimulation du péristaltisme intestinal, facilitent l'absorption du calcium et du phosphore ;
- Etablissement d'une réaction légèrement acide dans les intestins empêchant ainsi la croissance et la multiplication des bactéries nocives ;
- Assure des niveaux de magnésium optimaux et améliore la digestion des graisses et autres nutriments dans le corps humain ;
- Participer au développement de la plaque dentaire ;
- Le traitement thermique du lactosérum transforme le lactose en lactulose, qui est l'un des promoteurs de croissance des bifidobactéries.

3.2. Protéines

Les protéines de lactosérum sont un mélange de différentes protéines individuelles, qui sont la β lactoglobuline (β -LG), l' α -lactalbumine (α -LA), les immunoglobulines (Igs), l'albumine sérique bovine (BSA), la lactoferrine (Lf), la lactopéroxydase (LP), protéose-peptone et glycomacropéptide (GMP). À l'exception du glycomacropéptide, tous les autres composants protéiques sont naturellement présents dans le lactosérum, tandis que le glycomacropéptide est produit à partir de la caséine lors de la première étape de la transformation enzymatique du fromage (Madureira *et al.*, 2007). Le contenu et les caractéristiques de chaque protéine individuelle sont différents, comme le montre le tableau 5 (Yadav *et al.*, 2015).

Les protéines de lactosérum contiennent tous les acides aminés essentiels. La concentration de ces acides aminés est élevée par rapport à plusieurs autres sources de protéines biologiques (Tableau 6). Elles sont également riches en acides aminés à chaîne ramifiée, dont la leucine, l'isoleucine et la valine et en acides aminés soufrés tels que la cystéine et la méthionine qui renforcent la fonction immunitaire. (Singh *et al.*, 2016 ; Blazic *et al.*, 2018).

Tableau 5. Composition protéique et caractéristiques de base des protéines de lactosérum (Yadav *et al.*, 2015).

Protéine	(%)	Masse moléculaire (kDa)	pH isoélectrique (pHi)
Immunoglobulines (Igs)	8,0	150-1000	5,5-8,3
Albumine sérique bovine (ASB)	5,0	66,0	5,13
Lactoferrine (Lf)	1,0	76,5	9,5-10,0
β-Lactoglobuline (β-LG)	40-50	18,3	5,35-5,49
α-Lactalbumine (α-LA)	12-15	14,0	4,2-4,5
Glycomacropeptide (GMP)	12,0	6,8	4,3-4,6
Protéose-peptone (PP)	0,19	4-22	-
Lactoperoxydase (LP)	0,50	78,0	9,5

- **β - lactoglobuline (β -LG)** : protéine de lait soluble qui capture les molécules hydrophobes et participe à la réduction de l'absorption intestinale des lipides (50 % des protéines totales de lactosérum) (Blažić *et al.*, 2018) ;
- **α -lactalbumin (α -LA)** : protéine de lactosérum thermostable qui soutient la biosynthèse du lactose et a la capacité de lier des cations métalliques (20% des protéines totales de lactosérum) (Blažić *et al.*, 2018) ;
- **Albumine sérique bovine (ASB)** : L'ASB se lie facilement aux acides gras libres et d'autres matières grasses et, de ce fait contribue aux propriétés émulsifiantes des protéines de lactosérum. Elle possède aussi des propriétés antioxydantes et joue un rôle important dans l'inhibition de la croissance des tumeurs dans les glandes mammaires (5% du total des protéines de lactosérum) (Madureira *et al.*, 2007) ;
- **Glycomacropeptide (GMP)** : GMP également connu sous le nom de caséinomacropeptide (CMP), il est thermostable (Modler, 2009 ; Yadav *et al.*, 2015). leurs molécules ont des caractéristiques uniques dues à l'absence de résidus d'acides aminés aromatiques (phénylalanine, tryptophane, tyrosine, histidine, arginine ou cystéine). L'absence de phénylalanine fait de cette protéine un ingrédient alimentaire précieux pour les patients souffrant de la maladie phénylcétonurie. De plus, le GMP est riche en acides aminés à chaîne ramifiée (Fox *et al.*, 2017 ; Yadav *et al.*, 2015) ;
- **Immunoglobulines** : anticorps spécifiques générés en réponse à la présence d'un antigène étranger. Leur fonction principale est d'augmenter une immunité passive (10% du total des protéines de lactosérum (Blažić *et al.*, 2018) ;

- **Lactoferrine (LF)** : elle représente environ 4% des protéines du lactosérum et elle est une métalloprotéine composée de 703 résidus d'acides aminés, 16 ponts disulfures et une molécule de Fe^{3+} . A cause de son haut point isoélectrique, elle forme un complexe avec la β -LG. Du fait de la présence du fer, elle a une haute résistance à la dénaturation thermique et possède des propriétés antibactériennes similaires à celles du lysozyme et de la lactoperoxydase (Lapointe-Vignola, 2002) ;
- **Protéose-peptone (PP)**: définie comme un mélange hétérogène complexe de protéines thermorésistantes du lactosérum. Les PP présentent de nombreuses fonctionnalités très intéressantes telles que les propriétés techno-fonctionnelles (propriétés émulsifiantes et moussantes) et les propriétés biologiques (inhibition de la lipolyse et activités antimicrobiennes), utilisables comme ingrédients fonctionnels potentiels pour les industriels (Karamoko *et al.*, 2013).
- **Lactoperoxydase (LP)**: Il s'agit d'une enzyme native du lait ayant des propriétés antimicrobiennes et présente dans le lactosérum à une concentration de 1-30 mg/L. La Lactoperoxydase est constituée d'une seule chaîne polypeptidique de 612 résidus d'acides aminés et elle est relativement thermostable (Anand *et al.*, 2103 ; Yadav *et al.*, 2015).

Tableau 6. Composition en acides aminés essentiels de lactosérum (en g/100 g de protéines) (Romain *et al.*, 2008).

Acides aminés essentiels	Protéines de lactosérum
Isoleucine	6,55
Leucine	14,00
Lysine	10,90
Méthionine	2,35
Cystine	3,15
Phénylalanine	4,05
Tyrosine	4 ,80
Thréonine	6,70
Tryptophane	3,20
Valine	6,85

3.3. Minéraux

Le lactosérum est une bonne source d'électrolytes, notamment de sodium et de potassium, qui sont nécessaires pendant la convalescence après une diarrhée. Les minéraux

tels que le calcium, le magnésium et le phosphore sont présents en solution et sont aussi partiellement liés aux protéines. Le zinc est présent à l'état de traces, le lactose favorise également l'absorption des ions Mg et Zinc, qui, même à l'état de traces, aident à mieux gérer la diarrhée (Macwan *et al.*, 2016).

3.4. Vitamines

Lors de la fabrication du fromage ou de la caséine, certaines vitamines hydrosolubles passent du lait au lactosérum, mais leurs quantités sont très variables et dépendent fortement de la manipulation du lactosérum. Les plus importantes de ces vitamines sont la riboflavine, l'acide folique et la cobalamine. Cependant, ces deux dernières vitamines sont liées aux protéines de lactosérum, ce qui explique pourquoi elles passent dans le lactosérum lors de la fabrication du fromage. Il est intéressant de noter que le lactosérum contient des quantités plus élevées de vitamine B₂ que le lait en raison de l'activité de certaines cultures de départ (c.-à-d. les bactéries lactiques) lors de la fabrication du fromage (Božanić *et al.*, 2014 ; Barukčić *et al.*, 2019). Dans le cas de la vitamine B₁₂, une plus grande partie de celle-ci a été transférée dans le lactosérum lorsqu'une coagulation de présure plutôt qu'une coagulation acide a été utilisée (Macwan *et al.*, 2016).

4. Différents formes de lactosérum

Le lactosérum peut être utilisé de différentes manières dans l'industrie alimentaire, mais il est surtout déshydraté en poudre de lactosérum ou utilisé pour la fabrication de protéines de lactosérum (Macwan *et al.*, 2016) (Tableau 7).

Les protéines de lactosérum sont généralement commercialisées sous trois formes, telles que le concentré de protéines de lactosérum, l'isolat de protéines de lactosérum et l'hydrolysate de protéines de lactosérum (Sousa *et al.*, 2012 ; Khezri *et al.*, 2016).

4.1. Concentré de protéines de lactosérum (CPL)

Le CPL est préparé en utilisant différents types de processus membranaires tels que l'ultrafiltration, la diafiltration, la microfiltration et l'osmose inverse. En plus des procédés membranaires, l'échange d'ions et l'électrodialyse sont parfois utilisés pour la déminéralisation (Blažić *et al.*, 2018). Le CPL a les niveaux de graisses et de cholestérol les plus bas par rapport à d'autres formes de lactosérum disponibles dans le commerce, et contient des glucides sous forme de lactose et un niveau élevé de peptides bioactifs notamment, β lactoglobuline (β -LG) et α -lactalbumine (α -LA) (Nagar et nagal, 2013 ;

Ganju et Gogate, 2017). En raison de sa grande solubilité, le CPL est largement utilisé comme additif alimentaire dans la viande, les boissons, les produits laitiers, les produits de boulangerie et les aliments pour nourrissons (Blazic *et al.*, 2018).

Selon la concentration en protéines, le CPL est divisé en trois catégories (Gregurek, 2015) :

- CPL à faible teneur en protéines : 25 - 40% des solides totaux ;
- CPL avec une teneur moyenne en protéines: 45 - 60% des solides totaux ;
- CPL à haute teneur en protéines: 60 - 80% des solides totaux.

4.2. Isolat de protéines de lactosérum (IPL)

L'IPL est la forme protéique de lactosérum la plus riche en protéines, avec plus de 90% de protéines de lait hydrosolubles. Il est fabriqué en éliminant suffisamment de constituants non protéiques du lactosérum, de sorte que le produit sec fini ne contienne pas moins de 90% de protéines. Le IPL est fabriqué commercialement par filtration sur membrane ou par chromatographie par échange d'ions (Anand *et al.*, 2013).

Des niveaux élevés de protéines et des quantités minimales de lactose, de matières grasses et de cendres sont les principaux avantages de l'IPL sur le CPL. L'ajout de l'IPL dans la production alimentaire améliore le goût et la texture d'un produit final. Ils sont principalement ajoutés aux desserts glacés, aux boissons, aux glaces et aux compléments alimentaires pour sportifs (Blazic *et al.*, 2018).

4.3. Hydrolysate de protéines de lactosérum (HPL)

L' HPL est une protéine de lactosérum pré-digérée et partiellement hydrolysée fabriquée dans le but de faciliter le métabolisme. Les HPL ont des propriétés antioxydantes et une teneur en protéines de 70 à 80% (Sinha *et al.*, 2007). Pendant l'hydrolyse, les protéines sont décomposées en peptides de différentes tailles et en acides aminés libres, à la suite du clivage des liaisons peptidiques. La dégradation des protéines peut être effectuée par des enzymes, des acides, des alcalins ou par un traitement à haute température

(Blazic *et al.*, 2018). Les formules hydrolysées à base de protéines de lactosérum sont bénéfiques pour les nourrissons intolérants aux protéines de lait de vache (Blazic *et al.*, 2018).

Tableau 7. Composition moyenne (%) des principaux produits à base de poudre de lactosérum (Božanić *et al.*, 2014).

	Protéines	Lactose	Minéraux
Poudre de lactosérum	12,5	73,5	8,5
Poudre de lactosérum déminéralisé (70%)	13,7	75,7	3,5
Poudre de lactosérum déminéralisé (90%)	15,0	83,0	1,0
Poudre de perméat ultra filtrée	1,0	90,0	9,0
Concentré de protéines de lactosérum	65,0-80,0	4,0-21,0	3,0-5,0
Isolat de protéine de lactosérum	88,0-92,0	<1	2,0-3,5

5. Applications des protéines de lactosérum dans les industries agroalimentaires

Les protéines de lactosérum sont utilisées dans de nombreuses applications alimentaires (tableau 8) en raison de leur fonctionnalité et de leur valeur nutritionnelle (Onwilata et huth, 2008 ; Yadav *et al.*, 2015). Cette dernière est directement liée à la concentration en acides aminés essentiels (en particulier contenant du soufre) et en acides aminés à chaîne ramifiée (isoleucine, leucine et valine) (Baldasso *et al.*, 2011 ; Yadav *et al.*, 2015). En raison de la composition souhaitable en acides aminés, les protéines de lactosérum ont une valeur biologique supérieure par rapport à la caséine et à d'autres protéines d'origine animale, y compris l'œuf, qui ont longtemps été considérées comme des protéines de référence (Božanić *et al.*, 2014; Macwan *et al.*, 2016).

Les propriétés fonctionnelles des protéines de lactosérum sont principalement dues à caractéristiques physiques, chimiques et structurelles (Jovanović *et al.*, 2005 ; Yadav *et al.*, 2015) comme une bonne solubilité, une bonne absorption, des propriétés moussantes, gélifiantes et émulsifiantes (Bozanic *et al.*, 2014 ; Panghal *et al.*, 2018). Les protéines de lactosérum peuvent modifier tout ou une partie des propriétés organoleptiques, visuelles, d'hydratation, surfactantes, structurelles, texturales et rhéologiques des aliments, ce qui permet d'améliorer leur acceptation par les consommateurs (Onwulata et Huth, 2008 ; Gupta *et al.*, 2019).

Le concentré de protéines de lactosérum et l'isolat de protéines de lactosérum sont les meilleures formes d'utilisation des protéines de lactosérum (Madenci et Bilgiçli, 2014) en raison de leur teneur élevée en protéines et en acides aminés ; de leur faible teneur en calories, en graisses et en sodium ; de l'absence d'agents pathogènes, de composés toxiques et de facteurs antinutritionnels ; de leur compatibilité avec d'autres ingrédients ; de leur

disponibilité immédiate ; et de la perception qu'il s'agit des produits "naturels" (onwilata et hutch, 2008).

Tableau 8. Applications alimentaires des protéines de lactosérum (Cheftel et Lorient, 1982).

Produits	Fonctions
Produits de boulangerie-biscuiterie	Apport protéique, rétention d'eau, gélifiant, texture
Pâtes alimentaires	Apport protéique, texture
Pâtisserie (meringues, génoises...)	Emulsifiant, moussant, rétention d'eau, gélifiant
Confiserie, chocolat au lait	Emulsifiant, arôme, texture, dispersibilité
Potages, sauces	Épaississant (interaction avec amidon), émulsifiant
Plats cuisinés	Épaississant, émulsifiant, rétention d'eau.
Farines lactées	Apport protéique, solubilité.
Boissons lactées ou fruitées	Soluble à chaud ou/et à pH acide, épaississant
Aliments diététiques et infantiles	Apport protéique, solubilité, épaississant
Fromages naturels et fondus	Emulsifiant, épaississant, gélifiant.
« Imitation cheeses, dips », pâtes à tartiner	Emulsifiant, épaississant
Crèmes glacées	Emulsifiant, épaississant
Crèmes, desserts, flans, yoghourts	Emulsifiant, épaississant, gélifiant.
Produits carnés (saucisses, pâtés, hamburger)	Emulsifiant, épaississant, liant, gélifiant, rétention d'eau et de matières grasses.

Chapitre 3
Sels alcalins

Chapitre 3. Sels alcalins

1. Généralités

Les agents alcalinisant sont importants dans la préparation de nombreux produits alimentaires. Leur utilisation est considérée comme essentielle pour le développement des caractéristiques de qualité souhaitables du produit, telles que la couleur et la texture (Lai *et al.*, 2004 ; Reepholkul et Charoenrein, 2013).

Les sels d'acide carbonique tels que le carbonate de sodium peuvent être un outil efficace pour gérer la pourriture post-récolte des fruits car ils sont peu coûteux, facilement disponibles et peuvent être utilisés avec un risque minimal de blessure pour le fruit (Ahmed *et al.*, 2007) .

En ce qui concerne les légumineuses (comme les pois et les haricots), un trempage avant la cuisson dans l'eau peut réduire le temps de cuisson (Fabbri et Crosby, 2016). Durant le trempage, l'eau se diffuse dans les granules d'amidon et les fractions protéiques, ramollissant ainsi la structure des haricot (Sikora *et al.*, 2018). Ce problème peut être résolu en ajoutant un peu de sel à l'eau de trempage. En plus de raccourcir le temps de cuisson, cela peut influencer positivement la qualité nutritionnelle des haricots (Kinyanjui *et al.*, 2015). Un ajout de bicarbonate de sodium à la solution de trempage réduit également la teneur en tanin et l'activité inhibitrice de la trypsine dans les haricots (Sikora *et al.*, 2018).

Dans la cuisine chinoise, le bicarbonate de sodium est largement utilisé pour améliorer le rendement, la tendreté et le masquage des saveurs atypiques dans la viande d'animaux d'élevage terrestres (Asli et Mørkøre, 2012). L'efficacité du bicarbonate de sodium est attribuée à leur capacité à solubiliser les protéines myofibrillaires et à améliorer leur répulsion électrostatique (Lee *et al.*, 2015 ; Mohan *et al.*, 2016).

Les sels alcalins de carbonates peuvent minimiser le problème des produits carnés pâles, mous et exsudatifs des viandes de poulet (Alvarado et Sams, 2003). Les bicarbonates de sodium pourraient être utilisés dans les formulations de viande et de poisson comme substitut de phosphate. Il a été constaté que les caractéristiques de qualité (couleur, capacité de rétention d'eau, texture et rendement) de la viande traitée avec du bicarbonate de sodium étaient similaires dans une certaine mesure à celles de la viande traitée avec des phosphates. La viande traitée au bicarbonate présentait une structure plus grossière qui

pourrait être expliquée par la production de dioxyde de carbone pendant la cuisson (Petraci *et al.*, 2013).

Certains additifs alimentaires alcalins, tels que le bicarbonate de sodium (NaHCO_3), le carbonate de sodium (Na_2CO_3), le carbonate de potassium (K_2CO_3) et le bicarbonate de potassium (KHCO_3) sont généralement utilisés pour améliorer la qualité des aliments fermentés (par exemple le pain et le pain cuit à la vapeur) en neutralisant les acides produits pendant la fermentation (Sun *et al.*, 2020 ; Xi *et al.*, 2020). L'ajout d'alcali peut non seulement réduire la sensation de goût acide (Sun *et al.*, 2020), mais aussi augmenter la qualité du pain, par exemple le volume, la surface des cellules gazeuses et la qualité de la texture, en renforçant la réticulation covalente du gluten (Guo *et al.*, 2019 ; Wang *et al.*, 2021).

2. Sels alcalins dans la production des aliments à base de céréales

Les conditions alcalines sont utilisées à la fois pour extraire les protéines des céréales et des pseudo-céréales et/ou pour avoir un impact sur la couleur, la saveur et/ou la texture de leurs produits finis:

2.1. Bretzels (pâtisserie salée)

Le trempage de pâtes à bretzels dans une solution alcaline confère au produit finit son goût et sa texture uniques, ainsi que sa couleur brillante. L'alcali typique utilisé pour la production de bretzels durs est une solution de soude (NaOH) à une concentration d'environ 1% et à une température d'environ 85°C à 92°C pendant 10 à 25 min. Tandis que, l'utilisation d'une solution de NaHCO_3 donne des bretzels tendres avec une saveur plus douce et une texture de croûte plus molle (Yao *et al.*, 2006).

2.2. Tortillas

Pour la préparation des tortillas, le maïs est traité dans 1% de Ca(OH)_2 à haute température (chaux chaude) pendant de nombreuses heures. Ce procédé est appelé nixtamalisation et vise à éliminer le péricarpe. Cependant, la nixtamalisation affecte également les éléments protéiques. L'effet sur le produit final est que le traitement donne une saveur, un arôme et une couleur typiques de la chaux. Néanmoins, le traitement alcalin entraîne également des pertes nutritionnelles par la formation de lysinoalanine (Deleu, 2019).

2.3. Nouilles alcalines

Depuis plusieurs milliers d'années, les nouilles à base de blé constituent une part importante de l'alimentation humaine dans les pays asiatiques. Ils sont appréciés par les consommateurs pour leur facilité de manipulation et de cuisson. Environ 40% du blé en Chine est utilisé pour divers types de production de nouilles (Li *et al.*, 2018). L'un des ingrédients les plus essentiels dans la préparation des nouilles jaunes alcalines, outre la farine, l'eau et le chlorure de sodium, sont les sels alcalins (Karim et Sultan., 2015), dont les plus couramment utilisés sont les carbonates de sodium et de potassium ou le mélange des deux (généralement 9:1, *kansui*). D'autres réactifs alcalins, tels que l'hydroxyde de sodium et les bicarbonates, sont également utilisés dans certains pays (Hatcher *et al.*, 2008; Gulia *et al.*, 2014; Ahmed *et al.*, 2016; Fan *et al.*, 2018). L'objectif initial de l'ajout des sels alcalins était de prolonger la durée de conservation des nouilles en retardant la croissance des moisissures (Fu, 2008; Wang *et al.*, 2018).

Les sels alcalins sont ajoutés à un taux de 0,5 à 1,5 % dans les nouilles à forte saveur alcaline, tandis qu'ils sont ajoutés à un taux de 0,1 à 0,3 % dans quelques types de nouilles afin d'en améliorer la qualité (Gulia *et al.*, 2014; Ahmed *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2017 ; Adejuwon *et al.*, 2020). L'ajout des sels alcalins augmente l'absorption d'eau (Fu, 2008) et le temps de développement de la pâte (Chu, 2004), et donne une pâte ferme et peu extensible (Fu, 2008). De plus, les nouilles cuites contenant du *kansui* ont une texture ferme et une couleur jaune distincte, en raison des pigments flavonoïdes naturels de la farine, qui sont incolores aux pH acides mais deviennent jaune aux pH alcalins (Fu, 2008 ; Rombouts *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2018).

Dans les nouilles à base de sarrasin, l'inclusion de sels alcalins dans la recette favorise la formation d'un réseau protéique plus continu grâce à des liaisons transversales SS et non-SS (Guo *et al.*, 2017). Le *Kansui* augmente également la fermeté et les pertes à la cuisson des nouilles cuites à base de blé ou de sarrasin. En outre, l'alcali améliore les propriétés rhéologiques des nouilles fraîches contenant du blé ou du sarrasin (Deleu, 2019).

