

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



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



N° d'ordre :.....

N° de série :.....

## **Thèse de Doctorat en Sciences**

**Spécialité: Sciences Alimentaires**

**Thème**

---

**Diversification, enrichissement et aptitude technologique  
en panification sans gluten : valorisation de sous-produits  
de l'industrie de transformation des fruits et légumes**

---

présentée par : **Mme DJEGHIM Fairouz, épo. GOUDJIL**

Soutenu le : **03 / 07 /2022**

**Devant le jury composé de :**

Président : **BENATALLAH Leila** Prof I.N.A.T.A-A.U.F.M.C1

Rapporteur : **ZIDOUNE Mohammed** Prof I.N.A.T.A-A.U.F.M.C1

**Nasreddine**

Examineurs : **BENAHMED DJILALI Adiba** Prof U.M.M.T.O

**NOUI Yassine** MCA I.S.V.S.A. Batna 1

**BOUASLA Abdallah** MCA I.N.A.T.A-A.U.F.M.C1

## **Remerciements**

*Je commence par remercier **ALLAH** de m'avoir accordé la chance et donné le courage, la patience et la force nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier mon directeur de thèse Professeur **ZIDOUNE Mohammed Nesreddine**, responsable d'Equipe de Transformation et Elaboration de Produits Agro-alimentaires (TEPA), pour sa genreuse disponibilité et pour sa grande professionnalité, ainsi que pour le soutien permanent qu'il m'a accordé tout au long de ces six années, j'ai énormément appris.*

*Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance au Professeur **BENATALLAH Leila**, responsable du Laboratoire de Génie Agro-Alimentaire (GENIAAL), pour avoir bien voulu présider mon jury de soutenance.*

*Je tiens à remercier vivement le Professeur **BENAHMED DJILALI Adiba**, de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.*

*Je tien à dire ma gratitude au **Dr. NOUI Yassine**, Maitre de conférences à l'université de Batna 1, d'expertiser mes travaux de thèse et de faire partie de mon jury.*

*J'adresse aussi mes remerciements au **Dr. BOUASLA Abdallah**, Maitre de conférences à l'INATAA d'avoir accepté de faire partie de mon jury de soutenance.*

*Je tiens à exprimer aussi ma gratitude toute spéciale au Professeur **NAMOUNE Hacene**, responsable d'Equipe Céréales et Produits Céréales (CPC), qui m'a accueilli au sein de son laboratoire pour la réalisation des analyses au rhéofermentomètre.*

*J'exprime tout particulièrement ma reconnaissance au **Dr. ROZYLO Renata** de l'Université des sciences de la vie de Lublin (Pologne) pour avoir son aide et sa collaboration.*

*Mes remerciements vont à tout le personnel et les ingénieurs que j'ai rencontrédurant mon stage au sein de Centre de Recherche en Biotechnologie (CRBT), pour l'accueil chaleureux, l'aide et l'assistance qu'ils m'ont réservés.*

*Mes vifs remerciements aux responsables des entreprises **N'Gaous –Conserves**, spa (Batna, Algérie), « **Maison Latina** » (CHELGHOUM LAID, MILA, Algérie) et de la **Coopérative Nopal TEC ALGERIE** (Sidi-Fradj, Souk Ahras, Algérie) qui ont accepté de*

*collaborer ma recevoir et de mettre à ma disposition les sous-produits étudiées dans ce modeste travail.*

*Enfin, merci à tous mes ami(e)s : **BOUREKOUA Hayat, SANAH Ibtissem, MAHROUG Hamida, FETOUHI Awatif, BADER Roumeila, BENLAKSIRA Souheila Bouchra et BOUTECHE Ilyes.***

*Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce travail*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement :*

*A l'homme, qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager : mon cher père **Abdelhafed**. Que ce travail traduit ma gratitude.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère **Habíba**.*

*A mes chère sœur **Asma** et **Samíha** et mon frère **Issam** qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.*

*A mon cher époux, **GOUDJIL Adel**, qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles.*

*A mes deux enfants **Mohamed Dhíae** et **Ranim***

*A mes chère neveux **Iyed**, **Anas**, **Majde** et **Jad**.*

*A mes beaux-parents **GOUDJIL Faride** et **Dalíla**.*

*A mes chères amies, **Awatíf**, **Hamída**, **Hayat**, **Ibtissem**, **Imen**, **Romayla**, **Rokía** et **Síhem** pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

*A toute ma famille **DJEGHIM** et **KELLOU**.*

*A la mémoire de ma grand-mère qui nous a quitté voilà six mois*

*A tous ceux qui m'aiment ...*

# Sommaire

Liste des publications et communications

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction..... 1

## *Etude bibliographique*

### **Chapitre 1. Sous-produit des fruits et des légumes**

1. Définitions .....	3
<b>1.1. Déchets</b> .....	3
1.2. Sous-produit.....	3
1.3. Valorisation .....	4
1.4. Recyclage.....	4
2. Industrie agroalimentaire .....	4
3. Déchets de l'industrie agroalimentaire.....	4
4. Sous -produits des fruits et légumes.....	6
4.1. Production des fruits et légumes .....	6
4.2. Type des sous-produits de l'industrie de transformation des fruits et des légumes sélectionnés.....	6
4.3. Composition chimique et les composés fonctionnels des sous-produits des fruits et des légumes sélectionnés.....	7
4.3.1. Sous-produits de pomme .....	7
4.3.2. Sous-produits d'orange.....	8
4.3.3. Sous-produits de la tomate.....	8
4.3.4. Sous-produits de piment.....	9
4.3.5. Sous-produits de la figue de barbarie.....	9
4.4. Utilisation des sous-produits des fruits et des légumes en industrie alimentaire... ..	10
4.4.1. Utilisation de sous- produits de pomme.....	11
4.4.2. Utilisation de sous- produits d'orange .....	11
4.4.3. Utilisation de sous- produits de tomate.....	11
4.4.4. Utilisation de sous- produits de piment.....	12
4.4.5. Utilisation de sous- produits de la figue de barbarie.....	12
5. Utilisation des sous- produits des fruits et des légumes dans les produits de boulangerie.....	12

### **Chapitre 2. Pain sans gluten**

6. Utilisation des sous- produits des fruits et des légumes en panification sans gluten.....	14
6.1. Maladie cœliaque.....	14
6.2. Gluten.....	14
6.2.1. Structure de gluten .....	15
6.2.2. Rôle du gluten dans la fabrication du pain à base du blé.....	16
6.3. Panification.....	17
6.3.1. Pétrissage .....	17
6.3.2. Fermentation.....	18
6.3.3. Cuisson .....	18
6.3.4. Refroidissement.....	19

6.4. Pain sans gluten.....	19
6.5. Formulations de pain sans gluten.....	20
6.5.1. Maïs .....	20
6.5.2. Pois chiches.....	21
6.6. Amélioration du pain sans gluten .....	22
6.7. Effet des sous-produits des fruits et des légumes en panification sans gluten .....	24

## ***Etude expérimentale***

### **I/ Matériel et méthodes**

1. Matières premières.....	27
1.1. Farine de blé tendre.....	27
1.2. Farines exemptes de gluten.....	27
1.3. Sel.....	27
1.4. Levure boulangère.....	27
1.5. Eau d'hydratation .....	27
1.6. Sous- produits des fruits et légumes .....	27
1.6.1. Marc d'orange.....	28
1.6.2. Marc de pomme.....	28
1.6.3. Marc de tomate.....	28
1.6.4. Marc de piment .....	29
1.6.5. Sous-produits de la figue de barbarie .....	29
Pelure de la figue de barbarie.....	29
Pelure des graines de figue de barbarie.....	30
2. Caractérisation physico-chimiques des matières premières.....	30
2.1. Détermination du taux d'humidité.....	30
2.2. Détermination de la teneur en cendres.....	30
2.3. Détermination de la teneur en matières grasses totales.....	31
2.4. Détermination de la teneur en protéines.....	31
2.5. Détermination de la teneur en fibres.....	32
2.6. Détermination de la teneur en glucides assimilables.....	33
2.7. Détermination de la teneur en pectine.....	34
3. Détermination de la capacité de rétention d'eau des sous-produits .....	34
4. Etapes de fabrication du pain.....	34
4.1. Hydratation préalable des sous-produits.....	34
4.2. Préparation du pain.....	35
5. Détermination des caractéristiques rhéologiques de la pâte.....	38
5.1. Analyse au rhéofermentomètre.....	38
5.2. Mesures rhéologiques de la pâte par rhéoviscosimètre (test d'écoulement).....	41
6. Evaluation de la qualité des pains .....	43
6.1. Perte de poids.....	43
6.2. Volume spécifique.....	43
6.3. Mesure du pH .....	43
6.4. Humidité finale.....	43
6.5. Analyse de couleur.....	44
6.6. Analyse d'image de la mie.....	45
6.7. Analyse sensorielle.....	46
7. Analyses statistiques.....	47

## II / Résultats et Discussion

1. Impact de l'incorporation de sous-produits sur les propriétés physicochimiques de la formule sans gluten.....	48
1.1. Caractères physicochimiques des farines de l'étude.....	48
1.2. Caractères physicochimiques des sous-produits de l'étude .....	49
1.3. Répercussion de l'incorporation de sous-produits sur les caractères physicochimiques de la formule sans gluten de base.....	52
2. Répercussion de l'incorporation des sous-produits sur le comportement rhéologique de la pâte .....	54
2.1. Indications de test d'écoulement.....	54
2.1.1. Consistance de la pâte.....	55
2.1.2. Indice d'écoulement.....	56
2.2. Réponses au rhéofermentomètre.....	57
2.2.1. Production de gaz pendant la fermentation .....	57
2.2.2. Développement de la pâte pendant la fermentation .....	59
3. Incidences de l'incorporation des sous-produits sur la qualité finale des pains .....	64
3.1. Perte de poids.....	64
3.2. Teneur en eau du pain .....	65
3.3. Valeur du pH du pain.....	67
3.4. Volume spécifique de pain .....	68
3.5. Couleur de la croûte et de la mie du pain.....	71
3.6. Structure de la mie du pain.....	73
4. Analyse et recherche de corrélation situant l'effet des différentes incorporations .....	77
4.1. Classification hiérarchique des effets des sous-produits sur le pain sans gluten ...	77
4.2. Corrélation entre paramètres rhéologiques des pâtes et qualité finale des pains...	80
5. Qualité organoleptique des pains .....	82
5.1. Résultats de l'analyse sensorielle.....	82
5.2. Corrélation-acceptabilité globale-qualité finale des pains.....	86
<b>Conclusion générale</b> .....	89
<b>Références bibliographiques</b> .....	92
<b>Annexes</b>	

## Liste des publications et communications

### Publications scientifiques

Djeghim, F., Bourekoua, H., Różyło, R., Bieńczak, A., Tanaś, W., Zidoune, M. N. (2021). Effect of By-Products from Selected Fruits and Vegetables on Gluten-Free Dough Rheology and Bread Properties. *Applied Sciences*, 11(10), 4605. <https://doi.org/10.3390/app11104605>.

**IF : 2,679.**

### Communications scientifiques

1. **Djeghim, F.,**Zidoune, M. N. (2020). Effect of orange, apple and tomato pomace on dough rheology property of gluten free bread. *II. INTERNATIONAL AGRICULTURAL, BIOLOGICAL & LIFE SCIENCE CONFERENCE*. Edirne, Turkey.
2. **Djeghim, F.,**Zidoune, M. N. (2021). Valorization of tomato and pepper pomaces in gluten free bread. *Séminaire National : Ressources végétales, Produits Naturels et Santé (RVPNS)*, Blida, Algérie.



## Listes des figures

<b>Figure1:</b> Schéma illustrant la production de déchets et de sous-produits.....	3
<b>Figure2:</b> quantité de déchets alimentaire mondial par produit du l'année 2009.....	5
<b>Figure 3 :</b> répartition approximative des composants du graine de blé.....	15
<b>Figure 4:</b> Schéma montrant l'intégralité des liaisons dans une protéine.....	16
<b>Figure 5:</b> Diagramme structurel des protéines de gluten dans le système de pâte (a) et de gluten (b).....	17
<b>Figure 6:</b> Modifications des protéines pendant la fabrication du pain.....	18
<b>Figure 7:</b> Approches pour améliorer la qualité du pain sans gluten.....	24
<b>Figure 8 :</b> diagramme de panification des deux formules à base de blé tendre et sans gluten (maïs/ pois chiche).....	38
<b>Figure 9 :</b> schéma de principe de fonctionnement du rhéofermentomètre.....	39
<b>Figure 10 :</b> courbe de développement de la pâte.....	40
<b>Figure 11 :</b> courbe de dégagement gazeux.....	41
<b>Figure 12 :</b> principe de fonctionnement du rhéomètre à disques parallèles (plan /plan)...	42
<b>Figure 13 :</b> montage d'analyse colorimétrique du pain (crouste et mie) permettant d'utiliser l'application android de capture de couleur Color Grab .....	45
<b>Figure 14 :</b> illustration pour la surface, le périmètre, la surface convexe, la circularité et la solidité.....	46
<b>Figure 15 :</b> pectine extraite de la poudre de a : MSGO, b : MSGPo, c :PPPi, d : PT, e : PFB , f : PGFB avant séchage.....	51
<b>Figure 16 :</b> capacité de rétention d'eau des sous-produits des fruits et des légumes.....	52
<b>Figure 17 :</b> développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit d'orange pendant 90 min.....	61
<b>Figure 18:</b> développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de pomme pendant 90 min.....	61
<b>Figure 19 :</b> développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de la tomate pendant 90 min.....	62
<b>Figure 20:</b> développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de piment pendant 90 min.....	62
<b>Figure 21 :</b> développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de la pelure de la figue de barbarie pendant 90 min.....	63

<b>Figure 22</b> : développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de la pelure des graines de la figue de barbarie pendant 90 min.....	63
<b>Figure 23</b> : volume spécifique du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés a : en fonction de la source de sous-produit, b : en fonction de la quantité de sous-produit ajoutée .....	69
<b>Figure 24</b> : image de la mie du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés.....	76
<b>Figure 25</b> : classification hiérarchique des échantillons de blé et des pains sans gluten avec et sans sous-produit étudiés, selon la méthode de Ward .....	77
<b>Figure 26</b> : diagramme de constellation des échantillons de blé et des pains sans gluten avec et sans sous-produit étudiés, selon la méthode de Ward.....	78
<b>Figure 27</b> : écarts types des groupes des pains en fonction des paramètres rhéologiques de la pâte et la qualité finale.....	79
<b>Figure 28</b> :analyse factorielle multiple corrélant le pourcentage de sous-produits, les propriétés rhéologiques de la pâte et les propriétés du pain.....	81
<b>Figure 29</b> :dendrogramme de profile sensorial et d'acceptabilité globale du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans ajout des sous-produits selon la méthode de Ward...	84
<b>Figure 30</b> :carte thermique de profile sensorial et d'acceptabilité globale du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans ajout des sous-produits.....	84

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Les différents déchets générés par différentes industries agro-alimentaires...	5
<b>Tableau 2:</b> production mondial, en Afrique et en Algérie de certains fruits et légumes (FAOSTAT-FAO ,2019) et l'estimation annuels des déchets.....	6
<b>Tableau 3:</b> sous-produits des fruits et des légumes sélectionnés.....	7
<b>Tableau 4:</b> composition chimique du marc de la pomme.....	7
<b>Tableau 5:</b> composition chimique du marc d'orange.....	8
<b>Tableau 6:</b> composition chimique des sous-produits de la tomate.....	8
<b>Tableau 7:</b> composition chimique des grains et de placenta du piment .....	9
<b>Tableau 8:</b> composition chimique des sous –produits de la figue de barbarie.....	10
<b>Tableau 9:</b> Effet de l'incorporation de quelque sous-produit des fruits et des légumes sur le pain sans gluten.....	25
<b>Tableau 10 :</b> quantités d'eau ajoutés pour l'hydratation des sous-produits, d'eau ajouté à la formule et d'eau d'hydratation totale .....	36
<b>Tableau 11 :</b> formulation de pain à base de blé tendre et les pains sans gluten enrichie en divers sous-produits végétaux.....	37
<b>Tableau 12 :</b> composition physico-chimiques des farines de blé, et de la formule sans gluten de base maïs/pois chiche (pour 100 g de matière brute) .....	48
<b>Tableau 13 :</b> composition physico-chimiques des sous-produits (pour 100 g de matière brute).....	49
<b>Tableau 14:</b> composition physico-chimique de la formule sans gluten maïs/pois chiche en fonction du type et de quantité de sous-produits utilisés.....	53
<b>Tableau 15 :</b> paramètres rhéologiques de la pâte de blé et sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés.....	55
<b>Tableau 16 :</b> paramètres de développement de la pâte et de production de gaz du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés.....	58
<b>Tableau 17:</b> perte de poids du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés.....	64
<b>Tableau 18:</b> humidité finale du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés.....	66
<b>Tableau 19:</b> pH du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés.	67
<b>Tableau 20 :</b> Couleurs de la croûte et de la mie du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés.....	72

<b>Tableau 21 :</b> Structure de la mie du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés.....	74
<b>Tableau 22:</b> profil sensorial et d'acceptabilité globale du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans ajout des sous-produits.....	83
<b>Tableau 23 :</b> matrice de corrélation entre les attribues sensorielles et la qualité finale des pains .....	88

## Liste des abbreviations

<b>AACC :</b>	American Association of Cereal Chemists
<b>ACP :</b>	analyse en composante principale
<b>ANOVA :</b>	Analysis of variance
<b>AOAC :</b>	Association of Official Analytical Chemists
<b>Blé T<sub>1</sub> :</b>	témoin de blé
<b>CA :</b>	Coefficient d'affaiblissement
<b>CCLS :</b>	Coopérative des Céréales et Légumes Secs
<b>CE :</b>	Parlement européen et du Conseil
<b>CIE :</b>	International Commission on Illumination
<b>CP1 :</b>	composante principale 1
<b>CP2 :</b>	composante principale 2
<b>CRBt :</b>	Centre de Recherche en Biotechnologie
<b>CRE :</b>	capacité de rétention d'eau
<b>ENASEL :</b>	Entreprise Nationale Algérienne Sel
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization
<b>FAOSTAT :</b>	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
<b>FB :</b>	figue de barbarie
<b>ICC :</b>	<i>International Association for Cereal Chemistry</i>
<b>L* a * b* :</b>	Espace de couleur
<b>L.N.T.A :</b>	laboratoires de Nutrition et Technologie Alimentaire
<b>LMW :</b>	Low molecular weight
<b>MPi :</b>	Marc de piment
<b>MG :</b>	matière grasse
<b>MO :</b>	Marc d'orange
<b>MPo :</b>	Marc de pomme
<b>MSGO :</b>	marc sans graine d'orange
<b>MSGPo :</b>	marc sans graine de pomme
<b>MT :</b>	Marc de tomate
<b>N :</b>	Azote
<b>NA :</b>	nombre des alvéoles
<b>NIH :</b>	National Institute of Mental Health
<b>PFB :</b>	Pelure de la figue de barbarie
<b>PGFB :</b>	Pelure des graines de figue de barbarie
<b>PPPi :</b>	pelure avec le placenta du piment
<b>PT :</b>	pelure de tomate
<b>SG T<sub>2</sub> :</b>	témoin sans gluten
<b>SS :</b>	liaisons disulfure
<b>T.E.P.A :</b>	Transformation et Elaboration de Produits Agro-alimentaires
<b>TIFF :</b>	Tag Image File Format
<b>TMA:</b>	taille moyenne des alvéoles
<b><math>\gamma</math> :</b>	vitesses de cisaillement
<b><math>\eta_{ap}</math> :</b>	viscosité apparente
<b><math>\Omega</math> :</b>	Vitesse angulaire

# INTRODUCTION

## **Introduction**

Les données du marché mondial et de la littérature montrent un taux de croissance annuel sans cesse croissant avec des ventes en produits sans gluten de plus en plus importantes en raison de la prévalence de la maladie cœliaque et d'autres allergies associées au gluten. Le marché sans gluten offre aujourd'hui une variété d'aliments ou d'ingrédients et de formules sans gluten qui peuvent être consommés en toute sécurité par les patients souffrant de la maladie cœliaque. En général, dans le monde et particulièrement en Algérie, la majorité des produits sans gluten sont de qualité inférieure en goût et principaux caractères organoleptiques et sont plus deux fois plus chers que ceux à base de blé.

En effet, en l'absence de gluten, la pâte présente des propriétés rhéologiques très insuffisantes et se montre incapable de développer un réseau viscoélastique, ce qui affecte la qualité finale du pain proposé aux malades cœliaques.

Le remplacement du gluten et/ou l'acquisition de ses propriétés technofonctionnelles sont l'un des problèmes les plus difficiles et les plus recherchés de la technologie alimentaire visant la diversification de l'alimentation pour malades cœliaques. L'utilisation d'ingrédients de substitution, notamment à base d'amidon, d'hydrocolloïdes, de protéines, d'enzymes, d'émulsifiants et/ou de fibres, dans la préparation de pâte pour panification a été envisagée pour améliorer la texture, la sensation en bouche, l'acceptabilité, la durée de conservation et les propriétés nutritionnelles des produits. Cela peut donner des résultats très intéressants si les propriétés viscoélastiques du gluten sont imitées.

Ces dernières années, l'utilisation de produits fonctionnels et naturels en boulangerie a augmenté pour améliorer les qualités physiques, sensorielles, la durée de conservation du pain et aussi sa valeur nutritionnelle a augmenté. Des graines, des fruits ou des végétaux tels que la pomme de terre, la châtaigne, le raisin, la datte, la poire, la pomme, la carotte, l'orange et la figue de barbarie ont été testés en vue d'obtenir de produits fonctionnels en boulangerie. Des effets similaires ont été observés en ajoutant des sous-produits de fruits et de légumes au pain.

La transformation des fruits et des légumes, activité agro-industrielle à croissance rapide dans le monde, génère des déchets et / ou sous-produits tels que : pulpe, marc, tige, feuilles, racines et graines de fruits etc... La masse de sous-produits obtenue peut approcher ou même dépasser celle des produits correspondants (20-60 g pour 100 g). Ces déchets ou chutes résiduelles qui sont très riches en éléments nutritifs et substances bioactives méritent d'être étudiées pour une meilleure valorisation.

Les principales études sur l'utilisation des sous-produits des fruits et des légumes en industrie agro-alimentaire ont porté sur leurs propriétés anti-oxydantes, anti-microbiennes, aromatisantes, colorantes, et texturisantes. Cela constitue une source peu coûteuse et assez disponible (fibres alimentaires, de protéines et de lipides) et disponibles pouvant être utilisée rationnellement en formulations pour malades cœliaques. Elle aurait l'avantage d'offrir des composés bioactifs bénéfiques tels que caroténoïdes, enzymes, polyphénols, huiles, vitamines, fibres alimentaires, acides aminés et protéines pour les produits sans gluten.

De nombreuses études ont envisagé de vérifier les effets des sous-produits de fruits et de légumes, tels que pelures d'orange, de grenade, de mangue, de raisin et de pomme de terre, en panification à base de blé afin d'améliorer la texture et la qualité des produits finis, mais seulement quelques-unes d'entre elle se sont intéressées au panification sans gluten.

Au sein de notre équipe de recherche « Transformation et Elaboration de Produits Agro-alimentaires » (T.E.P.A), du Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A), la diversification pour malades cœliaques a été abordée par la formulation-fabrication de divers aliments en veillant à assurer la meilleure qualité en termes caractères rhéologique, texturale, organoleptiques et nutritionnels. Des résultats très intéressants et encourageants ont été enregistrés en panification en général et en obtention, entre autres, de pains sans gluten de type produits local traditionnel (algériens) et autres (Benatallah *et al.*, 2012; Bourekoua *et al.*, 2017; Djeghim *et al.*, 2018; Bourekoua *et al.*, 2020).

Sachant que très peu d'études sur l'utilisation des sous-produits de fruits et légumes comme ingrédients fonctionnels en panification sans gluten sont notés, le présent travail de thèse vise la diversification et l'amélioration de la qualité des produits de panification proposés à nos malades cœliaques par :

- l'étude des incidences de l'incorporation de quelques dérivés de l'industrie de transformation des fruits et légumes en espérant un gain de qualité.
- l'appréciation des possibilités de valorisation selon l'origine des sous-produits étudiés.