3. Carbonates de sodium et de potassium

3.1. Carbonates de sodium (SIN 500)

L'additif alimentaire SIN 500, carbonates de sodium a plusieurs codes SIN : SIN 500(i) (carbonate de sodium), SIN 500 (ii) (hydrogénocarbonate de sodium ou bicarbonate

de sodium) et SIN 500 (iii) (Sesquicarbonate de sodium) (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

3.1.1. Sources

Le bicarbonate de sodium est fabriqué industriellement à partir de saumure et de calcaire selon le procédé de la soude à l'ammoniac. Il est purifié par cristallisation répétée.

Le carbonate de sodium est obtenu en chauffant le bicarbonate de sodium impur. Il est également produit aux États-Unis à partir du minerai de sesquicarbonate de sodium par chauffage suivi d'une lixiviation à l'eau chaude (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

3.1.2. Utilisation dans l'alimentation

Parmi les carbonates, le plus courant est le bicarbonate de sodium. Il est également connu sous le nom de bicarbonate de soude. Il est utilisé dans la panification, pour générer du dioxyde de carbone en le mélangeant avec une matière acide telle que l'acide tartrique (SIN 334) ou l'un des phosphates acides. Le bicarbonate de sodium se décompose thermiquement et peut être utilisé seul comme agent levant (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

Le carbonate de sodium est également utilisé comme agent levant dans les gâteaux, en combinaison avec, par exemple, le phosphate d'aluminium de sodium (SIN 541). Les carbonates de sodium sont également utilisés pour modifier l'acidité des produits et pour arrêter la réaction d'hydrolyse dans la production de sucre inverti (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

3.1.3. Avantages

Les carbonates de sodium sont solubles dans l'eau froide, facilement disponibles et peu coûteux. Leur taux de réaction avec les acides peut être modifié en changeant la taille des particules, et le carbonate et le bicarbonate sont disponibles dans un certain nombre de tailles de granulés. Ils sont également disponibles sous forme de granulés enrobés (encapsulés) de graisse ou de stéarate de magnésium pour les applications où la réaction doit être inhibée jusqu'à une étape ultérieure du processus.

Le bicarbonate est également utilisé seul, générant du dioxyde de carbone par l'action de la chaleur à des températures aussi basses que 60°C (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

3.1.4. Limitations

Lorsqu'il est utilisé en excès, le bicarbonate peut laisser un goût savonneux dans le produit. La taille des particules du carbonate doit être choisie avec soin, car l'utilisation de particules trop grosses peut entraîner la présence de carbonate non réagi dans le produit final (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

3.2. Carbonates de potassium (SIN 501)

L'additif alimentaire SIN 501 (carbonates de potassium) a plusieurs codes SIN: SIN 501(i) (carbonate de potassium) SIN 501 (ii) (hydrogénocarbonate de potassium) (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013)

3.2.1. Sources

Le carbonate et le bicarbonate de potassium sont tous deux préparés en faisant passer du dioxyde de carbone dans de l'hydroxyde de potassium (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

3.2.2. Utilisation dans l'alimentation

Le carbonate de potassium est utilisé comme agent levant en conjonction avec une matière acide telle que le phosphate d'aluminium sodique (SIN 541). Il est également utilisé dans l'alcalinisation de la poudre de cacao (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

Le bicarbonate de potassium peut également être utilisé comme agent levant pour générer du dioxyde de carbone en le mélangeant avec une matière acide telle que l'acide tartrique (SIN 334) ou le diphosphate disodique (SIN 450(i)). Le tricarbone est également utilisé seul, générant du dioxyde de carbone par l'action de la chaleur à des températures aussi basses que 60°C (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

3.2.3. Avantages

Les carbonates de potassium sont utilisés comme agents levant, lorsqu'il est nécessaire de limiter la quantité de sodium ou de renforcer le potassium dans le produit. Le carbonate de potassium est plus soluble que le carbonate de sodium (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

Dans l'alcalinisation de la poudre de cacao, la poudre est mise en réaction avec une base pour approfondir la couleur et augmenter l'intensité du goût. Un certain nombre de bases sont utilisées à cette fin, chacune ayant ses avantages particuliers. Le carbonate de potassium est considéré comme donnant une meilleure couleur que le carbonate de sodium (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

3.2.4. Limitations

Le carbonate de potassium ne libère du dioxyde de carbone que lorsqu'il est utilisé en conjonction avec un acide. Il est donc moins pratique à utiliser que le carbonate de sodium. Lorsqu'il est utilisé en excès, le bicarbonate de potassium peut laisser un goût de savon dans le produit. Le bicarbonate de potassium est plus cher et nécessite des taux d'utilisation plus élevés que le bicarbonate de sodium (Emerton et Choi, 2008 ; Saltmarsh et Saltmarsh, 2013).

Matériel et méthodes

Les objectifs de la présente thèse sont :

1. L'étude de l'effet du lactosérum acide et doux sur la qualité culinaire et sensorielle des pâtes alimentaires sans gluten ;
2. L'étude de l'effet des sels alcalins et/ou d'isolat de protéines de lactosérum sur la qualité technologique et sensorielle des pâtes alimentaires sans gluten.

1. Matières premières

1.1. Farines de riz et de maïs

Les farines de riz et de maïs ont été fournies par la SARL BioAglut (Constantine, Algérie). La composition chimique pour 100 g de matières sèches est présentée dans le tableau 9.

Tableau 9. Composition (en g/100 g de matière sèche) de la farine de riz et de la farine de maïs (données du fabricant)

Nutriments	Farine de riz	Farine de maïs
Glucides	78	74
Protéines	7	7,9
Lipides	1,8	1,8
Fibres	1	3,2

1.2. Sel

Le sel utilisé est un sel de table iodé (ENASEL, Constantine, Algérie).

1.3. Eau d'hydratation

L'eau utilisée dans les essais de fabrication des spaghettis sans gluten est une eau distillée. Alors que l'eau utilisée dans la fabrication des macaronis sans gluten est une eau de robinet.

1.4. Lactosérum

Le lactosérum doux (LD) a été fourni par la laiterie ONALAIT NUMIDIA (Constantine, Algérie). Il est issu de la fabrication du fromage type camembert obtenu par une coagulation mixte (coagulation acide et coagulation enzymatique). Les échantillons ont été prélevés à partir de la cuve de coagulation dans des flacons en plastique stériles.

Le lactosérum acide est obtenu au niveau du laboratoire L.N.T.A. Il est issu de la fabrication du fromage traditionnel type *Klila* obtenu par une coagulation acide spontanée du lait de vache (figure 1).

Les échantillons des deux types de lactosérum sont congelés à -24°C jusqu'à leur utilisation.

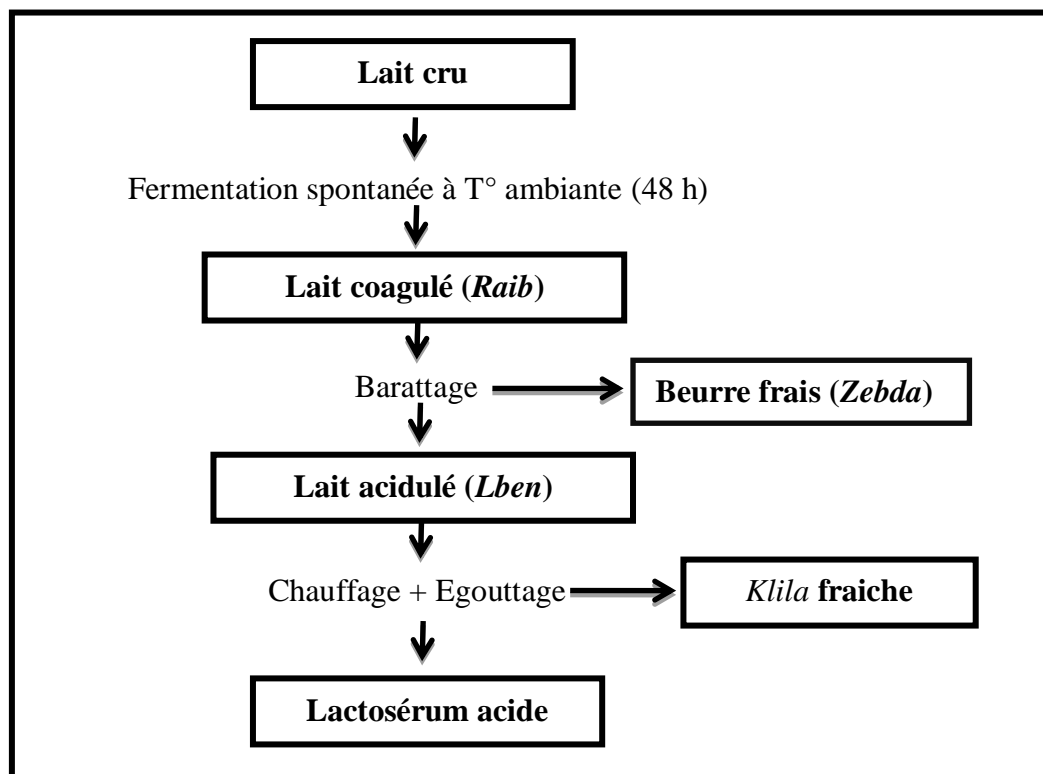


Figure 1. Etapes de récupération du lactosérum acide

1.5. Isolat de protéines de lactosérum

L'isolat de protéines de lactosérum (IPL) de la marque PINK SUN (Burn, Royaume-Uni) a été utilisé pour la production des pâtes sans gluten. Sa composition (en g/100g) est la suivante : 92 g de protéines, 1 g de lipides, 0,7 g de glucides et 0,5 g de sels.

1.6. Sels alcalins

Les sels alcalins utilisés sont un mélange (rapport massique 9/1) de carbonate de sodium (Na_2CO_3 , SIN 500) et de carbonate de potassium (K_2CO_3 , SIN 501). Les deux sels sont achetés du commerce.

2. Etude de l'effet du lactosérum acide et doux sur la qualité culinaire et sensorielle des spaghettis sans gluten

2.1. Caractérisation physico-chimique des farines

2.1.1. Distribution granulométrique

La granulométrie est l'étude de la distribution de la taille des particules (Melcion, 2000). Le tamisage des farines de riz et de maïs a été réalisé à l'aide d'une tamiseuse (Retsch AS 200, Haan, Allemagne). Un échantillon de 100 g est réparti de manière uniforme au sommet d'un empilement de quatre tamis d'ouverture de mailles décroissante : 200, 150, 125, et 100 µm. Les particules dont les dimensions sont inférieures aux ouvertures de mailles constituent le passant, alors que les plus grosses qui représentent le refus sont retenues. Les refus de chaque tamis et le dernier passant ont été ensuite pesés. La distribution granulométrique des particules des farines (DG) est exprimée en % selon la formule suivante :

$$DG (\%) = \frac{\text{masse de refus ou du passant (g)} \times 100}{\text{masse de l'échantillon (g)}}$$

2.1.2. Détermination de la teneur en eau

La teneur en eau a été déterminée selon la norme NF V03-708 (AFNOR, 1991). Une prise d'essai de 5 g est pesée dans une coupelle de masse connue, placée dans une étuve à 130°C pendant 2 h. L'opération de séchage est répétée toutes les 30 min jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La teneur en eau (H) est exprimée en pourcentage (%) selon l'équation suivante :

$$H (\%) = \frac{(\text{masse de la prise d'essai (g)} - \text{masse du résidu sec})}{\text{masse de la prise d'essai (g)}} \times 100$$

2.2. Caractérisation physico-chimique du lactosérum

2.2.1. pH

La mesure du pH consiste à doser la concentration des protons H⁺ présents dans l'échantillon. Le pH est déterminé selon la norme NF V 04-210 (AFNOR, 1986) au moyen d'un pH-mètre (HANNA instruments pH 210, Romania).

2.2.2. Acidité

L'acidité est déterminée par la titration de l'acide lactique à l'aide de l'hydroxyde de sodium à 0,11 mol/L. La présence de phénolphtaléine comme indicateur coloré indique la limite de la neutralisation par changement de couleur du jaune au rose pâle (AFNOR, 1986). L'acidité est exprimée en degré Dornic (°D, 1 °D = 0,1 g d'acide lactique dans un litre de lactosérum) et calculée par l'équation suivante :

$$\text{L'acidité (°D)} = V \times 10$$

Où : V : volume de la solution d'hydroxyde de sodium ayant permis le changement de couleur.

2.2.3. Extrait sec total

L'extrait sec total a été déterminé selon la norme NF V04-282 (AFNOR, 1980) par dessiccation d'une prise d'essai de 3 ml de lactosérum dans une étuve (Mettler, Schwabach, Allemagne) réglée à 105°C pendant 24 h jusqu'à évaporation complète de l'eau. La teneur en eau, exprimée en pourcentage de masse de produit, est donnée par la l'équation :

$$H (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100$$

Où m_0 : la masse, en grammes, de la capsule vide.

m_1 : la masse, en grammes, de la capsule et la prise d'essai avant dessiccation.

m_2 : la masse, en grammes, de la capsule et la prise d'essai après dessiccation.

L'extrait sec total (EST) est calculé par la formule suivante :

$$\text{EST} (\%) = 100 - H$$

2.2.4. Matière grasse

Elle est déterminée selon la méthode acido-butyrométrique ou « méthode de Gerber » selon la norme NF V04-210 (AFNOR, 1980). Après dissolution des protéines par addition d'acide sulfurique, la séparation de la matière grasse du lactosérum par centrifugation dans un butyromètre est favorisée par l'addition d'une quantité d'alcool iso-amyle. La teneur en matière grasse est exprimée en g/l est obtenu par la lecture de la graduation sur le butyromètre :

$$\text{MG (g/L)} = (B - A) \times 100$$

Où : A : la valeur correspondant au niveau inférieur de la colonne grasse.

B : la valeur correspondant au niveau supérieur de la colonne grasse.

2.2.5. Protéines solubles

La technique de Bradford a été utilisée pour doser les protéines du lactosérum (Bradford, 1976). C'est une méthode colorimétrique basée sur la formation d'un complexe bleu caractéristique entre les protéines et le réactif de Coomassie G250, entraînant un changement d'absorbance qui se fait à 595 nm. Les densités optiques sont par la suite converties à leurs valeurs correspondantes en µg de la protéine témoin de Sérum Albumen Bovine /ml, après avoir tracé la courbe d'étalonnage correspondante.

2.2.6. Lactose

La teneur en lactose a été estimée en réalisant un dosage par la méthode de Bertrand (1906) qui repose sur les propriétés réductrices des glucides. Le glucose réduit partiellement la liqueur de Fehling en excès, ensuite l'oxyde cuivreux formé (précipité rouge) est dosé par manganimétrie. Un tableau de correspondance entre la masse de cuivre et la masse de lactose a été utilisé (annexe 2). La réaction doit se dérouler à chaud et pendant 3 min à partir de l'ébullition pour respecter la correspondance des tables.

2.2.7. Cendres

Les cendres sont des substances résultantes de l'incinération de la matière sèche à 550°C ± 25°C dans un four à moufle (AFNOR, 1986). La teneur en cendres a été déterminée selon la méthode AACC 08-01 par incinération d'une prise d'essai de 10 ml de lactosérum dans un four à moufle à une température de 550°C pendant 4 h (AACC, 1995). Le taux de cendres de l'échantillon est exprimé comme suit :

$$\text{Taux de cendres (g/L)} = \frac{P_1 - P_0}{\text{Prise d'essai}} \times 100$$

Où: P_0 : le poids de la capsule vide (g).

P_1 : le poids de la capsule + échantillon après incinération (g).

2.3. Fabrication des spaghettis sans gluten

La fabrication des spaghettis sans gluten a été réalisée au niveau du laboratoire LNNTA. Une formule à base d'un mélange de farine de riz et de maïs (rapport massique 2:1) a été utilisée et qui a été sélectionnée après des essais préliminaires. Neuf échantillons de spaghettis sans gluten ont été fabriqués et répartis en 3 types (tableau 10) :

- 1) spaghettis sans gluten avec ajout de lactosérum doux à différents taux (25%, 50%, 75% et 100%) ;
- 2) spaghettis sans gluten avec ajout de lactosérum acide à différents taux (25%, 50%, 75% et 100%) ;
- 3) spaghettis sans gluten témoin sans ajout de lactosérum.

Par ailleurs, des spaghettis commerciaux ordinaires (à base de blé dur) ont été aussi utilisés comme pâtes témoins.

Tableau 10. Formulations des différents échantillons de spaghettis sans gluten

Pâtes	Farine de riz (g)	Farine de maïs (g)	LD (% (mL))	LA (% (mL))	Eau (% (mL))	Sel (g)
TSG	66,67	33,33	-	-	100 (61,66)	2
P25D	66,67	33,33	25 (15,41)	-	75 (46,24)	2
P50D	66,67	33,33	50 (30,83)	-	50 (30,83)	2
P75D	66,67	33,33	75 (46,24)	-	25 (15,41)	2
P100D	66,67	33,33	100 (61,66)	-	0	2
P25A	66,67	33,33	-	25 (15,41)	75 (46,24)	2
P50A	66,67	33,33	-	50(30,83)	50 (30,83)	2
P75A	66,67	33,33	-	75 (46,24)	25 (15,41)	2
P100A	66,67	33,33	-	100 (61,66)	-	2

LD : lactosérum doux ; LA : lactosérum acide.

Le digramme de fabrication des spaghettis sans gluten est représenté dans la figure 2 et comprend les étapes suivantes :

- **Hydratation et malaxage** : après avoir bien mélangé manuellement les farines de riz et de maïs, X1 ml d'eau distillée et/ou X2 ml de lactosérum ont été ajoutés. Ensuite, le mélange a été pétri pendant 5 min à l'aide d'un pétrin (KENWOOD KM 300, Havant, Royaume-Uni) jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène, consistante et lisse.
- **Mise en forme par extrusion** : après un repos de 15 min, la pâte est extrudée à l'aide une machine à pâtes (SIMAC PASTAMATIC junior plus 230 W, Italie) pour produire des spaghettis. Ces derniers ont été collectés à la sortie de la filière, coupés à l'aide d'un couteau et disposées sur des plateaux perforés.
- **Séchage** : tous les échantillons de pâtes ont été pré-séchés pendant 12 min à 30°C, puis séchés pendant 4 h à 45 °C dans une étuve (Memmert, Schwabach, Allemagne). Les pâtes

sèches ont été emballées dans des sacs en plastique fermés hermétiquement puis conservées à température ambiante.

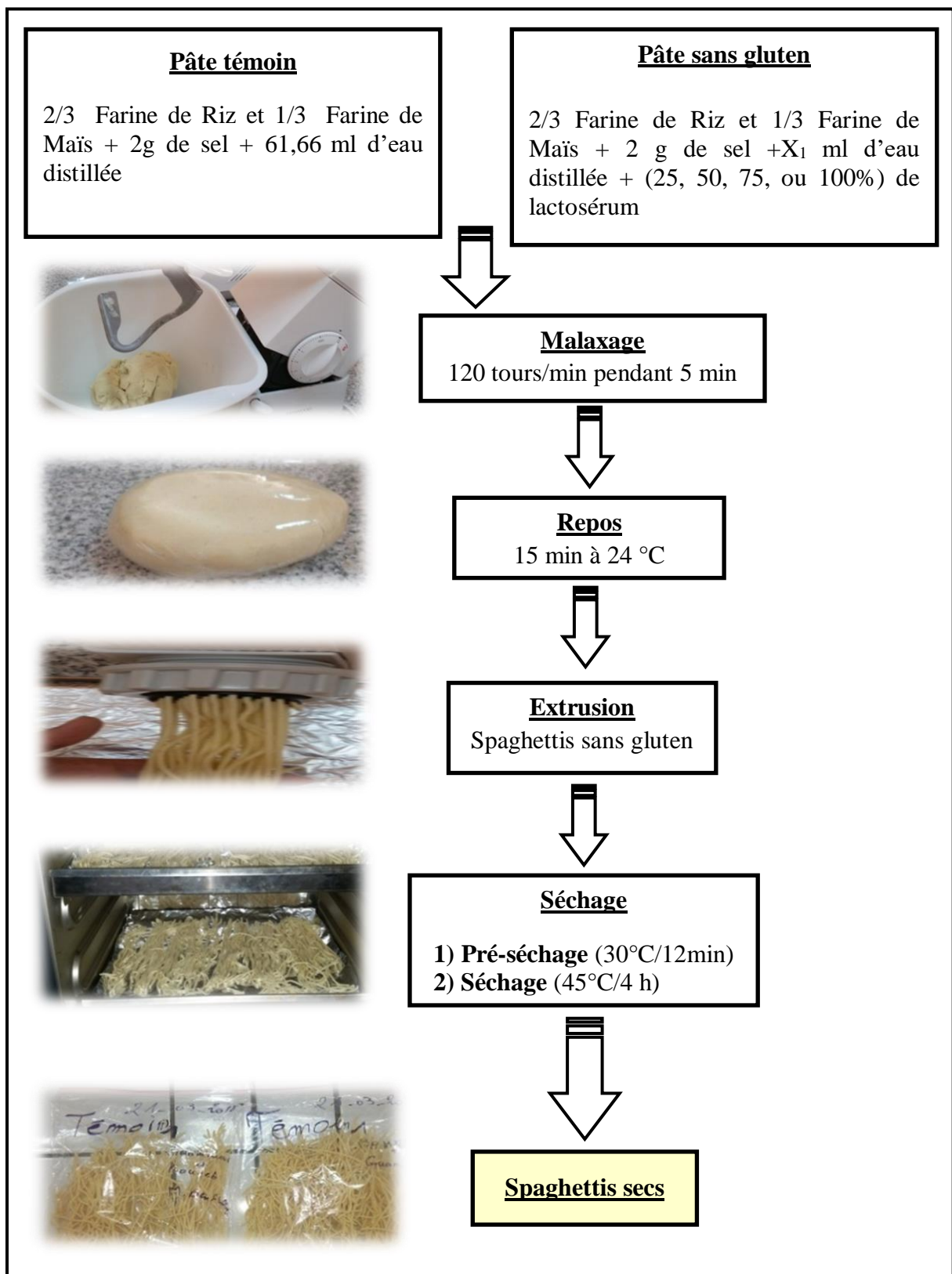


Figure 2. Diagramme de fabrication des spaghettis sans gluten

2.4. Appréciation de la qualité culinaire des spaghettis

La qualité culinaire des spaghettis a été appréciée par la détermination du temps optimal de cuisson (TOC), de la capacité d'absorption de l'eau (CAE) et des pertes à la cuisson. Tous les tests ont été réalisés en trois répétitions.

2.4.1. Temps optimal de cuisson

Un échantillon de 10 g de pâtes est plongé dans 200 ml d'eau distillée en ébullition (sans addition de sel). A des intervalles de temps réguliers (soit toutes les 30 s), un brin de pâte est prélevé puis immédiatement écrasé entre deux plaques de verre. Le temps optimal de cuisson correspond au temps à partir duquel l'amidon est complètement gélatinisé et disparition de la ligne blanche (figure 3) (AACC, 2000).

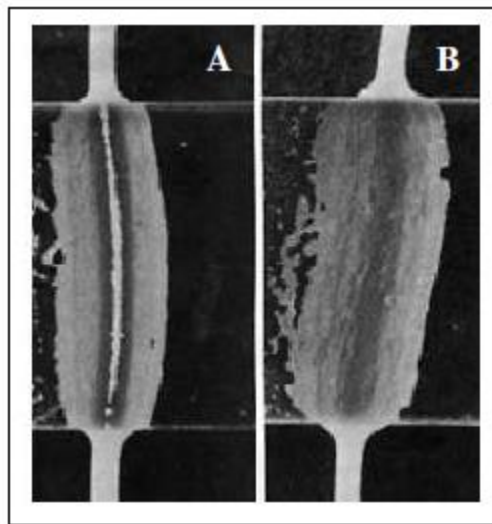


Figure 3. Illustration du test de la ligne blanche utilisé pour la détermination du temps optimal de cuisson. A : pâte non cuite, B : pâte cuite au temps optimal de cuisson (Petitot ; 2009)

2.4.2. Capacité d'absorption de l'eau

Le gonflement est défini comme étant le gain de poids des pâtes pendant la cuisson et indique la quantité d'eau absorbée. Ceci est donc un indice sur la capacité d'absorption de l'eau de la pâte alimentaire (Marti *et al.*, 2013).

Une quantité de 10 g de pâte (P_1) est cuite dans 200 ml d'eau distillée en ébullition pendant le TOC correspondant. Les pâtes sont ensuite rincées avec 100 ml d'eau distillée, égouttées pendant 3 min puis pesées (P_2). La capacité d'absorption de l'eau (CAE) est calculée en utilisant l'équation suivante (Bouasla, 2017) :

$$\text{CAE (\%)} = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100$$

2.4.3. Pertes à la cuisson

L'eau de rinçage et l'eau de cuisson des pâtes ont été recueillies puis séchées dans une étuve à 105°C pendant 24 h. Le résidu sec obtenu est pesé et les pertes à la cuisson sont calculées par la formule suivante (AACC, 2000).

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

2.5. Analyses sensorielles

L'évaluation sensorielle a été réalisée par un panel composé de 20 dégustateurs (des étudiants et des enseignants de l'I.N.A.T.A.A) sur trois échantillons de pâtes : les pâtes enrichies avec 50% de lactosérum acide puisqu'elles sont les pâtes sans gluten avec les pertes à la cuisson les plus faibles, les pâtes témoins sans gluten et les pâtes commerciales témoins à base de blé dur.

L'évaluation sensorielle consiste en un test hédonique pour déterminer le profil sensoriel et l'acceptabilité sensorielle globale. Les spaghettis cuits au TOC sont présentés dans un ordre aléatoire aux dégustateurs dans des assiettes en plastique et un code de trois chiffres aléatoire a été attribué à chaque type de pâte. Une note sur une échelle de 1 à 9 est donnée à chacun des attributs suivants : apparence, couleur, fermeté, adhésivité, goût et acceptabilité sensorielle globale. Chaque attribut est évalué 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 » (annexe 1). Les pâtes alimentaires avec un score moyen d'acceptabilité sensorielle globale supérieur à 5 ont été considérées comme acceptables (Bouasla, 2017).

2.6. Analyse statistique

Toutes les mesures ont été effectuées en triplicata. L'analyse statistique des données a été réalisée à l'aide du logiciel statistique XLSTAT (2009). Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart-type. La comparaison entre plusieurs moyennes a été réalisée par l'analyse de la variance (ANOVA) suivie le test *post hoc* Fisher LSD. La comparaison entre deux moyennes a été réalisée par un test t. Le seuil de signification est fixé à 0,05.

3. Etude de l'effet des sels alcalins et/ou d'isolat de protéines de lactosérum sur la qualité des macaronis sans gluten

3.1. Fabrication des macaronis sans gluten

Les macaronis sans gluten ont été fabriqués au niveau du Centre de recherche et d'analyse de l'économie agricole (Lodi, Italie). Une formule à base d'un mélange de farine de riz et de maïs (rapport massique 2:1) a été utilisée et cinq types de pâtes ont été fabriqués (tableau 11) :

- macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif (P1).
- macaronis sans gluten avec ajout de sels alcalins (mélange de carbonates de sodium et de potassium (rapport massique 9/1)). Deux taux d'incorporation ont été testés : 0,5% (0,5 g/100 g de la formule, P2) et 1% (1 g/100 g de la formule, P3) ;
- macaronis sans gluten enrichies avec 5% d'isolat de protéines de lactosérum (5 g/100 g de la formule, P4) ;
- macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'isolat de protéines de lactosérum (P5).

Tableau 11. Formulations des différents échantillons de pâtes sans gluten

Pâtes	Farine de riz (g)	Farine de maïs (g)	Sels alcalins (g)	IPL (g)
P1	66,67	33,33	-	-
P2	66,67	33,33	0,5	-
P3	66,67	33,33	1	-
P4	66,67	33,33	-	5
P5	66,67	33,33	1	5

IPL : isolat des protéines de lactosérum.

Le procédé de fabrication des macaronis sans gluten est représenté dans la figure 4 et comprend les étapes suivantes :

- **Hydratation/malaxage** : 14 kg du mélange (formule riz-maïs) ont été hydratés avec de l'eau chaud (~98 °C) de telle sorte que la teneur finale en eau soit de 40% (P1). Le mélange de sels alcalins (1%) et d'isolat des protéines de lactosérum (5%) ont été ajoutés durant cette étape (P5).

- **Préparation des pellets** : le mélange hydraté est extrudé à l'aide d'une machine PROGEL® mono-vis (Braibanti, Milan, Italie) en appliquant les paramètres suivants : pression d'extrusion de 10 bars et température de la vis d'extrusion de 130 °C. Les pellets obtenus (85-90 °C) avaient une longueur de 5 mm et une épaisseur de 3 mm.
- **Mise en forme des pâtes** : les sels alcalins (0,5% ou 1%) et l'isolat des protéines de lactosérum (5%) ont été ajoutés aux pellets durant cette étape (P2, P3 et P4 respectivement). Les pellets ont été ensuite transformés en macaroni à l'aide d'une installation industrielle pilote (Mac 30, Italpast, Parma, Italie) par extrusion sous vide à 20°C.
- **Séchage** : les macaronis sans gluten ont été séchés dans une unité de séchage expérimentale (Braibanti, Milan, Italie) à 60°C pendant 18 h à 75% d'humidité relative. Les macaronis secs ont été emballés dans des sacs en plastique fermés hermétiquement à température ambiante jusqu'à leur analyse.

Les échantillons de pâtes sèches utilisés pour les analyses chimiques ont été broyés pendant 20 s à 18000 rpm avec un Heavy-Duty Blender (Waring Commercial, Stamford, CT, USA), en utilisant une lame spéciale pour les matériaux poussiéreux, et tamisés à travers une maille en acier n° 18 pour exclure les particules supérieures à 1 mm.

3.2. Caractérisation physico-chimique des macaronis sans gluten

3.2.1. Humidité

L'humidité a été déterminée selon la méthode 44-15.02 (AACC, 1995) par séchage d'une prise d'essai à une température adéquate jusqu'à l'obtention d'une masse constante

3.2.2. Protéines

La teneur en protéines (g/100 g m.s.) a été évaluée selon la méthode Kjeldahl 979.09 (AOAC, 2000). L'azote de l'échantillon est minéralisé par 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 6,25 a été utilisé pour passer de la concentration en azote à celles des protéines dans le produit brut.

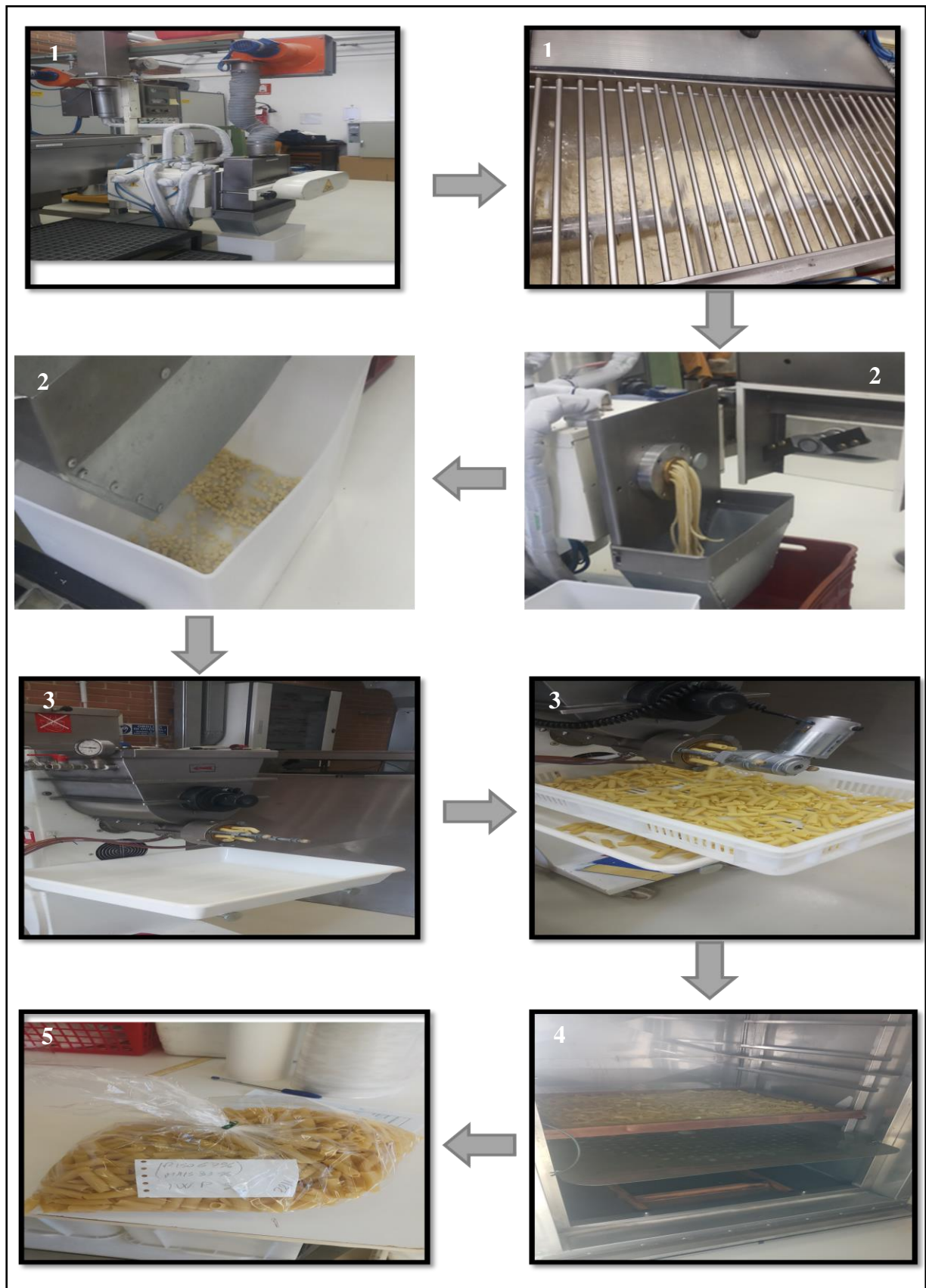


Figure 4. Etapes de fabrication des macaronis sans gluten

1 : malaxage, 2 : préparation des pellets, 3 : mise en forme, 4 : séchage, 5 : emballage.

3.2.3. Furosine

La teneur en furosine (mg de furosine/100 g de protéines) a été déterminée par HPLC après hydrolyse acide comme décrit par Hidalgo et Brandolini (2011). Les échantillons ont été injectés dans un appareil de chromatographie liquide Millipore Waters (Milford, USA) composé de deux pompes HPLC 510, d'un contrôleur de gradient automatisé 680 et d'un détecteur multi-longueurs d'onde programmable 490. L'instrument était connecté à un chromato-intégrateur D-2500 (Merck-Hitachi, Darmstadt, Allemagne). Les conditions opératoires de l'analyse HPLC de la furosine étaient les suivantes :

- une colonne C8 dédiée à la furosine (250 4,6 mm, Alltech Italia S.R.L., Milan, Italie) ;
- température de la colonne de 35°C ;
- détection multi-longueur d'onde 280 nm ;
- phase mobile (A) : acide acétique à 0,4% dans l'eau ;
- phase mobile (B) : chlorure de potassium à 0,3% dans le solvant A ;
- débit = 1,2 mL/min.

Le gradient d'élution, exprimé en proportion de l'éluant B, était le suivant : condition initiale, 2% pendant 13,5 min ; de 2 à 50% en 7 min, 50% pendant 1 min ; de 50 à 2% en 1,5 min, 2% pendant 10 min.

Une courbe d'étalonnage a été construite en utilisant 9 concentrations différentes entre 0,33 et 5,13 mmol/L de dichlorhydrate de furosine (NeoMPS, Laboratoires PolyPeptide, Strasbourg, France) dans HCl (3N). La courbe d'étalonnage était linéaire ($R^2 = 1,00$; $p \leq 0,001$) dans les plages de concentration considérées.

Les limites de détection et de quantification de la solution étalon étaient de 0,11 et 0,35 mmol/L, correspondant respectivement à :

- 5,9 et 13 mg/100 g de protéines dans les échantillons contenant 9 g/100 g de protéines ;
- 2,9 et 6,5 mg/100 g de protéines dans les échantillons contenant 18 g/100 g de protéines.

Les résultats sont exprimés en mg de furosine/100 g de protéines.

3.3. Appréciation de la qualité des macaronis sans gluten

3.3.1. Propriétés de viscosité

Les propriétés de viscosité des macaronis secs ont été déterminées en duplicata à l'aide d'un Rapid Visco Analyzer (Newport Scientific, Warriewood, Australie). Un échantillon de 4 g de pâtes broyées et 25 ml d'eau distillée, corrigés à une base d'humidité de 14% de

l'échantillon, ont été mélangés dans une boîte en aluminium (Mariottis *et al.*, 2011). Sous agitation constante, la suspension a été testée dans les conditions de température et de temps suivantes (figure 5) :

- 50°C pendant 1 min ;
- chauffée à 95°C pendant 4 min et 42 s ;
- maintenue à 95°C pendant 7 min et 12 s ;
- refroidie progressivement à 50 °C pendant 11 min.

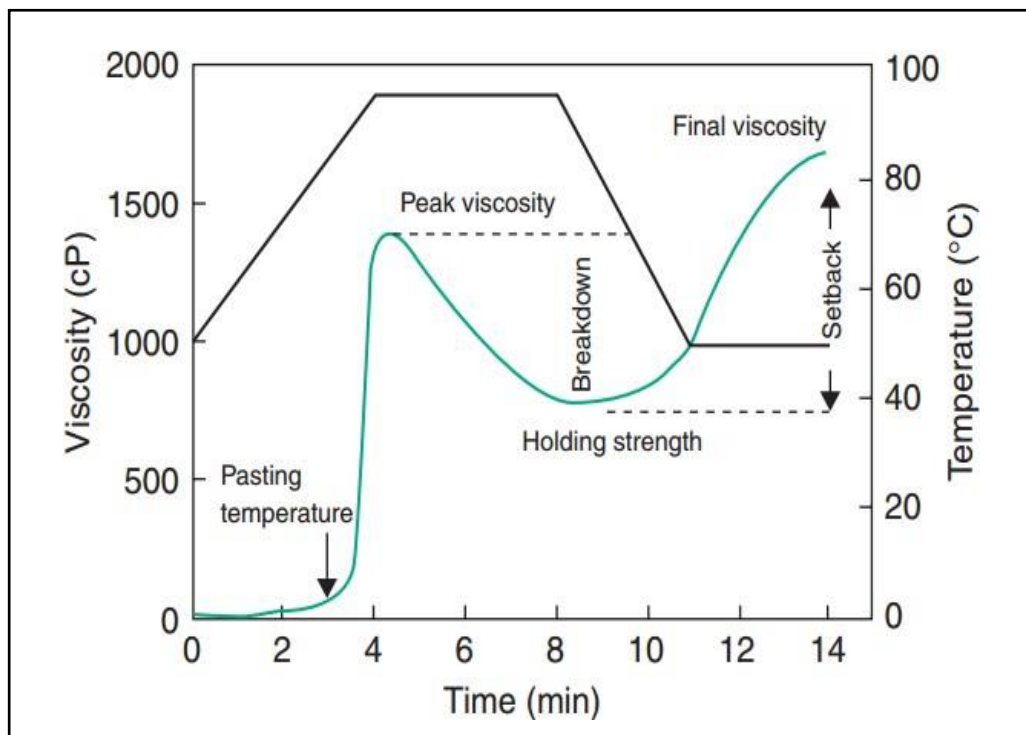


Figure 5. Profil typique de viscosité (Stoddard, 2004)

Les paramètres mesurés étaient :

- la viscosité maximale (centipoises, cP) : la viscosité la plus élevée au cours du cycle de chauffage ;
- le breakdown (cP) : correspondant à la différence entre la viscosité maximale et la viscosité à la fin de la période de maintien à 95°C. Il est un indice de diminution de la viscosité au cours du maintien à 95°C ;
- la viscosité finale (cP) : la viscosité atteinte à la fin de la période de refroidissement ;

- le setback (cP) : correspondant à la viscosité finale moins la viscosité à la fin de la période de maintien à 95°C. Il est indice d'augmentation de la viscosité au cours du cycle de refroidissement ;
- le temps de pic (sec) : le temps pour atteindre la viscosité maximale ;
- 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).

3.3.2. Qualité culinaire

La qualité culinaire des macaronis sans gluten a été appréciée par la détermination du temps optimal de cuisson, de la capacité de l'absorption de l'eau et des pertes à la cuisson comme déjà décrits dans le titre 2.3 (pages 39 et 40).

3.3.3. Couleur des pâtes sèches et des pâtes cuites

La couleur des pâtes sèches et cuites a été mesurée en 10 répétitions par un Chroma Meter CR-210 de Minolta (Minolta, Osaka, Japon) équipé d'un illuminant standard C et calibré avec une plaque réflectrice blanche standard. Les résultats sont exprimés dans l'espace CIELAB en valeurs L* (luminosité ; 0=noir, 100=blanc), a* (+a=rougeur, -a=vert) et b* (+b=jaune, -b=bleu).

3.3.4. Caractérisation géométrique

Les caractéristiques géométriques des macaronis secs et cuits ont été déterminées par analyse d'image sur dix macaronis pris au hasard selon la méthode décrite par Mariotti *et al.* (2011). Les échantillons ont été placés sur un scanner à plat (Epson Perfection 3170 Photo, Seiko Epson Corp., Japon) et recouverts d'une boîte noire pour amplifier le contraste entre les objets et le fond. Les images ont été capturées à une résolution de 600 dpi, enregistrées au format TIFF et traitées avec le logiciel Image Pro-Plus v. 4.5.1.29 (Media Cybernetics Inc., Rockville, MD, USA).

La surface (mm²) et la longueur des macaronis secs et cuits ont été déterminées. Par ailleurs, l'augmentation de la surface et de la longueur après cuisson ont également été calculées à l'aide des équations suivantes :

$$\text{L'augmentation de la surface (\%)} = \frac{\text{Surface après cuisson} - \text{Surface avant cuisson}}{\text{Surface avant cuisson}} \times 100$$

$$\text{L'augmentation de la longueur (\%)} = \frac{\text{longueur après cuisson} - \text{longueur avant cuisson}}{\text{longueur avant cuisson}} \times 100$$

3.3.5. Texture

Les propriétés de texture des macaronis cuits ont été déterminées par un test d'extrusion-compression à l'aide d'un analyseur de texture TA.HD plus (Stable Micro Systems, Godalming, Surrey, Royaume-Uni) équipé d'une cellule Kramer à 10 lames et d'une cellule de charge de 2,5 kN (figure 6). L'instrument était géré par le logiciel Texture Exponent 32 v. 4.0.8.0 (Stable Micro Systems, Godalming, Surrey, Royaume-Uni).

Deux aliquotes de pâtes (50 g) pour chaque échantillon ont été cuites, conditionnées à température ambiante dans un récipient hermétique, puis comprimées et extrudées à une vitesse de 0,67 mm/s. Trois répétitions du test de Kramer ont été effectuées sur chaque aliquote de pâtes, pour un total de six déterminations. Les résultats sont exprimés en valeurs moyennes de la fermeté (la force maximale de compression en N) et de l'énergie totale d'extrusion (l'aire sous la courbe totale de compression-extrusion en J) (Lucisano *et al.*, 2012).

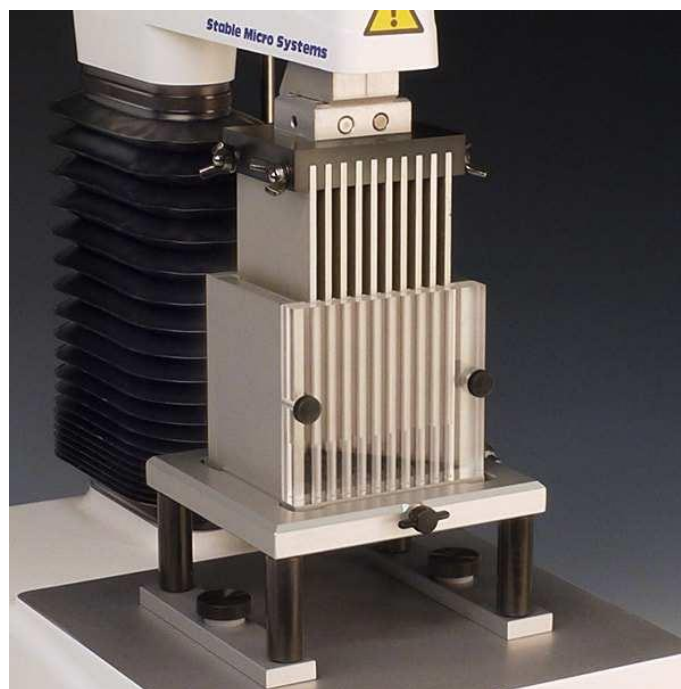


Figure 6. Kramer à 10 lames de l'analyseur de texture TA.HD plus.