Dans cette étude, nous avons évalué les effets sur les propriétés rhéologiques et sur la qualité des pains sans gluten préparés à partir d'une formule de base : maïs – pois chiche. Deux types différents de marc (d'orange et de pomme) et quatre types différents de pelures (de tomate, de piment, de figue de barbarie et de graines de figue de barbarie) sont testés. Les pains enrichis sont comparés au pain sans gluten de notre formule de base non enrichi et au pain de blé tendre.



# ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## Chapitre 1. Sous-produit des fruits et des légumes

### 1. Définitions

Les définitions de déchets, de sous-produit, de valorisation et de recyclage est selon la législation européenne sur la gestion des déchets , directive n° 2008/98/CE du 19/11/08 relative aux déchets et abrogeant certaines directives du Journal Officiel de l'Union Européenne (Européen et Européen, 2008).

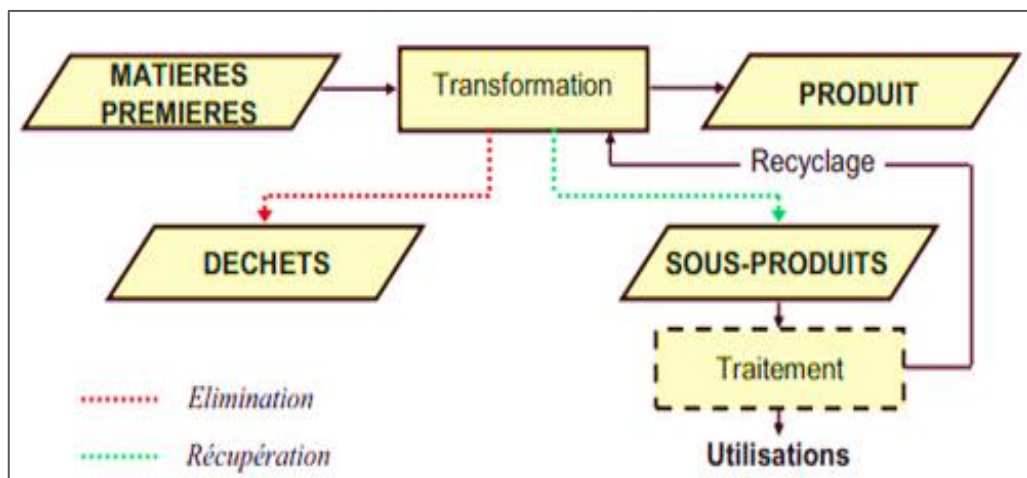
#### 1.2. Déchets

Toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire(Européen et Européen, 2008).

#### 1.2. Sous-produit

Une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production dudit bien ne peut être considéré comme un sous-produit et non comme un déchet (Européen et Européen, 2008)(figure 1) que si les conditions suivantes sont remplies:

- a) l'utilisation ultérieure de la substance ou de l'objet est certaine;
- b) la substance ou l'objet peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes;
- c) la substance ou l'objet est produit en faisant partie intégrante d'un processus de production;
- d) l'utilisation ultérieure est légale, c'est-à-dire que la substance ou l'objet répond à toutes les prescriptions pertinentes relatives au produit, à l'environnement et à la protection de la santé prévues pour l'utilisation spécifique et n'aura pas d'incidences globales nocives pour l'environnement ou la santé humaine.



**Figure1:** Schéma illustrant la production de déchets et de sous-produits (Européen et Européen, 2008).

**1.3. Valorisation**

Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie (Européen et Européen, 2008).

**1.4. Recyclage**

Toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage.

**2. Industrie agroalimentaire**

Les principales industries alimentaires du monde comprennent les produits laitiers, les fruits et légumes, la viande et la volaille, les fruits de mer et les céréales. Cependant, ces industries génèrent d'énormes quantités de sous-produits et de déchets, qui contiennent de grandes quantités de matières organiques, ce qui entraîne des problèmes d'élimination et de pollution de l'environnement en raison de l'insolubilité des fibres, des protéines et des huiles (Russ et Meyer-Pittroff, 2004; Chouaibi *et al.*, 2019).

Les méthodes traditionnelles de l'utilisation des déchets des industries alimentaires incluent leur utilisation à l'alimentation des animaux, comme engrais ou élimination (Jayathilakan *et al.*, 2012). Les industries alimentaires se concentrent actuellement sur l'utilisation des sous-produits et les déchets issus de l'industrie et résoudre le problème de la gestion et de recyclage des déchets par la valorisation, l'utilisation des sous-produits et des matières de rebut et le développement de nouveaux produits à valeur ajoutée destinés à des applications commerciales (Anal, 2018).

**3. Déchets de l'industrie agroalimentaire**

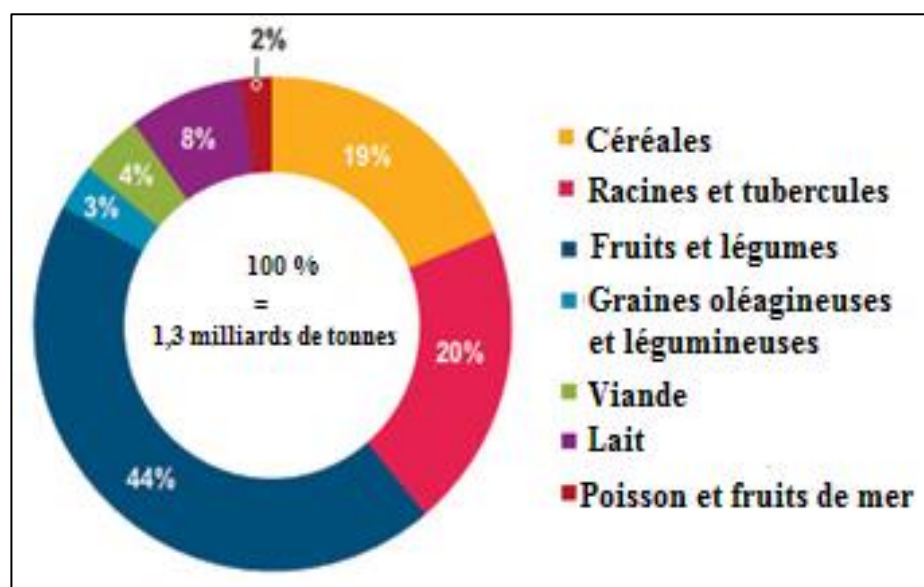
Les déchets et les sous-produits sont produits à toutes les étapes du cycle de vie des aliments, c'est-à-dire pendant la production, la transformation industrielle et la distribution. Il a été signalé que 39 % des aliments sont gaspillés dans l'industrie alimentaire et que ce chiffre devrait augmenter si des politiques de prévention appropriées ne sont pas mises en place (Ahmad et Khan, 2019). Selon la FAO, chaque année, 1,3 milliards de tonnes de nourriture a été gaspillé dans le monde, ce qui représente un tiers de la production totale de l'industrie alimentaire (Gustavsson *et al.*, 2011).

Les différents types de déchets produits par les industries de transformation des aliments sont indiqués dans le tableau 1.

**Tableau 1:** Les différents déchets générés par les industries agro-alimentaires  
(Rao, 2009; Ezejiolora *et al.*, 2014)

Industrie alimentaire	Déchets produits
Transformation céréales et de légumineuses	Enveloppes, coque, son et tige
Transformation des fruits et légumes	Pelures, pulpe, graines, tige, fibre, noyau et moelle
Transformation de produits animaux	Peaux, sang, graisses, cornes, poils, os et intestins.
Transformation des produits de la mer	Viscères, têtes, épines dorsales, sang et coquillages, œufs, parties coupées et pinces.
Transformation des produits laitiers	Lactosérum, lactose
Épices et condiments	Coques et tiges
Noix	Coquilles, le coir de coco et la moelle

La plus grande quantité de déchets est donnée par les fruits et légumes (figure 2), qui représentent 0,5 milliard de tonnes. La transformation industrielle de fruits et légumes génère environ 50% des sous-produits sous forme de marc, pelures, noyaux, fruits et légumes non mûrs et / ou endommagés (Padayachee *et al.*, 2017).



**Figure 2:** quantité de déchets alimentaires produite dans le monde et par filière en 2009  
(Lipinski *et al.*, 2013)

#### 4. Sous -produits des fruits et légumes

##### 4.1. Production des fruits et légumes

En 2018, la production mondiale totale des fruits et légumes a atteint 868 million tonnes et 1089 million tonnes respectivement (FAO, 2020). La plus grande partie de cette production est destinée à l'industrie agroalimentaire qui génère, après transformation, une énorme quantité de sous-produits qui sont considérés comme déchets (tableau 2). Ces sous-produits constituent toujours une ressource des composés de grande valeur.

**Tableau 2:** production mondiale, en Afrique et en Algérie de certains fruits et légumes (FAOSTAT-FAO, 2019) et l'estimation annuels des déchets

Fruits et légumes	Production Mondiale (tonnes)	Production Afrique (tonnes)	Production Algérie (tonnes)	Références	Estimation annuels des déchets (Million Mt)	Références
<b>Pomme</b>	87236221	3132896	558830	(FAO, 2019)	3,0– 4 ,2	(Tokuşoğlu, 2018)
<b>Oranges</b>	78699604	9833656	1199535		32,5	(de Moraes Crizel <i>et al.</i> , 2013)
<b>Tomates</b>	180766329	21664774	1477878		5–11	(Schieber <i>et al.</i> , 2001)
<b>Piments doux et épicé</b>	4255050	1046161	17003		/	/
<b>Piments forts, piments doux frais</b>	38027164	3630869	675168		/	/

##### 4.2. Type des sous-produits de l'industrie de transformation des fruits et des légumes sélectionnés

La transformation industrielle des fruits et des légumes produit de grandes quantités de sous-produits tels que le marc, les pelures, les graines et les tourteaux. Ces sous-produits issus des industries agro-alimentaires et leur quantité diffèrent les uns des autres, selon le type de produit fabriqué et la technique de production utilisée (Anal, 2018). Le tableau 3 illustre les différents types de sous-produits produits par les différentes industries de transformation des fruits et légumes sélectionnés.

**Tableau 3:** sous-produits des fruits et des légumes sélectionnés

Fruits et légumes	Transformation industrielle	Sous-produits (%)	Type des sous-produits	Références
<b>Pomme</b>	Jus	25-30	Pelure/chaire(95%) Grains (2–4%) Tige (1%)	(Coman <i>et al.</i> , 2020), (Ayala-Zavala <i>et al.</i> , 2018)
<b>Oranges</b>	Jus	45-60	Pelures (28 %) Grains (0,1–5%) Albédo (37 %)	(de Moraes Crizel <i>et al.</i> , 2013), (O'shea <i>et al.</i> , 2015b), (Anal, 2018), (Oreopoulou et Russ, 2007)
<b>Tomates</b>	sauces, conserve, pâte, ketchup, jus	3-40	Graine (33-60%) pelure (27- 40%)	(Zhang <i>et al.</i> , 2015), (Anal, 2018)
<b>Piments</b>	ketchups, salsas, sauces diverses, vinaigrettes, épices	5 à 30	pelures, tiges, graines (20%), placenta	(Baenas <i>et al.</i> , 2019) (Yilmaz <i>et al.</i> , 2015)
<b>Figue de barbarie</b>	Jus, confitures	45	Pelures (40-50 %) Graine (5,7 -7,9%)	(Yilmaz <i>et al.</i> , 2015)

### 4.3. Composition chimique et les composés fonctionnels des sous-produits des fruits et des légumes sélectionnés

Selon la nature du produit fabriqué, les déchets des industries alimentaires contiennent généralement des fibres alimentaires, des protéines et des peptides, des lipides, des acides gras et des composés phénoliques. Alors que, les sous-produits de l'industries de transformation des fruits et légumes sont de très bonnes sources de composés bioactifs, tels que les fibres alimentaires et les composés phénoliques (Gabriela et Ganjyal, 2018).

#### 4.3.1. Sous-produits de pomme

Le marc de pomme est considéré comme une source de fibres alimentaires (plus de 50 % du poids sec) et de composés phénoliques (1200–4000 mg/kg de poids sec), y compris les flavanols (catéchine, épicatechine, procyanidines ) et les hydroxycinnamates (Ayala-Zavala *et al.*, 2018). Les pelures contenaient deux fois plus de composés phénoliques totaux que ceux contenu dans la pulpe des fruits (Ayala-Zavala *et al.*, 2010).La composition chimique du marc de pomme est donné dans le tableau 4.

**Tableau 4:** composition chimique du marc de la pomme

Humidité (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Cendres (%)	Glucides (%)	Fibres (%)	Pectine (%)	Références
8,1	6	2,5	1,4	/	82	4,2	(Bchir <i>et al.</i> , 2014)
9	2,37	2,27	1,6	84,76	/	/	(O'shea <i>et al.</i> , 2015a)
4,4	3,8	3,8	1,8	45,1	26,5	/	(Wang <i>et al.</i> , 2019)

### 4.3.2. Sous-produits d'orange

Les pelures d'orange ont été considérées comme une excellente source d'huiles essentielles, d'antioxydants naturels, d'éthanol, d'acides organiques, d'oligosaccharides pectiques et de pectine, de la cellulose, de l'hémicellulose, de la lignine, des pigments de chlorophylle (Pathak *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2019). De plus, la pelure d'orange comprend des polyméthoxyflavones hydroxylées et des flavonoïdes méthylés (Okino Delgado et Fleuri, 2016). Le tableau 5 représente la composition chimique du marc d'orange.

**Tableau 5:** composition chimique du marc d'orange

Humidité (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Cendres (%)	Glucides (%)	Référence
10,55	6	1,88	3,68	77,78	(O'shea <i>et al.</i> , 2015a)
9,25	0,43	6,57	3,43	/	(Ocen et Xu, 2013)
7,46	7,82	/	2,46	/	(Nagarajaiah et Prakash, 2016)

### 4.3.3. Sous-produits de la tomate

Les constituants des sous-produits de la tomate sont des glucides, des acides organiques, des pigments, des fibres, des protéines, des huiles et des vitamines. La composition chimique des graines et des pelures est très différente. Les pelures sont riches en caroténoïdes comme le lycopène (représentant 85 % de la teneur totale en caroténoïdes) et le bêta-carotène, les fibres alimentaires et les composés phénoliques, tandis que les graines contiennent principalement des protéines de haute qualité (20 %, avec une teneur élevée en lysine) et les lipides (acide linoléique, oléique, palmitique, stéarique et arachidique). Les acides gras insaturés représentent 80% de la teneur totale en lipides (Coman *et al.*, 2020). La composition chimique des sous-produits de la tomate est donnée dans le tableau 6.

**Tableau 6:** composition chimique des sous-produits de la tomate

Type de sous-produit	Humidité (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Cendres (%)	Glucides (%)	Fibres (%)	Référence
Marc	4,71	20,7	5,2	4,75	/	76,27	(Majzoobi <i>et al.</i> , 2011)
	10,2	18,25	0,65	7,25	/	/	(Bhat et Hafiza, 2016)
Pelure	/	10,08	3,22	/	/	29,94	(Knoblich <i>et al.</i> , 2005)
	9,59	7,55	7,25	5,09	80,12	45,64	(Khedr <i>et al.</i> , 2016)
Graine	/	20,23	6,37	5,18	/	53,79	(Knoblich <i>et al.</i> , 2005)

#### 4.3.4. Sous-produits de piment

Les données de la littérature sur la composition chimique et les composés fonctionnels des sous-produits de piment sont très limitées. Les graines de piment contiennent des stérols, des saponines, des composés anti-adipogéniques et phénoliques responsables des activités biologiques (Sung et Lee, 2016). En plus, les graines de piment rouge contiennent des composés antinutritionnels comme l'acide phytique et des tanins en petites quantités (Embaby et Mokhtar, 2011). Les graines de piment renferment une certaine teneur d'huile (Leroy, 1943). Les huiles de graines de piment rouge sont riches en acides gras polyinsaturés et la quantité d'acides linoléiques peut atteindre 71%, ce qui est supérieur à celui des huiles de graines oléagineuses. De plus, d'autres composés bioactifs importants tels que les polyphénols, les tocophérols, les phytostérols et les composés aromatiques ont également été trouvés dans les huiles de graines de piment (Chouaibi *et al.*, 2019). La composition chimique des grains et de placenta du piment est illustrée dans le tableau 7.

**Tableau 7:** composition chimique des grains et de placenta du piment

Type de sous-produit	Protéines (%)	Lipides (%)	Cendres (%)	Glucides (%)	fibres (%)	Sucres réducteurs (%)	Caroténoïdes	Référence
Graine (piment doux)	19,28	19,57	4,88	56,28	/	/	/	(Embaby et Mokhtar, 2011)
	28,92	/	5,61	/	29,10	/	/	(Yılmaz <i>et al.</i> , 2015)
Graine (piment fort)	20,88	/	3,76	/	22,66	2,96	/	(Simonovska <i>et al.</i> , 2014)
Placenta	25,19	/	17,99	/	15,05	20,42	0,37	(Simonovska <i>et al.</i> , 2014)

#### 4.3.5. Sous-produits de la figue de barbarie

La pelure de figue de barbarie était composée de fibres alimentaires, de pectine, de composants antioxydants (phénols et flavonoïdes), de minéraux (potassium), de vitamines (acide ascorbique, tocophérol et vitamine K), de caroténoïdes (lutéine,  $\beta$ -carotène et Violaxanthine) (Salim *et al.*, 2009; Anwar et Sallam, 2016b; Bouazizi *et al.*, 2020; Belhadj Slimen *et al.*, 2021). Les graines de figue de barbarie contiennent de polyphénols, de flavonoïdes, de minéraux, des acides gras, de tocophérols de tanins et des sels minéraux (Ca, K, Mg et P).



La farine de graines de figue de barbarie contient des acides aminés comme : acide glutamique, l'acide aspartique, la leucine, la lysine et l'arginine (Al-Juhaimi et Özcan, 2013; Al Juhaimi *et al.*, 2018). Le tableau 8 représente la composition des sous-produits de la figue de barbarie.

**Tableau 8:** composition chimique des sous –produits de la figue de barbarie.

Type de sous-produit	Humidité (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Cendres (%)	Glucides (%)	Fibres (%)	Référence
Farine de Pelure	9,11	3,3	2,7	14,57	49,6	20,70	(Bouazizi <i>et al.</i> , 2020)
	/	4,56	3,66	8,66	60,65	7,72	(El-Neney <i>et al.</i> , 2019)
Graine	/	11,8	6,77	5,90	/	54,2	(El Kossori <i>etal.</i> , 1998)
	6,1	4,8	5,0	1,27	/	12,47	(Özcan et Al Juhaimi, 2011)
Tourteau des graines	/	7,07	/	1,29	89,01	/	(Borchani <i>et al.</i> , 2021)

#### 4.4. Utilisation des sous-produits des fruits et des légumes en industrie alimentaire

La croissance microbienne, la dégradation des attributs sensoriels et la perte de nutriments sont parmi les principales causes qui compromettent la qualité et la sécurité des produits alimentaires (Janevska *et al.*, 2010). Les additifs synthétiques peuvent réduire la décomposition des aliments, mais les consommateurs sont préoccupés par les résidus chimiques dans les produits alimentaires. En ce qui concerne les problèmes de sécurité alimentaire, l'une des technologies émergentes majeures est l'application d'additifs naturels.(Ayala-Zavala et González-Aguilar, 2011).

Les sous-produits des fruits et légumes peuvent être utilisés dans les industries pharmaceutiques, sanitaires, alimentaires, cosmétiques et chimiques(Ahmad et Khan, 2019).

Les sous-produits des fruits et des légumes jouent un rôle important dans l'industrie agroalimentaire, ce sont des sources nouvelles, naturelles et économiques d'arômes, de colorants, de protéines, de fibres alimentaires, d'antimicrobiens, d'antioxydants, agents épaississants, d'enzyme, d'acides organiques et d'huiles essentielles qui peuvent être utilisées comme additifs alimentaire (Gowe, 2015; Campos *et al.*, 2020). Les fibres alimentaires présentent certaines propriétés fonctionnelles en tant qu'additifs alimentaires, telles que la capacité de rétention d'eau, la capacité de gonflement, l'augmentation de la viscosité ou la formation de gel, qui sont essentielles dans la formulation de certains produits alimentaires.

L'utilisation directe de sous-produits des fruits et des légumes est moins chère mais il doit s'assurer que les sous-produits sont à l'abri d'une contamination microbiologique (toxines) et chimique (pesticides, métaux lourds) ; de plus, les propriétés sensorielles des nouveaux produits susceptibles d'avoir une incidence sur l'acceptabilité du produit par le consommateur (Toldrá, 2019).

#### **4.4.1. Utilisation de sous- produitsde pomme**

Le marc de pomme a été utilisée pour la préparation de : la confiture et la sauce depomme. Elle a été aussi incorporé dans les produits carnés, de yogourts et les produits de boulangerie comme source de sucre et de fibres alimentaires et utilisée comme stabilisants pour les émulsions huile-eau (Shalini et Gupta, 2010; Huc-Mathis *et al.*, 2019; Coman *et al.*, 2020).Les graines de pommes dégraissées ont été utilisées dans la formule de chewing-gum (Gunes et al., 2019).

#### **4.4.2. Utilisation de sous- produitsd'orange**

En raison des caractéristiques fonctionnelles et nutritionnelles de la pelure d'orange, elle peut être utilisée comme un ingrédient dans plusieurs produits tels que les pâtes, la viande, les produits de boulangerie et les yaourts (O'Shea *et al.*, 2012).Sendra *et al* (2010) ont découvert que la fibre d'orange augmentait la viscosité du yaourt. L'incorporation des fibres à une valeur supérieure à 6 % et après pasteurisation renforce le gel. La fibre d'orange a un effet positif sur la saucisse :le retard de l'oxydation, la réduction de la croissance microbienne des microbes indésirables, l'augmentation de la durée de conservation et maintenir les niveaux de composés polyphénoliques dans la saucisse (Viuda-Martos *et al.*, 2010).

#### **4.4.3. Utilisation de sous- produitsde tomate**

La marc de tomate a été utilisée sous forme de poudre comme complément nutritif à divers aliments tels que les craquelins, biscuits, pain, pâtes, hamburger, saucisses en raison de leur richesse en lycopène, phénols, fibres alimentaires, acides gras insaturés et acides aminés essentiels. Ou l'ajout du marc de la tomate a provoqué une teneur en humidité plus élevée et une texture plus douce pour le pain plat à base de blé dur, augmentations des protéines, des fibres alimentaires totales, des fibres alimentaires solubles, des fibres alimentaires insolubles, des composés phénoliques totaux et de l'activité antioxydante totale dans les craquelins (Lu *et al.*, 2019).

L'incorporation des graines de tomate dans le pain a augmenté la qualité des protéines et le volume et retardé le rassissement (Carlson *et al.*, 1981).La pelure de tomate est utilisée

dans les produits carnés en raison de leur richesse en lycopène, en tant que colorant rouge, elle pourrait inhiber la détérioration de la couleur de la viande au cours de stockage et réduire l'oxydation des lipides (antioxydant) (Calvo *et al.*, 2008). L'ajout de la pelure au viande modifié les propriétés textural, à cause de la présence de pectine, ce dernier à la capacité de former un gel et augmenté l'élasticité de la viande (Lu *et al.*, 2019).

#### **4.4.4. Utilisation de sous- produitsde piment**

Les graines de piment ont été utilisées pour l'extraction de protéines. Ces protéines ont été utilisées avec du jaune d'œuf pour la production de mayonnaise (Durmuş, 2008). Alors que la farine des graines de piments ont été utilisées pour l'amélioration de la qualité nutritionnelle de deux type de pâte à tartiner, chocolat et mélasse (Bostanci *et al.*, 2017).

#### **4.4.5. Utilisation de sous- produitsde la figue de barbarie**

Les graines de figue de barbarie sont utilisées comme additif au pain à base de blé en raison de leur teneur élevée en glucides, protéines, fibres alimentaires et des composés bioactifs (Ali *et al.*, 2020; Bouazizi *et al.*, 2020). La pelure du fruit de figue de barbarie est considérée comme un ingrédient fonctionnel pour améliorer les propriétés physico-chimiques, structurelles et nutritionnelles des saucisses cuites, elle a augmenté l'humidité, retenir plus d'eau dans les saucisses, et diminué le rancissement oxydatif pendant le stockage des saucisses cuites. La pelure de figue de barbarie est utilisée aussi pour la fabrication de biscuits, du pain (Ali *et al.*, 2020; Bouazizi *et al.*, 2020), et des snacks sans gluten (Miranda *etal.*, 2018). L'ajout de très petite quantité de pelures de figue de barbarie à la farine de blé augmente le valeurs nutritionnelle du pain de mie en raison de sa teneur élevée en fibres, en acide ascorbique et en antioxydants naturels, augmenter la durée de conservation du pain de mie et également diminuer le rassissement (Anwar et Sallam, 2016a).

### **5. Utilisation des sous- produits des fruits et des légumes dans les produits de boulangerie**

Une recherche dans la base de données de la littérature sur les sujets " sous-produit et pain " ainsi que " sous-produit et biscuit ou cookie ou muffin " dans Web of Science en janvier 2017 a donné 242 articles. 157 articles concernant l'utilisation de sous-produits dans les pains et 85 articles concernant l'utilisation de sous-produits dans les muffins, biscuits ou cookies (Gómez et Martinez, 2018).

Dans les produits de boulangerie, des marcs de fruits secs peuvent être ajoutés pour remplacer la farine, le sucre ou la graisse et ainsi réduire la charge énergétique tout en améliorant les teneurs en fibres et en antioxydants. La teneur élevée en fibres des marcs de

fruits entraîne cependant des interactions techno-fonctionnelles qui affectent les propriétés physico-chimiques et sensorielles (Quiles *et al.*, 2018). Les sous-produits obtenus par les fruits et légumes possèdent des propriétés antimicrobiennes en raison de leur activité antioxydante et de la teneur élevée en polyphénols totaux et en bétalaines, par conséquent, l'ajout de tels ingrédients dans les produits de boulangerie levés, tels que le pain, pourrait affecter négativement la capacité de la levure de boulanger *Saccharomyces cerevisiae* (Parafati *et al.*, 2020).

## Chapitre 2. Pain sans gluten

### 6. Utilisation des sous- produits des fruits et des légumes en panification sans gluten

#### 6.1. Maladie cœliaque

La maladie cœliaque, également connue sous le nom d'entéropathie au gluten ou sprue cœliaque, est l'une des maladies d'origine alimentaire les plus courantes chez l'homme. La maladie cœliaque est une maladie à médiation immunitaire déclenchée par l'ingestion de gluten de blé et de protéines similaires chez les personnes génétiquement prédisposées où se produisent une inflammation de l'intestin grêle et donc une destruction de la structure villositaire de celui-ci. (Melini *et al.*, 2017). Le traitement de la maladie cœliaque à ce jour semble être à l'exclusion du gluten du régime alimentaire et la consommation de produits sans gluten. Le taux de prévalence de la maladie cœliaque dans l'ensemble de la population pour certains pays est : l'Algérie 5,6% , Finlande 1,0–2,4%, Suède 0,5–2,9%, Nouvelle-Zélande 1,2%, Royaume-Uni 0,9–1,5% , Espagne 0,3–1,4%, Italie 0,9– 1,0%, Inde 0,3-1,0%, États-Unis 0,3-0,9%, Égypte 0,5%, Australie 0,4%, Russie 0,2% et Allemagne 0,2%. (El Khoury *etal.*, 2018).

Selon le Codex Alimentarius Commission (2008) les produits exempts de gluten sont :

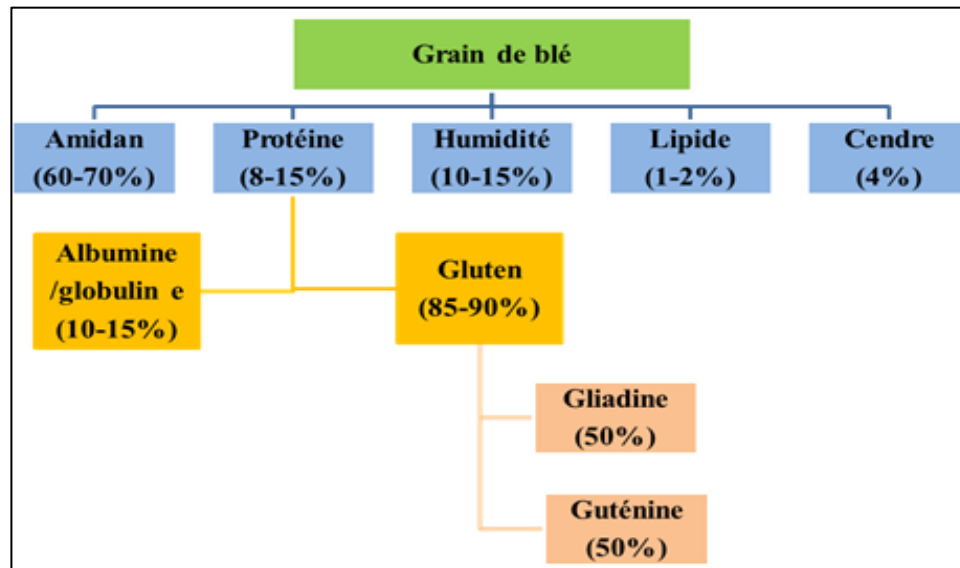
**a-** Les composés ou fabriqués uniquement à partir d'un ou plusieurs ingrédients qui ne contiennent pas de blé (à savoir toutes les espèces de *Triticum*, telles que le blé dur, l'épeautre et le blé de Khorasan, qui est aussi commercialisé sous différents noms comme le KAMUT), de seigle, d'orge, d'avoine ou de leurs variétés croisées, dont la teneur en gluten ne dépasse pas 20 mg/kg au total, sur la base des aliments tels que vendus ou distribués au consommateur final.

**b-** Constitués d'un ou plusieurs ingrédients issus du blé (à savoir toutes les espèces de *Triticum*, telles que le blé dur, l'épeautre et le blé de Khorasan, qui est aussi commercialisé sous différents noms comme le KAMUT), de seigle, d'orge, d'avoine ou de leurs variétés croisées, qui ont été traités spécialement pour retirer le gluten, et dont la teneur en gluten ne dépasse pas 20 mg/kg au total, sur la base des aliments tels que vendus ou distribués au consommateur final.

L'autorité alimentaire internationale exige l'absence totale de gluten pour qualifier un produit comme étant sans gluten (Naqash *et al.*, 2017).

#### 6.2. Gluten

Le gluten est une fraction protéique du blé, du seigle, de l'orge, de l'avoine ou de leurs variétés croisées et de leurs dérivés, à laquelle certaines personnes sont intolérantes et qui est insoluble dans l'eau et dans le NaCl à 0,5 M. Alors que les prolamines est la fraction du gluten qui peut être extraite à l'aide d'éthanol à 40-70 %. La prolamine du blé est la gliadine, celle du seigle la sécaline, celle de l'orge l'hordéine et celle de l'avoine l'avénine. Toutefois, on parle habituellement de sensibilité au gluten. La teneur en prolamine du gluten est généralement de 50 % (figure 3) (Codex Alimentarius Commission, 2008).



**Figure 3** : répartition approximative des composants du grain de blé (Biesiekierski, 2017)

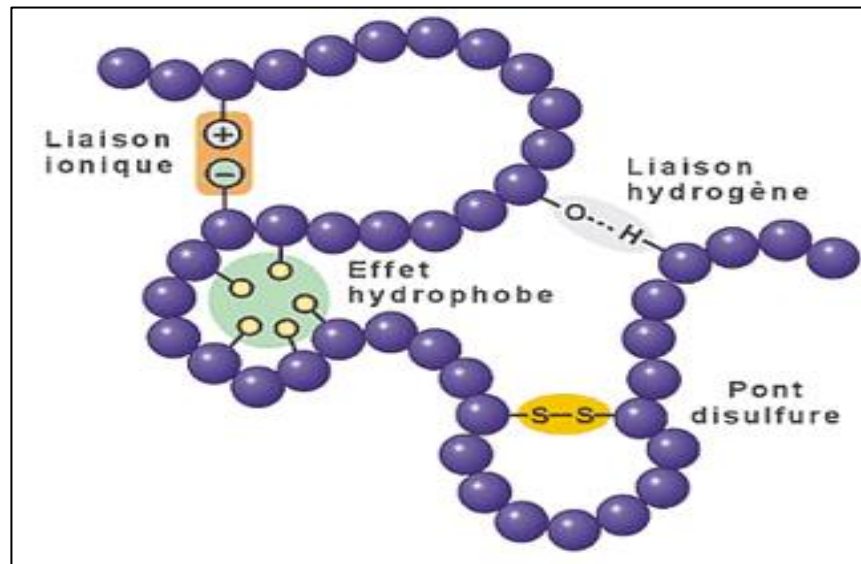
### 6.2.1. Structure de gluten

Les protéines du gluten peuvent être divisées en deux fractions principales selon leur solubilité dans les alcools aqueux : les gliadines solubles dans l'eau alcoolisée telle que l'éthanol à 70 %, avec des liaisons disulfure (SS) intramoléculaires (à l'exception des  $\omega$ -gliadines) et d'une fraction de gluténine qui est insoluble dans l'éthanol et génère des liaisons SS intermoléculaires (Wieser, 2007), améliorant les propriétés physico-chimiques et rhéologiques du gluten. Les deux fractions sont constituées de nombreux composants protéiques partiellement liés, caractérisés par des teneurs élevées en glutamine et en proline.

La gliadine a des structures monomères contenant des fractions telles que  $\omega 5$  (49,000–55,000 Da; 3–6%),  $\omega 1,2$  (39000–44 000 Da ; 4–7%),  $\alpha/\beta$  (28000–35 000 Da, 28–33 %) et  $\gamma$  - gliadines (31000 à 35000 Da, 23 à 31 %) en fonction de leurs compositions en acides aminés, de leurs séquences d'acides aminés partielles ou complètes et de leurs poids moléculaires (Abedi et Pourmohammadi, 2020). La fraction gluténine comprend des agrégats de protéines liées par des liaisons d'inter chaînes disulfures ; ils ont une taille

variable allant d'environ 500 000 à plus de 10 millions. Sur la base de la structure primaire, les sous-unités de gluténine ont été divisées en sous-unités de poids moléculaire élevé (67 000-88 000 Da) et en sous-unités de faible masse moléculaire (LMW) (32 000-35 000 Da) (Wieser, 2007).

Les sous-unités de poids moléculaire élevé linéaires interagissent les uns avec les autres via des liaisons disulfures. La sous-unité de poids moléculaire élevé et les protéines globulaires sont combinées via des liaisons disulfures et des liaisons non covalentes (liaisons hydrogène, ioniques et hydrophobes) (figure 4). Le nombre d'interactions protéiques linéaires-linéaires et d'interactions protéiques linéaires-globulaires dépend principalement de la longueur effective de la chaîne peptidique de la sous-unité poids moléculaire élevé (Wieser, 2007; Abedi et Pourmohammadi, 2020).



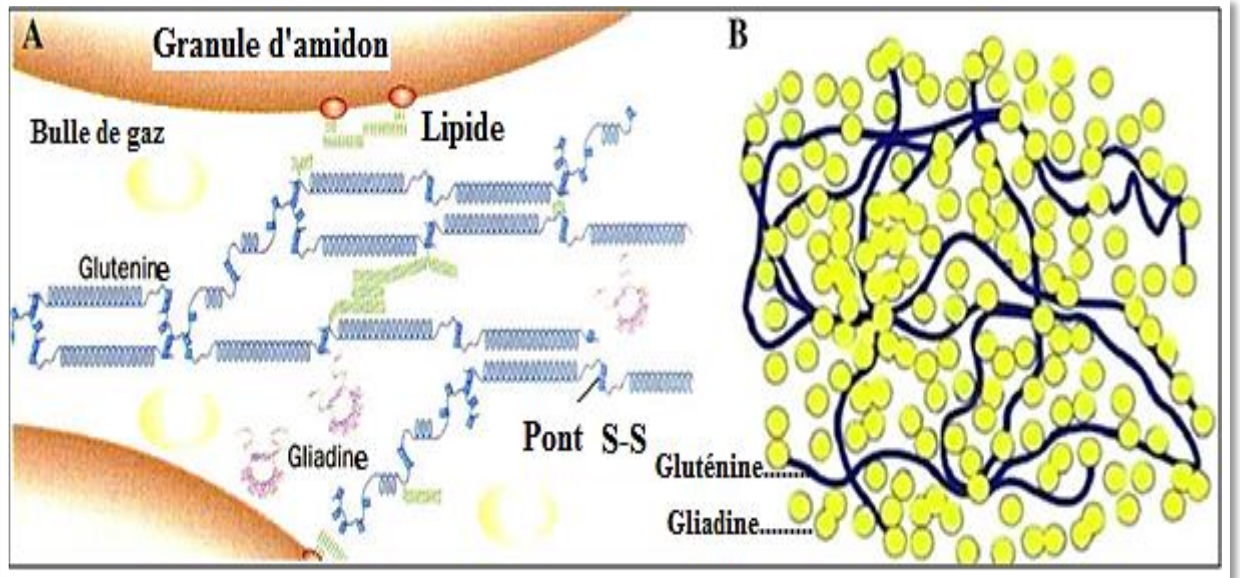
**Figure 4:** Schéma montrant l'intégralité des liaisons dans une protéine

### 6.2.2. Rôle du gluten dans la fabrication du pain à base de blé

Le gluten joue un rôle essentiel dans la détermination de la qualité boulangère unique du blé en conférant à la pâte une capacité d'absorption d'eau, une cohésion, une viscosité et une élasticité (Wieser, 2007).

Le gluten devient apparent lorsque la farine de blé est hydratée et soumise à l'énergie du mélange, même à la main, c'est une masse viscoélastique qui a la capacité de former de fines films qui retiennent les gaz (figure 5), permettant à la pâte de se dilater pour devenir un aliment plus doux, plus léger et plus acceptable au goût après la cuisson (Cauvain et Young, 2007).

Les gliadines hydratées contribuent essentiellement à la viscosité de la pâte, et les gluténines hydratées sont responsables de l'élasticité de la pâte (Lazaridou *et al.*, 2007; Wieser, 2007). Le gluten est donc une protéine structurante qui joue un rôle important dans la panification et est responsable de l'apparence, de la texture et de la qualité du pain (Capriles et Arêas, 2014).



**Figure 5 :** Diagramme structurel des protéines de gluten dans le système de pâte (a) et de gluten (b) (Feng *et al.*, 2020)

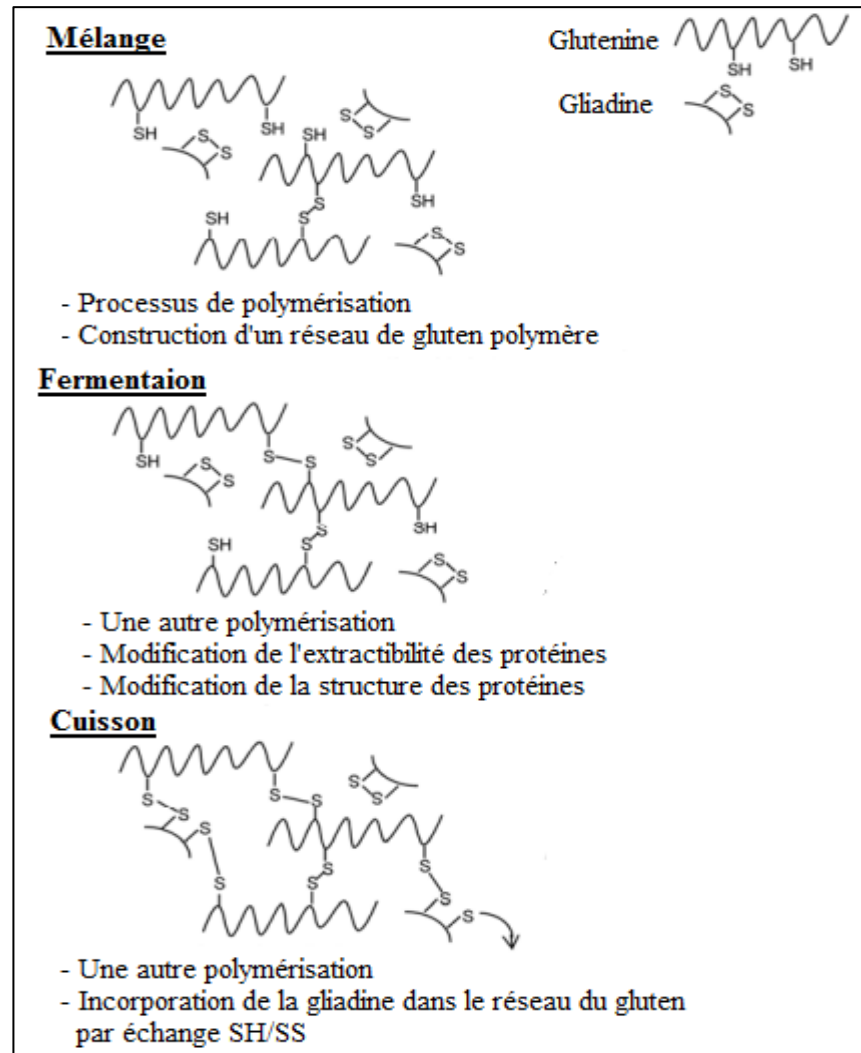
### 6.3. Panification

La panification constitue un processus complexe composé de 4 étapes : mélange, fermentation, cuisson et de refroidissement au cours desquelles se produisent l'évaporation de l'eau, l'expansion du volume, la désactivation des enzymes et des levures, la gélatinisation de l'amidon, la coagulation des protéines et la formation de miettes et de croûtes (Sivam *et al.*, 2010).

#### 6.3.1. Pétrissage

L'étape de pétrissage transforme le mélange de farine, d'eau et d'autres ingrédients en une pâte homogène. Au cours de pétrissage, l'énergie mécanique a entraîné des modifications de conformation dans les protéines de blé hydratées par cassure et formation de liaisons covalents (-SS-) et non covalents (liaisons hydrophobes et hydrogène) (figure 6). Des bulles d'air sont incorporées dans la pâte pour fournir les noyaux pour le gaz dioxyde de carbone libèrent après la fermentation de sucre, sous l'action des levures (Sluimer, 2005; Sivam *et al.*, 2010).





**Figure 6 :** Modifications des protéines pendant la fabrication du pain (Joye *et al.*, 2010)

### 6.3.2. Fermentation

L'étape de la fermentation comprend une ou de plusieurs périodes de fermentation pour des durées allant de moins d'une heure à plusieurs heures. Cette étape est basée sur la réaction de fermentation, où le glucose ou d'autres sucres sont convertis en éthanol et en dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone gazeux se diffuse vers les noyaux gazeux et les fait grandir en cellules à gaz, ce qui dilate la pâte. Les cellules de gaz formées sont régulières et stables (Sluimer, 2005).

### 6.3.3. Cuisson

L'étape de cuisson implique un transfert de chaleur et de masse, entraînant la transformation de la pâte en pain. Au départ, le centre du pain commence à se réchauffer et gagne ainsi un temps de fermentation supplémentaire, ce qui augmente la production de gaz et de l'expansion, ce qui fait augmenter le volume du pain. L'activité de la levure diminue au fur

et à mesure que la pâte se réchauffe, et elle est désactivée lorsque la température atteint environ 55 °C. La stabilité structurelle est maintenue et la gélatinisation de l'amidon de blé commence à environ 60°C. Généralement, il n'y a pas assez d'eau dans la pâte pour gélatiniser complètement l'amidon, et l'eau passera du gluten à l'amidon au fur et à mesure de la cuisson.

Le gluten subit une dénaturation et une polymérisation, et une grande partie de l'eau qui hydrate le gluten est libérée et absorbée par les granules d'amidon gonflés. Au fur et à mesure que la température augmente, le pain subit de changements physiques, chimiques et biochimiques qui se produisent simultanément, entraînant la transformation de la structure de la pâte en une structure spongieuse de la mie (Capriles et Arêas, 2014). La couche extérieure de la mie sèche pour former une croûte.

La couleur de la croûte est le produit des réactions de Maillard et de caramélisation. Le brunissement de la croûte se produit lorsque la température de cuisson est supérieure à 110 °C. Les réactions de Maillard contribuent également à la saveur et à l'arôme du pain (Cauvain et Young, 2007; Sivam *et al.*, 2010).

#### **6.3.4. Refroidissement**

Le refroidissement commence une fois la cuisson terminée. La structure de la mie du pain est encore fixée par la gélification et la cristallisation de l'amidon gélatinisé et le raidissement des granules gonflés. Le pain perd de l'humidité et de la chaleur. Il est important de contrôler les conditions de refroidissement afin d'obtenir les propriétés de mie et de croûte souhaitées (Cauvain et Young, 2007).

Le pain a une structure spongieuse, dont les éléments structurels sont une phase continue d'amidon gélatinisé enfermé dans un réseau continu de gluten coagulé (Sluimer et Sluimer, 2005; Cauvain et Young, 2007).

#### **6.4. Pain sans gluten**

Les pains sans gluten se caractérisent par une formule hétérogène, étant une combinaison de riz et de maïs (Brites *et al.*, 2010), d'amidon et de farine, ainsi que de protéines, de fibres, de graisses, d'hydrocolloïdes et d'enzymes spécifiques.

Les pains sans gluten disponibles dans le commerce sont incompatibles avec leurs homologues contenant du gluten en termes de qualité et d'acceptabilité. Plusieurs défauts de qualité peuvent être associés au pain sans gluten, tels qu'un volume plus faible, l'absence de structure alvéolée appropriée, une texture sèche, friable et granuleuse, une croûte craquelée, une sensation en bouche et une saveur mauvaise. Comme les pains sans gluten contiennent

principalement de l'amidon, ils manquent d'autres nutriments et subissent un rassissement rapide, ce qui réduit la durée de conservation (Cappa *et al.*, 2016; Naqash *et al.*, 2017).

La pâte sans gluten présente une expansion et une rétention des gaz incomplètes pendant la levée, ce qui donne un pain de volume réduit avec une mie peu moelleuse. Ces produits ne présentent pas les propriétés rhéologiques, texturales et la qualité de cuisson qui sont propres aux produits à base de gluten (Cappa *et al.*, 2016; Naqash *et al.*, 2017).

### 6.5. Formulations de pain sans gluten

Une étude de Monteiro *et al* (2021), réalisée sur 259 articles basés sur des formulations de pain sans gluten, en se basant sur le volume spécifique comme indicateur de qualité a montré que : 66% des études utilisaient la farine de riz comme ingrédient principal, suivie de la farine de maïs (18%), du sarrasin (13,5% ) et du soja (11,5%). Les farines de quinoa et de sorgho ont été utilisées dans environ 9 % des études. La farine de millet a été utilisée dans 5,4 % des travaux. La farine d'amarante, de pois chiche et de tapioca a été utilisée dans environ 4 % des travaux. La farine de teff a été utilisée dans 3,5 % des travaux.

Les autres études ont évalué le potentiel de panification des fèves, de l'avoine, de la caroube, des pois, du lupin, de la farine de gluten de maïs, des pignons de pin, du gland, du babassu, de la citrouille, des lentilles, de la patate douce, de la pomme de terre, de la banane non mûre, de la banane mûre, du chia, du yacon, des noix, du chanvre (*Cannabis sativa subsp. sativa*), de la farine de brisures de riz, des algues brunes et de la farine de noisettes dégraissée.

Étant donné que la farine utilisée dans la production de pain sans gluten ne doit pas provenir du blé, les farines de pois chiches et de maïs sont des substituts appropriés car elles sont exemptes de gluten. De plus, leur niveau total de protéines, de nutriments et d'énergie est élevé. Elles sont également capables de réduire le rassissement et la dureté de la mie du pain sans gluten (Aguilar *et al.*, 2015).

Le volume spécifique est un indicateur de qualité important, mais pour obtenir des volumes spécifiques supérieurs ou égaux à 3,5 cm<sup>3</sup>/g pour le pain sans gluten, des améliorants sont ajoutés, ces derniers sont souvent artificiels et pas toujours tolérés par les consommateurs. Il est donc important de rechercher des formulations de pain sans gluten à base d'additifs naturels. Il est important de noter que, comme le volume spécifique, l'analyse du profil de texture (dureté, mastication, élasticité, cohésion et adhésivité) sont des indicateurs importants de la qualité du pain sans gluten.