3.3.6. Analyses sensorielles

L'évaluation sensorielle consiste en un test hédonique pour déterminer le profil sensoriel et l'acceptabilité sensorielle globale des macaronis sans gluten comme déjà mentionné dans le titre 2.4. (Page 40).

3.4. Analyse statistique

L'analyse statistique des données a été réalisée à l'aide du logiciel statistique STATGRAPHICS® Centurion. Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart-type. La comparaison entre les moyennes a été réalisée par l'analyse de la variance (ANOVA) suivie le test *post hoc* Fisher LSD au seuil de signification de 0,05.

Résultats et discussion

Partie 1. Effet du lactosérum acide et doux sur la qualité culinaire et sensorielle des spaghettis sans gluten

1.1. Caractéristiques physico-chimiques des farines

1.1.1. Distribution granulométrique

Les résultats de la distribution granulométrique des farines de riz et de maïs sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12. Granulométrie des farines utilisées dans la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten

Classe des fractions (μm)	Farine de riz (%)	Farine de maïs (%)
> 200	0,00	0,00
]150-200]	$69,90 \pm 0,62$	$7,12 \pm 0,08$
]125-150]	$17,70 \pm 0,81$	$36,46 \pm 0,68$
]100-125]	$8,51 \pm 0,87$	$55,89 \pm 0,59$
≤ 100	0,00	0,00

Il ressort que la proportion des particules la plus importante des farines de riz et de maïs se situe respectivement dans les intervalles]150-200] μm (69,90%) et] 100-125] μm (55,89%). Selon le *Codex Alimentarius* (1995), la dénomination « farine » désigne tout broyat de granulométrie inférieure à 212 μm , ce qu'est le cas pour les farines de riz et de maïs utilisées dans la fabrication des pâtes sans gluten.

L'hétérogénéité dans la répartition des dimensions des particules de nos farines pourrait être expliquée par l'influence directe des opérations unitaires appliquées sur les grains entiers de céréales, tels que le broyage, la séparation et le mélange ainsi qu'à la différence de composition, de texture et d'humidité de ces ingrédients (Melcion, 2000).

1.1.2. Humidité

La teneur en eau (humidité) est un facteur déterminant de la qualité des farines sur le plan hygiénique car elle influe sur leur préservation au cours de stockage (Feillet, 2000). En effet, quand la teneur en eau de la farine est élevée, il peut y avoir une détérioration par développement de moisissures.

La teneur en eau de la farine de riz était 6,65% alors que celle de la farine de maïs est 8,97%. Ces résultats sont en accord avec la norme du Codex Alimentarius (FAO, 1996) qui en fixe la valeur de 15% comme limite maximale, ce qui permet donc leur bonne conservation.

1.2. Caractéristiques physico-chimiques du lactosérum

Les caractéristiques physico-chimiques des deux types de lactosérums utilisés dans la fabrication des pâtes sans gluten sont présentées dans le tableau 13.

Le lactosérum acide était significativement plus acide (pH = 4,28 et acidité = 58,62 °D), plus riche en cendres (0,73 g/L) et plus pauvre en protéines solubles (4,6 g/L) que le lactosérum doux. Aucune différence significative n'a été observée en ce qui concerne l'extrait sec total, la teneur en matière grasse et la teneur en lactose entre les deux types de lactosérum.

Tableau 13. Caractéristiques physico-chimiques des lactosérums utilisés dans la fabrication des pâtes alimentaires sans gluten

Caractéristiques	Lactosérum doux	Lactosérum acide
pH	6,21 ± 0,05 ^b	4,28±0,005 ^a
Acidité (°D)	14,00± 1,00 ^a	58,62± 0,57 ^b
Extrait sec total (EST) (%)	5,63± 0,04 ^a	5,50± 0,18 ^a
Matière grasse (g/L)	0,43± 0,05 ^a	0,23± 0,05 ^a
Protéines (g/L)	7,10± 0,98 ^b	4,60± 0,28 ^a
Cendres (g/L)	0,52± 0,65 ^a	0,73± 0,86 ^b
Lactose (g/L)	46,5± 0,25 ^a	45,25± 0,35 ^a

^{a-b} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même ligne sont significatives différentes (p< 0,05)

La composition du lactosérum varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de lactosérum (acide ou doux), la source de lait (vache, brebis, lait de vache, *etc.*), l'alimentation de l'animal qui produit le lait, la méthode de transformation du fromage, la saison et le stade de lactation (Barukčić *et al.*, 2109).

Les résultats du pH et de l'acidité confirment le type de chaque type de lactosérum et ils sont compris dans les intervalles rapportés dans la littérature : pH entre 5,8 et 6,6 et

acidité entre 10 et 20 °D pour le lactosérum doux ; et pH entre 4,0 et 5,0 et acidité entre 40 et 60 °D pour le lactosérum acide (Macwan *et al.*, 2016 ; Rani, 2018).

Les résultats de la teneur en protéines et en lactose du lactosérum se situent également dans les intervalles typiques comme il a été rapporté par Božanić *et al.* (2016) et Onwulata et Huth, (2008) : le lactosérum doux contient 46-52 % de lactose et 6-10% de protéines, tandis que le lactosérum acide contient 44-46% de lactose et 6-8% de protéines.

Cependant, les valeurs trouvées de cendres et d'extrait sec total pour les deux types de lactosérum sont inférieures aux données rapportées dans la littérature (Onwulata et Huth, 2008 ; Singh, 2014 et Chandan *et al.*, 2019) qui sont 2,5-4,7% de cendres et 7% d'extrait sec pour le lactosérum doux et 4,3-7,5% de cendres et 6,5% d'extrait sec pour le lactosérum acide.

Les résultats de la teneur en matière grasse sont proches de ceux rapportés par Božanić *et al.* (2014) et Chandan *et al.* (2019) qui sont respectivement de 0,5 g/L et 0,3g/L pour le lactosérum doux et le lactosérum acide.

1.2. Qualité culinaire des spaghettis sans gluten

La qualité culinaire des spaghettis sans gluten et des pâtes commerciales témoins à base de blé (TBC) est présentée dans les figures 7, 8 et 9.

1.2.1. Temps optimal de cuisson

Le TOC des échantillons de pâtes sans gluten enrichies avec du lactosérum doux et acide variait de 4,2 à 7,26 min. Les pâtes à base de dur (TBC) avaient un TOC significativement plus long (13,38 min) que les échantillons de pâtes sans gluten (figure 7). Cette différence pourrait être expliquée par l'absence de gluten dans les pâtes sans gluten, qui rendrait leur structure plus fragile, facilitant ainsi la pénétration de l'eau pendant la cuisson (Chillo *et al.*, 2007 ; Phongthai *et al.*, 2017).

Comme il est indiqué par Lorenzo *et al.* (2018), le temps de cuisson dépend de la vitesse de diffusion de l'eau dans les pâtes, il est donc fortement lié à la formulation des pâtes et aux conditions de fabrication, qui affectent toutes les deux la structure finale de la matrice.

De plus, pour les échantillons de pâtes sans gluten, le TOC a augmenté avec la quantité de lactosérum doux et de lactosérum acide ($r = 0,75$ et $r = 0,81$ respectivement). Il est passé de 4,2 min pour les pâtes sans gluten sans ajout de lactosérum à 5,22 min pour les

pâtes avec 100% de lactosérum doux et à 7,26 min pour les pâtes avec 100% de lactosérum acide. Cela pourrait être expliqué par une gélatinisation plus lente de l'amidon causée par la présence de protéines de lactosérum. En effet, l'encapsulation de l'amidon par les protéines limiterait leur absorption d'eau, augmentant ainsi le temps nécessaire à l'eau pour atteindre le centre de la pâte lors de la cuisson (Petitot *et al.*, 2009 ; Petitot *et al.*, 2010).

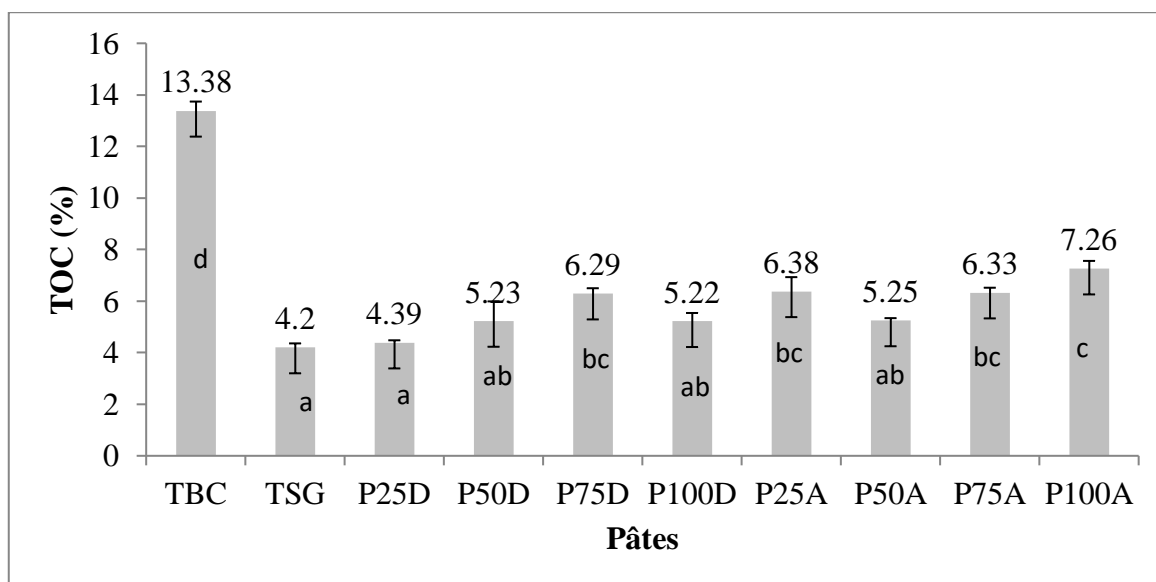


Figure 7. Temps optimal de cuisson des spaghettis

^{a-d} Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$). TBC: pâtes commerciales témoin à base de blé dur ; TSG: pâtes témoin sans gluten ; P25D: pâtes avec 25% de lactosérum doux (LD) ; P50D: pâtes avec 50% de LD ; P75D: pâtes avec 75% de LD ; P100D: pâtes avec 100% de LD ; P25A: pâtes avec 25% de lactosérum acide (LA) ; P50A: pâtes avec 50% de LA ; P75A: pâtes avec 75% de LA ; P100A: pâtes avec 100% de LA.

1.2.2. Capacité d'absorption de l'eau

Le poids des pâtes cuites indique l'absorption de l'eau et correspond à un phénomène macroscopique impliquant une modification moléculaire complexe de l'amidon et des protéines, principalement une hydratation (Sozer *et al.*, 2007 ; Nouviaire *et al.*, 2008).

L'absorption de l'eau est considérablement affectée par la formulation des pâtes (Laleg *et al.*, 2016). Il convient également de noter que l'absorption d'eau se produit à travers le réseau de protéines ainsi qu'à travers l'amidon (Petitot *et al.*, 2009 ; Petitot *et al.*, 2010).

La CAE des spaghettis sans gluten a diminué avec l'augmentation du taux d'incorporation du lactosérum doux ($r = -0,88$) ou du lactosérum acide ($r = -0,72$). La CAE des pâtes spaghetti sans gluten variait entre 107,01% et 135,47% (figure 8). Ceci pourrait s'expliquer par la réduction de la quantité d'eau nécessaire au gonflement de l'amidon, conséquence de la concurrence éventuelle des différents biopolymères pour l'eau disponible après l'ajout de lactosérum, comme il a été souligné par Kumar *et al.* (2019) et Ungureanu-Iuga *et al.* (2020).

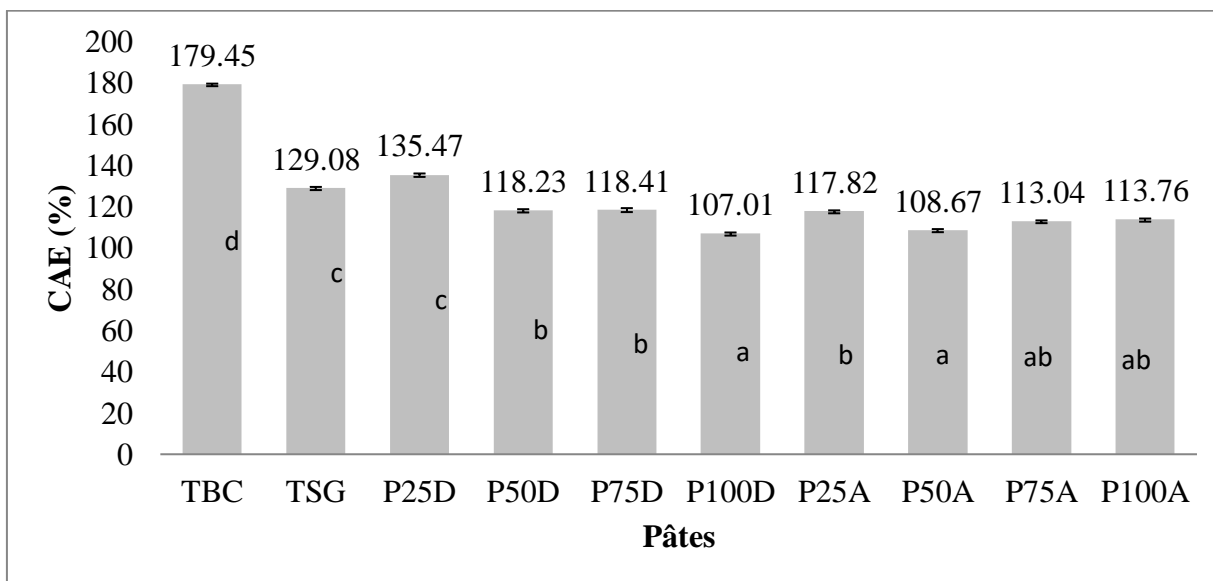


Figure 8. Capacité d'absorption de l'eau des spaghettis

^{a-d} Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$). TBC: pâtes commerciales témoin à base de blé dur ; TSG: pâtes témoin sans gluten ; P25D: pâtes avec 25% de lactosérum doux (LD) ; P50D: pâtes avec 50% de LD ; P75D: pâtes avec 75% de LD ; P100D: pâtes avec 100% de LD ; P25A: pâtes avec 25% de lactosérum acide (LA) ; P50A: pâtes avec 50% de LA ; P75A: pâtes avec 75% de LA ; P100A: pâtes avec 100% de LA.

D'autre part, les pâtes commerciales témoins à base de blé dur ont absorbé significativement plus d'eau (179,45%) que celles des spaghettis sans gluten. Cela pourrait être lié au TOC plus long des pâtes de blé, vu que plus d'eau peut diffuser et interagir avec les matrices d'amidon et de protéines (Sozer *et al.*, 2007 ; Giuberti *et al.*, 2015). De plus, pendant la cuisson, le gluten agit comme une éponge pour l'eau, ouvre sa structure et embarque les granules d'amidon à l'intérieur de ce réseau (Sozer *et al.*, 2007).

1.2.3. Pertes à la cuisson

Les pertes à la cuisson sont largement utilisées comme indicateur de la performance globale au cours de la cuisson, car elles sont considérées comme un indice de résistance à la désintégration pendant la cuisson (Larrosa *et al.*, 2016).

Les pertes à la cuisson des pâtes sans gluten enrichies avec du lactosérum acide ou doux variaient de 11,57 à 15,75 %. Les pâtes témoins à base de blé dur ont enregistré les pertes de matière les plus faibles ($p < 0,05$) dans l'eau de cuisson (4,31%) (figure 9).

Les pertes à la cuisson plus élevées des pâtes sans gluten par rapport aux pâtes à base de blé dur pourraient être liées à l'absence de gluten, ce qui entraîne un emprisonnement moins efficace des polymères d'amidon dans la matrice, donnant ainsi des produits avec des pertes à la cuisson plus élevés (Marti *et al.*, 2014 ; Laleg *et al.*, 2017).

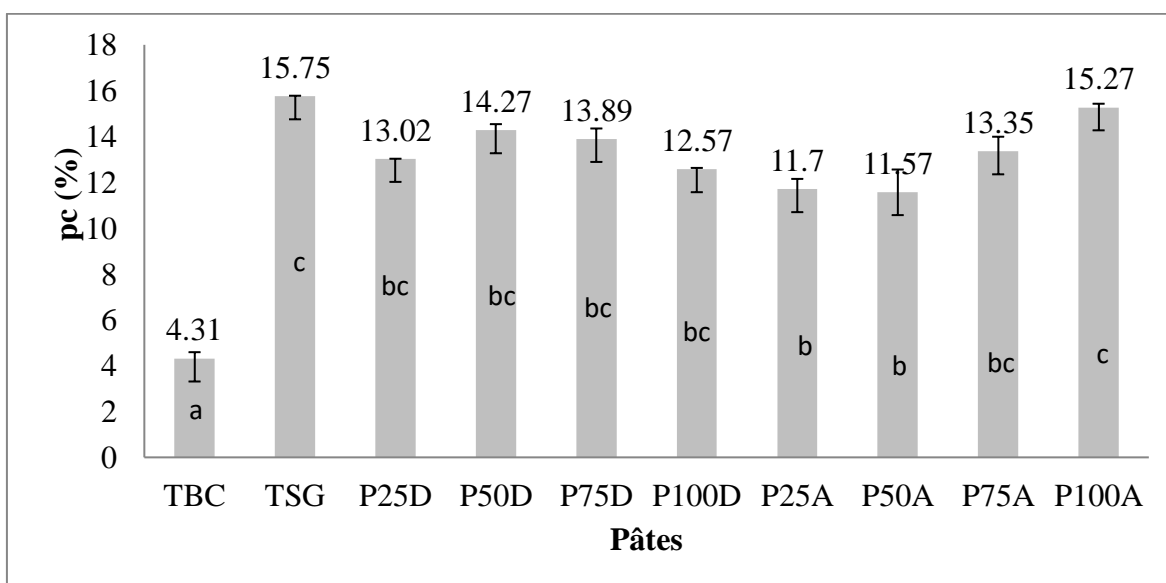


Figure 9. Pertes à la cuisson des spaghettis

^{a-d} Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$). TBC: pâtes commerciales témoin à base de blé dur ; TSG: pâtes témoin sans gluten ; P25D: pâtes avec 25% de lactosérum doux (LD) ; P50D: pâtes avec 50% de LD ; P75D: pâtes avec 75% de LD ; P100D: pâtes avec 100% de LD ; P25A: pâtes avec 25% de lactosérum acide (LA) ; P50A: pâtes avec 50% de LA ; P75A: pâtes avec 75% de LA ; P100A: pâtes avec 100% de LA.

L'incorporation du lactosérum doux dans la formulation n'a pas engendré de changements significatifs dans la quantité de matières perdues pendant la cuisson. En revanche, l'ajout de 25% ou de 50% de lactosérum acide a entraîné une diminution

significative des pertes à la cuisson (11,70 et 11,57 % respectivement) comparativement aux pâtes témoins sans gluten. Ceci est probablement dû à l'incorporation des constituants des pâtes dans les gels de protéines de lactosérum suite à leur coagulation pendant la cuisson, ce qui entraîne une meilleure rétention de l'amidon dans la matrice et, par conséquent, une perte de matières solides plus faible (Marti *et al.*, 2014). Des résultats similaires ont été rapportés par Marti *et al.* (2014) pour des pâtes fabriquées à partir de riz étuvé et supplémentée en protéines de lactosérum et par Ungureanu Iuga *et al.* (2020) pour des pâtes de maïs avec ajout de poudre de lactosérum.

Une faible quantité de matières perdues est le signe de pâtes cuites de haute qualité (Del Nobile *et al.*, 2005 ; Lorenzo *et al.*, 2018). Selon Hoseney (1994), des pâtes de bonne qualité doivent présenter des pertes à la cuisson inférieures à 12%. Par conséquent, seules les pâtes contenant 25% et 50% de lactosérum acide peuvent être considérées comme acceptables. Cependant, malgré l'effet positif de l'ajout du lactosérum acide sur les pertes à la cuisson, les résultats obtenus dépassent la limite considérée (7-8%) pour les spaghetti à base de blé (Sissons *et al.*, 2012).

1.3. Caractéristiques sensorielles des spaghettis

Les résultats de l'évaluation sensorielle des pâtes sont présentés dans le tableau 14.

Tableau 14. Profil sensoriel des spaghettis sans gluten avec 50% du lactosérum acide comparativement aux spaghettis témoins commerciales à base de blé et spaghettis témoin sans gluten

Attributs	PTCB	PTSG	P50A
Apparence	8,60±0,60 ^a	2,5±1,82 ^c	3,85±1,87 ^b
Couleur	8,00±1,75 ^a	4,05±2,01 ^b	3,95±2,14 ^b
Fermeté	8,35±1,1 ^a	1,85±1,09 ^c	4,8±1,76 ^b
Adhésivité	8,35±0,74 ^a	2,05±1,28 ^c	5,45±2,28 ^b
Goût	7,40±1,60 ^a	2,75±2,02 ^c	5,4±2,4 ^b
Acceptabilité globale	7,25±1,58 ^a	2,4±1,53 ^c	5,65±1,63 ^b

^{a-c} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même ligne sont significatives différentes ($p < 0,05$). PTCB : pâtes témoins commerciales à base de blé ; PTSG : pâtes témoin sans gluten ; P50A: pâtes avec 50% de lactosérum acide.