#### 6.5.1. Maïs

Un grain de maïs entier (*Zea mays* L.) est composé de quatre parties différentes : l'endosperme (82 à 84 % de la masse totale du grain), le germe (10 à 12 %), le son (5 à 6 %) et le point d'attache (1 %) (Ai et Jane, 2016). Le maïs est une céréale sans gluten, il contient environ 62 % d'amidon, 4 % de lipides et 8,7 % de protéines. C'est une source essentielle de micronutriments, de fibres alimentaires et de composés bioactifs tels que les caroténoïdes, les phytostérols, les composés phénoliques, les flavonoïdes et les anthocyanines (Hassan *et al.*, 2019).

L'amidon est le composant prédominant (61 à 78%) du grain de maïs, et il est principalement situé dans l'endosperme (98 à 99% de l'amidon total) (Ai et Jane, 2016).

Le maïs broyé est utilisé dans des produits tels que les pâtes de maïs, la farine de maïs et l'amidon de maïs, les tortillas, les crêpes, les pains de maïs et les chips de maïs (Hassan *et al.*, 2019).

Les pains de maïs sont caractérisés par une coloration jaune foncé, un faible volume spécifique et une mie ferme. Les farines de maïs avec une granulométrie plus grosses sont les plus appropriées pour la fabrication du pain sans gluten, car elles donnent des pains avec plus de volume et moins de fermeté que les pains fabriqués avec une farine plus fine. En raison de sa couleur, la farine de maïs blanche pourrait être une alternative intéressante pour la production de pain sans gluten (Capriles et Arêas, 2014).

### **6.5.2. Pois chiches**

Les graines de pois chiches (*Cicer arietinum*) peuvent être consommés frais ou bouillis, mais ils sont également broyés lorsqu'ils sont secs pour obtenir une farine utilisée comme ingrédient dans les soupes, dans des plats comme le houmous, et/ou dans le pain. Dans la panification, la farine de pois chiches est considérée comme un ingrédient prometteur pour l'amélioration de la qualité du pain, en raison de sa composition.

Les pois chiches contiennent une quantité modérément élevée de protéines (17 à 22%), ont une faible teneur en matières grasses (6,48%), une teneur élevée en glucides (50%) et en fibres brutes (3,82%) (Asif *et al.*, 2013). Ils sont également riches en minéraux : macroéléments, tels que le potassium, le calcium, le sodium et le magnésium, et microéléments, tels que le cuivre, le fer et le zinc (Rachwa-Rosiak *et al.*, 2015).

La teneur en protéines est plus élevée dans le pois chiche que dans d'autres légumineuses, comme le petit pois, le haricot sec, la lentille, la féverole (Mohammed *et al.*, 2012). La fraction la plus importante est représentée par les globulines qui varient entre 53%

et 60%, suivies des glutélines (19,38 % à 24,40 %), des albumines (8,39 % à 12,31 %) et des prolamines (3,12 % à 6,89 %) (Asif *et al.*, 2013).

La composition en acides aminés, qui est généralement un indicateur très important de la valeur nutritionnelle des aliments, est remarquable dans la farine de pois chiche. La teneur en acides aminés essentiels et en acides aminés endogènes (39,89 et 58,64 g/100 g de protéines, respectivement) est significativement plus élevée dans la farine de pois chiche que dans la farine de blé (32,20 et 56,55 g/100 g de protéines, respectivement) (Rachwa-Rosiak *et al.*, 2015). La farine de pois chiche contribue à l'amélioration de la qualité nutritionnelle du pain, notamment en termes de réponse glycémique, en raison de la digestibilité lente de son amidon et de la proportion élevée d'amidon résistant (Yu *et al.*, 2020).

L'augmentation de la concentration de farine de pois chiche dans la formulation sans gluten a amélioré les paramètres de qualité du pain tels que la porosité et le volume spécifique, la fermeté de la mie diminuait ; le pain présentait une texture continue et plus lisse (Rostamian *et al.*, 2014). Les protéines de pois chiches ont de bonnes propriétés émulsifiantes, qui améliorent le volume du pain sans gluten (Aguilar *et al.*, 2015).

### **6.6. Amélioration du pain sans gluten**

Diverses stratégies peuvent être utilisées pour améliorer la qualité du pain sans gluten (figure 7) en traitant les différents problèmes liés à la formulation et au processus technologique (Cappa *et al.*, 2016). Pour résoudre les problèmes technologiques liés au pain sans gluten et améliorer l'acceptabilité structurelle des produits de panification sans gluten, plusieurs additifs ont été utilisés pour imiter le rôle joué par le gluten.

Différents enzymes, émulsifiants, hydrocolloïdes, amidon, protéine de différentes sources, et des sous-produits des fruits et des légumes... etc. sont ajoutés aux farines sans gluten, ce qui a des effets positifs sur la structure, la texture, l'acceptabilité et la durée de conservation (Houben *et al.*, 2012; Melini *et al.*, 2017). Ces ingrédients sont capables de fixer l'eau, d'augmenter la viscosité de la pâte, et de créer, lors du mélange, des liaisons inter et intra-protéiques capables de mimer les propriétés du gluten (Cappa *et al.*, 2016; Gustafson, 2016) :

- Amidons ont une grande influence sur les paramètres de la pâte, tels que la texture, la rétention d'humidité et la qualité finale, car ils se lient et créent une structure perméable aux gaz (Houben *et al.*, 2012).

- Hydrocolloïdes ou gommes (par exemple, gomme d'agar, carboxyl-méthyl-cellulose, hydroxyl-propyl-méthyl-cellulose et gomme de xanthane) qui ont des propriétés colloïdales, sont principalement utilisés dans les différentes formules de remplacement de gluten et de sa fonctionnalité, en raison de leur grande capacité de fixation d'eau, de produire des gels dans les systèmes aqueux et de leur comportement structurant (Li et Nie, 2016) .
- Protéine de lait améliore la saveur du pain et la couleur de la croûte, améliore la texture, réduisent le rassissement et augmente l'absorption d'eau, et améliore donc les propriétés de manipulation des pâtes (Zannini *et al.*, 2012).
- Protéine d'œuf forme des films viscoélastiques fortement cohésifs améliorant la rétention des gaz (Ibanoglu et Erçelebi, 2007). La coagulation thermique de la protéine et du jaune d'œuf contenant des phospholipides et des lipoprotéines en tant qu'émulsifiants facilite la dispersion et la stabilisation des bulles de gaz dans les systèmes de pâte sans gluten (Schober, 2009).
- Emulsifiants peuvent être utilisés pour augmenter la rigidité de la pâte, améliorer la structure du pain et diminuer la vitesse de rassissement. Par interaction avec les molécules d'amidon, ils retardent la rétrogradation et inhibent mobilisation de l'eau. En raison de leur nature amphiphile et de leur capacité à migrer vers les interfaces, ils peuvent réduire la tension superficielle et produire des dispersions stables pour la mie (Hoseney, 1984; Nunes *et al.*, 2009).
- Enzymes favorisent les réseaux de protéines pour augmenter l'élasticité de la pâte et réduire sa déformation de la pâte (Renzetti *et al.*, 2008).

Les pains sans gluten étant principalement basés sur l'amidon, ils se caractérisent par une faible valeur nutritionnelle. Pour améliorer leur profil nutritionnel, des pseudo-céréales (quinoa), des farines de légumineuses (pois chiche, lentille, soja, petits pois) et des isolats de protéines ont été ajoutés à la farine sans gluten pour l'enrichir en protéines (Schoenlechner *et al.*, 2010; Matos *et al.*, 2014).

Les légumineuses (pois, pois chiches, lentilles, haricots) sont une source importante de protéines alimentaires. Ils contiennent des quantités élevées de lysine, de leucine, d'acide aspartique, d'acide glutamique et d'arginine et fournissent des profils d'acides aminés essentiels bien équilibrés lorsqu'ils sont consommés avec des céréales (Mohammed *et al.*, 2014). Les farines de légumineuses exercent plusieurs activités telles que l'absorption d'eau et

d'huile, principalement attribuée aux glucides et aux protéines, l'émulsification et le moussage en raison de la teneur élevée en protéines (Bird *et al.*, 2017).



**Figure 7:** Approches pour améliorer la qualité du pain sans gluten (Capriles et Arêas, 2014)

### 6.7. Effet des sous-produits des fruits et des légumes en panification sans gluten

La demande croissante de pain sans gluten de haute qualité, d'étiquettes sans danger et naturels fait que le développement de nouvelles approches dans la fabrication du pain sans gluten est nécessaire (Moroni *et al.*, 2009). Il y a lieu de rechercher en particulier des additifs sans gluten qui sont sécurisés, contiennent de grandes quantités de nutriments, notamment des constituants bénéfiques pour la santé (polyphénols), et peuvent être acquis en grandes quantités à un coût raisonnable (Gumul *et al.*, 2021).

En dehors des pseudo-céréales, des graines, des légumes et des fruits généralement utilisés en panification sans gluten, des substrats innovants tels que les sous-produits des fruits et des légumes (le marc, la pelure etc...), pourraient être utilisés (Gumul *et al.*, 2021). Les sous-produits de la transformation des fruits et légumes sont des sources appropriées de nutriments et d'ingrédients fonctionnels pour les produits sans gluten, sans augmenter leur prix (Drabińska *et al.*, 2018).

Des résultats intéressants ont été obtenus par l'incorporation d'ingrédients à base des sous-produits de fruits et de légumes (tableau 9), comme la marc de pomme (Rocha Parra *et al.*, 2015; Gumul *et al.*, 2021), des graines de fraise et de cassis dégraissées (Korus *et al.*, 2012), du marc d'orange (O'shea *et al.*, 2015b), dans les formules de pain sans gluten. Ces ingrédients peuvent augmenter les teneurs en nutriments et en composés phytochimiques des pains sans gluten (Arslan *et al.*, 2019).

Les fibres alimentaires extraites des fruits ont une valeur nutritionnelle supérieure à celles dérivées des céréales sans gluten en raison de leur composition équilibrée par rapport aux facteurs antinutritionnels de la maladie cœliaque, de leur énergie métabolique plus faible, de leur capacité de rétention d'eau et de graisse et de la présence de composés bioactifs associés tels que les caroténoïdes et les flavonoïdes, etc... (Arslan *et al.*, 2019).

**Tableau 9:** Effet de l'incorporation de quelque sous-produit des fruits et des légumes sur le pain sans gluten

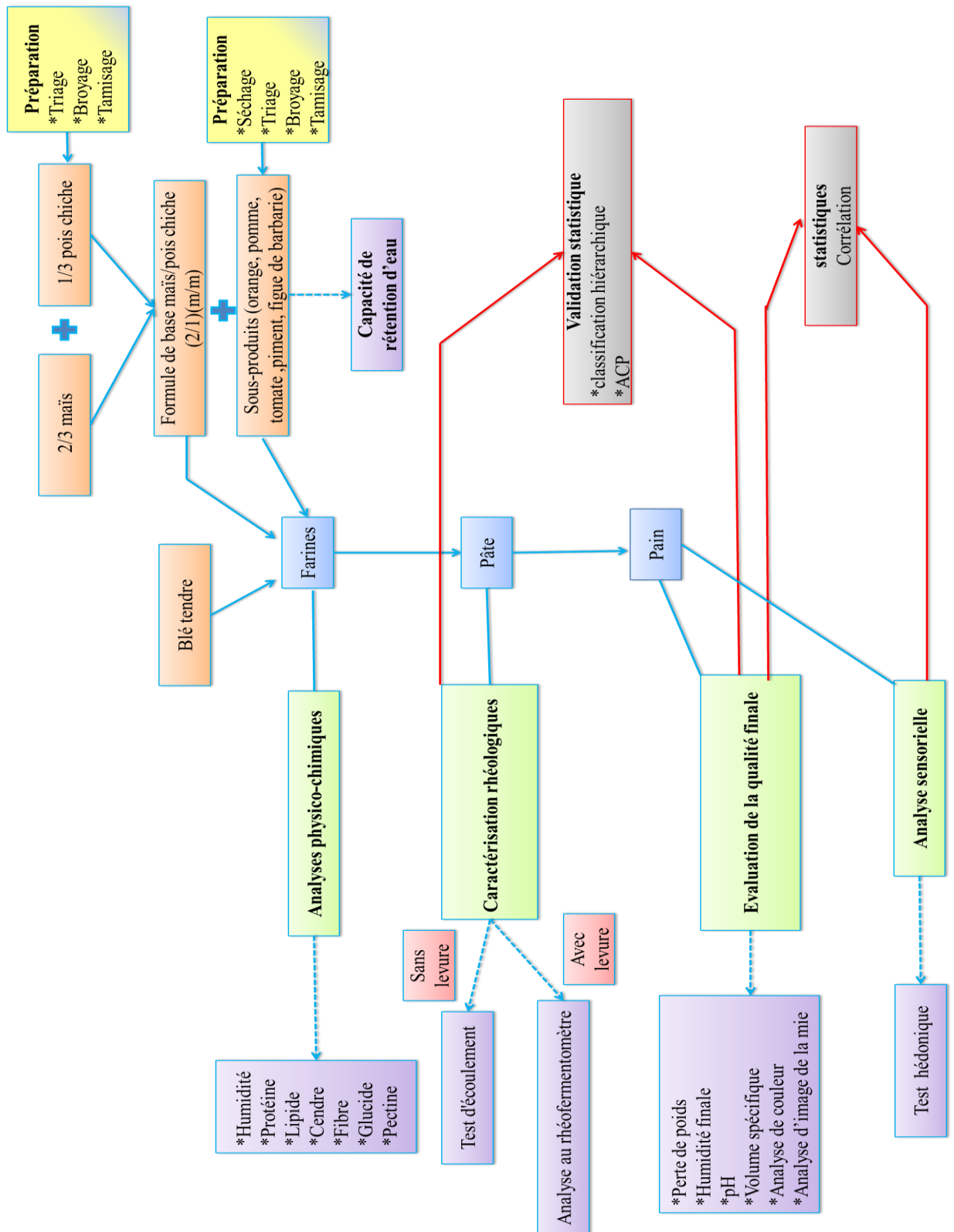
Fruit ou légume	Type de sous-produit	Effet sur le pain sans gluten	Références
Orange	Marc	↑ Fibres totales	(O'shea <i>et al.</i> , 2015b)
Pomme	Marc	↑ Viscosité, ↑ fibres	(Parra <i>et al.</i> , 2015)
Pomme	Marc	↑ Volume spécifique, Consistance spongieuse.	(Rocha Parra <i>et al.</i> , 2015)
Pomme	Marc	↑ notations sensorielles, ↑ composés phénoliques, ↑ flavonoïdes, ↑ acides phénoliques, ↑ phloridzine.	(Gumul <i>et al.</i> , 2021)
Fraise	Graines dégraissées	↓ Dureté, ↑ volume, ↑ notations sensorielles ↑ notation de l'apparence, ↑ notation de la couleur, ↑ notation structure/porosité, ↑ acceptabilité de goût et l'odeur.	(Korus <i>et al.</i> , 2012)
Oignon	Pelure	↑ Antioxydants, ↑ notations sensorielles	(Bedrníček <i>et al.</i> , 2020)
Brocoli	Feuilles	↑ Teneur en nutriments (protéines et minéraux), ↑ volume spécifique, ↓ Perte à la cuisson, ↑ l'antioxydant, amélioration des propriétés technologiques et fonctionnelles	(Krupa-Kozak <i>et al.</i> , 2021)
Café	Parcheminé	Amélioration de la couleur, de la capacité antioxydante et de la stabilité oxydative.	(Littardi <i>et al.</i> , 2021)

↑ Et ↓ désignent respectivement l'augmentation et la diminution.



# MATERIEL ET METHODES

Démarche de la thèse



## **Matériel et méthodes**

L'effet des sous-produits de pomme, d'orange, de tomate, de piment et de figue de barbarie sur le pain sans gluten a été étudié. Les analyses-physicochimiques des matières premières (farines et sous-produits), rhéologiques des pâtes, technologiques et sensorielles des pains ont été effectuées.

### **1. Matières premières**

Les ingrédients utilisés dans la fabrication des pains, témoin et/ou sans gluten, sont la farine de blé tendre, les farines sans gluten, le sel, la levure, l'eau et les sous-produits des fruits et des légumes.

#### **1.1. Farine de blé tendre**

La farine de blé tendre (*Triticum aestivum*) a été utilisée pour la fabrication du pain témoin. Elle est produite par les moulins "Kenza" (Didouche Mourad Constantine, Algérie) et conditionnée dans des paquets de 1 kg avec une granulométrie  $< 200 \mu\text{m}$ .

#### **1.2. Farines exemptes de gluten**

Les farines de maïs (*Zea mays* L.) et de pois chiche (*Cicer arietinum*) ont été utilisées pour la fabrication des pains sans gluten. La farine de maïs (Bio Aglut, Constantine, Algérie) est conditionnée dans un paquet de 800g avec une granulométrie  $< 200 \mu\text{m}$ . La farine de pois chiche, avec une granulométrie  $< 200 \mu\text{m}$ , est obtenue après broyage des graines de la variété locale FLIP 90-13 C, fournie par la Coopérative des Céréales et Légumes Secs (CCLS) de la wilaya de Constantine.

#### **1.3. Sel**

Le sel de cuisine iodé utilisé est le produit de l'ENASEL (Entreprise Nationale Algérienne Sel, Sétif) acheté du commerce et conditionné dans un sachet en plastique de 1Kg.

#### **1.4. Levure boulangère**

La levure sèche instantanée (*Saccharomyces cerevisiae*) de la marque Saf –instant (France), a été utilisée. Elle est achetée de commerce et conditionnée dans un paquet de 500 g.

### 1.5.Eau d'hydratation

L'eau d'hydratation utilisée est une eau distillée de pH de  $5,68 \pm 0,25$  préparée fraîchement au niveau de laboratoire.

### 1.6.Sous- produits des fruits et légumes

Lessous-produits utilisés dans ce travail en vue de leur valorisation sont les marcs d'orange, de pomme, de piment, de tomate et les pelures de la figue de barbarie et ses graines

Tous les sous-produits sont collectés auprès des industries agroalimentaires sauf les pelures de la figue de barbarie provenant d'une ferme privée et de la pelure de ses graines, qui nous ont été fournies par une coopérative agricole.

#### 1.6.1. Marc d'orange (MO)

Le marc d'orange (oranger : *Citrus sinensis*) est collecté en février 2018, de l'entreprise N'Gaous –Conserves, spa (Batna, Algérie), après extraction du jus à partir de fruits entiers. Le marc d'orange contient de la pelure, une petite quantité de pulpe, les tissus internes et les graines. Il est égoutté dans un tissu puis séché à 40°C pendant 8 h dans un séchoir à air chaud (MAXEI, S.A.ARRAS MAXEI, Type MC 100, France). Les graines (5,50 % de masse sèche) sont séparées manuellement du marc et ne sont pas utilisées. Le marc séché (94,50% masse sèche) est broyé à l'aide d'un broyeur à percussion (Sonika, Slovénie) puis tamisé (<500µm) et stocké dans un bocal hermétique en verre, à température ambiante, jusqu'à utilisation. Donc la poudre de marc sans graine d'orange (MSGO) est utilisée pour la préparation du pain sans gluten.

#### 1.6.2. Marc de pomme (MPo)

Le marc de pomme (pommier : *Malus domestica*) est collecté en mois d'octobre 2018, de l'entreprise dénommée « Maison Latina » (CHELGHOUM LAID, MILA, Algérie). Il est généré lors de la préparation de confiture de pomme. Le marc contient la pelure, une petite quantité de pulpe et les graines.

Le marc est égoutté dans un tissu puis séché à 40°C pendant 16 h dans un séchoir à air chaud avec un système de ventilation (MAXEI, S.A.ARRAS MAXEI, Type MC 100, France). Les graines (8,78% de masse sèche) sont séparées manuellement du marc. La pelure et la pulpe séchées (91,22% de masse sèche) sont stockées dans un bocal hermétique en verre après broyage à l'aide d'un broyeur à percussion (Sonika, Slovénie) et passage à travers un

tamis de 500 µm. La poudre de marc sans graine de pomme (MSGPo) obtenu est utilisée pour la préparation du pain sans gluten.

### **1.6.3. Marc de tomate (MT)**

Le marc de tomate (Tomate : *Solanum lycopersicum*) est fourni par l'entreprise « Maison Latina » (CHELGHOUM LAID- MILA, Algérie) au mois d'octobre 2018. Il contient la pelure et les graines qui sont générées lors de la préparation du concentré de tomate. Le marc est égoutté dans un tissu puis séché dans un sécheur à lit fluidisé (Retsch, TG 200, Allemagne) à 35 °C pendant 30 min. La pelure (52,13% masse sèche) est séparée des graines (47,87% masse sèche) par tamisage avec frottement à travers un tamis de 1100 µm. La pelure est broyée à l'aide d'un broyeur à percussion (Sonika, Slovénie), tamisée (500µm) et stockée dans un bocal hermétique en verre à température ambiante. La poudre de la pelure de tomate (PT) est étudiée dans l'incorporation dans la formule du pain sans gluten.

### **1.6.4. Marc de piment (M Pi)**

Le marc de piment (Piment : *Capsicum annuum*) est un mélange de marc de poivron vert et de piment rouge fort, obtenu lors de la préparation de "Hmiss". Il contient la pelure, les graines et le placenta. Le marc de piment est collecté en octobre 2018, de l'entreprise « Maison Latina » (CHELGHOUM LAID- MILA, Algérie). Le marc est égoutté dans un tissu puis séché dans un sécheur à lit fluidisé (Retsch, TG 200, Allemagne) à 35 °C pendant 30 min. Les graines (38,50% masse sèche) sont séparées du marc par frottement et tamisage à travers un tamis de 1100 µm. La pelure avec le placenta (61,50% masse sèche) sont broyées à l'aide d'un broyeur à percussion (Sonika, Slovénie), tamisés (500µm) et conservés à température ambiante dans bocal hermétique en verre. La poudre de la pelure avec le placenta du piment (PPPi) est utilisée pour la préparation du pain sans gluten.

### **1.6.5. Sous-produits de la figue de barbarie (FB)**

Deux types de sous-produits de fruit de figue de barbarie (*Opuntia ficus-indica*) à étudier par incorporation dans la pâte pour préparation de pain sans gluten.

- **Pelure de la figue de barbarie (PFB)**

Des fruits mûrs de figue de barbarie sont recueillis de la ferme privée de la wilaya de Mila (Daïra Aïn beïda Ahriche, Algérie) en septembre 2018.

Les fruits de figue de barbarie sont d'abord lavés abondamment à l'eau pour enlever la poussière et les épines. Ils sont ensuite égouttés puis pelés manuellement à l'aide d'un couteau. La pelure représente 45,60% de la masse fraîche, la pulpe et les graines représentent

53,40% de la masse fraîche. Les pelures obtenues sont découpées en petits morceaux puis séchées dans un séchoir avec ventilation à air chaud (MAXEI, S.A. ARRAS MAXEI, Type MC 100, France) à 35°C pendant 5h. Les pelures séchées sont broyées en utilisant un broyeur à percussion (Sonika, Slovénie). Après tamisage à travers un tamis de 500 µm, la poudre de pelure de la figue de barbarie (PFB) obtenue est stockée à température ambiante ( $25 \pm 5$  °C) avec une granulométrie < 500 µm dans un bocal hermétiquement fermé en verre jusqu'à utilisation.

- **Pelure des graines de figue de barbarie (PGFB)**

La pelure des graines de la figue de barbarie est obtenue à l'état sec, par la Coopérative Nopal TEC ALGERIE (Sidi-Fradj, Souk Ahras, Algérie) en novembre 2017.

Elle est générée lors de l'opération de séparation des graines de figue de barbarie de la pulpe. Après l'opération de broyage des fruits complets de la figue de barbarie et le rinçage des graines pour éliminer les traces de la pulpe et du jus, les graines avec des pelures de couleur blanche sont obtenues. La pelure des graines est séparée manuellement de la graine de figue de barbarie après un séchage à l'aire libre. La pelure sèche des graines est broyée à l'aide d'un broyeur à percussion (Sonika, Slovénie) et tamisée pour obtenir une poudre de pelure des graines de la figue de barbarie (PGFB) avec une granulométrie < 500 µm. La PGFB est stockée à température ambiante dans un bocal hermétiquement fermé en verre jusqu'à utilisation.

## **2. Caractérisation physico-chimiques des matières premières**

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées pour les farines de maïs, du pois chiche et des sous-produits, au sein des laboratoires de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.), Centre de Recherche en Biotechnologie (CRBt) et du laboratoire privé Laboratoire d'analyses CATALYSE LAB.

### **2.1. Détermination du taux d'humidité**

La méthode 926.12 (AOAC, 2005) est utilisée pour déterminer le taux d'humidité.

Une prise d'essai de 5g de chaque échantillon est placée dans un creuset, puis mise à sécher dans une étuve (Mettler, Allemagne) à 105°C jusqu'à poids constant. Les creusets sont refroidis dans un dessiccateur, puis pesés. Chaque test a été réalisé en triplicata. Le pourcentage d'humidité (H) de l'échantillon a été calculé en utilisant la formule suivante:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \text{ en g pour 100 g de poudre}$$

Où :

- m : masse de la prise d'essai en g.
- m<sub>1</sub> : masse de la prise d'essai avec le creuset en g.
- m<sub>2</sub> : masse du résidu sec avec le creuset en g.

## **2.2. Détermination de la teneur en cendres**

Le dosage des cendres est basé sur l'incinération de toute matière organique sous l'effet de température élevée. La méthode 942.05 (AOAC, 2005) est utilisée. 2 g de chaque échantillon est placé dans les creusets est introduit dans un four à moufle (Thermo - scientific, Thermolyne) réglé à 550°C pendant 24 h, jusqu'à combustion totale de la matière organique et apparition d'un résidu blanc ou blanc grisâtre. A la sortie du four, les creusets sont placés dans un dessiccateur pour le refroidissement puis pesés. Chaque test a été réalisé en triplicata. Le taux de cendres totales (C) est donné par la formule suivante :

$$C = \frac{m_1}{m} \times 100 \text{ en g pour 100 g de poudre}$$

Où :

- m : masse de la prise d'essai avant incinération en g.
- m<sub>1</sub> : masse du résidu après incinération en g.

## **2.3. Détermination de la teneur en matières grasses totales**

Le dosage de la matière grasse est effectué par la méthode de Soxhlet sur un appareil de marque (*Foss*, Tecator Soxtec model 2043, Sweden), en utilisant l'hexane comme solvant pour l'extraction. Une prise d'essai de 1 g de chaque échantillon est introduite dans une cartouche à extraction, puis des creusets (en aluminium ou en verre) préalablement séchés (105°C pendant 30 min) et pesés sont remplis avec 25 ml d'hexane. L'extraction est effectuée pendant 60 min à une température de 130°C (creusets en aluminium) ou à 150°C (creuset en verre). Les creusets sont placés dans une étuve à 105°C pendant 24 h puis pesés. Chaque test a été réalisé en triplicata.

Le taux de la matière grasse (MG) est calculé par la formule suivante :

$$MG = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \text{ en g pour 100 g de poudre}$$

Où :

- m<sub>2</sub> : masse du creuset vide en g.
- m<sub>1</sub> : masse du creuset et la matière grasse après extraction en g.

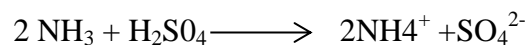
m: masse de la prise d'essai avant extraction en g.

#### **2.4.Détermination de la teneur en protéines**

La teneur en protéines est déterminée selon la méthode de Kjeldahl 960.52 (AOAC, 2005) en utilisant un système de digestion automatique (Foss Tecator Digestion System 2508 Auto) et une unité de distillation (Büchi K-355, Flawil, Suisse). Chaque test a été réalisé en triplicata. La méthode de Kjeldahl passe par les étapes suivantes :

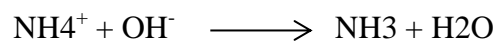
##### **a)Minéralisation**

Une prise d'essai de 0,5 g de chaque échantillon est additionnée avec l'acide sulfurique concentré (98%) dans un matras en présence d'un catalyseur. Le matras est placé sur le dispositif de chauffage et à ce stade, carbone et hydrogène se dégagent sous forme de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O alors que l'azote est transformé en ammoniacque par minéralisation de la matière organique. Un essai à blanc (réactif sans échantillon) doit être inclus dans chaque série de dosages.

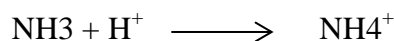


##### **b) Distillation et titration**

Pour la distillation, l'eau distillée et de la soude (40%) sont versées dans le matras. Le distillat est recueilli dans une solution d'acide borique (4%) en présence d'indicateur coloré. L'addition d'une base forte permet de libérer l'ammoniac qui est alors entraîné par de la vapeur d'eau puis ensuite piégé dans une solution d'acide borique.



La titration de l'ammoniacque est effectuée par l'acide chlorhydrique de 0,2 N



La teneur en protéines brutes (P) est estimée en multipliant la valeur obtenue lors de la détermination de la teneur en azote par le facteur de conversion qui est de 5,7 dans le cas de la farine de blé tendre et de 6,25 pour la farine de maïs, de pois chiche ou des sous-produits.

Le taux d'azote (N) est calculé par la formule suivante :

$$N = \frac{(V_1 - V_0) \times 0,2 \times 14}{m \times 1000} \times 100 \text{ en g pour 100 g de poudre}$$

Où :

V<sub>0</sub>: volume de HCl versé pour le blanc

V<sub>1</sub>: volume de HCl versé pour l'échantillon

0,2 : normalité de HCl

m : masse de la prise d'essais de l'échantillon en g.



14 : masse atomique de l'azote

Le teneur en protéines brutes (P) est donné par la formule suivante :

$$P = N \times \text{facteur de conversion}$$

Le facteur de conversion est 5,7 pour la farine de blé tendre et 6,25 pour les farines de maïs, de pois chiche et les poudres de sous-produits.

### **2.5.Détermination de la teneur en fibres**

La détermination de la teneur en fibre brute est effectuée selon la méthode de Weende (Henneberg et Stohmann, 1864). Elle est basée sur la solubilisation des composés non-cellulosiques dans des solutions d'acide sulfurique et d'hydroxyde de potassium, à l'aide d'un extracteur de fibres brutes (FIWE, Velp Scientifica, Italie). L'hydrolyse acide est utilisée dans le but de l'extraction des sucres et de l'amidon et l'hydrolyse alcaline vise à éliminer les protéines, un peu d'hémicellulose et de lignine.

Une prise d'essai de 1 g de l'échantillon est portée à ébullition pendant 30 min dans 150 ml d'une solution de l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 1,25%, en présence de n-octanol comme agent anti moussant. L'échantillon est lavé trois fois avec 30 ml de l'eau distillée chaude. Après avoir vidangé le dernier lavage, 150 ml de KOH à 1,25% et 3 gouttes de n-octanol sont ajoutés et portés à ébullition pendant 30 min. L'échantillon est lavé de nouveau trois fois avec 30 ml de l'eau distillée chaude puis un dernier lavage avec de l'eau froide pour permettre aux creusets de se refroidir. Le contenu des creusets est lavé trois fois avec 25 ml d'acétone. Après séchage dans une étuve à 105° C jusqu'à masse constant (m<sub>1</sub>), les résidu sont incinérés dans un four à moufle à 550°C pendant 3 h, refroidis et repesés (m<sub>2</sub>).

Le taux de fibres brutes (F) est calculé par la formule suivante :

$$F = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \text{ en g pour 100 g de poudre}$$

Où :

m<sub>1</sub> : masse des fibres brutes + masse des cendres en g.

m<sub>2</sub> : masse des cendres en g.

m : masse de la prise d'essais de l'échantillon en g.

Chaque test a été réalisé en triplicata.

### **2.6.Détermination de la teneur en glucides disponible (assimilables)**

Le taux des glucides assimilables (G) est déterminé par soustraction de la somme des taux des composants précédents à partir de 100% de produit frais. Le taux des glucides estimé ne comprend pas les fibres. Il est calculé par la formule suivante:

$$G = 100 - (H + C + MG + P + F) \text{ en g pour 100 g de poudre}$$

Où:

H: taux d'humidité en g pour 100 de matière sèche ;

C: taux de cendres en g pour 100 g de matière sèche ;

MG: taux de la matière grasse en g pour 100 g de matière sèche ;

P: taux de protéines en g pour 100 g de matière sèche ;

F: taux de fibres en g pour 100 g de matière sèche.

### **2.7.Détermination de la teneur en pectine**

Une prise d'essai de 2g d'échantillon est mélangée d'abord avec 40 ml d'acide chlorhydrique à 0,1 N. Le mélange est chauffé à 90°C pendant 45 min, pour l'hydrolyse de la protopectine, puis refroidi à température ambiante. Le surnageant est récupéré par filtration sur une passoire en nylon. Un volume de filtrat est dispersé dans deux volumes d'éthanol à 95% (V / 2V), la pectine a été précipitée pendant une nuit à température ambiante à l'abri de la lumière. Ensuite, la pectine précipitée est recueillie par filtration sur une passoire en nylon, lavée deux fois avec de l'éthanol à 70% pour éliminer le mono et des disaccharides puis centrifugée (20 minutes; 10000 tr / min, 10 ° C). Finalement, le surnageant est jeté et la pectine humide obtenue est séchée à 65 ° C jusqu'à ce que son masse soit constant (Liew *et al.*, 2014; Doukani et Tabak, 2015; Abid *et al.*, 2017).

Le pourcentage de rendement des échantillons en pectine est calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$\text{pectine} = \frac{\text{masse de la pectine obtenu (g)}}{\text{masse initial de l'échantillon(g)}} \times 100 \text{ en g pour 100 g de poudre}$$

### **3. Détermination de la capacité de rétention d'eau des sous-produits**

Lacapacité de rétention d'eau (CRE) est considérée comme la masse d'eau retenue par 1 g d'échantillon dans des conditions de trempage et de centrifugation spécifiées (McConnell *et al.*, 1974). Une prise d'essai 1 g de poudre est, d'abord, mélangée avec 15 ml d'eau distillée dans un tube à centrifuger. Le mélange est agité au vortex (VELP Scientifica, ZX3) pendant 30 s et laissé s'hydrater pendant une nuit. La suspension est ensuite centrifugée à 15000xg

pendant 20 min. Finalement, le surnageant est rejeté et le CRE a été exprimée en gramme d'eau retenue par gramme de poudre sèche (ANG, 1991; Rabetafika *et al.*, 2014).

$$\text{CRE} = \frac{m_1 - m}{m_1} (\text{g d'eau/g de poudre})$$

$m_1$  : masse de la poudre après centrifugation en g ;

$m$  : masse de la prise d'essais de l'échantillon en g.

#### **4. Etapes de fabrication du pain diagramme adopté**

##### **4.1. Hydratation préalable des sous-produits**

Une hydratation préalable de poudres des sous-produits est réalisée. Les sous-produits sont trempés dans l'eau distillée pendant une nuit à température ambiante. La quantité d'eau de trempage nécessaire varie en fonction des résultats de la capacité de rétention d'eau (CRE) pour chaque échantillon (tableau10). L'hydratation préalable des sous-produits réduit l'absorption d'eau nécessaire au moment de la formation de la pâte et rendrait plus faciles le reste des opérations (pétrissage, levée,...).Utilisation des sous-produits secs rendra la pâte excessivement molle dans les premières étapes du mélange. La préhydratation des sous-produits a réduit la concurrence pour l'eau entre les fibres et les composants de la pâte qui étaient activés par l'eau pendant le développement de la pâte, comme l'action de la levure.

##### **4.2. Préparation du pain**

Le pain à base de farine de blé a été préparé en tant que pain témoin de blé (Blé T<sub>1</sub>). Le pain sans gluten sans ajout de sous-produit a été fabriqué et considéré comme du pain témoin sans gluten (SG T<sub>2</sub>). Des formules sans gluten enrichies en poudres des sous-produits à différents pourcentages ont été également préparées en vue de fabriquer les pains de notre étude. La formule de base de pain sans gluten était constituée d'un mélange de farine de maïs et de pois chiche dans un rapport massique de 2/1 (m/m). Les formulations de pain sans gluten ont été préparées en substituant une faible proportion de la farine de la formule de base par des sous-produits. Les sous-produits de MSGO, MSGPo, PPPi, PT, PFB, PGFB ont été étudiés à 0, 2,5, 5 ou 7,5 g / 100 g d'ingrédients brute de la formule de base (maïs-pois chiche). Les quantités de sous-produits ajoutées à la formule de base sans gluten sont choisies après des essais préliminaires. Toutes les poudres de sous-produits ont été utilisées après leur hydratation.

Les farines (maïs / pois chiche), la levure, les sous-produits préalablement hydratés et

l'eau ont été mélangés par un batteur (Moulinex, France) muni d'un bras spirale pendant 1 min avec une vitesse de 150 tr/min, puis le sel (2g) préalablement dissous dans 40 ml d'eau a été progressivement ajouté au mélange. La pâte a été mélangée pendant 6 min supplémentaires puis divisée en pâtons de 90 g. Ces pâtons sont moulés dans des barquettes en aluminium avec papier couvercle ayant des dimensions de 9×7×3 cm<sup>3</sup> (figure 8) avant d'être placés dans une étuve de fermentation à 37°C. Le temps de fermentation varie selon le T<sub>1</sub>, temps auquel la pâte atteint la hauteur maximale H<sub>m</sub> donné par le rhéofermentomètre. Le test de cuisson a été effectué dans un four électrique à 230 ° C pendant 30 min, en enlevant le papier couvercle du moule 10 min soigneusement avant la fin de la cuisson. A la fin, le pain est mis à refroidir à température ambiante.

Le pain témoin de blé a été préparé en suivant les mêmes étapes de celles du pain témoin sans gluten, sans sous-produit. Les formulations pour chaque type de pain sont présentées dans les tableaux 10 et 11.

**Tableau 10 :** quantités d'eau ajoutés pour l'hydratation des sous-produits, d'eau ajouté à la formule et d'eau d'hydratation totale

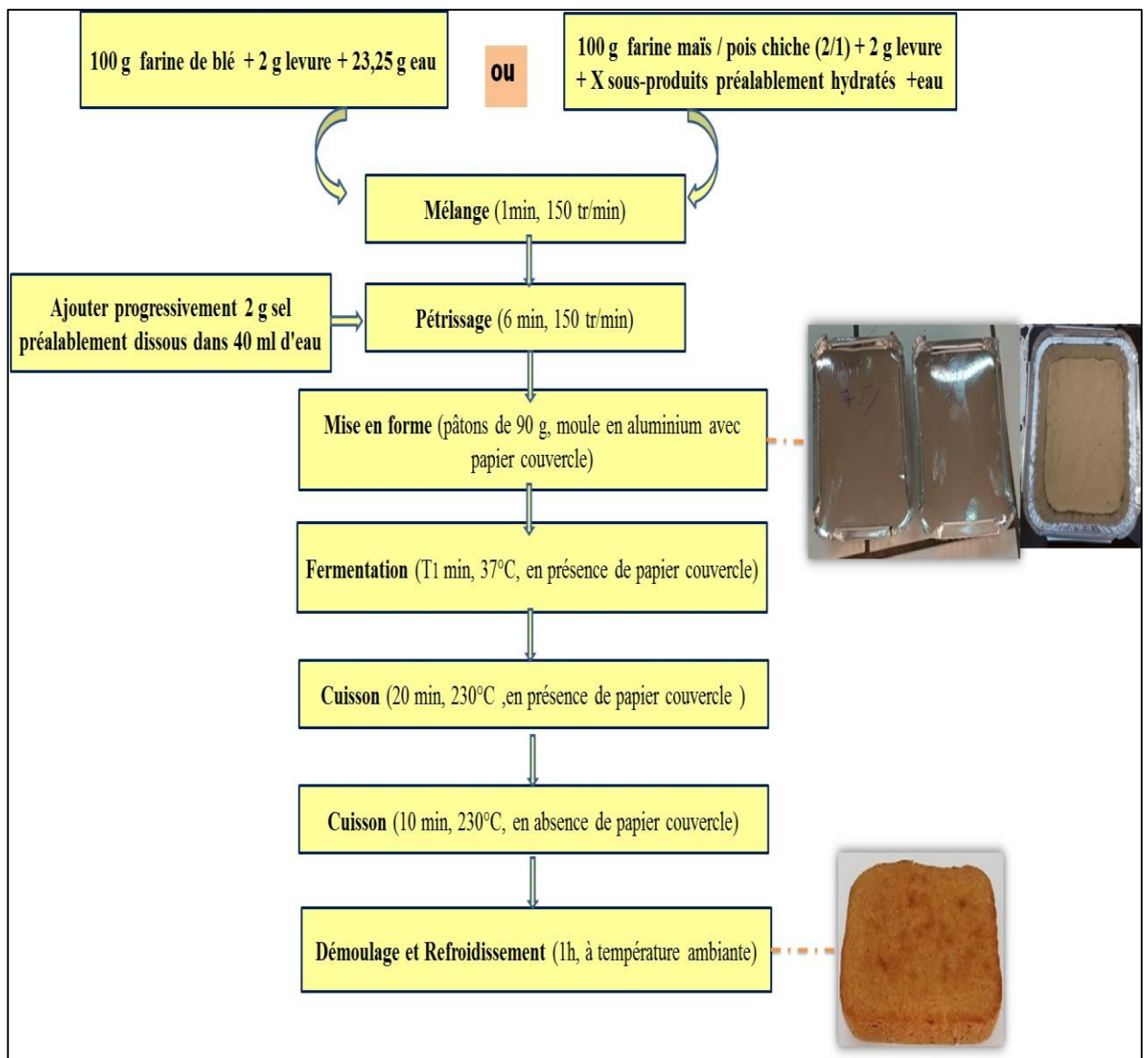
	<b>addition (g/100g poudre)</b>	<b>Eau d'hydratation des sous-produits (mL)</b>	<b>Eau ajouté à la formule (mL)</b>	<b>Eau d'hydratation totale (mL)</b>
<b>Témoin blé</b>	<b>0</b>	/	63,25	63,25
<b>Témoin sans gluten</b>	<b>0</b>	/	100	100
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	18,55	97,5	116,05
	<b>5</b>	37,10	95	132,1
	<b>7,5</b>	55,65	92,5	148,15
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	17,10	97,5	114,6
	<b>5</b>	34,20	95	129,2
	<b>7,5</b>	51,30	92,5	143,8
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	11,53	97,5	109,03
	<b>5</b>	23,05	95	118,05
	<b>7,5</b>	34,58	92,5	127,08
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	13,5	97,5	111
	<b>5</b>	27,00	95	122
	<b>7,5</b>	40,50	92,5	133
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	12,08	97,5	109,58
	<b>5</b>	24,15	95	119,15
	<b>7,5</b>	36,23	92,5	128,73
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	11,48	97,5	108,98
	<b>5</b>	22,95	95	117,95
	<b>7,5</b>	34,43	92,5	126,93

**MSGO:** poudre de marc sans graine d'orange; **MSGPo:** poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi:** poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT:** poudre de la pelure de tomate; **PFB:** poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB:** pelure des graines de la figue de barbarie.

**Tableau 11** : formulations de pain à base de blé tendre et les pains sans gluten enrichie en divers sous-produits végétaux.

	Témoin blé	Formulation sans gluten et taux d'incorporation			
		Témoin sans gluten	Formules de l'étude avec SP en g /100 g de base brute		
			2,5	5	7,5
Farine de blé (g)	100	0	0	0	0
Farine de maïs (g)	0	66,67	65	63,33	61,67
Farine de pois chiche(g)	0	33,33	97,5	95	92,5
Totale de la formule de base sans gluten (g)	100	100	97	100	100
SP (g) poudre	0	0	2,5	5	7,5
Eau d'hydratation des sous-produits (mL)	0	0	CRE*2,5	CRE*5	CRE*7,5
Eau ajoutés à la formule (mL)	63,25	100	97,5	95	92,5
Eau d'hydratation totale (mL)	63,25	100	97,5 + (CRE*2,5)	95 + (CRE*5)	92,5 + (CRE*7,5)
Sel (g)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Levure (g)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Composition total avant pétrissage (g)	167,25	204	201 + (CRE *2,5)	199 + (CRE *5)	196,5+ (CRE * 7,5)
Totaux sans hydratation (g)	104	104	104	104	104

**SP** : sous-produit, **CRE** : capacité de rétention d'eau



**Figure 8 :** diagramme de panification des deux formules à base de blé tendre et sans gluten (maïs/ pois chiche).

## 5. Détermination des caractéristiques rhéologiques de la pâte

Les caractéristiques rhéologiques des pâtes à base de blé tendre et à base de la formule sans gluten, en présence et en absence de sous-produits sont étudiées à l'aide d'un rhéofermentomètre et d'un rhéoviscosimètre. Le même diagramme de fabrication de la pâte a été suivi.

### 5.1. Analyse au rhéofermentomètre

Le rhéofermentomètre étudie l'évolution d'une pâte placée dans une cuve à essai qui va fermenter en fonction du protocole défini (température et temps). Le rhéofermentomètre F3

(Chopin, Villeneuve La Garenne Cedex, France) (figure 9) est conçu pour aider à :

- mesurer le développement de la pâte et le dégagement gazeux lors de processus de fermentation de la pâte ; c'est-à-dire contrôler le pouvoir fermentatif des farines ;
- choisir des additifs et évaluer de leurs effets ;
- sélectionner des levures.

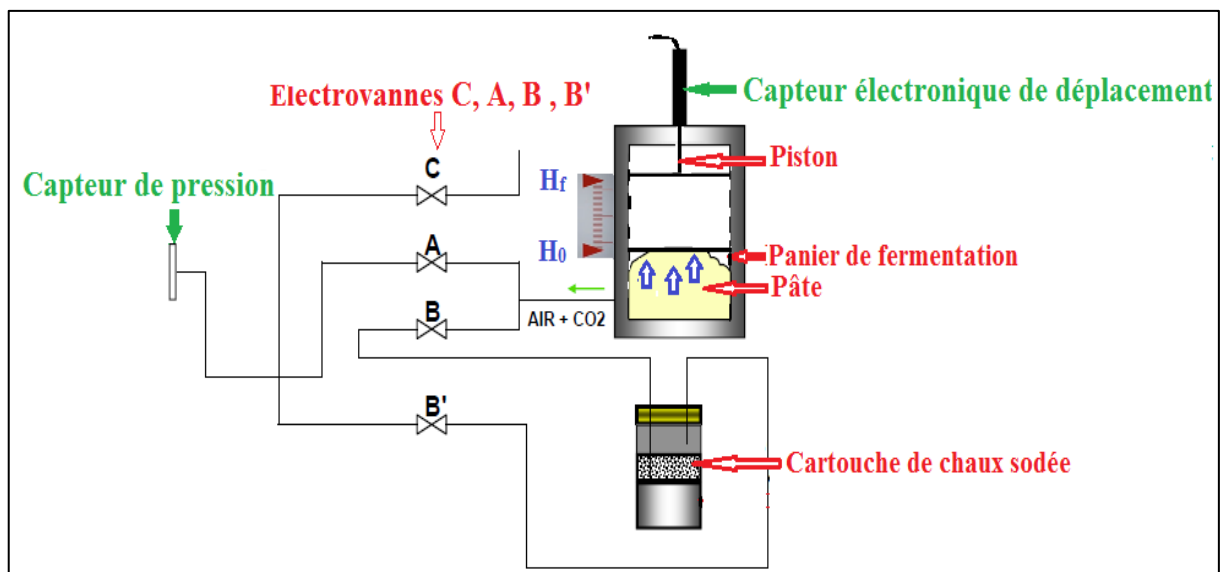
Pour éviter le débordement de la pâte au cours de la fermentation, des essais préliminaires nous ont permis de fixer la masse des pâtons à placer dans le panier de fermentation à 200 g. Le piston seul (254 g) est placé sur la pâte sans addition de poids supplémentaires, en raison de la faiblesse de la pâte sans gluten (Gómez *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2014; Ronda *et al.*, 2017). La pâte est laissée fermenter à 37°C pendant 90 min. Le nombre de points de mesure est de 61, noté toutes les 90 sec (1,50 min).

A chaque point de mesure s'effectuent les étapes suivantes :

- la mesure de la hauteur d'élévation du piston au niveau du capteur électronique de déplacement et de l'augmentation de pression due au gonflement de la pâte en fermentation.
- dans une seconde phase la mesure de la hauteur du piston et celle de la pression due au gonflement de la pâte après soustraction du CO<sub>2</sub> piégé au niveau de la cartouche de chaux sodée.