Les pâtes témoins commerciales à base de blé dur ont obtenu des scores significativement plus élevés pour tous les attributs sensoriels (entre 7,25 et 8,60) en comparaison avec les pâtes témoins sans gluten (entre 1,85 et 4,05) et les pâtes avec 50% de lactosérum acide (entre 3,85 et 5,65).

En outre, les pâtes sans gluten enrichies avec 50% de lactosérum acide ont obtenu des scores plus élevés ($p < 0,05$) pour tous les attributs sensoriels (apparence, fermeté, adhésivité, goût et acceptabilité globale) par rapport aux pâtes témoins sans gluten, à l'exception de la couleur.

Seules les pâtes témoins commerciales à base de blé et les pâtes enrichies avec 50% de lactosérum acide étaient considérées comme acceptable (score de l'acceptabilité sensorielle globale > 5).

Partie 2. Effet des sels alcalins et/ou d'isolat de protéines de lactosérum sur la qualité des macaronis sans gluten

2.1. Caractéristiques physico-chimiques

Les résultats de l'humidité, des protéines et de la furosine des échantillons de macaronis sans gluten sont représentés dans le tableau 15.

Tableau 15. Humidité, protéines et furosine des macaronis sans gluten

	Humidité (%)	Protéines (%)	Furosine (mg/100 g protéines)
Farine de riz	6,66	7	0,00 ± 0,00
Farine de maïs	8,97	7,9	9,12 ± 0,97
IPL	5,53	92	181,14 ± 5,38
P1	11,1 ± 0,00 ^b	7,40 ± 0,06 ^a	264,70 ± 12,48 ^{ab}
P2	11,25 ± 0,03 ^c	7,46 ± 0,09 ^a	359,64 ± 24,34 ^b
P3	11,75 ± 0,04 ^d	7,00 ± 0,07 ^a	523,93 ± 23,33 ^c
P4	10,95 ± 0,08 ^a	10,63 ± 0,85 ^b	809,00 ± 55,44 ^d
P5	10,03 ± 0,01 ^a	10,96 ± 0,03 ^c	942,25 ± 83,74 ^c

^{a-e} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

L'humidité des macaronis sans gluten était comprise entre 10,03 et 11,75 %. Ces valeurs sont inférieures à la limite (< 12%) qui leur assure une bonne conservation (Codex Alimentarius, 1995).

La teneur en protéines des macaronis sans gluten augmentait de manière significative avec l'ajout de 5% de protéines de lactosérum à la formule à base des farines de riz et de maïs, 10,63% et 10,96% pour les pâtes avec 5% d'IPL et celles avec 5% d'IPL et 1% des sels alcalins respectivement.

La furosine est un marqueur moléculaire du brunissement non-enzymatique. Elle est produite par hydrolyse acide des composés d'Amadori qui se forment lors de la réaction de Maillard entre les sucres réducteurs et les protéines (Gallegos-Infante *et al.*, 2010). Les dommages causés par le traitement thermique sont principalement déterminés par la teneur en furosine (Kumar *et al.*, 2021).

La furosine n'a pas été détectée dans la farine de riz. Cependant, une faible teneur en ce composé a été trouvée dans la farine de maïs (9,12 mg/100 g de protéines). La teneur en furosine de l'IPL était 181,14 mg/100 g de protéines qui pourrait être attribuée au traitement thermique appliqué pendant la déshydratation du lactosérum.

Tous les échantillons de pâtes sans gluten sèches contenaient de la furosine avec des valeurs qui variaient entre 264,70 et 942,25 mg/100 g de protéines. Ces résultats indiquent clairement que la réaction de Maillard a eu lieu pendant le séchage des pâtes. En outre, les différentes formulations avaient un impact sur la teneur en furosine des macaronis sans gluten. Les valeurs les plus élevées de furosine ont été enregistrées pour les échantillons de macaronis sans gluten avec 5% d'IPL et celles avec 5% d'IPL et 1% ds sels alcalins (809 et 942,25 mg /100 g de protéines, respectivement). Ces valeurs étaient plus élevées que celles rapportées par d'autres études : 19 mg/100 g protéines (Gasparre *et al.*, 2019), 458 mg/100 g protéines (Marti *et al.*, 2014), 107,3 à 553,3 mg/100 g protéines (Giannetti *et al.*, 2013), 44 à 462 mg/100 g protéines (García-Baños *et al.*, 2004). Selon les indices de qualité, une concentration plus élevée de furosine indique un produit de mauvaise qualité (Ramirez-Jimenez *et al.*, 2003). Les échantillons des macaronis sans gluten avec sels alcalins présentaient des valeurs de furosine comprises entre 221,74 et 523,93 mg/100 g de protéines. De Noni et Pagani, (2010), Giannetti *et al.* (2014) ont relevé des taux de furosine dans des pâtes de blé allant de 390 à 562 mg/ 100 g de protéines.

2.2. Propriétés de viscosité

Les propriétés de viscosité des macaronis sans gluten sont résumées dans le tableau 16. Ces propriétés représentent une mesure de la viscosité des pâtes pendant le cycle de chauffage et de refroidissement, reflétant les phénomènes moléculaires qui se produisent dans les granules d'amidon.

Tableau 16. Paramètres de viscosité des macaronis sans gluten

	Viscosité maximale (cP)	Breakdown (cP)	Viscosité finale (cP)	Setback (cP)	Temps de pic (s)	Température de gélatinisation (°C)
P1	382,5±3,53 ^a	47,5±0,70 ^a	1096,5±7,77 ^c	761,5±10,6 ^c	6,37±0,04 ^b	95,0±0,28 ^d
P2	784,0±29,69 ^b	173,5±4,94 ^c	2084,0±35,35 ^d	1473,5±10,6 ^d	5,67±0,09 ^a	84,93±1,52 ^b
P3	887,5±27,57 ^c	189,5±16,26 ^c	2347,5±36,06 ^e	1649,5±24,74 ^e	5,60±0,0 ^a	78,70±0,56 ^a
P4	356,5±14,84 ^a	61,5±6,36 ^{ab}	949,0±24,04 ^a	654,0±15,55 ^a	5,67±0,0 ^a	92,40±0,63 ^{cd}
P5	389,5±2,12 ^a	77,5±9,19 ^b	1032,0±12,72 ^b	720,0±24,04 ^b	5,60±0,0 ^a	89,20±0,56 ^c

^{a-e} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

L'ajout des sels alcalins a augmenté significativement la viscosité maximale, la viscosité finale, le breakdown et le setback des pâtes sans gluten. L'augmentation de la viscosité des pâtes pendant le chauffage est due au gonflement des granules d'amidon et la diminution de la viscosité était causée par la rupture des granules gonflés (Rafiq *et al.*, 2016 ; Tao *et al.*, 2019).

L'augmentation de la viscosité des macaronis sans gluten contenant des sels alcalins a probablement été causée par des changements dans le gonflement des granules d'amidon et leur déformation pendant la gélatinisation. La viscosité maximale élevée indique que les sels alcalins ont provoqué un gonflement plus important des granules d'amidon avant leur rupture, cela a entraîné la formation d'un réseau plus visqueux pendant le refroidissement et une augmentation conséquente de la viscosité finale.

La viscosité élevée de breakdown et de setback des macaronis sans gluten contenant les sels alcalins suggère que les conditions alcalines ont favorisé la rupture de la structure granulaire, indiquant un affaiblissement de la structure des granules (Wang *et al.*, 2014 ; Lai *et al.*, 2004). Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Fan *et al.* (2018), Li *et al.* (2018) et Tao *et al.* (2019). Le temps de pic et la température de gélatinisation ont diminué avec l'ajout des sels alcalins. Cette diminution pourrait s'expliquer partiellement par une augmentation du pouvoir de gonflement des granules d'amidon, accompagnée de modifications de la structure des protéines (Lai *et al.*, 2004).

La présence de 5% d'isolat de protéines de lactosérum a significativement diminué la viscosité finale, le setback et le temps de pic des macaronis sans gluten qui ont montré une viscosité maximale et une température de gélatinisation moins élevés par rapport aux pâtes témoins sans gluten (P1). Ces résultats suggèrent que les protéines de lactosérum pourraient avoir ralenti l'absorption d'eau par les granules d'amidon individuels (et par conséquent leur gélatinisation) en raison de la concurrence éventuelle des différents biopolymères pour l'eau disponible. Une diminution de la viscosité a également été observée par Marco et Rosell (2008) et Marti *et al.* (2014) lorsque des protéines de lactosérum ont été ajoutées aux pâtes sans gluten de riz, probablement en raison de l'effet de dilution exercé sur la concentration d'amidon. Le breakdown, lié à la capacité des amidons à résister à un chauffage à haute température et aux contraintes de cisaillement, a augmenté ($p > 0,05$) en présence d'isolat des protéines de lactosérum par rapport au contrôle en absence de ces protéines.

L'ajout de 1% des sels alcalins et 5% d'IPL n'avait aucun effet significatif sur la viscosité maximale, alors qu'il a significativement diminué la viscosité finale, le setback, le temps de pic et la température de gélatinisation d'une part et qu'il a significativement augmenté le breakdown des macaronis sans gluten d'autre part par rapport aux pâtes témoins (P1).

2.3. Qualité culinaire

2.3.1. Temps optimal de cuisson

Le même temps optimal de cuisson (8 min) a été enregistré pour tous les échantillons de pâtes sans gluten. L'ajout des sels alcalins à des taux de 0,5% et 1% ainsi que l'incorporation de 5% d'isolat de protéines de lactosérum n'a pas eu d'effet significatif sur le temps optimal de cuisson des macaronis sans gluten à base de riz et de maïs par

rapport aux pâtes sans gluten témoins (P1). Contrairement à nos résultats, Fan *et al.* (2018) ont trouvé que le temps optimal de cuisson des nouilles a augmenté significativement avec le taux d'incorporation des sels alcalins. Ungureanu-Iuga *et al.* (2020) ont rapporté une diminution significative du TOC avec l'augmentation du taux d'incorporation des protéines de lactosérum.

2.3.2. Capacité d'absorption de l'eau

Pendant la cuisson, l'absorption de l'eau des pâtes reflète la capacité de gonflement de l'amidon et des protéines sous l'effet de la chaleur (Larrosa *et al.*, 2016). La capacité d'absorption des macaronis sans gluten variait de 64,5% pour les macaronis sans gluten avec 1% des sels alcalins (P3) à 75,6% pour celles avec 1% des sels alcalins et 5% d'isolat de protéines de lactosérum (P5) (figure 10).

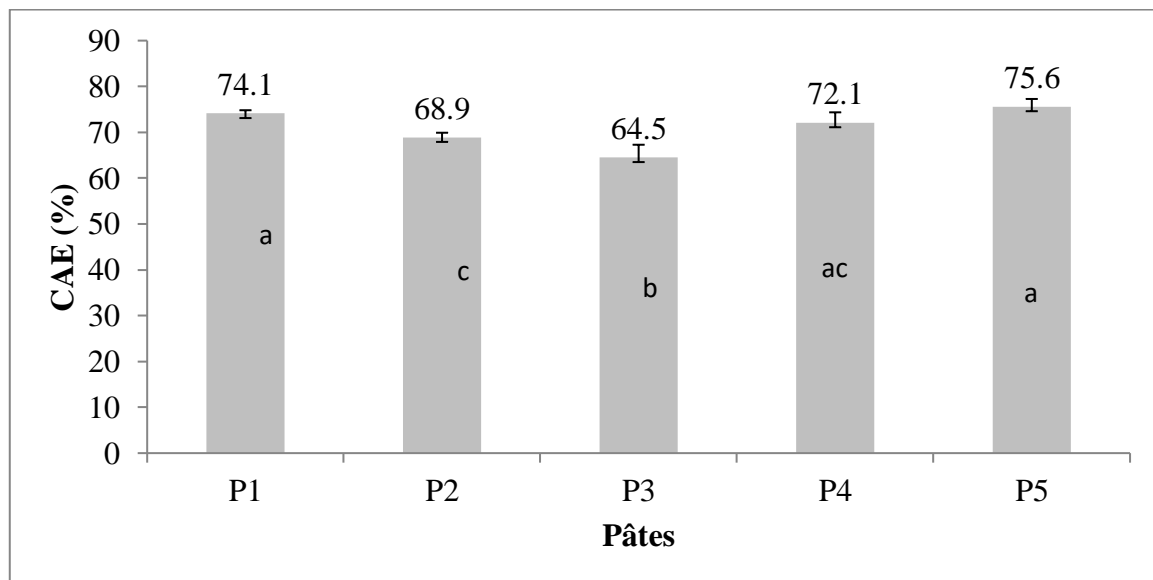


Figure 10. Capacité d'absorption d'eau des macaronis

^{a-c} Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

La CAE a diminué significativement avec l'augmentation du taux des sels alcalins ajoutés par rapport aux pâtes sans gluten témoins, ce qui pourrait être attribué aux pertes de cuisson élevées (Fan *et al.*, 2018). Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par Fan *et al.* (2018) indiquant qu'avec l'augmentation du taux de sels alcalins, l'absorption d'eau

des nouilles a augmenté puis diminué significativement, atteignant la valeur maximale lorsque la proportion d'ajout de sels alcalins était de 0,2%. Guo *et al.* (2017) ont constaté que l'absorption d'eau augmentait significativement avec l'ajout de 0,5% de sels alcalins, et diminuait à partir de l'ajout de 1% de sels alcalins. Cette augmentation pourrait être due à l'impact des sels alcalins sur les propriétés de gélification de l'amidon. En effet, lors de l'ajout des sels alcalins, plus d'amidon se gélatinise à la surface des nouilles, plus d'eau est absorbée (Del Nobile *et al.*, 2003; Guo *et al.*, 2017).

L'ajout de 5% d'IPL n'a pas engendré un changement significatif sur la capacité d'absorption de l'eau des macaronis sans gluten en comparaison avec les pâtes témoins. Des résultats similaires ont été signalés par Marti *et al.* (2014) après de l'incorporation de 6% de concentré de protéines de lactosérum dans la fabrication des pâtes sans gluten à base de riz. Kumar *et al.* (2019) ont constaté que l'ajout de concentré de protéines de lactosérum a significativement diminué la capacité d'absorption de l'eau des pâtes sans gluten à base farine de millet. Cela peut être dû au fait que les protéines du lait réduisent de manière compétitive l'eau nécessaire au gonflement de l'amidon pendant la gélatinisation.

Concernant les pâtes avec 1% de sels alcalins et 5% d'IPL, une augmentation non significative ($p > 0,05$) de la capacité d'absorption de l'eau a été enregistrée en comparaison avec les pâtes témoins (P1).

2.3.3. Pertes à la cuisson

Les pertes à la cuisson révèlent l'étendue de la lixiviation des matières dans l'eau de cuisson (Guo *et al.*, 2017). La quantité des résidus dans l'eau de cuisson est communément utilisée comme indicateur de la qualité des pâtes. Une faible quantité des résidus indique une qualité élevée des pâtes (Del Nobile *et al.*, 2005; Susanna et Prabhasankar, 2013).

L'absence de gluten dans les pâtes sans gluten entraîne une rétention moins efficace des polymères d'amidon dans la matrice de la pâte, ce qui se traduit par des pertes à la cuisson plus élevées (Marti *et al.*, 2014). Dans notre étude, les pertes à la cuisson des macaronis sans gluten étaient comprises entre 7,1 et 12,4% (figure 11).

Les pertes à la cuisson des macaronis sans gluten ont augmenté significativement avec l'augmentation du taux des sels alcalins. Ces résultats sont en accord avec ceux de Rombouts *et al.* (2014), Guo *et al.* (2017), Li *et al.* (2018) et Fan *et al.* (2018). Cette augmentation pourrait être expliquée par le fait qu'avec l'augmentation de l'ajout de sels alcalins, le pH de l'eau de surface bouillie augmentait et les pertes d'amidon augmentaient

(Moss *et al.*, 1986). En outre, les pertes à cuisson peuvent être dues à la lixiviation des sels ajoutés eux-mêmes ou des protéines solubles dans les sels.

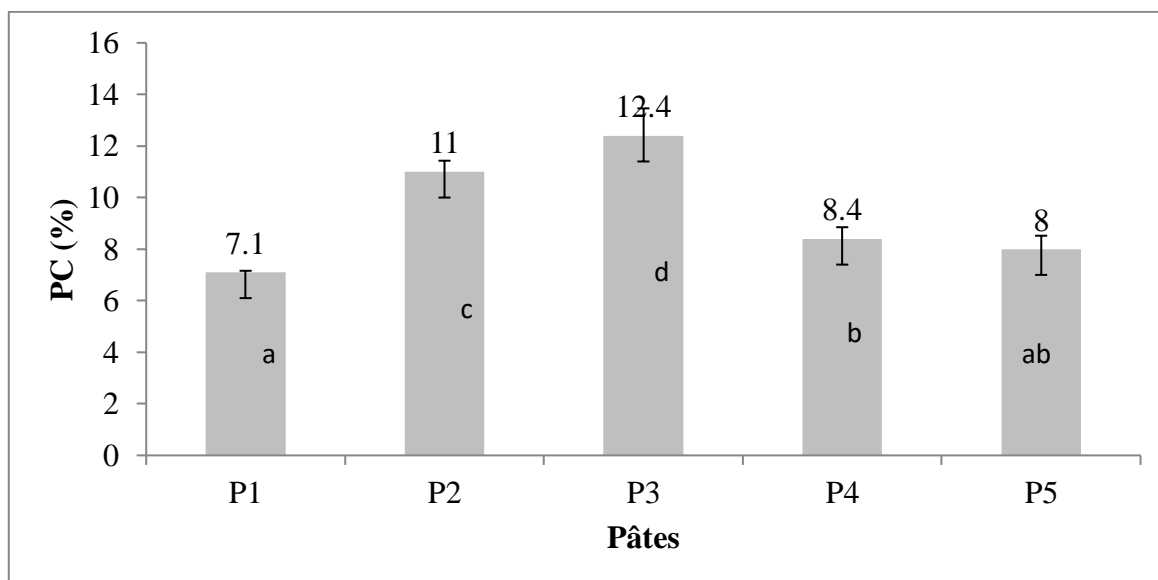


Figure 11. Pertes à la cuisson des macaronis sans gluten

^{a-e} Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

Une augmentation significative des pertes à la cuisson des pâtes sans gluten avec 5% d'isolat des protéines de lactosérum a été signalée comparativement aux pâtes témoins. Cela pourrait être dû à la lixiviation des sucres d'isolat de protéines de lactosérum (Prabhasankar *et al.*, 2007). Ces résultats sont en conformité avec ceux obtenus par Prabhasankar *et al.* (2007) et Phongtail *et al.* (2017). En revanche, contrairement à nos résultats, d'autres études ont signalé une diminution significative des pertes à la cuisson dans les pâtes contenant des protéines de lactosérum (Marti *et al.*, 2014 ; Kumar *et al.*, 2019 ; Ungureanu-iuga, 2020), et ils l'ont attribué à la coagulation des protéines pendant la cuisson, à leurs hautes propriétés de solubilité, d'hydratation et/ou d'émulsification (Pagani *et al.*, 1986 ; Marco et Rosell, 2008).

Aucune différence significative n'a été constatée entre les pertes à la cuisson des pâtes sans gluten avec 1% des sels alcalins et 5% d'IPL et celles des pâtes témoins.

Selon Hosoney (1994), des pâtes de bonne qualité doivent présenter des pertes à la cuisson inférieures à 12%. Par conséquent, tous les macaronis sans gluten peuvent être considérées comme acceptables à l'acceptation des pâtes avec 1% des sels alcalins.

2.4. Couleur

2.4.1. Couleur des macaronis secs

La couleur des pâtes est un attribut de qualité très important qui influence grandement leur acceptation par les consommateurs. Elle est l'un des paramètres que le consommateur puisse évaluer lors de la sélection d'un produit sur le marché (Carini *et al.*, 2009). Les caractéristiques de couleur des macaronis sans gluten secs sont représentées dans le tableau 17.

Tableau 17. Profil de couleur des macaronis sans gluten secs

Pâtes	<i>L</i>*	<i>a</i>*	<i>b</i>*
P1	51,9±2,06 ^a	-4,3±0,27 ^b	17,8±0,66 ^c
P2	51,0±1,56 ^a	-2,5±0,39 ^c	19,0±2,02 ^d
P3	49,0±0,86 ^b	-2,4±0,34 ^c	22,8±0,72 ^b
P4	54,8±1,58 ^c	-4,5±0,59 ^b	20,9±0,76 ^a
P5	56,7±1,25 ^d	-5,0±0,24 ^a	22,2±0,63 ^b

^{a-d} Les moyennes avec des lettres différentes sont significatives différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

La couleur des pâtes dépend de l'activité de la polyphénols oxydase, des substrats phénoliques et des paramètres environnementaux tels que le pH et la force ionique (Kumar *et al.*, 2019).

L'incorporation des sels alcalins a diminuée significativement la luminance (valeur de L^*) et a augmenté les valeurs a^* (la teinte verte a diminué et la teinte rouge a augmenté) et l'indice de jaune par rapport aux pâtes témoins sèches. La forte coloration jaune des

pâtes contenant des sels alcalins peut être due aux pigments de la farine de maïs, qui subissent un changement chromophore à un pH alcalin (Fu, 2008).

L'incorporation d'isolat de protéines de lactosérum dans les macaronis sans gluten à base de riz et de maïs a augmenté de manière significative la luminance et l'indice de jaune des pâtes sèches, alors que la valeur de a^* n'a pas connu un changement significatif par rapport aux pâtes témoins. Cette augmentation peut être due à la réaction de Maillard qui peut se produire pendant le séchage suite à l'ajout de l'IPL. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Ungureanu-Iuga (2020) pour les pâtes sans gluten à base de maïs enrichies en poudre de lactosérum.

2.4.2. Couleur des macaronis cuits

Les caractéristiques de couleur des macaronis sans gluten cuits sont représentées dans le tableau 18.