Les tracés des variations de hauteur d'élévation (en mm) (figure 11) et de pression (converties en mL) (figure 12) sont enregistrés simultanément en fonction de temps :

- courbe de développement de la pâte en mm ;
- courbe de production gazeuse totale en mm ;
- courbe de CO<sub>2</sub> retenu (déduit par différence).



**Figure 9** : schéma de principe de fonctionnement du rhéofermentomètre

### 5.1.1. Courbe de développement de la pâte

Ce tracé permet de déterminer les paramètres suivants (figure 10) :

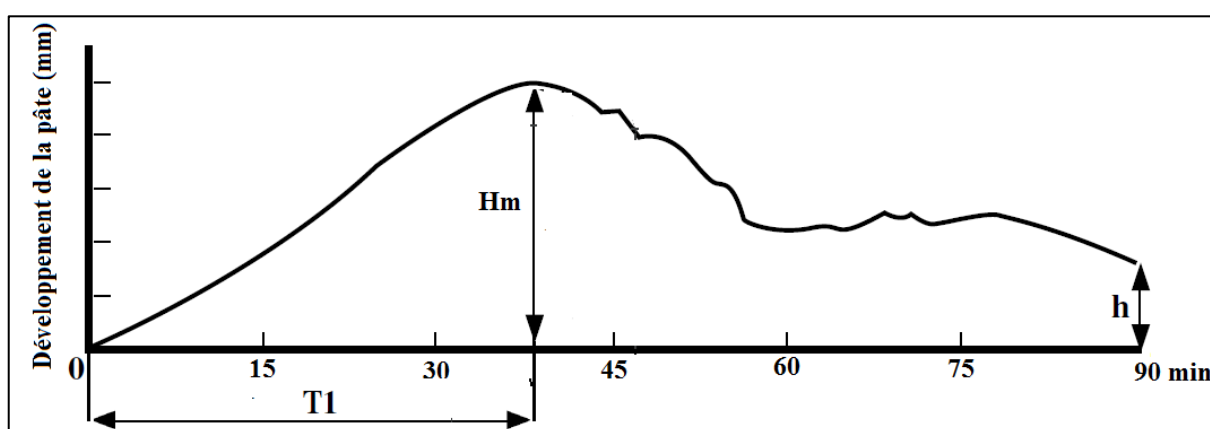
$H_m$ : hauteur de développement maximale de la pâte, exprimée en mm.

$T_1$  : temps de développement maximal de la pâte, exprimé en min. Il est relié très étroitement à la concentration et la rapidité de la levure et à son activité.

$h$  : hauteur de développement de la pâte à la fin de l'essai (après 90 min), exprimée en mm

CA : Coefficient d'affaiblissement  $(H_m - h) / H_m$ , c'est le pourcentage de l'abaissement de développement de la pâte à 90 min par rapport à  $T_1$ .

Les résultats seront exprimés par la courbe moyenne de deux répétitions pour chaque échantillon



**Figure 10** : courbe de développement de la pâte.

### 5.1.2. Courbe de production gazeuse totale et courbe de rétention du gaz

La courbe permet de déterminer (figure 11):

$H_m$  : hauteur maximale de la courbe de dégagement gazeux. Elle est exprimée en mm

$T_1$  : temps nécessaire pour obtenir  $H_m$ . Il est exprimée en minutes

$T_x$  : temps d'apparition de la porosité de la pâte, moment où la pâte commence à laisser échapper du  $CO_2$  (en minutes).

$V_{tCO_2}$  : volume total du  $CO_2$  volume total de dégagement gazeux en ml

$V_{pCO_2}$  : volume du  $CO_2$  perdu volume de  $CO_2$  en ml que la pâte a laissé échapper au cours de la fermentation.

$V_{RCO_2}$  : Volume de rétention : volume de  $CO_2$  en ml retenu dans la pâte à la fin de l'essai.

$RCO_2$  : Coefficient de rétention de gaz  $CO_2$  : c'est le rapport en % entre le  $V_{RCO_2}$  de la pâte et le  $V_{tCO_2}$  produit au cours de l'essai.

$$RCO_2 = \frac{V_{RCO_2}}{V_{tCO_2}} * 100$$



Les résultats seront exprimés par la courbe moyenne de deux répétitions pour chaque échantillon

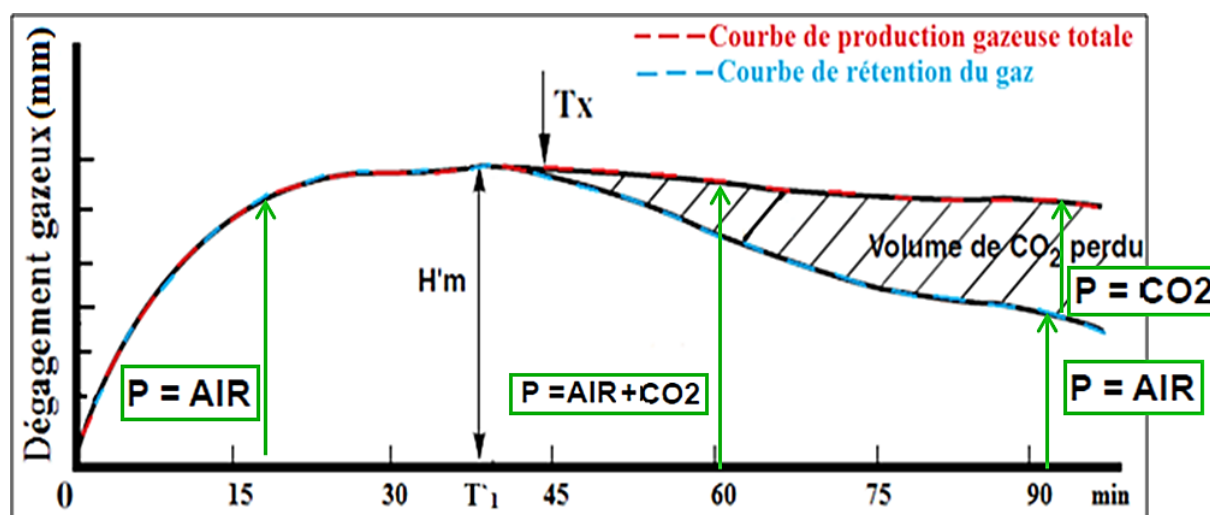
Un autre paramètre est ajouté : la hauteur de développement maximale de la pâte ajustée  $H_m^{adj}$ . Il est calculé selon la méthode Altuna *et al.* (2015) pour évaluer le développement de la pâte indépendamment de la production de gaz qui est due à l'activité de la levure et non pas aux propriétés de la pâte (pour isoler l'effet de l'activité de la levure):

$$H_m^{adj} = (H_m/V_{tCO_2}) \times V_{t0} \quad (\text{en mm})$$

Où :  $V_{t0}$  est le volume total de  $CO_2$  de la pâte sans gluten témoin à 0 g sous-produit.

Si  $H_m^{adj} > H_m$  le développement de la pâte est due à la rhéologie de la pâte.

Si  $H_m^{adj} < H_m$  le développement de la pâte est due à l'activité de la levure et à la rhéologie de la pâte.



**Figure 11** : courbe de dégagement gazeux

## 5.2. Mesures rhéologiques de la pâte par rhéoviscosimètre (test d'écoulement)

Le test d'écoulement de la pâte est réalisé à l'aide d'un rhéoviscosimètre. Les ingrédients de la pâte (farine, sel et/ou sous-produit pré-hydraté), à l'exclusion de la levure, ont été soigneusement mélangés, de l'eau a été ajoutée, et le tout a été pétri pendant 7 min à l'aide d'un mélangeur vertical (Heidolph RZR 2020, Allemagne) à 210 tr/min pour obtenir une pâte homogène.

Ensuite, 20 g de pâte est laissée reposer pendant 20 min avant d'être placée dans le rhéomètre Haake VT 550 (HaakeMessTechnik GmbH Co, Karlsruhe, Allemagne) pour le processus de relaxation de la contrainte résiduelle. Une boule de 20g de pâte est placée entre

deux disques parallèles (plan /plan) de 50 mm de diamètre (Haake, PK 5, 0,5 grads), avec un écart entre les deux disques est de 4,5 mm. Du papier de verre fin a été collé sur les disques, supérieur et inférieur, afin de limiter le glissement de la pâte (Tanner *et al.*, 2008; Hicks et See, 2010; Dai *et al.*, 2011) (figure 12). Après avoir enlevé la pâte en excès, les bords sont recouverts par l'huile de paraffine pour éviter la déshydratation des échantillons. La pâte est laissée reposer pendant 5 min avant de commencer l'essai, afin de relâcher la contrainte et de stabiliser la température (Witczak *et al.*, 2010).

La température a été maintenue à 25 °C par circulation d'eau (thermostat HAAKE DC3 et cryostat HAAKE K15, Allemagne). Les données rhéologiques ont été analysées à l'aide du logiciel HAAKE Rheo Win version 2.09 dans la plage de vitesses de cisaillement comprise entre 1,2 et 200 s<sup>-1</sup> pendant 3 min. Le nombre de points de mesure est de 100. Chaque test a été réalisé en triplicata. La viscosité apparente ( $\eta_{ap}$ ) a été déterminée, en utilisant la loi de puissance (loi d'Ostwald de Waele) (Sabanis *et al.*, 2009; Ronda *et al.*, 2017) :

$$\eta_{ap} = K. \gamma^{n-1}$$

Où :

$\eta_{ap}$ : viscosité apparente (Pa.s).

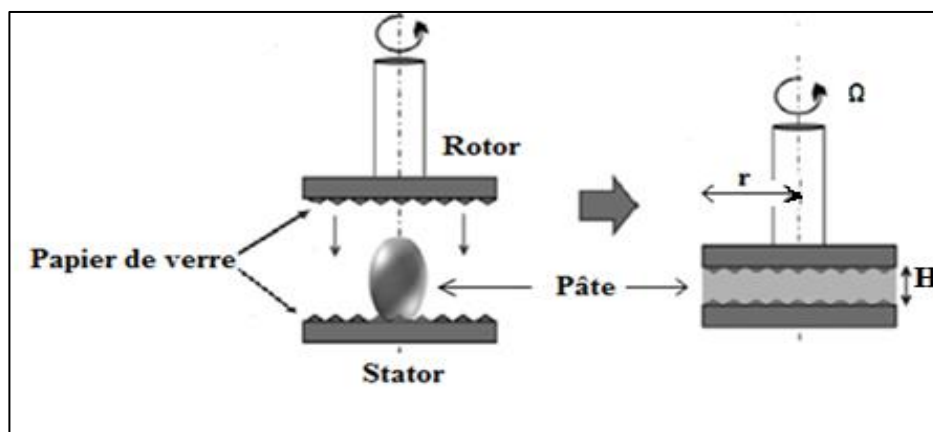
$\gamma$  : vitesses de cisaillement  $\gamma$  (s<sup>-1</sup>) =  $\frac{\Omega r}{H}$

$\Omega$  : Vitesse angulaire (en rad. s<sup>-1</sup>).

H : Hauteur d'espace entre les deux disques (en m), r : rayon de disque rotor (en m).

K : indice de consistance est une constante (en Pa.s<sup>n</sup>), il représente la contrainte nécessaire pour obtenir un taux de cisaillement de 1 s<sup>-1</sup>.

n : indice d'écoulement.



**Figure 12** : principe de fonctionnement du rhéomètre à disques parallèles (plan /plan)

$\Omega$  : Vitesse angulaire, H : Hauteur d'espace entre les deux disques, r : rayon de disque rotor

## **6. Evaluation de la qualité des pains**

### **6.1. Perte de poids**

Le pourcentage de perte de poids correspond à la différence entre le poids du pâton avant fermentation (90g) et le poids du pain après cuisson divisé par le poids du pâton.

Il est calculé juste après la cuisson selon la formule suivante (Keskin *et al.*, 2004):

$$\% \text{ Perte de poids} = \frac{\text{poids du pâton} - \text{poids du pain}}{\text{poids du pâton}} \times 100$$

### **6.2. Volume spécifique**

Le poids et le volume du pain refroidi sont déterminés après 1 h de la cuisson. Le volume du pain est mesuré par la méthode de déplacement des graines de colza AACC 10.05 (Aacc, 2000) et la masse est donnée par une balance en g. Le pain cuit est mis dans un récipient rempli par les graines de colza, Après l'arasement de la surface du récipient à l'aide d'une règle, les graines de colza en excès sont transférées dans une éprouvette pour mesurer leur volume. Le volume spécifique (cm<sup>3</sup> / g) est calculé comme le rapport entre le volume du pain et son poids.

### **6.3. Mesure du pH**

Après cuisson, le pain est broyé en poudre fine. Une prise d'essai de 10 g de poudre est mélangée avec 100 ml d'eau distillée ayant pH initial de 5,68 ± 0,16. Le mélange est ensuite placé sur un agitateur orbital (Heidolphpolymax 1040, Schwabach, Allemagne) et agité pendant 30 min à température ambiante. Le pH du surnageant de mélange est mesuré après 10 min de repos au moyen d'un pH mètre (Majzoobi *et al.*, 2016; Majzoobi *et al.*, 2017).

### **6.4. Humidité finale**

L'humidité finale des pains est déterminée selon la méthode ICC 110/1 (ICC, 1996). La mesure est effectuée en deux étapes :

**Etape 1, première dessiccation à 40°C** : Le pain est coupé en petites portions, séché dans une étuve à 40 ° C pendant 48 h. Le taux d'humidité des portions (H<sub>portion</sub>) de pain est calculé. Il est donné par cette formule :

$$\text{H portion \%} = \frac{\text{P1} - \text{P2}}{\text{P1} - \text{P}} \times 100$$

Où :

P<sub>1</sub> : poids de la boîte avec les portions de pain avant séchage à 40°C.

P<sub>2</sub> : poids de la boîte avec les portions de pain après séchage à 40°C.

P<sub>1</sub> . P<sub>2</sub> : quantité d'eau évaporée à 40°C.

P : poids de la boîte vide.

**Etape 2, deuxième dessiccation à 105°C :** les portions des pains séchées sont moulues. Environ 10 g de poudre sont séchés dans une étuve à 105 °C jusqu'à poids constant. Le taux d'humidité de la poudre de pain ( $H_{\text{poudre}}\%$ ) est calculé comme suivant :

$$H_{\text{poudre}} \% = \frac{P'1 - P'2}{P'1 - P'} \times 100$$

Où :

$P'1$  : poids de la boîte avec les portions de pain avant séchage.

$P'2$  : poids de la boîte avec les portions de pain après séchage.

$P'1 - P'2$  : quantité d'eau évaporée à 105°C

$P'$  : poids de la boîte vide.

Enfin l'humidité finale du pain ( $H_f$ ) (humidité résiduelle) est déterminée où la somme des deux humidités  $H_{\text{portion}}$  et  $H_{\text{poudre}}$  donne le total d'eau évaporée.

L'humidité finale du pain ( $H_f$ ) est la suivante :

$$H_f = H_{\text{portion}}\% + H_{\text{poudre}}\% \left( \frac{100 - H_{\text{portion}}\%}{100} \right)$$

Où :

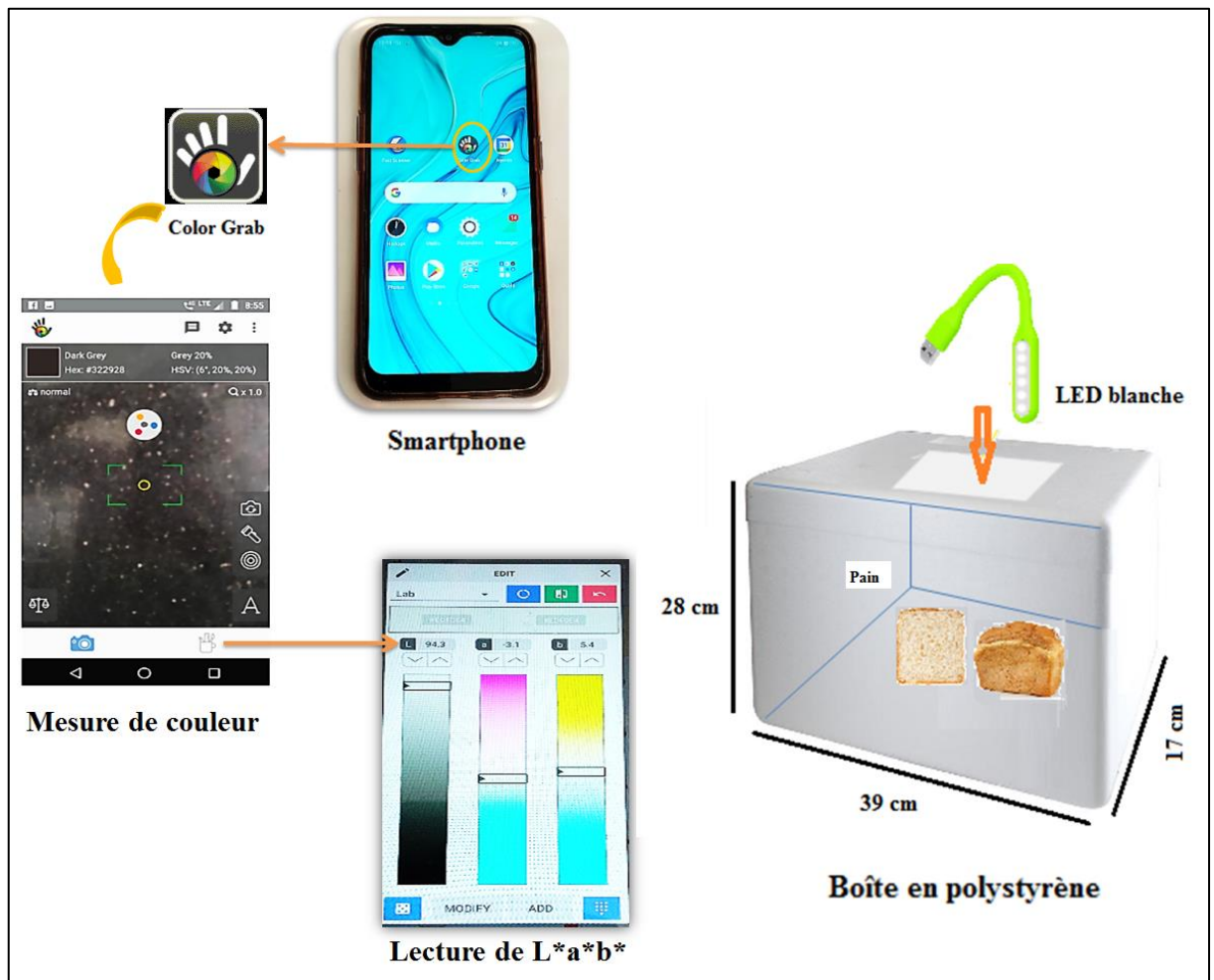
$H_{\text{portion}}$  : humidité de portion du pain à 40° C

$H_{\text{poudre}}$  : humidité de la poudre

### **6.5. Analyse de couleur**

La couleur de la croûte et de la mie des pains est déterminée au moyen d'une application android de capture de couleur Color Grab (version 3.6.1, 2017, Loomatrix Ltd) (He *et al.*, 2020). Pour assurer que la lumière ambiante n'affecte pas la capture des couleurs, une boîte fermée en polystyrène avec une surface interne blanche ( $39 \times 17 \times 28 \text{ cm}^3$ ), intégrée avec une lumière LED blanche de 1,2 W 5V, est utilisée pour obtenir une lumière interne uniforme (figure 13). L'espace colorimétrique CIELAB ( $L^* a^* b^*$ ) défini par la Commission Internationale de l'Eclairage est choisi. Il a décrit toutes les couleurs visibles à l'œil humain (Chen et Ren, 2014). La valeur de luminosité,  $L^*$ , définit le noir à 0 et le blanc à 100, la valeur de  $a^*$  est relatif aux couleurs opposées vert-rouge, avec les valeurs (-) indique le vert et les valeurs (+) indique le rouge. La valeur de  $b^*$  représente les adversaires bleu-jaune, avec les valeurs (-) indique le bleu et les valeurs (+) indique le jaune. La valeur de  $L^* a^* b^*$  de la mie et de la croûte a été capturée par l'appareil photo du smartphone et analysée à l'aide de l'application Color Grab.

La mesure de la couleur est prise à partir de cinq positions différentes de la même croûte ou de la mie.



**Figure 13:** montage d'analyse colorimétrique du pain (croûte et mie) permettant d'utiliser l'application android de capture de couleur Color Grab

### 6.6. Analyse d'image de la mie

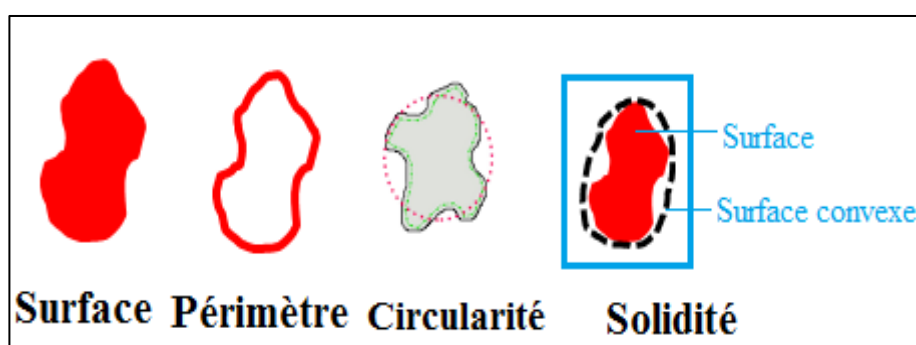
Le traitement d'image est effectué à l'aide du logiciel ImageJ (1.43u; Java1.7.0\_21 32 bits, Wayne Rasband, National Institute of Mental Health (NIH), Bethesda, Maryland, USA). Le pain est coupé transversalement en tranche de 2,5 cm d'épaisseur. La photographie des tranches est prise au moyen de l'appareil photo d'un smartphone mobile oppo. Les images sont enregistrées au format TIFF en couleur. Chaque image est recadrée pour ne garder que la mie de pain, puis convertie en image monochromes en niveaux de gris (8 bits). Le procédé de seuil est utilisé pour différencier les alvéoles de la mie (couleur noir) et la mie (couleur blanc). Les paramètres mesurés sont: le nombre des alvéoles (NA), taille moyenne des alvéoles (TMA) (mm<sup>2</sup>), proportion de l'aire (%), le périmètre, la circularité et la solidité (figure 14).

- **Circularité** : appelée aussi facteur de forme ou déficit isopérimétrique, elle est définie comme le rapport de la surface de la particule sur son périmètre (Legland, 2019). Sa valeur varie de 0,00 (de plus en plus forme allongée) à 1,0 (un cercle parfait) :

$$\text{Circularité} = 4\pi \frac{\text{aire}}{\text{périmètre}^2}$$

- **Solidité** : est appelée aussi compacité ou convexité. Elle est définie comme le rapport de la surface de la particule sur de son enveloppe convexe. Sa valeur est égale à 1 pour une surface convexe (forme régulière) et diminue avec l'apparition de zones concaves caractéristiques de l'apparition d'irrégularités dans le contour (Legland, 2019):

$$\text{Solidité} = \frac{\text{aire}}{\text{aire convexe}}$$



**Figure 14** : illustration pour la surface, le périmètre, la surface convexe, la circularité et la solidité.

### 6.7. Analyse sensorielle

Une analyse sensorielle descriptive avec test hédonique a été réalisée pour évaluer les caractéristiques sensorielles du pain de blé tendre et des pains sans gluten. Pour cette étude, les échantillons ont été évalués par 52 dégustateurs non entraînés, composés de 19 hommes et 33 femmes, âgés de 16 à 62 ans. Des tranches de pain avec une épaisseur de 1 cm, contenant la croûte et la mie, ont été présentées sur des plats blancs en plastique codés avec des nombres aléatoires à trois chiffres. Nous avons demandé aux panélistes de se rincer la bouche avec de l'eau avant chaque appréciation et d'évaluer les échantillons en fonction de la couleur, le goût, l'arôme, la texture, l'apparence et l'acceptabilité globale du pain (annexe 1). Une échelle de notation hédonique à neuf points a été utilisée pour quantifier chaque attribut (1 : je n'aime pas extrêmement, 5 : satisfaisant, 9 : extrêmement agréable). Les pains sont

considérés comme acceptables si leur note moyenne de l'acceptation globale est supérieure à 2,5 (Mastromatteo *et al.*, 2012; Matos et Rosell, 2012).