Tableau 18. Profil de couleur des macaronis sans gluten cuits

Pâtes cuits	L^*	a^*	b^*
P1	70,8±1,78 ^b	-4,8±0,31 ^b	20,5±1,24 ^a
P2	68,2±2,45 ^a	-2,8±0,33 ^d	24,7±1,57 ^c
P3	62,2±1,07 ^c	-3,3±0,45 ^c	27,2±0,68 ^d
P4	69,3±1,85 ^a	-5,0±0,38 ^{ab}	19,0±1,31 ^b
P5	71,1±1,25 ^b	-5,2±0,21 ^a	20,6±0,84 ^a

^{a-d} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

Par rapport aux pâtes témoins, la luminance des macaronis sans gluten cuits a diminué significativement avec l'augmentation du taux d'incorporation des sels alcalins, tandis que l'indice de rouge et l'indice de jaune ont augmenté significativement avec l'augmentation du taux d'incorporation des sels alcalins.

L'ajout de 5% d'IPL a entraîné une diminution significative de la luminosité (L^*) et de l'indice de jaune (b^*) des macaronis sans gluten cuits par rapport aux pâtes témoins. Cependant, aucun effet significatif n'a été observé sur l'indice de rouge (a^*).

L'incorporation de 1% de sels alcalins en combinaison avec 5% d'IPL n'a pas eu d'effet significatif sur les paramètres de couleur des pâtes cuites par rapport aux pâtes témoins, à l'exception de la valeur a^* qui a diminué de manière significative.

2.5. Caractéristiques géométriques

Les paramètres géométriques sont fondamentaux, non seulement parce qu'ils peuvent influencer les propriétés mécaniques des pâtes sèches, mais aussi parce qu'ils peuvent affecter encore plus le comportement des différents échantillons pendant la cuisson (Mariotti *et al.*, 2011). La surface et la longueur des macaronis sans gluten secs et cuits sont présentées dans le tableau 19.

Tableau 19. Surface et longueur des macaronis sans gluten

Pâtes	Pâtes sèches		Pâtes cuites	
	Surface (mm ²)	Longueur (mm)	Surface (mm ²)	Longueur (mm)
P1	352,89 ±25,23 ^{ab}	34,76±3,20 ^{bc}	479,14 ±43,16 ^a	39,34±3,77 ^a
P2	330,78±23,27 ^a	31,28±1,87 ^a	443,09±38,38 ^c	35,85±2,30 ^d
P3	376,99±18,22 ^{bc}	36,07±1,39 ^c	540,09±29,01 ^b	42,49±1,43 ^b
P4	400,20±36,42 ^c	38,38±3,58 ^d	586,94±46,46 ^d	45,64±4,01 ^c
P5	347,87±27,57 ^a	32,95±2,59 ^{ab}	494,57±31,71 ^a	38,35±2,51 ^a

^{a-d} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

Pour les macaronis secs, la surface variait de 330,78 mm² à 400,20 mm² et la longueur variait de 31,28 mm à 38,38 mm. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées pour pâtes avec 5% d'IPL et les pâtes avec 1% de sels alcalins. Les mêmes tendances ont été observées pour les macaronis cuits. Ces différences de caractéristiques géométriques des macaronis sans gluten peuvent être attribuées à des différences pendant la mise en forme (coupure) des pâtes.

La cuisson des macaronis a entraîné une augmentation de la surface (34,42-47,32%) et de la longueur (13,64-19,63%). Les pâtes P4 avaient une augmentation de la

surface significativement plus élevée que celles des pâtes P2 (tableau 20). Aucune différence significative n'a été enregistrée pour l'augmentation de la longueur des macaronis cuits.

Tableau 20. Augmentation de la surface et de la longueur des macaronis sans gluten

Pâtes	Augmentation de la surface (%)	Augmentation de la longueur (%)
P1	36,11±11,93 ^{ab}	13,64±11,72 ^a
P2	34,42±13,68 ^a	15,13±11,74 ^a
P3	43,58±10,68 ^{ab}	17,95±5,67 ^a
P4	47,32±13,03 ^b	19,63±13,06 ^a
P5	42,89±13,00 ^{ab}	17,06±11,72 ^a

^{a-b} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

2.6. Texture

Les propriétés de texture sont considérées comme la caractéristique la plus critique pour évaluer la qualité et déterminer l'acceptabilité des pâtes par les consommateurs (Fan *et al.*, 2018). Les attributs texturaux des macaronis sans gluten pour la fermeté et l'énergie totale de compression-extrusion sont indiqués dans le tableau 21.

Tableau 21. Fermeté et énergie de compression-extrusion des macaronis sans gluten

Pâtes	Fermeté (N)	Énergie de compression-extrusion (mJ)
P1	336,2±19,26 ^c	2830,9± 181,85 ^b
P2	241,8± 16,24 ^b	2395,7± 131,28 ^a
P3	261,3± 4,97 ^{ab}	2491,8± 131,95 ^a
P4	244,9±12,15 ^{ab}	2395,2±178,90 ^a
P5	262,7±17,06 ^a	2405,7±210,94 ^a

^{a-b} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

L'ajout des sels alcalins a entraîné une diminution significative de la fermeté et de l'énergie totale de compression-extrusion des macaronis sans gluten comparativement aux pâtes témoins. La fermeté était significativement plus faible pour les pâtes avec 0,5% de sels alcalins. La diminution de la fermeté pourrait être due aux pertes à la cuisson élevées qui ont été principalement causées par la présence de sels alcalins. Contrairement à ces résultats, d'autres études ont montré que la présence de sels alcalins augmentait la fermeté des nouilles de blé. En effet, les sels alcalins pourraient favoriser la réticulation des protéines et la formation d'un réseau protéique serré (Guo *et al.*, 2017 ; Fan *et al.*, 2018).

La fermeté et l'énergie de compression-extrusion des macaronis sans gluten étaient significativement plus faibles pour les macaronis contenant 5% d'IPL par rapport aux pâtes témoins. Des résultats similaires concernant l'évolution de la fermeté ont été rapportés par Marti *et al.* (2014) et Ungureanu-Iuga *et al.* (2020). Prabhasankar *et al.* (2007) ont rapporté que l'ajout de concentré de protéines de lactosérum diminuait la fermeté des vermicelles à base de blé en raison de la diminution de la force et de l'intégrité des protéines du gluten.

L'ajout de 5% d'IPL et de 1% de sels alcalins aux macaronis sans gluten a également entraîné une diminution de la fermeté et l'énergie de compression-extrusion des pâtes cuites en comparaison avec les pâtes témoins. Les protéines de lactosérum peuvent être responsables de la formation d'entités discrètes au lieu d'une structure de gel protéique, ce qui implique une plus faible fermeté des pâtes (Kumar *et al.*, 2019).

2.7. Caractéristiques sensorielles des macaronis cuits

Le tableau 22 présente les attributs sensoriels (apparence, couleur, fermeté, adhésivité, goût, et acceptabilité globale) des macaronis sans gluten cuits.

L'évaluation sensorielle des pâtes sans gluten en termes d'apparence a montré une différence significative uniquement entre les pâtes témoins et les macaronis sans gluten contenant 1% de sels alcalins et 5 % d'IPL. Ces dernières ont reçu le score le plus élevé (6,80).

En ce qui concerne la couleur, les macaronis avec 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ont reçu le score le plus élevé (7,65) tandis que les pâtes avec des sels alcalins ont reçu les scores les plus basses (5,25 et 5,6 pour les macaronis avec 0,5% de sels alcalins et les macaronis avec 1% de sels alcalins, respectivement) par rapport aux autres pâtes ($p < 0,05$).

Aucune différence significative n'a été constatée pour les scores de fermeté des macaronis sans gluten par rapport aux pâtes témoins, sauf pour les pâtes avec 0,5% de sels alcalins qui ont reçu le score le plus bas (3,75).

Pour l'adhésivité, les pâtes avec 1% de sels alcalins ont reçu le score le plus élevé par rapport aux pâtes témoins ($p < 0,05$).

Tableau 22. Profil sensoriel et acceptabilité sensorielle globale des macaronis sans gluten cuits

Attributs	P1	P2	P3	P4	P5
Apparence	6,00±1,07 ^a	6,10±1,02 ^a	6,30±0,86 ^{ab}	6,50±1,10 ^{abc}	6,70±1,08 ^{bc}
Couleur	7,10±0,78 ^b	5,25±0,44 ^a	5,60±0,5 ^a	7,45±0,75 ^{bc}	7,65±0,67 ^c
Fermeté	4,45±1,14 ^b	3,75±1,33 ^a	4,45±1,23 ^b	5,10±0,71 ^c	4,05±0,82 ^{ab}
Adhésivité	5,90±1,51 ^a	6,20±1,15 ^a	6,90±1,37 ^b	6,10±1,20 ^{ab}	6,05±1,31 ^a
Goût	3,75±1,74 ^a	3,55±1,95 ^a	4,00±2,55 ^a	4,35±1,95 ^a	3,35±1,66 ^a
Acceptabilité globale	5,00±0,85 ^a	4,50±1,57 ^a	5,45±1,35 ^{ab}	6,00±0,79 ^b	4,95±0,75 ^a

^{a-b} Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$). P1 : macaronis sans gluten témoins à base de riz et de maïs sans aucun additif ; P2 : macaronis sans gluten avec ajout de 0,5% de sels alcalins ; P3 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins ; P4 : macaronis sans gluten avec ajout de 5% d'IPL ; P5 : macaronis sans gluten avec ajout de 1% de sels alcalins et 5% d'IPL ; IPL : isolat de protéines de lactosérum.

L'ajout des sels alcalins, d'IPL ou du mélange des deux n'a pas eu d'effet significatif sur les scores attribués aux macaronis sans gluten en termes de goût.

En ce qui concerne l'acceptabilité sensorielle globale, tous les macaronis sans gluten ont obtenu des scores acceptables (≥ 5) à l'exception des pâtes avec 0,5% de sels alcalins et des pâtes avec 1% de sels alcalin et 5% d'IPL.

Conclusion

La présente thèse avait comme objectifs d'étudier l'effet du lactosérum acide et du lactosérum doux sur la qualité culinaire et sensorielle des spaghettis sans gluten d'une part, et d'étudier l'effet des sels alcalins et/ou d'isolat de protéines de lactosérum sur la qualité technologique et sensorielle des macaronis sans gluten d'autre part.

Les résultats de l'étude de l'effet du lactosérum acide et doux sur la qualité culinaire et sensorielle des spaghettis sans gluten à base de riz et de maïs ont permis de faire ressortir les conclusions suivantes :

- L'utilisation de lactosérum doux et de lactosérum acide a augmenté le temps optimal de cuisson des spaghettis alimentaires sans gluten ;
- Les pertes à la cuisson n'ont pas été affectées par l'incorporation de lactosérum, sauf pour les spaghettis sans gluten avec 25 et 50% de lactosérum acide qui ont enregistré des valeurs significativement plus faibles que les autres pâtes sans gluten ;
- L'ajout de 50% de lactosérum a eu un effet positif sur les attributs sensoriels en améliorant la fermeté, l'adhésivité, le goût et l'acceptabilité globale des spaghettis sans gluten.

Les résultats de l'effet de l'incorporation de sels alcalins et/ou d'isolat de protéines de lactosérum sur la qualité technologique et sensorielle des pâtes sans gluten nous ont amenés aux conclusions suivantes :

- La viscosité des macaronis a été améliorée par l'ajout de 5% d'IPL par rapport aux pâtes témoins;
- Une augmentation de la capacité d'absorption d'eau a été enregistrée pour les pâtes avec 1% des sels alcalins et 5% d'IPL;
- L'incorporation des sels alcalins ou d'IPL a augmenté l'indice de jaune des macaronis ;
- Tous les macaronis sans gluten ont obtenu des scores acceptables pour l'acceptabilité sensorielle globale (≥ 5) à l'exception des macaronis avec 0,5% de sels alcalins et des macaronis avec 1% de sels et 5% d'IPL ;
- L'ajout de sels alcalins a diminué la CAE des macaronis alors que les pertes à la cuisson ont été augmentées comparativement aux macaronis témoins ;
- L'ajout de 5% d'IPL n'a pas eu d'effet sur la CAE, mais il a augmenté les pertes à la cuisson des macaronis en comparant avec les macaronis témoins ;
- La viscosité des macaronis a été augmentée par l'ajout des sels alcalins ;

- L'ajout des sels alcalins et/ou d'IPL a entraîné une diminution de la fermeté et de l'énergie totale de compression-extrusion des macaronis sans gluten comparativement aux macaronis témoins.

En perspectives, il serait intéressant de :

- ✓ Caractériser la microstructure des pâtes sans gluten ;
- ✓ Tester d'autres formules pour la fabrication des pâtes sans gluten ;
- ✓ Ajouter d'autres additifs qui peuvent améliorer la qualité des pâtes sans gluten ;
- ✓ Utiliser d'autres méthodes physiques pour la fabrication des pâtes sans gluten.

Références bibliographiques

- 1) AACC. (1995). Method 08-03: Total Ash, Method 46-13: Crude Protein—Micro-Kjeldahl Method. In *Approved Methods of American Association of Cereal Chemistry*, Saint Paul, Minnesota.
- 2) AACC. (2000). *Approved methods of the American Association of Cereal Chemists*, 10th edition Saint Paul, Minnesota, USA. American Association of Cereal Chemists International, 1200 p.
- 3) Adejuwon, O. H., Jideani, A. I., & Falade, K. O. (2020). Quality and public health concerns of instant noodles as influenced by raw materials and processing technology. *Food Reviews International*, 36(3), 276-317.
- 4) AFNOR (Association Française de Normalisation) (1991). *Lait et produits laitiers, méthodes d'analyse*. Paris, 286 p.
- 5) AFNOR (Association Française de Normalisation) (1986). *Contrôle de la qualité des produits laitiers*. Paris, 1030 p.
- 6) 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.
- 7) AFNOR (Association française de normalisation). (1993). *Contrôle de la qualité des produits alimentaires: lait et produits laitiers: analyses physico-chimiques*. Paris, 562 p.
- 8) Ahmed, D. M., Hafez, O. M., & Fouad, A. (2007). Integrated control of postharvest decay on blood orange fruits by curing, hot water and sodium carbonate applications. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 3(6), 590-598.
- 9) Ahmed, I., Qazi, I. M., Li, Z., & Ullah, J. (2016). Rice Noodles : Materials, Processing and Quality Evaluation. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: B. Life and Environmental Sciences*, 53, 215-238.
- 10) Alvarado, C. Z., & Sams, A. R. (2003). Injection marination strategies for remediation of pale, exudative broiler breast meat. *Poultry Science*, 82(8), 1332-1336.
- 11) Anand, S., Som Nath, K., Chenchaiyah, M. (2013). Whey and Whey Products. In Y. W. Park & G. F. W. Haenlein (Éds.), *Milk and Dairy Products in Human Nutrition* (p. 477-497). John Wiley & Sons.
- 12) OAC International (2000). *Official Methods of Analysis*, 18th ed. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- 13) Arendt, E. K., Dall Bello, F. (2008). *Gluten-free cereal products and beverages* (1st Ed). Elsevier, Acad. Press.
- 14) Åsli, M., & Mørkøre, T. (2012). Brines added sodium bicarbonate improve liquid retention and sensory attributes of lightly salted Atlantic cod. *LWT-Food science and technology* 46 (1), 196-202.
- 15) Baldasso, C., Barros, T. C., & Tessaro, I. C. (2011). Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. *Desalination*, 278 (1-3), 381-386.
- 16) Barukčić, I., Jakopović, KL., & Božanić, R (2019). Whey and Buttermilk—Neglected Sources of Valuable Beverages, in: Grumezescu AL, Holban AM, editors. *Natural Beverages*, Cambridge: E-Publishing, p. 209–242.

- 17) Bauer, W. J., Badoud, R., & Löliiger, J. (2010). Science et technologie des aliments : Principes de chimie des constituants et de technologie des procédés. PPUR Presses polytechniques.
- 18) Bertrand, G (1906). Le dosage de sucres reducteurs. *Bull Soc Chim* 35, 1285–1299.
- 19) Blažić, M., Zavadlav, S., Kralj, E., & Šarić, G. (2018). Production of whey protein as nutritional valuable foods. *Croatian journal of food science and technology*, 10 (2), 255-260.
- 20) Boudalia, S., Gueroui, Y., Boumaza, B., Bousbia, A., Benada, M., Leksir, C., Mezroua, E. Y., Zemmouchi, K. R., Saoud, A., & Chemmam, M. (2020). Evaluation of Physicochemical Properties and Sensory Qualities of Pasta Enriched with Freeze-Dried Sweet Whey. *Scientia agriculturae bohemica*, 51(3), 75-85.
- 21) 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*, 75, 569-577.
- 22) Boucheham, N., Galet, L., Patry, S., & Zidoune, M. N. (2019). Physicochemical and hydration properties of different cereal and legume gluten-free powders. *Food Science & Nutrition*, 7(9), 3081-3092.
- 23) Božanić, R., Barukčić, I., & Lisak, K. (2014). Possibilities of whey utilisation. *Austin Journal of Nutrition and Food Sciences*, 2 (7), 7.
- 24) Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 72(1-2), 248-254.
- 25) Brites, L. T., Schmiele, M., & Steel, C. J. (2018). Gluten-Free bakery and pasta products. *Alternative and replacement foods*, 385-410.
- 26) Cai, J., Chiang, J.H., Tan, M.Y.P., Saw, L.K., Xu, Y. & Ngan-Loong, M.N. (2016). Physicochemical properties of hydrothermally treated glutinous rice flour and xanthan gum mixture and its application in gluten-free noodles. *Journal of Food Engineering*, 186, 1–9.
- 27) Cabanillas, B. (2020). Gluten-related disorders : Celiac disease, wheat allergy, and nonceliac gluten sensitivity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60 (15), 2606-2621.
- 28) 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*, 47(2), 421-426.
- 29) Campos, B. V. P., & Almeida, E. L. (2021). Gluten-free pasta elaborated with taro flour (*Colocasia esculenta*) : A study of the employ of egg white and transglutaminase on the technological properties. *Research, Society and Development*, 10(1), e52710111454.
- 30) Carini, E., Vittadini, E., Curti, E., & Antoniazzi, F. (2009). Effect of different shaping modes on physico-chemical properties and water status of fresh pasta. *Journal of Food Engineering*, 93, 400-406.

- 31) Carini, E., Vittadini, E., Curti, E., Antoniazzi, F., & Viazzani, P. (2010). Effect of different mixers on physicochemical properties and water status of extruded and laminated fresh pasta. *Food Chemistry*, 122(2), 462-469.
- 32) Carini, E., Curti, E., Minucciani, M., Antoniazzi, F. & Vittadini, E. (2013). Pasta. In: *Engineering Aspects of Cereal and Cereal-Based Products* (edited by R.D.P.F. Guine & P.M. dos Reis Correira). Pp. 211–238. Boca Raton: CRC Press.
- 33) Chandan, RC., Kilara, A., & Shah, NP(2009). *Dairy processing and quality assurance*. United States: Wiley-Blackwell, 586 p.
- 34) 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 Science and Technology*, 41(4), 642-651.
- 35) Chaudhary, D. P., Kumar, S., & Langyan, S. (Eds.). (2014). *Maize in: nutrition dynamics and novel uses*. Pp. 3-17. New Delhi: Springer India.
- 36) Cheftel, J. C., & Lorient, D. (1982). Les propriétés fonctionnelles des protéines laitières et leur amélioration. *Le Lait*, 62(617-620), 435-483
- 37) 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(4), 492-500.
- 38) 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(1), 101-107.
- 39) Chu, Y. (2004). Study on the influence of alkaline condition to the rheology property of flour dough (English abstract only). *Food Science and Technology*, 3, 83-85.
- 40) Codex Alimentarius. (1995). Norme Codex pour la farine de blé. Codex Stand 152-1985 (Rév. 1995). Céréales, légumes secs, légumineuses et matières protéiques végétales. 1-4. <http://www.fao.org/3/a-a1392f.pdf>.
- 41) Cohen, I. S., Day, A. S., & Shaoul, R. (2019). Gluten in Celiac Disease—More or Less?. *Rambam Maimonides Medical Journal*, 10(1).
- 42) Comino, I., de Lourdes Moreno, M., Real A., Rodríguez-Herrera, A., Barro, F., & Sousa, C. (2013). The Gluten-Free Diet: Testing Alternative Cereals Tolerated by Celiac Patients. *Nutrients*, 5(10), 4250-4268.
- 43) Conte, P., Fadda, C., Drabinska, N., & Krupa-Kozak, U. (2019). Technological and nutritional challenges, and novelty in gluten-free breadmaking: A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 69(1).
- 44) Culetu, A., Susman, I. E., Duta, D. E., & Belc, N. (2021). Nutritional and Functional Properties of Gluten-Free Flours. *Applied Sciences*, 11(14), 6283.
- 45) Czaja-Bulsa, G., & Bulsa, M. (2018). Adherence to gluten-free diet in children with celiac disease. *Nutrients*, 10(10), 1424.
- 46) da Silva, J.P., Scapim, M.R., Monteiro, A.R., de Oliveira, E.R., & Madrona, G.S. (2013). Development of rice flour pasta for gluten induced enteropathy patients. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 3, 101–104.