## **7. Analyses statistiques**

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel JMP Trial 15 statistics (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Les résultats sont exprimés sous forme de moyenne  $\pm$  écart type. L'analyse de variance à un facteur (ANOVA) a été utilisée pour tester la signification des différences entre les moyennes pour chaque variable. Les moyennes ont été comparées à l'aide du test de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

La classification hiérarchique selon la méthode de Ward et l'analyse en composante principale (ACP) ont été réalisées pour classer les pains et vérifier la corrélation entre les propriétés rhéologiques de la pâte et la qualité finale du pain.

La classification hiérarchique, basée sur la méthode de Ward a été aussi utilisée pour l'analyse sensorielle afin de classer les échantillons de pains selon leurs propriétés organoleptiques et ressortir les différences et les ressemblances entre eux. La corrélation entre les propriétés sensorielle et la qualité finale du pain a été déterminée en utilise le test de corrélation.

Les résultats d'ACP et de classification hiérarchique ont été présentées sous forme de graphique.

# RESULTATS ET DISCUSSION



## Résultats et discussion

### 1. Impact de l'incorporation de sous-produits sur les propriétés physicochimiques de la formule sans gluten

#### 1.1. Caractères physicochimiques des farines l'étude

Le tableau 12 montre la composition physicochimique des farines de blé, de maïs, de pois chiche et de la formule maïs/ pois chiche. Les teneurs en humidité, en protéines et en lipides de ces farines varient de 9,22 % à 12,01% ; de 7,9% à 22%, de 1,8% à 4,35% respectivement. Les teneurs en fibres et en cendres varient respectivement de 0,45% à 3,43% et de 0,52% à 2,67%. La teneur en glucides est comprise entre 58,33 et 77,04 %

**Tableau 12 :** composition physico-chimiques des farines de blé, et de la formule sans gluten de base maïs/pois chiche (pour 100g de matière brute)

	Humidité (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Fibres (%)	Cendres (%)	Glucides (%)
<b>Blé</b>	12,01±0,19 <sup>a</sup>	7,9±0,01 <sup>b</sup>	2,08±0,00 <sup>b</sup>	0,45±0,02 <sup>c</sup>	0,52±0,02 <sup>c</sup>	77,04
<b>Maïs</b>	9,96±0,12 <sup>b</sup>	7,9±0,01 <sup>b</sup>	1,8±0,03 <sup>c</sup>	3,2±0,02 <sup>b</sup>	0,83±0,01 <sup>b</sup>	76,31
<b>Pois chiche</b>	9,22±0,33 <sup>b</sup>	22±0,12 <sup>a</sup>	4,35±0,35 <sup>a</sup>	3,43±0,00 <sup>a</sup>	2,67±0,01 <sup>a</sup>	58,33
<b>Formule maïs/ Pois chiche (2/1)*</b>	9,71	12,59	2,64	3,27	1,43	70,36

\* : La composition physico-chimique de la formule maïs/ pois chiche (2/1) est déterminée par calcul. Le taux des glucides assimilables est déterminé par soustraction de la somme des taux des composants. Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ ).

La composition de la farine de blé tendre utilisée pour cette étude est plus ou moins en accord avec les résultats de Matz (1960), mais inférieure aux résultats trouvés par Taneya *et al.* (2014). Ces légères variations peuvent être dues aux différences variétales, à la qualité des graines, aux conditions agro-écologiques, à l'utilisation d'engrais, au degré de séchage, aux conditions de stockage et aux méthodes d'analyse (Taneya *et al.*, 2014).

La farine de pois chiche est plus riche en protéines, en lipides, en fibres et en cendres par rapport aux farines de blé et de maïs. La composition de la farine de pois chiche est compatible avec celle obtenue par Asif *et al.*(2013) et Kahraman *et al.*(2022), où les teneurs en protéines, en lipides et en cendres varient respectivement de 21 à 23,5 %, de 5,7 à 7,6 % et

de 2,3 à 3,1 %. Les teneurs en protéines des farines de blé et du maïs sont comparables (7,9%) où il y'a pas une différence significative.

La formule utilisée dans ce travail est composée de 2/3 de farine de maïs et 1/3 de farine de pois chiche. L'intérêt de l'ajout de la farine de pois chiche dans les formulations sans gluten réside dans l'augmentation de leurs teneurs en protéines.

## 1.2. Caractères physicochimiques des sous-produits de l'étude

### a. Composition physico-chimique

Le tableau 13 représente la composition physicochimique des sous-produits utilisés dans cette étude. La teneur en humidité des échantillons est comprise entre 5,23% et 11,41% ; la teneur en protéines varie de 2,66 à 8,48%, la teneur en matières grasses de 1,03 à 4,37%. Les teneurs en fibres et en cendres sont comprises respectivement entre 7,41 et 52,90% et entre 1,51 et 19,60%. La teneur en glucides varie de 16,88 à 64,36 %.

**Tableau 13 :** composition physico-chimique des sous-produits (pour 100 g de matière brute).

	Humidité	Protéines	Lipides	Fibres	Cendres	Glucides	Pectine
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<b>MSGO</b>	9,90±0,00 <sup>b</sup>	5,40±0,12 <sup>d</sup>	4,37±0,56 <sup>a</sup>	12,41±0,13 <sup>e</sup>	3,76±0,01 <sup>c</sup>	64,16	21,92 ±1,11 <sup>a</sup>
<b>MSGPo</b>	11,41±0,28 <sup>a</sup>	3,66±0,23 <sup>f</sup>	3,16±0,80 <sup>c</sup>	15,90±0,02 <sup>d</sup>	1,51±0,08 <sup>e</sup>	64,36	8,65±0,03 <sup>c</sup>
<b>PPPi</b>	6,04 ±0,37 <sup>d</sup>	4,38±0,20 <sup>e</sup>	2,46±0,03 <sup>bc</sup>	49,00±0,1 <sup>c</sup>	2,92±0,00 <sup>d</sup>	35,20	5,76± 0,15 <sup>e</sup>
<b>PT</b>	5,23±0,38 <sup>e</sup>	7,87±0,05 <sup>b</sup>	3,31±0,35 <sup>c</sup>	52,90±0,16 <sup>a</sup>	3,61±0,05 <sup>c</sup>	27,08	3,91±0,24 <sup>f</sup>
<b>PFB</b>	10,29±0,03 <sup>b</sup>	8,48±0,09 <sup>a</sup>	1,69±0,13 <sup>ab</sup>	7,41±0,26 <sup>f</sup>	19,60±0,15 <sup>a</sup>	52,53	7,14±0,07 <sup>d</sup>
<b>PGFB</b>	7,87±0,04 <sup>c</sup>	7,00±0,23 <sup>c</sup>	1,03±0 ,07 <sup>d</sup>	50,80±0,30 <sup>b</sup>	16,42±0,34 <sup>b</sup>	16,88	9,85± 0,20 <sup>b</sup>
<b>P</b>	0,0000	<0,0001	0,0022	0,0000	0,0000		0,0000

**MSGO:** poudre de marc sans graine d'orange; **MSGPo:** poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi:** poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT:** poudre de la pelure de tomate; **PFB:** poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB:** pelure des graines de la figue de barbarie.

Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ ).

Les résultats obtenus montrent que tous les sous-produits utilisés ont une composition physicochimique différente ( $p < 0,05$ ). La teneur en humidité la plus élevée a été trouvée pour le MSGPo. Les teneurs en cendres et en protéines les plus élevées ont été notées pour la PFB. Ces valeurs sont plus élevées que celles trouvées par Anwar et Sallam (2016b), teneur en protéines est de 4,56%, teneur en cendres est de 8,66%. Les teneur en protéines et en cendres

de PT obtenues dans cette étude sont inférieures aux valeurs indiquées par Knoblich *et al.* (2005), teneur en protéines est de 10,05% et teneur en cendres est de 25,6%.

En ce qui concerne les lipides, le MSGO a la teneur la plus élevée par rapport aux autres sous-produits. Cette richesse en lipides est probablement due à la présence de nombreuses glandes contenant des huiles essentielles de la pelure d'orange (Pandharipande et Makode, 2012).

Les teneurs en fibres les plus élevées, supérieures à 49%, sont enregistrées pour la PT, la PGFB et la PPPi. Donc, ces sous-produits peuvent être utilisées comme une source de fibres alimentaires. La teneur en fibres de PT obtenue, qui est de 52,90%, est en accord avec celles données par PA Silva *et al.* (2019), qui sont comprises entre 48,62 et 53,97%.

Il a été constaté que le MSGPo et le MSGO sont riches en glucides. La composition du MSGPo a été confirmée par Skinner *et al.* (2018) (teneur en protéines : 2,7-5,3 %, teneur en matières grasses : 1,1-3,6 %, teneur en fibres totales : 4,4-47,3 %).

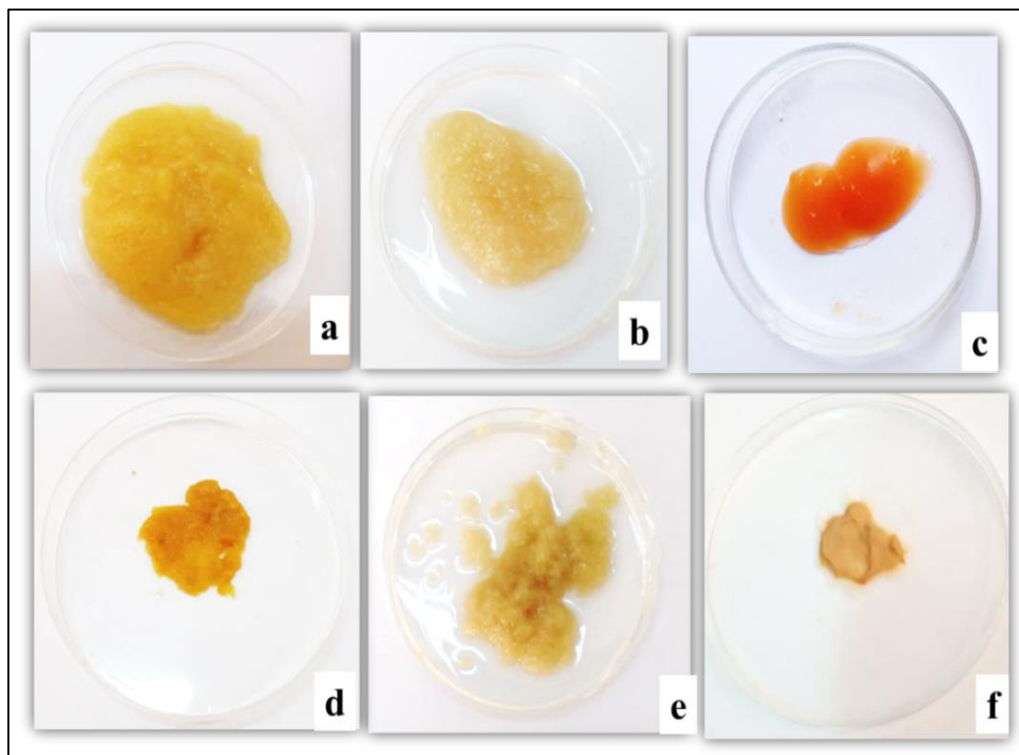
Les différences entre la composition physico-chimique des sous-produits obtenues dans cette étude et les résultats des autres études peuvent être dues à l'emplacement géographique, la saison, la variété, le stade de maturation et/ou la méthode de traitement.

#### **b. Pectine des sous-produits**

Comme le montre le tableau 13, le MSGO présente une teneur en pectine la plus élevée (21,92%) suivi par la PGFB (9,85 %) (figure 15) alors que la valeur la plus faible a été notée pour la PT (3,91%). Comme indiqué par Wang *et al.* (2014), la pelure des agrumes est riche en pectine (21,95%) plus que le marc de pomme (16,68%). De même, Sundarraj et Ranganathan (2017) ont montré que la pelure d'agrumes et le marc de pomme sont les principales sources de pectine. Les pelures d'agrumes contiennent 25-35% (base sèche) de pectine et le marc de pomme contient 10-15% (base sèche) de pectine. La teneur en pectine de la PFB est de 7,14 %. Cette valeur est légèrement inférieure à celle obtenue par El Kossori *et al.* (1998) (7,71%) et supérieure à celle trouvée par Anwar et Sallam (2016b) (3%). Cette différence peut être due au stade de maturation du fruit et à la méthode d'extraction. L'ajout de pectine aux produits de boulangerie peut modifier leur texture, leur capacité de rétention de l'eau CRE et leur consistance.

La pectine peut être utilisée pour remplacer les matières grasses en raison de sa grande capacité de rétention d'huile en réduisant ainsi les calories sans perdre le goût, aussi elle peut

également prolonger la durée de conservation du pain (Oreopoulou et Tzia, 2007; Dalal *et al.*, 2020).

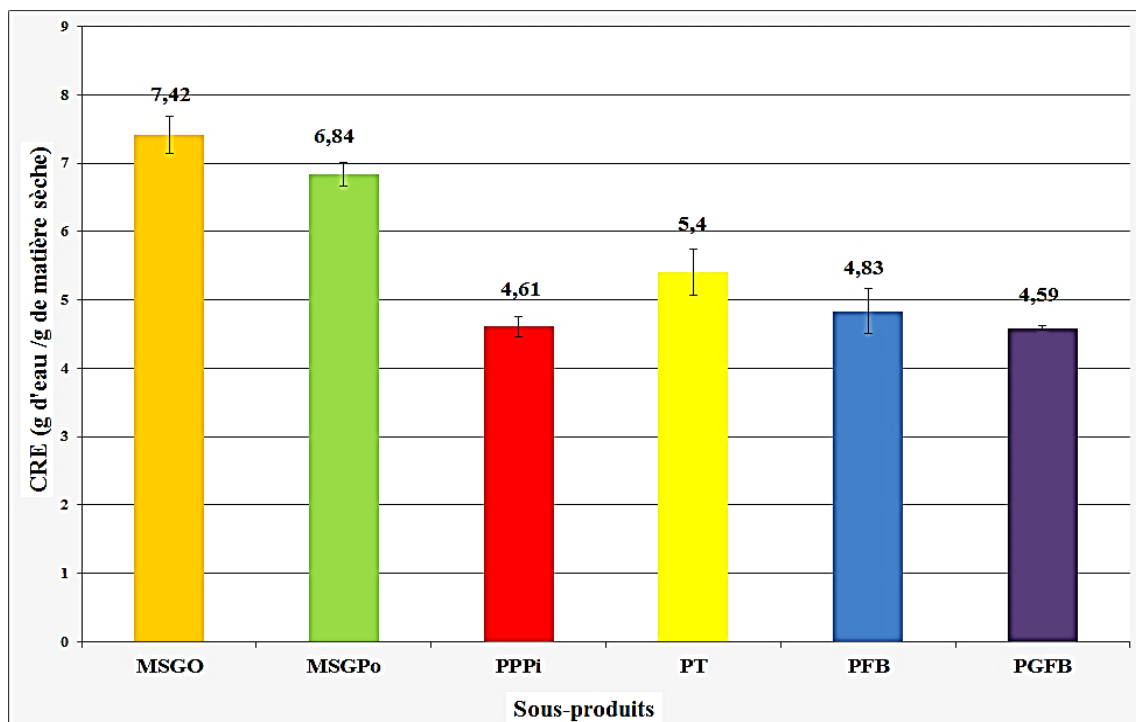


**Figure 15** : pectine extraite de la poudre de a : MSGO, b : MSGPo, c :PPPi, d : PT, e : PFB , f : PGFB avant séchage

(**MSGO**: marc sans graine d'orange; **MSGPo**: marc sans graine de pomme; **PPPi**: pelure avec le placenta du piment; **PT**: pelure de tomate; **PFB**: pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie).

### **c. Capacité de rétention d'eau des sous-produits**

La CRE est une propriété fonctionnelle essentielle pour les aliments tels que les produits de boulangerie, les soupes, les sauces et les pâtes (Yilmaz et Emir, 2017). Comme le montre la figure 16 et le tableau 14, le MSGO présente la plus grande capacité de rétention d'eau (7,42 g d'eau /g de matière sèche), suivi par MSGPo et PT. Alors il n'y a pas une différence significative entre la capacité de rétention d'eau de la PT, PPPi, PFB et PGFB.



**Figure 16:** capacité de rétention d'eau des sous-produits des fruits et des légumes

**MSGO:** poudre de marc sans graine d'orange; **MSGPo:** poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi:** poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT:** poudre de la pelure de tomate; **PFB:** poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB:** pelure des graines de la figue de barbarie, **CRE:** capacité de rétention d'eau.

La capacité de rétention d'eau du MSGPo (6,84 g d'eau /g matière sèche) s'est avérée plus élevée que celle donnée par Ocen et Xu (2013) (comprise entre 5,08 et 6,44 g d'eau /g matière sèche) et inférieure à celle obtenue par Bchir *et al.* (2014) (7,5 g d'eau /g matière sèche) et à celle indiquée par Jun *et al.* (2014) (9,96 g d'eau /g matière sèche).

Divers facteurs peuvent affecter la capacité de rétention d'eau de la poudre des sous-produits, tels que le pH, la présence de composants hydrophiles comme les fibres et les groupes hydroxyle libres, et la granulométrie de la poudre (Boubaker *et al.*, 2016; Yilmaz et Emir, 2017; Hosseini *et al.*, 2019). Les substances à forte capacité de rétention d'eau peuvent être utilisées comme ingrédient fonctionnel pour promouvoir des effets bénéfiques sur la santé, réduire les calories et modifier la viscosité et la texture des aliments préparés (Grigelmo-Miguel et Martín-Belloso, 1998; O'shea *et al.*, 2015b).

### 1.3. Répercussion de l'incorporation de sous-produits sur les caractères physicochimiques de la formule sans gluten de base

Les compositions physicochimiques de la formule sans gluten de base avec différents niveaux de sous-produits ajoutés sont présentées dans le tableau 14 (annexe 2).

**Tableau 14:** composition physico-chimique de la formule sans gluten maïs/pois chiche en fonction du type et de quantité de sous-produits utilisés

	Addition g p 100g	Humidité (%)	Protéines (%)	Lipides (%)	Fibres (%)	Cendres (%)	Glucides (%)	CRE g d'eau /g matière sèche
<b>Formule de base(maïs/pois chiche)</b>	<b>0</b>	9,71	12,59	2,64	3,27	1,43	70,36	-
<b>Formule de base+MSGO</b>	<b>2,5</b>	9,71	12,41	2,67	3,49	1,49	70,20	18,55
	<b>5</b>	9,71	12,23	2,73	3,72	1,54	70,07	37,10
	<b>7,5</b>	9,72	12,05	2,77	3,95	1,60	69,91	55,65
<b>Formule de base +MSGPo</b>	<b>2,5</b>	9,76	12,37	2,65	3,58	1,43	70,18	17,10
	<b>5</b>	9,79	12,14	2,67	3,90	1,43	70,07	34,20
	<b>7,5</b>	9,83	11,91	2,67	4,22	1,43	69,92	51,30
<b>Formule de base +PPPi</b>	<b>2,5</b>	9,61	12,38	2,63	4,41	1,46	69,48	11,53
	<b>5</b>	9,52	12,18	2,63	5,60	1,50	68,62	23,05
	<b>7,5</b>	9,43	11,97	2,62	6,7	1,54	67,74	34,58
<b>Formule de base +PT</b>	<b>2,5</b>	9,59	12,47	2,65	4,50	1,48	69,28	13,50
	<b>5</b>	9,48	12,35	2,68	5,74	1,53	68,21	27,00
	<b>7,5</b>	9,38	12,24	2,69	7,02	1,59	67,13	40,50
<b>Formule de base +PFB</b>	<b>2,5</b>	9,71	12,48	2,61	3,37	1,89	69,91	12,08
	<b>5</b>	9,73	12,38	2,59	3,47	2,33	69,48	24,15
	<b>7,5</b>	9,75	12,28	2,57	3,57	2,79	69,04	36,23
<b>Formule de base +PGFB</b>	<b>2,5</b>	9,66	12,45	2,60	4,45	1,80	69,02	11,48
	<b>5</b>	9,62	12,31	2,56	5,64	2,17	67,70	22,95
	<b>7,5</b>	9,58	12,16	2,52	6,83	2,55	66,36	34,43

MSGO: poudre de marc sans graine d'orange; MSGPo: poudre de marc sans graine de pomme; PPPi: poudre de pelure avec le placenta du piment; PT: poudre de la pelure de tomate; PFB: poudre de pelure de la figue de barbarie; PGFB: pelure des graines de la figue de barbarie, CRE :capacité de rétention d'eau.

La teneur en eau des formules enrichies en sous-produits varie de 9,38 à 9,83%. La teneur en eau augmente lorsque le niveau d'addition de MSGPo et de PFB augmente et a diminué avec l'augmentation de niveau de supplémentation de PPPi, PT et PGFB. Elle atteint la valeur la plus élevée (9,83%) avec un taux d'addition de MSGPo de 7,5 g p100g. Il n'y a pas de différence entre la teneur en eau de la formule de base sans gluten et celle de la farine sans gluten enrichie en 2,5 g et/ou 5 g de MSGO et en 2,5 g de PFB.

En ce qui concerne la teneur en protéines et en glucides des farines enrichies en sous-produits, les échantillons ont donné des valeurs allant de 11,91 à 12,48 % et de 67,13 à 70,20 %, successivement. On a constaté une faible diminution des protéines et une réduction des glucides disponibles dans les farines sans gluten enrichis par rapport au témoin sans gluten (12,59 % et 70,36% respectivement). En ce qui concerne la teneur en glucides disponibles, la réduction la plus importante étant donnée par PGFB à 7,5 p100g.

La teneur totale en lipides des formules enrichies en sous-produits varie de 2,52 à 2,77 %. Les formules contenant de MSGO présentent la teneur en lipides la plus élevée, suivie par les formules contenant de MSGPo et/ou de PT. Une faible réduction de la teneur en lipides a été observée dans les formules enrichies en PFB, PGFB et/ou PPPi par rapport à la formule de base sans gluten.

La teneur en cendres est plus élevée dans les formules enrichies en sous-produits par rapport à la formule de base sans gluten témoin, sauf pour le MSGPo, où son ajout ne modifie pas la teneur en cendre de la formule de base (1,43%) quelle que soit la quantité ajoutée. La formule qui contient 7,5 g de PFB présente la valeur de la teneur en cendres la plus élevée (2,79 %).

Il a été observé une augmentation de la teneur en fibres dans les formules enrichies en sous-produits. Elle est comprise entre 3,37 et 7,02 %, ce qui correspond à une multiplication par deux de la teneur en fibres par rapport à la formule témoin sans gluten. Les sous-produits utilisés sont des sources importantes de fibres alimentaires.

### **Conclusion**

*L'ajout de la farine de pois chiche dans les formulations sans gluten augmente la teneur en protéines des produits sans gluten. Les propriétés physicochimiques des sous-produits suggèrent que la PT, la PGFB et la PPPi sont des sources importantes de fibres alimentaires, la PFB peut être utilisée comme source de protéines et la MSGO peut être utilisée comme source de lipides. Les MSGO, PGFB, MSGPo, et PFB sont des sources importantes pour l'extraction de la pectine.*

*Le MSGO, le MSGPo et la PT présentent la plus grande capacité de rétention d'eau suivi par MSGPo et PT. Ils peuvent être utilisés comme ingrédient fonctionnel pour modifier la viscosité et la texture des pains sans gluten.*

## **2. Répercussion de l'incorporation des sous-produits sur le comportement rhéologique de la pâte**

Les tableaux 15 et 16 montrent l'effet de l'ajout de sous-produits sur les caractéristiques rhéologique des pâtes.

### **2.1. Indications de test d'écoulement**

Le coefficient de consistance (K), l'indice d'écoulement (n) et la valeur r (coefficient de corrélation statistique) sont présentés dans le tableau 15. Le modèle de la loi de puissance a montré des valeurs de coefficient de corrélation (r) élevé pour tous les échantillons.