- 47) de Lima, B. R., Botelho, R. B. A., & Zandonadi, R. P. (2019). Gluten-Free Pasta : Replacing Wheat with Chickpea. *Journal of Culinary Science & Technology*, 17(1), 1-8.
- 48) Del Nobile, M. A., Buonocore, G. G., Panizza, A., & Gambacorta, G. (2003). Modeling the spaghetti hydration kinetics during cooking and overcooking. *Journal of food science*, 68(4), 1316-1323.
- 49) Del Nobile, M. A., Baiano, A., Conte, A., & Mocchi, G. (2005). Influence of protein content on spaghetti cooking quality. *Journal of Cereal Science*, 41(3), 347-356.
- 50) Deleu, L. J., Lambrecht, M. A., Van de Vondel, J., & Delcour, J. A. (2019). The impact of alkaline conditions on storage proteins of cereals and pseudo-cereals. *Current Opinion in Food Science*, 25, 98-103.
- 51) De Noni, I., & Pagani, M. A. (2010). Cooking properties and heat damage of dried pasta as influenced by raw material characteristics and processing conditions. *Critical reviews in food science and nutrition*, 50(5), 465-472.
- 52) Dib A., Wójtowicz A., Benatallah L., Bouasla A., & Zidoune MN (2018). Effect of hydrothermal treated corn flour addition on the quality of corn-field bean gluten-free pasta. *BIO Web of Conferences*, 10, 02003.
- 53) El Khoury, D., Balfour-Ducharme, S., & Joye, I. J. (2018). A Review on the Gluten-Free Diet : Technological and Nutritional Challenges. *Nutrients*, 10(10), 1410.
- 54) Emerton, V., & Choi, E. (2008). *Essential guide to food additives*. Royal Society of Chemistry.
- 55) Fabbri, A. D., & Crosby, G. A. (2016). A review of the impact of preparation and cooking on the nutritional quality of vegetables and legumes. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 3, 2-11.
- 56) Fan, H., Ai Z., Chen, Y., Fu F., & Bian, K. (2018). Effect of alkaline salts on the quality characteristics of yellow alkaline noodles. *Journal of Cereal Science*, 84, 159-167.
- 57) Feillet, P. (2000). Le grain de blé, composition et utilisation. Institut national de la recherche agronomique, INRA, Paris, 308 p.
- 58) Ferreira, S. M. R., de Mello, A. P., de Caldas Rosa dos Anjos, M., Krüger, C. C. H., 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.
- 59) Fiorda, F. A., Soares, M. S., 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(1), 132-138.
- 60) Foschia, M., Beraldo, P., & Peressini, D. (2017). Evaluation of the physicochemical properties of gluten-free pasta enriched with resistant starch : Gluten-free pasta enriched with resistant starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(2), 572-577.
- 61) Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H. (2017). Whey and Whey Products. In P. F. Fox, T. P. Guinee, T. M. Cogan, & P. L. H. McSweeney, *Fundamentals of Cheese Science* (p. 755-769).

- 62) Fradinho, P., Sousa, I., & Raymundo, A. (2019). Functional and thermorheological properties of rice flour gels for gluten-free pasta applications. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(4), 1109-1120.
- 63) Fu, B. X. (2008). Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing. *Food Research International*, 41(9), 888-902.
- 64) 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.
- 65) Gallagher, E. (Ed.). (2009). *Gluten-free food science and technology*. John Wiley & Sons.
- 66) Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzman, N. E., Gonzalez-Laredo, R. F., Ochoa-Martínez, L. A., Corzo, N., Bello-Perez, L. A. & Peralta-Alvarez, L. E. (2010). Quality of spaghetti pasta containing Mexican common bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, 119(4), 1544-1549.
- 67) Ganju, S., & Gogate, P. R. (2017). A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents. *Journal of Food Engineering*, 215, 84-96.
- 68) Gao, Y., Janes, M. E., Chaiya, B., Brennan, M. A., Brennan, C. S., & Prinyawiwatkul, W. (2018). Gluten-free bakery and pasta products: prevalence and quality improvement. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(1), 19-32.
- 69) Garcia-Banos, J. L., Corzo, N., Sanz, M. L., & Olano, A. (2004). Maltulose and furosine as indicators of quality of pasta products. *Food Chemistry*, 88(1), 35-38.
- 70) Gasparre, N., Betoret, E., & Rosell, C. M. (2019). Quality indicators and heat damage of dried and cooked gluten free spaghetti. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(4), 481-488.
- 71) Gezahegn, A. M. (2021). Role of integrated nutrient management for sustainable maize production. *International Journal of Agronomy*, 2021.
- 72) Giacco, R., Vitale, M., & Riccardi, G. (2016). Pasta: Role in diet. *Encyclopedia of food and health*.
- 73) Giannetti, V., Mariani, M. B., & Mannino, P. (2013). Furosine as a pasta quality marker: evaluation by an innovative and fast chromatographic approach. *Journal of food science*, 78(7), C994-C999.
- 74) Giannetti, V., Mariani, M. B., Mannino, P., & Testani, E. (2014). Furosine and flavour compounds in durum wheat pasta produced under different manufacturing conditions: Multivariate chemometric characterization. *LWT-Food Science and Technology*, 56(1), 15-20.
- 75) 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(2), 538-545.
- 76) 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.
- 77) Gómez, M., & S. Sciarini, L. (2015). Gluten-Free Bakery Products and Pasta. In: E. Arranz, F. Fernández-Bañares, C. M. Rosell, L. Rodrigo, & A. S. Peña (Éds.),

- Advances in the Understanding of Gluten related Pathology and the Evolution of Gluten-Free Foods (1st éd., p. 565-604).
- 78) Gopalakrishnan, J., Menon, R., Padmaja, G., Sajeev, M. S., & Moorthy, S. N. (2011). Nutritional and Functional Characteristics of Protein-Fortified Pasta from Sweet Potato. *Food and Nutrition Sciences*, 02(09), 944-955.
- 79) Guezlane, L., & Abecassis, J. (1991). Méthodes d'appréciation de la qualité culinaire du couscous de blé dur. *Industries alimentaires et agricoles*, 108(11), 966-971.
- 80) Gulia, N., Dhaka, V., & Khatkar, B. S. (2014). Instant Noodles : Processing, Quality, and Nutritional Aspects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(10), 1386-1399.
- 81) Guo, X.-N., Wei, X.-M., & Zhu, K.-X. (2017). The impact of protein cross-linking induced by alkali on the quality of buckwheat noodles. *Food Chemistry*, 221, 1178-1185.
- 82) Guo, X.-N., Yang, S., & Zhu, K.-X. (2019). Influences of alkali on the quality and protein polymerization of buckwheat Chinese steamed bread. *Food Chemistry*, 283, 52-58.
- 83) Gupta, C., Pacheco, C., & Prakash, D. (2019). Lactoserum: As a Complete Nutraceutical. In: *Nutraceutical and Functional Foods in Disease Prevention*. Pp. 432-456. IGI Global.
- 84) Gwartz, J. A., & Garcia-Casal, M. N. (2014). Processing maize flour and corn meal food products : Processing methods for staple maize food products. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 66-75.
- 85) Hager, AS., Lauck, F., Zannini, E., & Arendt, EK (2012). Development of gluten-free fresh egg pasta based on oat and teff flour. *Eur Food Res Technol*, 235: 861–871.
- 86) Hatcher, D. W., Edwards, N. M., & Dexter, J. E. (2008). Effects of particle size and starch damage of flour and alkaline reagent on yellow alkaline noodle characteristics. *Cereal Chemistry*, 85(3), 425-432.
- 87) Hidalgo, A., & Brandolini, A. (2011). Evaluation of heat damage, sugars, amylases and colour in breads from einkorn, durum and bread wheat flours. *Journal of cereal science*, 54(1), 90-97.
- 88) Hoseney, R. C. (1994). *Principles of cereal science and technology*. American Association of Cereal Chemists. Inc., St. Paul, 170.
- 89) Hosseini, S.M.; Soltanizadeh, N.; Mirmoghtadaee, P.; Banavand, P.; Mirmoghtadaie, L.; & Shojaee-Aliabadi, S (2018). Gluten-free products in celiac disease: Nutritional and technological challenges and solutions. *Journal of research in medical sciences*, 23, 109.
- 90) Jovanović, S., Barać, M., & Maćej, O. (2005). Whey proteins-properties and possibility of application. *Mljekarstvo*, 55(3), 215-233.
- 91) Kahlon, T.S, & Chiu, M-C M. (2015). Teff, buckwheat, quinoa and amaranth: ancient whole grain glutenfree egg-free pasta. *Food and Nutrition Sciences*, 6(15), 1460-1467.
- 92) Kannan, R. L., Dhivya, M., Abinaya, D., Krishna, R. L., & Krishnakumar, S. (2013). Effect of integrated nutrient management on soil fertility and productivity in maize. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 2(8), 61-67.

- 93) Karamoko, G., Anihouvi, P., & Blecker, C. (2013). Évolution des connaissances sur les fonctionnalités de la fraction protéose-peptone du lait : Propriétés technofonctionnelles et biologiques (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 10.
- 94) Kaur, L., Singh, J., & Singh, N. (2005). Effect of glycerol monostearate on the physicochemical, thermal, rheological and noodle making properties of corn and potato starches. *Food Hydrocolloids*, 19, 839–849.
- 95) Kemboi, N., & Ng, E. K. (2021). Effects of adoption of csa interventions on maize productivity among small scale farmer households in moiben sub-county, kenya. 8(3), 10.
- 96) Keservani, R. K., Sharma, A. K., & Kesharwani, R. K. (Éds.). (2019). *Nutraceutical and Functional Foods in Disease Prevention*: IGI Global.
- 97) Khairuddin, M. A. N., & Lasekan, O. (2021). Gluten-Free Cereal Products and Beverages : A Review of Their Health Benefits in the Last Five Years. *Foods*, 10(11), 2523.
- 98) Khezri, S., Seyedsaleh, M. M., Hasanpour, I., Dastras, M., & Dehghan, P. (2016). Whey in: characteristics, applications and health aspects. In *International Conference on Science and Engineering*. Pp. 1-8.
- 99) Kinyanjui, P. K., Njoroge, D. M., Makokha, A. O., Christiaens, S., Ndaka, D. S., & Hendrickx, M. (2015). Hydration properties and texture fingerprints of easy-and hard-to-cook bean varieties. *Food Science & Nutrition*, 3(1), 39-47.
- 100) Kosinski, J., & Cacak-Pietrzak, G. (2020). Estimation of quality of spaghetti-form commercial gluten-free pastas. *Acta Agrophysica*, 27, 5-16.
- 101) Kumar, C. M., Sabikhi, L., Singh, A. K., Raju, P. N., Kumar, R., & Sharma, R. (2019). Effect of incorporation of sodium caseinate, whey protein concentrate and transglutaminase on the properties of depigmented pearl millet based gluten free pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 103, 19-26.
- 102) Kumar, G. S., Sh, A., Krishnan, R., & Mohammed, T. (2021). Pasta: Raw materials, processing and quality improvement. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 10, 185-197.
- 103) Kwak, H. S., Lee, W. J., & Lee, M. R. (2012). Revisiting lactose as an enhancer of calcium absorption. *International Dairy Journal*, 22(2), 147-151.
- 104) 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.
- 105) Lai, L. N., Karim, A. A., Norziah, M. H., & Seow, C. C. (2004). Effects of Na₂CO₃ and NaOH on pasting properties of selected native cereal starches. *Journal of food science*, 69(4), FCT249-FCT256.
- 106) Laleg, K., Cassan, D., Barron, C., Cordelle, S., Schlich, P., Walrand, S., & Micard, V. (2017). Qualités culinaires, sensorielles et nutritionnelles de pâtes alimentaires sans gluten à base de légumineuses. *Innovations Agronomiques*, 60, 145-156.
- 107) 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(9), e0160721.

- 108) Lamacchia, C., Camarca, A., Picascia, S., Luccia, A., & Gianfrani, C. (2014). Cereal-based gluten free food: How to reconcile nutritional and technological properties of wheat protein with safety for celiac disease patients. *Nutrients*, 6, 575-590.
- 109) Lapointe-Vignola, C. (2002). Science et technologie du lait: transformation du lait. Presses inter Polytechnique.
- 110) 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.
- 111) Larrosa, V., Lorenzo, G., Zaritzky, N., & Califano, A. (2013). Optimization of rheological properties of gluten-free pasta dough using mixture design. *Journal of Cereal Science*, 57(3), 520-526.
- 112) Lee, N., Sharma, V., Brown, N., & Mohan, A. (2015). Functional properties of bicarbonates and lactic acid on chicken breast retail display properties and cooked meat quality. *Poultry science*, 94(2), 302-310.
- 113) Leonard, M. M., Sapone, A., Catassi, C., & Fasano, A. (2017). Celiac disease and non celiac gluten sensitivity: a review. *Jama*, 318(7), 647-656.
- 114) Li, M., Sun, Q.-J., Han, C.-W., Chen, H.-H., & Tang, W.-T. (2018). Comparative study of the quality characteristics of fresh noodles with regular salt and alkali and the underlying mechanisms. *Food Chemistry*, 246, 335-342.
- 115) Linares-García, L., Repo-Carrasco-Valencia, R., Glorio Paulet, P., & Schoenlechner, R. (2019). Development of gluten-free and egg-free pasta based on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) with addition of lupine flour, vegetable proteins and the oxidizing enzyme POx. *European Food Research and Technology*, 245(10), 2147-2156.
- 116) Lionetti, E., Gatti, S., Pulvirenti, A., & Catassi, C. (2015). Celiac disease from a global perspective. *Best practice & research Clinical gastroenterology*, 29(3), 365-379.
- 117) Littardi, P., Diantom, A., Carini, E., Curti, E., Boukid, F., Vodovotz, Y., & Vittadini, E. (2019). A multi-scale characterisation of the durum wheat pasta cooking process. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(5), 1713-1719.
- 118) Lorenzo, G., Sosa, M., & Califano, A. (2018). Alternative proteins and pseudocereals in the development of gluten-free pasta, in: Holban A M, Grumezescu AM, editors. *Alternative and Replacement Foods*, London: E-Publishing, p. 433–458.
- 119) Lucisano, M., Cappa, C., Fongaro, L. & Mariotti, M. (2012). Characterisation of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: evaluation of the cooking behaviour. *Journal of Cereal Science*, 56, 667–675.
- 120) Macwan, S. R., Dabhi, B. K., Parmar, S. C., & Aparnathi, K. D. (2016). Whey and its utilization. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(8), 134-155.
- 121) Madenci, A. B., & Bilgiçli, N. (2014). Effect of Whey Protein Concentrate and Buttermilk Powders on Rheological Properties of Dough and Bread Quality : Effect of Dairy By-Products on Bread Quality. *Journal of Food Quality*, 37(2), 117-124.

- 122) Madureira, A. R., Pereira, C. I., Gomes, A. M., Pintado, M. E., & Malcata, F. X. (2007). Bovine whey proteins—Overview on their main biological properties. *Food Research International*, 40(10), 1197-1211.
- 123) Marcoa, C., & Rosell, C. M. (2008). Effect of different protein isolates and transglutaminase on rice flour properties. *Journal of Food Engineering*, 84(1), 132-139.
- 124) Mariotti, M., Iametti, S., Cappa, C., Rasmussen, P., & Lucisano, M. (2011). Characterisation of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: Evaluation of the uncooked products. *Journal of Cereal Science*, 53(3), 319-327.
- 125) 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(3), 404-409.
- 126) Marti, A., Pagani, M. A., & Seetharaman, K. (2011). Understanding starch organisation in gluten-free pasta from rice flour. *Carbohydrate Polymers*, 84(3), 1069-1074.
- 127) 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(2), 217-224.
- 128) Marti, A., & Pagani, M. A. (2013). What can play the role of gluten in gluten free pasta?. *Trends in Food Science & Technology*, 31(1), 63-71.
- 129) Mastromatteo, M., Chillo, S., Iannetti, M., Civica, V., & Del Nobile, M. A. (2011). Formulation optimisation of gluten-free functional spaghetti based on quinoa, maize and soy flours. *International journal of food science & technology*, 46(6), 1201-1208.
- 130) Melcion, J. P. (2000). La granulométrie de l'aliment: principe, mesure et obtention. *Productions animales*, 13(2), 81-97.
- 131) Melini, V., & Melini, F. (2019). Gluten-free diet: Gaps and needs for a healthier diet. *Nutrients*, 11(1), 170.
- 132) Merayo, Y. A., Gonzalez, R. J., Drago, S. L., Torres, R. L., & De Greef, D. M. (2011). Extrusion conditions and zea mays endosperm hardness affecting gluten-free spaghetti quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 2321-2328.
- 133) Mirhosseini, H., Abdul Rashid, N. F., Tabatabaee, Amid B., 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(1), 184-190.
- 134) Modler, W. (2009). Pioneer paper: Value-added components derived from whey. *American Dairy Science Association*, 1-33.
- 135) Mohan, A., Jaico, T., Kerr, W., & Singh, R. (2016). Functional properties of bicarbonates on physicochemical attributes of ground beef. *LWT- Food Science and Technology*, 70, 333-341.
- 136) Morreale, F., Boukid, F., Carini, E., Federici, E., Vittadini, E., & Pellegrini, N. (2019). An overview of the Italian market for 2015 : Cooking quality and nutritional value of gluten-free pasta. *International Journal of Food Science & Technology*, 54, 780-786.

- 137) Moss, H. J., Miskelly, D. M., & Moss, R. (1986). The effect of alkaline conditions on the properties of wheat flour dough and cantonese-style noodles. *Journal of Cereal Science*, 4, 261–268.
- 138) Munaza, B, Prasad, SGM, Gayas, B. (2012). Whey protein concentrate enriched cookies. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2, 165-173.
- 139) Nagar, S., & Nagal, S. (2013). Whey : Composition, Role in Human Health and its Utilization in Preparation of Value Added Products. *International Journal of Food and Fermentation Technology*, 3(2), 93.
- 140) Nouviaire, A., Lancien, R., & Maache-Rezzoug, Z. (2008). Influence of hydrothermal treatment on rheological and cooking characteristics of fresh egg pasta. *Journal of Cereal Science*, 47(2), 283-291.
- 141) Nuss, E. T., & Tanumihardjo, S. A. (2010). Maize : A Paramount Staple Crop in the Context of Global Nutrition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(4), 417-436.
- 142) Onwulata, C., & Huth, P. (Eds.). (2009). Whey processing, functionality and health benefits (Vol. 82). John Wiley & Sons.
- 143) Oko, A. O., Ubi, B. E., Efisue, A. A., & Dambaba, N. (2012). Comparative Analysis of the Chemical Nutrient Composition of Selected Local and Newly Introduced Rice Varieties Grown in Ebonyi State of Nigeria. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 2(2), 16-23.
- 144) Padalino, L., Mastromatteo, M., Sepielli, G., & Nobile, M. A. D. (2011). Formulation Optimization of Gluten-Free Functional Spaghetti Based on Maize Flour and Oat Bran Enriched in b-Glucans. *Materials*, 4(12), 2119-2135.
- 145) Padalino, L., Mastromatteo, M., Lecce, L., Cozzolino, F., & Del Nobile, M. A. (2013). Manufacture and characterization of gluten-free spaghetti enriched with vegetable flour. *Journal of Cereal Science*, 57(3), 333-342.
- 146) Padalino, L., Mastromatteo, M., Lecce, L., Spinelli, S., Conte, A., & Alessandro Del Nobile, M. (2015). Optimization and characterization of gluten-free spaghetti enriched with chickpea flour. *International journal of food sciences and nutrition*, 66(2), 148-158.
- 147) Padalino, L., Conte, A., & Del Nobile, M. (2016). Overview on the General Approaches to Improve Gluten-Free Pasta and Bread. *Foods*, 5, 87.
- 148) 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.
- 149) Panesar, P. S., & Kennedy, J. F. (2012). Biotechnological approaches for the value addition of whey. *Critical Reviews in Biotechnology*, 32(4), 327-348.
- 150) Panghal, A., Patidar, R., Jaglan, S., Chhikara, N., Khatkar, S. K., Gat, Y., & Sindhu, N. (2018). Whey valorization : Current options and future scenario – a critical review. *Nutrition & Food Science*, 48(3), 520-535.
- 151) Prabhasankar, P., Rajiv, J., Indrani, D., & Rao, G. V. (2007). Influence of whey protein concentrate, additives, their combinations on the quality and microstructure of vermicelli made from Indian T. Durum wheat variety. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1239-1245.

- 152) Petitot, M., Abecassis, J., & Micard, V. (2009). Structuring of pasta components during processing: impact on starch and protein digestibility and allergenicity. *Trends in Food Science & Technology*, 20(11-12), 521-532.
- 153) 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(2), 634-641.
- 154) Petracci, M., Bianchi, M., Mudalal, S., & Cavani, C. (2013). Functional ingredients for poultry meat products. *Trends in Food Science & Technology*, 33(1), 27-39.
- 155) Pétrus, M., Jésus, J., Cossarizza, G., Torregrosa, A., Gardes, H., Ingarao, J.-P., & Dutau, G. (2009). Allergie à la farine de maïs. À propos d'une nouvelle observation chez un enfant de huit ans. *Revue Française d'Allergologie*, 49(4), 379-382.
- 156) 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.
- 157) Rachman, A., Brennan, M. A., Morton, J., & Brennan, C. S. (2019). Effect of egg white protein and soy protein fortification on physicochemical characteristics of banana pasta. *Journal of food processing and preservation*, 43(9), e14081.
- 158) Rafiq, S. I., Singh, S., & Saxena, D. C. (2016). Effect of alkali-treatment on physicochemical, pasting, thermal, morphological and structural properties of Horse Chestnut (*Aesculus indica*) starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(3), 676-684.
- 159) Rafiq, A., Sharma, S., & Singh, B. (2017). Regression analysis of gluten-free pasta from brown rice for characterization and in vitro digestibility. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41, e12830.
- 160) Rani, M. (2018). Selection of suitable form of processing of cereal (pearl millet & moth bean) for preparation of whey-cereal based fermented beverage (Lassi) prepared by using ncdc-167 culture and 1% fat content. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 7 (7), 790-795.
- 161) Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., & Garcia-Casal, M. N. (2014). Global maize production, utilization, and consumption: Maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105-112.
- 162) Reepholkul, K., & Charoenrein, S. (2013). Effect of sodium carbonate on appearance and textural properties of glutinous rice cake. *International journal of food science & technology*, 48(10), 2185-2192.
- 163) Reilly, N. R. (2016). The gluten-free diet: Recognizing fact, fiction, and fad. *The Journal of Pediatrics* 175:206–10.
- 164) Rocchetti, G., Lucini, L., Rodriguez, J. M. L., Barba, F. J., & Giuberti, G. (2019). Gluten-free flours from cereals, pseudocereals and legumes: Phenolic fingerprints and in vitro antioxidant properties. *Food Chemistry*, 271, 157-164.
- 165) Romain, J., Thomas, C., Michel, M., & Pierre, S. et Gérard B.(2008). Les Produits Laitiers (2e Ed.). TD Lavoisier. Place TD Lavoisier. Paris, France, 200p. Rombouts, I., Jansens, K. J. A., Lagrain, B., Delcour, J. A., & Zhu, K.-X. (2014). The impact of salt and alkali on gluten polymerization and quality of fresh wheat noodles. *Journal of Cereal Science*, 60(3), 507-513.

- 166) Rombouts, I., Jansens, K. J., Lagrain, B., Delcour, J. A., & Zhu, K. X. (2014). The impact of salt and alkali on gluten polymerization and quality of fresh wheat noodles. *Journal of cereal Science*, 60(3), 507-513.
- 167) Rosell, C. M., Barro, F., Sousa, C., & Mena, M. C. (2014). Cereals for developing gluten-free products and analytical tools for gluten detection. *Journal of cereal science*, 59(3), 354-364.
- 168) Rosell, C. M., & Marco, C. (2008). Rice. In E. K. Arendt, & F. Dal Bello (Eds.), *Gluten free cereal products and beverages*. Pp. 81-100. London: Academic Press.
- 169) Sakre, N., Das, A. B., & Srivastav, P. P. (2016). Fuzzy Logic Approach for Process Optimization of Gluten-Free Pasta : Fuzzy Logic Approach for Process Optimization. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(5), 840-849.
- 170) Saltmarsh, M., & Saltmarsh, M. (Eds.). (2013). *Essential guide to food additives*. Royal Society of Chemistry.
- 171) Sapone, A., J. C. Bai, C. Ciacci, J. Dolinsek, P. H. Green, M. Hadjivassiliou, K. Kaukinen, K. Rostami, D. S. Sanders, M. Schumann, et al. (2012). Spectrum of gluten-related disorders: Consensus on new nomenclature and classification. *BMC Medicine* 10 (1):13.
- 172) Sayad, L, Kherici-Bousnoubra, H, Drouiche, N, Houhamdi, M, Kherici, N (2014). Calculation and interpretation of effluent discharge objectives of dairy industry: Case Edough's dairy – Annaba (Algeria). *Ecological Engineering*, 73, 421–424.
- 173) Schoenlechner, R., Drausinger, J., Ottenschlaeger, V., Jurackova, K., & Berghofer, E. (2010). Functional Properties of Gluten-Free Pasta Produced from Amaranth, Quinoa and Buckwheat. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(4), 339-349.
- 174) Seelam, B. S., David, J., & Kumari, A. (2017). Effect of sweet potato flour and whey protein concentrate on dough for preparation of cookies. *The Pharma Innovation*, 6(5, Part B), 99.
- 175) Semassa, A. J., Padonou, S. W., Anihouvi, V. B., Akissoé, N. H., Adjanohoun, A., & Baba-Moussa, L. (2016). Diversité Variétale, Qualité Et Utilisation Du Maïs (Zea Mays) En Afrique De l'Ouest : Revue Critique. *European Scientific Journal*, ESJ, 12(18), 197.
- 176) Sikora, M., Świeca, M., Gawlik-Dziki, U., Złotek, U., & Baraniak, B. (2018). Nutritional quality, phenolics, and antioxidant capacity of mung bean paste obtained from seeds soaked in sodium bicarbonate. *LWT*, 97, 456-461.
- 177) Silva, E., Sagis, L. M. C., van der Linden, E., & Scholten, E. (2013). Effect of matrix and particle type on rheological, textural and structural properties of broccoli pasta and noodles. *Journal of Food Engineering*, 119(1), 94-103.
- 178) Silva, E M 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.
- 179) Sinha, R., Radha, C., Prakash, J., & Kaul, P. (2007). Whey protein hydrolysate: Functional properties, nutritional quality and utilization in beverage formulation. *Food Chemistry*, 101(4), 1484-1491.

- 180) Singh, RS. (2014). Biotechnological Approaches for Valorization of Whey, in: Singh RS, Pandey A, Larroche Q, editors. *Advance in Industrial Biotechnology*, New Delhi: IK International-Publishing, p. 443-478.
- 181) Singh, R. (2016). Whey Proteins and Their Value-Added Applications. In *Protein Byproducts* (pp. 303-313). Academic Press.
- 182) Singh, N., Singh, S., & Shevkani, K. (2019). Maize : Composition, Bioactive Constituents, and Unleavened Bread. In *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention* (p. 111-121). Elsevier.
- 183) Sissons, M., Abecassis, J., Marchylo, B., & Cubadda, R. (2012). Methods used to assess and predict quality of durum wheat, semolina, and pasta, in: Sissons M, AbecassisJ, Marchylo B, Carcia M, editors. *Durum Wheat*, Saint Paul: E-Publishing, p. 213–234.
- 184) Sissons, M. (2016). Durum wheat chemistry and technology. *Encyclopedia of Food Grains*, 2nd Edition, pp 117-124.
- 185) Smithers, G. W. (2008). Whey and whey proteins—From ‘gutter-to-gold’. *International Dairy Journal*, 18(7), 695-704.
- 186) Sosa, M., Califano, A., & Lorenzo, G. (2019). Influence of quinoa and zein content on the structural, rheological, and textural properties of gluten-free pasta. *European Food Research and Technology*, 245(2), 343-353.
- 187) Sousa, G. T., Lira, F. S., Rosa, J. C., de Oliveira, E. P., Oyama, L. M., Santos, R. V., & Pimentel, G. D. (2012). Dietary whey protein lessens several risk factors for metabolic diseases: a review. *Lipids in health and disease*, 11(1), 1-9.
- 188) Sozer, N., Dalgic, A. C., & Kaya, A. (2007). Thermal, textural and cooking properties of spaghetti enriched with resistant starch. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 476-484.
- 189) Sozer, N. (2009). Rheological properties of rice pasta dough supplemented with proteins and gums. *Food Hydrocolloids*, 23(3), 849-855.
- 190) Spalatelu, C. (2012). Biotechnological valorisation of whey. *Innovative Romanian Food Biotechnology*, 10, 1.
- 191) Stoddard, F.L. (2004). Starch/chemistry. In: Wrigly, C., Corke, H., Walker, C.E. *Encyclopedia Grain Science*. Food Science Australia and Wheat CRC. ELSIVIER, Academic press, pp. 1128-1135.
- 192) Sun, X., Liu, C., & Wang, Y. (2020). Influence of Na₂CO₃ on the quality of dough with rice wine sourdough and steamed bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(5), 2261-2270.
- 193) 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(2), 613-621.
- 194) Tao, H., Li, M., Deng, H. D., Ren, K. X., Zhuang, G. Q., Xu, X. M., & Wang, H. L. (2019). The impact of sodium carbonate on physico-chemical properties and cooking qualities of starches isolated from alkaline yellow noodles. *International journal of biological macromolecules*, 137, 697-702.

- 195) Tariq, M. R., Sameen, A., Khan, M. I., Huma, N., & Yasmin, A. (2013). Nutritional and therapeutic properties of whey. *Journal of Annals Food Science and Technology*, 14, 19-26.
- 196) Thompson, T (2009). The nutritional quality of gluten –free foods. In: Gallagher E (ed) *Gluten-free food science and technology*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, pp 42–51.
- 197) Tsao, T., Beetner, G., Lorenz, K., & Frey, A. (1976). Extrusion processing of instant rice spaghetti. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie*, 9, 96–98.
- 198) Udachan, I., & Sahoo, A. K. (2017). Quality evaluation of gluten free protein rich broken rice pasta. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(3), 1378-1385.
- 199) Ungureanu-Iuga, M., Dimian, M., & Mironeasa, S. (2020). Development and quality evaluation of gluten-free pasta with grape peels and whey powders. *LWT- Food Science and Technology*, 130, 109714.
- 200) Vikal, Y., & Chawla, J. S. (2014). Molecular Interventions for Enhancing the Protein Quality of Maize. In D. P. Chaudhary, S. Kumar, & S. Langyan (Éds.), *Maize : Nutrition Dynamics and Novel Uses* (p. 49-61). Springer India.
- 201) 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.
- 202) Wang, L., Hou, G. G., Hsu, Y.-H., & Zhou, L. (2011). Effect of Phosphate Salts on the Pasting Properties of Korean Instant-Fried Noodle. *Cereal Chemistry Journal*, 88(2), 142-146.
- 203) Wang, S., Luo, H., Zhang, J., Zhang, Y., He, Z., & Wang, S. (2014). Alkali-induced changes in functional properties and in vitro digestibility of wheat starch: the role of surface proteins and lipids. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(16), 3636-3643.
- 204) Wang, X., Ma, Z., Li, X., Liu, L., Yin, X., Zhang, K., ... & Hu, X. (2018). Food additives and technologies used in Chinese traditional staple foods. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 5(1), 1-15.
- 205) Wang, J.-R., Guo, X.-N., Yang, Z., & Zhu, K.-X. (2021). Effect of sodium bicarbonate on quality of machine-made Kongxin noodles. *LWT*, 138, 110670.
- 206) Wani, S. H., Gull, A., Allaie, F., & Safapuri, T. A. (2015). Effects of incorporation of whey protein concentrate on physicochemical, texture, and microbial evaluation of developed cookies. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1), 1092406.
- 207) Wissmann, M, Hein A, Follmann, J, Rachow, N (2012). Environmental costs: Analysis of its impact and importance in the pursuit of eco-efficiency in an industry of cheese. *Custos e Agronegocio*, 8, 2–23.
- 208) Witek, M., Maciejaszek, I., & Surówka, K. (2020). Impact of enrichment with egg constituents on water status in gluten-free rice pasta–nuclear magnetic resonance and thermogravimetric approach. *Food chemistry*, 304, 125417.
- 209) Wolf, B. (2010). Polysaccharide functionality through extrusion processing. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(1-2), 50-54.
- 210) Woome, J. S., & Adedeji, A. A. (2021). Current applications of gluten-free grains – a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(1), 14-24.

- 211)** Xi, J., Xu, D., Wu, F., Jin, Z., & Xu, X. (2020). Effect of Na₂CO₃ on quality and volatile compounds of steamed bread fermented with yeast or sourdough. *Food Chemistry*, 324, 126786.
- 212)** Yadav, J. S. S., Yan, S., Pilli, S., Kumar, L., Tyagi, R. D., & Surampalli, R. Y. (2015). Cheese whey: A potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides. *Biotechnology advances*, 33(6), 756-774.
- 213)** Yalcin, S., & Basman, A. (2008). Quality characteristics of corn noodles containing gelatinized starch, transglutaminase and gum. *Journal of Food Quality*, 31(4), 465-479.
- 214)** Yao, N., Owusu-Apenten, R., Zhu, L., & Seetharaman, K. (2006). Effect of Alkali Dipping on Dough and Final Product Quality. *Journal of Food Science*, 71(3), C209-C215.
- 215)** Zannini, E., Jones, J. M., Renzetti, S., & Arendt, E. K. (2012). Functional replacements for gluten. *Annual review of food science and technology*, 3, 227-245.

ANNEXES

Annexe 1 : Bulletin d'analyse sensorielle des pâtes cuites

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

	001	070	550
Apparence			
Couleur			
Fermeté			
Adhésivité			
Goût			
Acceptabilité globale			

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 ; 9 : aimé extrêmement.

Annexe 2 : Tableau de correspondance entre la quantité de lactose hydraté, exprimée en milligrammes, et le volume de la solution de permanganate de potassium 0,1 N

KMnO ₄ 0,1N	Lactose hydraté	KMnO ₄ 0,1N	Lactose hydraté	KMnO ₄ 0,1N	Lactose hydraté
5,0	23,8	8,9	43,0	12,8	63,1
5,1	24,1	9,0	43,5	12,9	63,6
5,2	24,6	9,1	44,0	13,0	64,1
5,3	25,1	9,2	44,5	13,1	64,7
5,4	25,6	9,3	45,0	13,2	65,2
5,5	26,1	9,4	45,5	13,3	65,7
5,6	26,6	9,5	46,0	13,4	66,2
5,7	27,1	9,6	46,5	13,5	66,8
5,8	27,6	9,7	47,1	13,6	67,3
5,9	28,0	9,8	47,6	13,7	67,8
6,0	28,5	9,9	48,1	13,8	68,4
6,1	29,0	10,0	48,6	13,9	68,9
6,2	29,5	10,1	49,1	14,0	69,4
6,3	30,0	10,2	49,6	14,1	69,9
6,4	30,5	10,3	50,1	14,2	70,5
6,5	31,0	10,4	50,6	14,3	71,0
6,6	31,5	10,5	51,2	14,4	71,5
6,7	32,0	10,6	51,7	14,5	72,0
6,8	32,5	10,7	52,2	14,6	72,6
6,9	33,0	10,8	52,7	14,7	73,1
7,0	33,5	10,9	53,2	14,8	73,6
7,1	34,0	11,0	53,7	14,9	74,1
7,2	34,5	11,1	54,2	15,0	74,7
7,3	35,0	11,2		54,8	
7,4	35,5	11,3		55,3	
7,5	36,0	11,4		55,8	
7,6	36,5	11,5		56,3	
7,7	37,0	11,6		56,8	
7,8	37,5	11,7		57,4	
7,9	38,0	11,8		57,9	
8,0	38,5	11,9		58,4	
8,1	39,0	12,0		58,9	
8,2	39,5	12,1		59,9	
8,3	40,0	12,2		60,0	
8,4	40,5	12,3		60,5	
8,5	41,0	12,4		61,0	
8,6	41,5	12,5		61,5	
8,7	42,0	12,6		62,1	
8,8	42,5	12,7		62,6	

الملخص

كان الهدف الأول للأطروحة هو دراسة تأثير مصّل اللبّن (الحلو والحامض) على جودة الطهي و الجودة الحسية للسباجيتي الخالية من الغلوتين المصنوعة من الأرز والذرة (1/2). كانت مستويات الدمج 25 و 50 و 75 و 100%. تم اعتبار السباجيتي الخالية من الغلوتين المحضرة بدون إضافة مصّل اللبّن و السباجيتي التجارية المصنوعة من القمح الصلب كعناصر مقارنة. تم تقييم جودة الطهي (وقت الطهي الأمثل ، سعة امتصاص الماء وكمية المادة المفقودة أثناء الطهي) بالإضافة إلى القبول الحسي. أظهرت نتائج جودة الطهي أن السباجيتي الخالية من الغلوتين المحضرة مع إضافة مصّل اللبّن (حامض أو حلو) لها أوقات طهي مثالية أطول بكثير ($p < 0.05$) من السباجيتي الخالية من الغلوتين ، ولكن بشكل ملحوظ ($P < 0.05$) أقل من تلك الموجودة في سباجيتي القمح الصلب. انخفضت قدرة امتصاص الماء مع زيادة مستويات دمج مصّل اللبّن الحامض أو الحلو وامتصاص المعكرونة الخالية من الغلوتين كمية أقل من الماء مقارنة بالقمح الصلب. وقد تأثرت كمية المادة المفقودة أثناء الطهي بدمج 25 و 50% مصّل اللبّن الحامض. أشارت نتائج القبول الحسي إلى أنه تم تحسين الصلابة والالتصاق والنزق والمقبولية العامة للسباجيتي الخالية من الغلوتين بإضافة 50% مصّل اللبّن الحامض.

الهدف الثاني من الأطروحة هو دراسة تأثير الأملاح القلوية (كربونات الصوديوم والبوتاسيوم) و / أو بروتين مصّل اللبّن المعزول (IWP) على جودة المعكرونة الخالية من الغلوتين ، كانت مستويات الإضافة: 0.5 و 1% أملاح قلوية ، 5% IWP و 1% أملاح قلوية مع 5% IWP. تم تقييم جودة العينات المختلفة من المعكرونة الخالية من الغلوتين من حيث: خصائص اللزوجة، واللون ، وجودة الطهي (وقت الطهي الأمثل ، وامتصاص الماء وكمية المادة المفقودة أثناء الطهي) وخواص الملمس (الصلابة وطاقة الضغط البثق) و القبول الحسي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن لزوجة المعكرونة زادت معنوياً بإضافة الأملاح القلوية ، بينما انخفضت معنوياً بإضافة 5% IWP. أدت إضافة الأملاح القلوية إلى انخفاض في قدرة امتصاص الماء بينما زادت كمية المادة المفقودة أثناء الطهي. إضافة 5% IWP أدى إلى زيادة كبيرة في كمية المادة المفقودة أثناء الطهي ؛ بالنسبة للمعكرونة التي تحتوي على 1% أملاح قلوية و 5% IWP ، تم تسجيل زيادة غير معنوية ($p > 0.05$) في قدرة امتصاص الماء ، لذلك لم يحدث أي تغير معنوي في كمية المادة المفقودة أثناء الطهي. أدى دمج الأملاح القلوية إلى تقليل الإنارة وزيادة احمرار وصفرة المعكرونة الجافة والمطبوخة ؛ أدى دمج IWP في المعكرونة الخالية من الغلوتين إلى زيادة معنوية في مؤشر لمعان وصفرة المعكرونة الجافة ، بينما انخفضت هذه المتغيرات في حالة المعكرونة المطبوخة. أدت إضافة الأملاح القلوية و / أو IWP إلى انخفاض معنوي في الصلابة والطاقة الكلية للضغط والبثق للمعكرونة الخالية من الغلوتين. حققت جميع المعكرونة الخالية من الغلوتين درجات مقبولة للقبول الحسي الكلي (5) باستثناء المعكرونة التي تحتوي على 0.5% أملاح قلوية ومعكرونة مع 1% أملاح و 5% IWP.

الكلمات المفتاحية: معكرونة خالية من الغلوتين ، أرز ، ذرة ، مصّل اللبّن الحلو والحامض ، IWP ، أملاح قلوية ، الجودة التكنولوجية ، القبول الحسي.

Abstract

The first objective of the thesis was to study the effect of whey (sweet and acid) on cooking and sensory quality of gluten-free spaghetti based on a rice-corn formula (2/1). Incorporation levels were 25, 50, 75 and 100%. Gluten-free pasta without added whey and commercial wheat-based pasta were considered as controls. The results showed that gluten-free spaghetti with whey had a significantly higher optimal cooking time than those of control gluten-free spaghetti, but significantly lower than those of wheat-based spaghetti. Water absorption capacity decreased with increasing levels of acid or sweet whey incorporation and gluten-free spaghetti absorbed less water than wheat-based spaghettis. Cooking loss was reduced by the incorporation of 25 and 50% acid whey. Regarding sensory quality, firmness, stickiness, taste and overall acceptability of glutenfree spaghetti were improved by the addition of 50% acid whey. The second objective of the thesis was to study the effect of alkaline salts (sodium and potassium carbonates) and/or whey protein isolate (WPI) on the quality of gluten-free macaroni. Incorporation levels were 0.5 and 1% alkaline salts, 5% WPI and 1% alkaline salts with 5% WPI. The quality of gluten-free macaroni was evaluated in terms of viscosity properties, color, geometric characteristics, cooking quality, texture and sensory analysis. The results showed that the viscosity of macaroni increased significantly with the addition of alkaline salts, while it decreased significantly with the addition of 5% WPI. The addition of alkaline salts decreased significantly water absorption capacity while cooking loss increased significantly. The addition of 5% WPI increased significantly cooking loss. The incorporation of alkaline salts decreased significantly the luminance and increased the redness and the yellowness of dry and cooked macaroni. The incorporation of WPI increased significantly the luminance and yellowness of dry macaroni, while in the case of cooked macaroni these parameters were lower. The addition of alkaline salts and/or WPI resulted in a significant decrease in firmness and total compression-extrusion energy of gluten-free macaroni. All gluten-free macaroni obtained acceptable scores for overall sensory acceptability (≥ 5) except macaroni with 0.5% alkaline salts and macaroni with 1% salts and 5% WPI.

Keywords: gluten-free pasta, rice, corn, whey, whey proteins isolate, alkaline salts, technological quality, sensory quality.

Résumé

Le premier objectif de la thèse était d'étudier l'effet du lactosérum (doux et acide) sur la qualité culinaire et sensorielle des spaghettis sans gluten à base d'une formule riz-maïs (2/1). Les niveaux d'incorporation étaient de 25, 50, 75 et 100%. Des pâtes sans gluten sans ajout de lactosérum et des pâtes commerciales à base de blé dur ont été considérées comme des témoins. Les résultats ont montré que les spaghettis sans gluten avec du lactosérum avaient un temps optimal de cuisson significativement plus élevé que ceux de spaghettis sans gluten témoins, mais significativement plus bas que ceux de spaghettis à base de blé dur. La capacité d'absorption de l'eau a diminué avec l'augmentation des niveaux d'incorporation de lactosérum acide ou doux et les spaghettis sans gluten ont absorbées une quantité d'eau inférieure à celle du témoin de blé dur. Les pertes à la cuisson ont été diminuées par l'incorporation de 25 et 50% de lactosérum acide. Concernant la qualité sensorielle, la fermeté, l'adhésivité, le goût et l'acceptabilité globale des spaghettis sans gluten ont été améliorés par l'ajout de 50% de lactosérum acide. Le deuxième objectif de la thèse était d'étudier l'effet des sels alcalins (carbonates de sodium et de potassium) et/ou d'isolat de protéines de lactosérum (IPL) sur la qualité des macaronis sans gluten. Les niveaux d'incorporation étaient 0,5 et 1% de sels alcalins, 5% d'IPL et 1% des sels alcalins avec 5% d'IPL. La qualité des macaronis sans gluten a été évaluée en termes de propriétés de viscosité, couleur, caractéristiques géométriques, qualité culinaire, texture et analyse sensorielle. Les résultats ont montré que la viscosité des macaronis a été augmentée significativement par l'ajout des sels alcalins, alors qu'elle a été significativement diminuée par l'ajout de 5% d'IPL. L'ajout de sels alcalins a significativement diminué la capacité d'absorption de l'eau alors que les pertes à la cuisson ont été significativement augmentées. L'ajout de 5% d'IPL a significativement augmenté les pertes à la cuisson. L'incorporation des sels alcalins a diminuée significativement la luminance et a augmenté l'indice de rouge et l'indice de jaune des macaronis secs et cuits. L'incorporation d'IPL a augmenté significativement la luminance et l'indice de jaune des macaronis secs, alors que dans le cas des macaronis cuits ces paramètres étaient plus faibles. L'ajout des sels alcalins et/ou d'IPL a entraîné une diminution significative de la fermeté et de l'énergie totale de compression-extrusion des macaronis sans gluten. Tous les macaronis sans gluten ont obtenu des scores acceptables pour l'acceptabilité sensorielle globale (≥ 5) à l'exception des macaronis avec 0,5% de sels alcalins et des macaronis avec 1% de sels et 5% d'IPL.

Mots clés : pâtes sans gluten, riz, maïs, lactosérum, isolat de protéines de lactosérum, sels alcalins, qualité technologique, qualité sensorielle.