**Tableau 15** : paramètres rhéologiques de la pâte de blé et sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés

	Addition (g p 100 g)	K (Pa.s <sup>n</sup> )	n	r
<b>Blé T1</b>	<b>0</b>	141,90±25,74 <sup>e</sup>	0,33±0,04 <sup>a</sup>	0,97±0,007
<b>SG T2</b>	<b>0</b>	173,30±20,08 <sup>de</sup>	0,29±0,02 <sup>ab</sup>	0,97 ±0,007
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	216,60±134,49 <sup>de</sup>	0,08±0,01 <sup>bcdefg</sup>	0,93±0,01
	<b>5</b>	221,70±48,93 <sup>de</sup>	-0,11±0,09 <sup>abcde</sup>	0,88±0,04
	<b>7,5</b>	134,55±9,83 <sup>e</sup>	-0,25±0,04 <sup>efg</sup>	0,98±0,004
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	337,30±95,74 <sup>bcde</sup>	0,10±0,06 <sup>abcde</sup>	0,98±0,01
	<b>5</b>	291,40±22,84 <sup>de</sup>	-0,12±0,02 <sup>fg</sup>	0,89±0,06
	<b>7,5</b>	159,60±21,64 <sup>e</sup>	0,03±0,02 <sup>abcdef</sup>	0,87±0,01
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	289,65±130,74 <sup>cde</sup>	0,05±0,05 <sup>abcde</sup>	0,97±0,02
	<b>5</b>	182,76±67,76 <sup>e</sup>	0,17±0,04 <sup>abcd</sup>	0,87±0,05
	<b>7,5</b>	103,71±39,73 <sup>e</sup>	0,23±0,08 <sup>abc</sup>	0,98±0,01
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	955,40±323,29 <sup>ab</sup>	-0,20±0,00 <sup>defg</sup>	0,94±0,01
	<b>5</b>	229,05±80,40 <sup>de</sup>	0,14±0,01 <sup>cdefg</sup>	0,95±0,06
	<b>7,5</b>	125,75±20,7 <sup>e</sup>	0,162±0,08 <sup>abcde</sup>	0,99±0,00
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	822,70±37,62 <sup>abcd</sup>	-0,211±0,24 <sup>defg</sup>	0,92±0,07
	<b>5</b>	1049,00±548,71 <sup>a</sup>	-0,376±0,16 <sup>fg</sup>	0,92±0,01
	<b>7,5</b>	895,85±106,84 <sup>abc</sup>	-0,436±0,06 <sup>g</sup>	0,93±0,02
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	399,0±285,81 <sup>abcde</sup>	0,033±0,12 <sup>abcdef</sup>	0,96±0,02
	<b>5</b>	434,35±63,00 <sup>abcde</sup>	-0,078±0,17 <sup>abcdefg</sup>	0,90±0,03
	<b>7,5</b>	480,05±24,54 <sup>abcde</sup>	-0,03±0,18 <sup>abcdefg</sup>	0,95±0,06
<b>P</b>		< 0,0001	< 0,0001	

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO** : poudre de marc sans graine d'orange; **MSGPo** : poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi** : poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT** : poudre de la pelure de tomate; **PFB** : poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB** : pelure des graines de la figue de barbarie, **K** : indice de consistance, **n** : indice d'écoulement, **r** : coefficient de corrélation statistique. Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ )

### 2.1.1. Consistance de la pâte

La consistance de la pâte sans gluten est une caractéristique physique importante qui influe sur la qualité du produit fini , principalement le volume du pain, vu le rôle qu'elle joue dans la rétention des petites bulles d'air initialement incorporées dans la pâte pendant le pétrissage (Turabi *et al.*, 2008).

La valeur du coefficient de consistance a varié entre 103 et 1049 Pa.s<sup>n</sup>. Les valeurs de coefficient de consistance K les plus élevées ont été observées pour les pâtes contenant la



PFB, suivie par la PGFB et les plus faibles pour les pâtes contenant la PPPi. Aucune différence statistiquement significative n'a été enregistrée entre les coefficients de consistance K de la pâte témoin et ceux du MSGO, MSGPi et PPPi avec des taux d'addition de 2,5g et 5g et entre les coefficients de consistance du PT avec un taux d'addition de 5g et du PGFB avec des niveaux d'addition de 2,5g et 5g. Il existe une relation inversement proportionnelle entre la quantité de MSGO, de MSGPo, PPPi, ou PT et la consistance de la pâte. Plus leur taux augmente dans la pâte, plus le coefficient de consistance K diminue. Ce qui pourrait être lié à la pré-hydratation des sous-produits avant de les incorporer dans la pâte, ce qui réduit l'absorption d'eau et diminue la consistance de la pâte.

Le même résultat a été trouvé par Juszczak *et al.*(2012), par rapport au témoin sans gluten, qui ont indiqué que la valeur de K diminue (187 à 296,3 Pa.s<sup>n</sup>) avec l'augmentation de la quantité d'inulines ajoutée à la formule sans gluten (4-12 g). De même, une diminution des valeurs d'indice de consistance des pâte sans gluten de 428 à 391,3 Pa.s<sup>n</sup> a été observée avec l'augmentation des fibres d'agrumes (10-20g) dans la formulation de la pâte sans gluten (Korus *et al.*, 2020). Juszczak *et al.* (2012) ont également révélé qu'au-delà d'un certain niveau d'ajout d'inuline, aucun changement n'est apparu dans la consistance de la pâte.

Selon Ronda *et al.* (2017), l'influence des fibres ajoutées sur les propriétés d'écoulement de la pâte du pain sans gluten est principalement associée au type de fibres (insolubles/solubles) et à leur quantité. L'ajout de fibres solubles a réduit les valeurs de l'indice de consistance de la pâte sans gluten (Juszczak *et al.*, 2012), alors que l'ajout de fibres insolubles a un effet contraire sur la viscosité apparente de la pâte sans gluten (Sabanis *et al.*, 2009). Pour obtenir un volume satisfaisant de pain sans gluten, il est important que la pâte du pain sans gluten possède une consistance optimale (Ronda *et al.*, 2017).

### **2.1.2. Indice d'écoulement**

Les valeurs de l'indice d'écoulement n de toutes les pâtes sont inférieures à 1 (tableau 14). Ces valeurs sont situées entre -0,436 et 0,33, ce qui indique une pseudo-plasticité des échantillons (amincissement par cisaillement). Une diminution de l'indice d'écoulement n est observée lorsque la quantité de MSGO, PPPi, ou PFB ajoutée à la formulation de la pâte sans gluten est augmentée.

Selon la littérature, les valeurs de l'indice d'écoulement des formulations de pâtes sans gluten enrichies en fibres varient de 0,249 à 0,264 pour les fibres d'agrumes (Korus *et al.*, 2020), de 0,276 à 0,328 pour l'inuline (Juszczak *et al.*, 2012), et de 0,67 à 0,99 pour les fibres

de betterave à sucre et de pomme (Djordjević *et al.*, 2019). Les valeurs de l'indice d'écoulement  $n$  de cette étude sont inférieures aux valeurs obtenues par Djordjević *et al.* (2019).

Certains échantillons montrent une valeur négative de l'indice d'écoulement  $n$ , alors que selon Ronda *et al.* (2017), les valeurs de l'indice  $n$  des pâtes sans gluten se situent entre 0,25 et 0,35. Il y a très peu d'études qui expliquent les valeurs négatives de l'indice d'écoulement. Ces valeurs négatives peuvent être attribuées à la présence de glissement du mélange, à une dispersion de la viscosité ou à une dégradation moléculaire de l'échantillon (Padmanabhan et Bhattacharya, 1991; Drozdek et Faller, 2002; Fraiha *et al.*, 2011).

Pour les substances pseudo-plastiques, la viscosité est réduite lorsque le taux de cisaillement augmente car, sous l'action du cisaillement, les interactions entre les composants du produit se rompent (Zhu *et al.*, 2016). Donc, la modification de la microstructure de la pâte dans le sens de l'écoulement avec une augmentation du taux de cisaillement, entraîne une diminution de la viscosité apparente (Djordjević *et al.*, 2022). En l'occurrence, lorsque la viscosité apparente de la pâte est élevée, les bulles d'air piégées dans la pâte peuvent lever et persister dans le pain tout au long de la phase de cuisson, ce qui se traduit par un volume de pain et des porosités élevées (Sabanis *et al.*, 2009).

Le coefficient de consistance  $K$  et l'indice d'écoulement  $n$  dépendent de la température, de la pression et de la formulation. Pour les produits alimentaires non newtoniens le coefficient de consistance  $K$  est plus sensible à la température que l'indice d'écoulement  $n$ , où la suspension devient moins visqueuse lorsque la température augmente et plus visqueuse lorsqu'elle est soumise à des pressions (Krokida *et al.*, 2001; e Chiocchetti *et al.*, 2013; Ronda *et al.*, 2017; Ramsey, 2019). L'indice d'écoulement varie en fonction du niveau d'hydratation de la pâte et à la présence et aux variations des autres constituants de la pâte sans gluten (la formulation).

## **2.2. Réponses au rhéofermentomètre**

### **2.2.1. Production de gaz pendant la fermentation**

Le tableau 16 indique l'effet des sous-produits sur les caractéristiques de fermentation des pâtes.

**Tableau 16 :** paramètres de développement de la pâte et de production de gaz du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés

	Addition g p 100g	H <sub>m</sub> Mm	H <sub>m</sub> ' mm	T <sub>1</sub> min	T' <sub>1</sub> min	T <sub>x</sub> min	H Mm	CA %	V <sub>tCO2</sub> mL	V <sub>pCO2</sub> mL	V <sub>RCO2</sub> mL	R <sub>CO2</sub> %	H <sub>m</sub> <sup>adj</sup> mm
<b>Blé T<sub>1</sub></b>	<b>0</b>	34,6	77,4	63 :00	43:30	55:30	32,6	5,8	939	37	902	96,1	34,6
<b>SG T<sub>2</sub></b>	<b>0</b>	4,1	96,3	84 :00	45:00	31:30	3,9	4,9	874	259	615	70,4	4,10
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	4,0	98,1	30 :00	45:00	30:00	3,2	20,0	979	80	899	91,9	3,57
	<b>5</b>	5,0	91,9	28 :30	45:00	25:30	1,6	68,0	943	89	854	90,6	4,63
	<b>7,5</b>	6,6	85,3	31 :30	57:00	28:30	0,9	86,4	953	91	862	90,5	6,05
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	6,5	104,7	39 :00	49:30	27:00	2,4	63,1	1151	144	1006	87,5	4,94
	<b>5</b>	7,8	105,0	43 :30	55:30	31:30	2,4	69,2	1179	132	1047	88,8	5,78
	<b>7,5</b>	7,5	103,9	30 :00	54:00	28:30	3,3	56,0	1221	164	1058	86,6	5,37
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	5,9	106,8	52:30	43:30	24:00	5,0	15,3	1083	107	975	90,1	4,76
	<b>5</b>	6,4	103,0	36:00	36:00	24:00	4,0	37,5	1004	114	890	88,7	5,57
	<b>7,5</b>	3,9	100,3	39:00	39:00	25:30	2,3	41,0	996	100	896	90,0	3,42
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	8,2	98,8	39:00	40:30	27:00	1,0	87,8	1014	98	917	90,3	7,07
	<b>5</b>	6,5	102,2	31:30	36:00	27:00	1,4	78,5	969	96	874	90,1	5,86
	<b>7,5</b>	7,7	97,6	25:30	33:00	25:30	1,6	79,2	937	90	848	90,4	7,18
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	7,6	108,3	48:00	46:30	22:30	4,0	47,4	1118	103	1015	90,8	5,94
	<b>5</b>	7,8	109,1	36:00	42:00	24:00	3,6	53,8	1136	148	988	87,0	6,00
	<b>7,5</b>	5,8	105,7	58:30	46:30	24:00	4,8	17,2	1166	158	1008	86,4	4,35
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	5,8	105,6	61:30	43:30	28:30	5,6	3,4	1070	100	970	90,6	4,74
	<b>5</b>	4,7	102,8	43:30	37:30	24:00	3,3	29,8	993	105	887	89,4	4,14
	<b>7,5</b>	5,7	106,3	31:30	33:00	27:00	4,6	19,3	969	97	872	90,0	5,14

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc sans graine d'orange; **MSGPo**: poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie, **H<sub>m</sub>** :hauteur maximale de la pâte, **T<sub>1</sub>**:temps de développement maximal de la pâte, **H<sub>m</sub>'**: hauteur maximale du dégagement gazeux, **T'<sub>1</sub>**:temps nécessaire pour obtenir du maximum de formation de gaz,**T<sub>x</sub>** :temps d'apparition de la porosité de la pâte, **h**: hauteur de la pâte à la fin de l'essai, **CA**: coefficient d'affaiblissement = (H<sub>m</sub>-h)/H<sub>m</sub>, **V<sub>tCO2</sub>**: volume total de production de CO<sub>2</sub>, **V<sub>pCO2</sub>**: volume des pertes de CO<sub>2</sub>,**V<sub>RCO2</sub>**: volume de CO2 retenu, **R<sub>CO2</sub>**:coefficient de rétention du CO<sub>2</sub>, **H<sub>m</sub><sup>adj</sup>**: hauteur maximale ajustée.

L'ajout des différents sous-produits à différents taux (2,5, 5 et 7,5g pour 100g) dans les pâtes sans gluten a augmenté le volume total de production de CO<sub>2</sub> ( $V_{ICO_2}$ ), le volume de CO<sub>2</sub> retenu ( $V_{R\ CO_2}$ ) ainsi que le coefficient de rétention du CO<sub>2</sub> ( $R_{CO_2}$ ) et a réduit le volume de CO<sub>2</sub> perdu ( $V_{pCO_2}$ ). Ce qui signifie que l'ajout des sous-produits améliore la production et la capacité de rétention du CO<sub>2</sub> de la pâte sans gluten.

Une bonne production et rétention de gaz affectent positivement la qualité finale du pain, comme le rapportent Martínez *et al.* (2014), la capacité de rétention du CO<sub>2</sub> est liée aux ingrédients utilisés et à la structure interne de la pâte.

Il a été démontré que les sous-produits utilisés dans cette étude contiennent des sucres fermentescibles tels que le glucose et le fructose (Salim *et al.*, 2009; Sudha, 2011) et des minéraux tels que K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Zn<sup>2+</sup> (e Chiocchetti *et al.*, 2013; Gowe, 2015). La levure consomme directement les sucres fermentescibles contenus dans la pâte à partir des sous-produits ou après pré-hydrolyse des amidons de la farine de maïs ou de pois chiche et produisent du dioxyde de carbone et de l'éthanol, qui sont responsables de la levée de la pâte pendant la fermentation et la cuisson au four. En revanche, la présence de Ca<sup>2+</sup> dans les produits de fermentation permet d'obtenir un meilleur résultat de fermentation en augmentant la production d'alcool (Walker et Stewart, 2016; Struyf *et al.*, 2017).

### **2.2.2. Développement de la pâte pendant la fermentation**

La pâte sans gluten avec MSGO, MSGPo, PPPi, PT, PFB et PGFB est caractérisée par une hauteur de pâte maximale ( $H_m$ ) plus élevée que la pâte témoin sans gluten (tableau 15, figures 17, 18, 19, 20, 21, 22) à l'exception de la pâte avec 2,5g de MSGO et 7,5g de PPPi, qui a présentée une hauteur de pâte maximale ( $H_m$ ) moins élevée que la pâte témoin sans gluten. Néanmoins, ce paramètre était plus élevé pour la pâte de blé témoin. Dans l'ensemble, les pâtes sans gluten avec les sous-produits de MSGPo, PT et PFB présentent des hauteurs maximales de pâte ( $H_m$ ) plus importantes que celles des autres échantillons.

La même valeur d' $H_m$  est obtenue pour la MSGPo à 2,5g et la PT à 5g (6,5 mm), le MSGPo et la PFB à 5g (7,8 mm), et la PFB à 7,5 g et la PGFB à 2,5g (5,8 mm).

D'après les figures 17, 18, 19 et 20, les pâtes sans gluten qui ont la hauteur de pâte maximale ( $H_m$ ) la plus élevée (MSGO 7,5 g, MSGPo 5g, PT 2,5g, PGFB 2,5g) leur développement commence tardivement, après 6 min.

La hauteur maximale de dégagement de gaz ( $H'_m$ ) de la pâte sans gluten a augmenté après l'ajout de sous-produits à différents taux, sauf pour la MSGPo à 5 g et 7,5 g (annexe 3).

Le temps ( $T_1$ ) pour atteindre le développement maximal de la pâte a varié de 25 min à 84 min. Globalement, tous les sous-produits à différents taux ont réduit le temps  $T_1$  par rapport à la pâte de blé (63 min) et à la pâte sans gluten (84 min). L'augmentation de la valeur  $H'_m$  et la diminution de la valeur  $T_1$  pourraient être liées à la cinétique accélérée de la formation de  $CO_2$  après l'ajout des sous-produits.

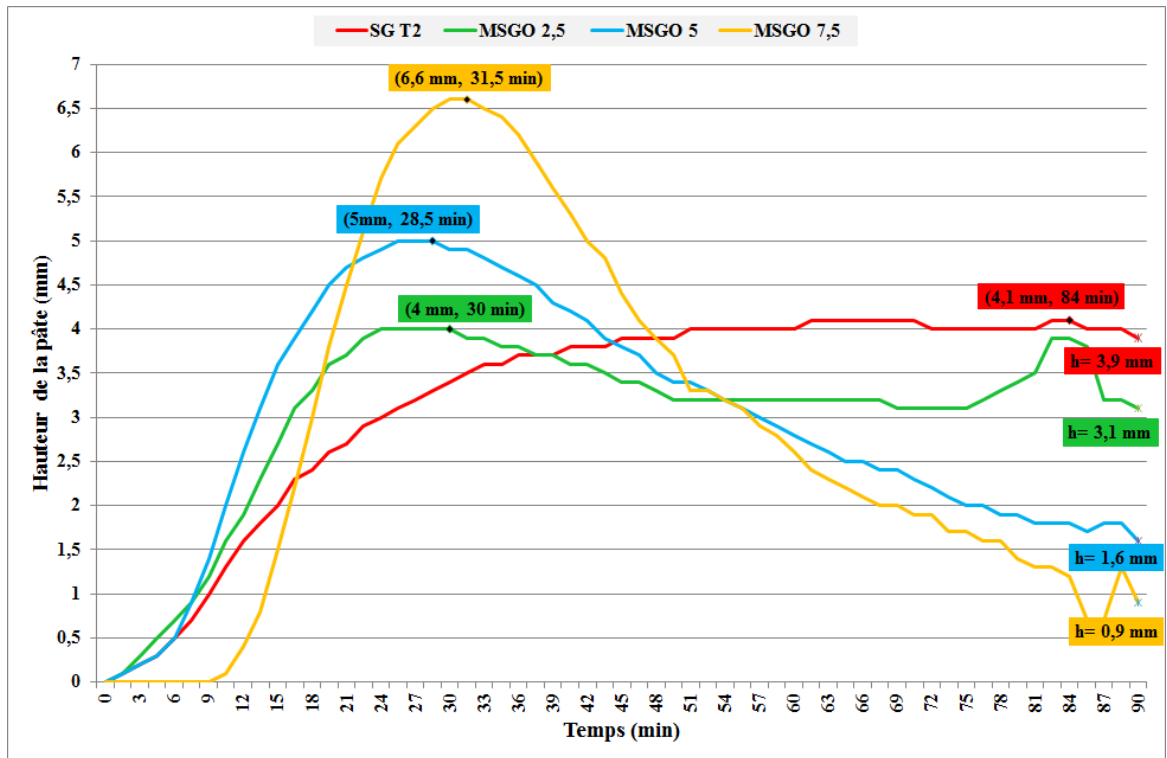
Le temps ( $T'_1$ ) pour atteindre une formation maximale de gaz a été affecté de manière différente pour chaque sous-produit utilisé à différents taux d'addition. La même valeur de  $T'_1$  (45 min) est observée pour la pâte témoin sans gluten et la pâte avec le sous-produit MSGO avec un taux d'ajout de 2,5g et 5g.

Le temps de porosité  $T_x$  de tous les échantillons avec les sous-produits semble être plus court que ceux de la pâte témoin de blé (55,30 min) et de la pâte témoin sans gluten (31,30 min). De plus, la hauteur maximale de la pâte ( $H_m$ ) de tous les échantillons est parvenue après  $T_x$ . Verheyen *et al.* (2014) ont indiqué que les deux paramètres le temps où le gaz a commencé à s'échapper de la pâte ( $T_x$ ) et la capacité de rétention de gaz par la pâte sont liés au volume de  $CO_2$  et à la rhéologie de la pâte.

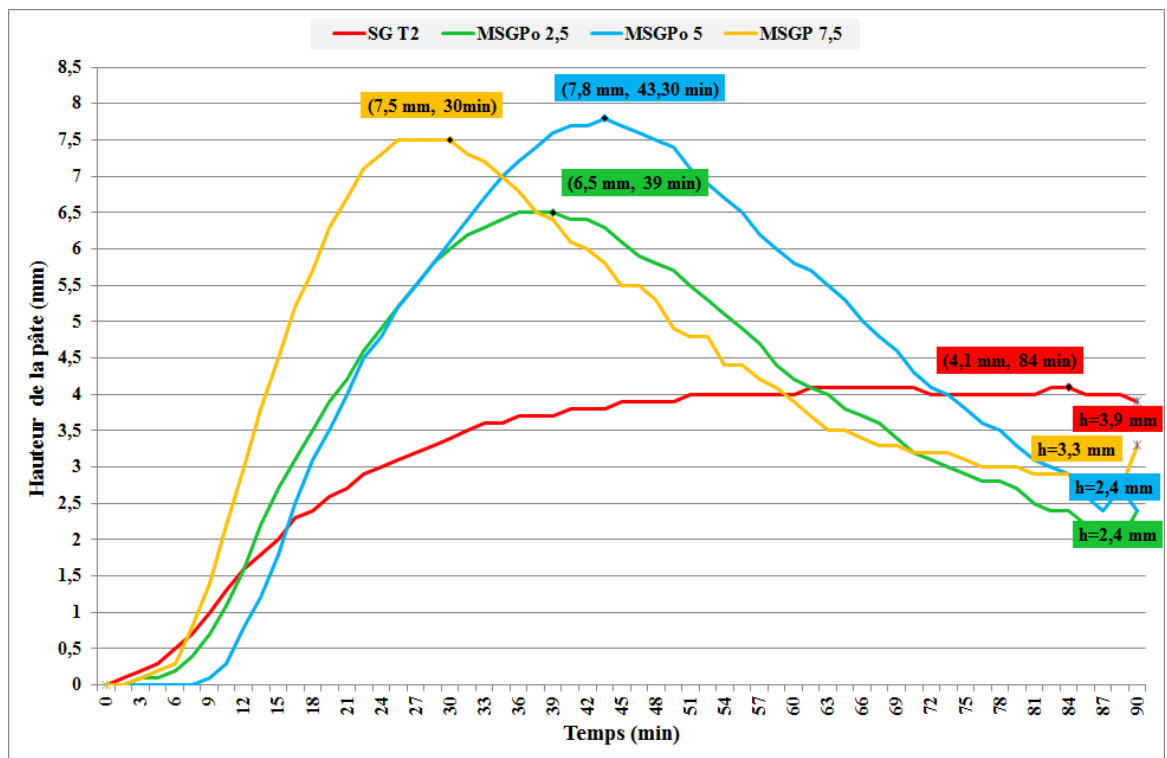
L'ajout de MSGO, MSGPo et PT n'a pas amélioré la hauteur finale (h) de la pâte sans gluten après 90 min, où, la hauteur finale (h) de la pâte sans gluten atteint 0,9 mm après l'ajout de 7,5g de MSGO. La valeur de h la plus basse est observée pour les pâtes qui ont un  $H_m$  la plus élevée (MSGO à 7,5 g ,PSGPo à 5g et /ou PT 2,5 g /100 g formule de base) (figures 17, 18 et 19).

Comparativement aux témoins de blé et sans gluten , le pourcentage de perte de volume de la pâte CA (coefficient d'affaiblissement) après 90 min est élevé pour tous les pâtes contient des sous-produits à l'exception de la pâte additionnée de 2,5 g de PGFB qui a un coefficient d'affaiblissement le plus faible (3,4 %), un  $T_1$  le plus long (61:30 min) et une hauteur finale (h) la plus élevée (5,6 mm), ce qui signifie que la pâte sans gluten avec 2,5 % de PGFB a produit une pâte à structure plus résistante par rapport à tous les échantillons.

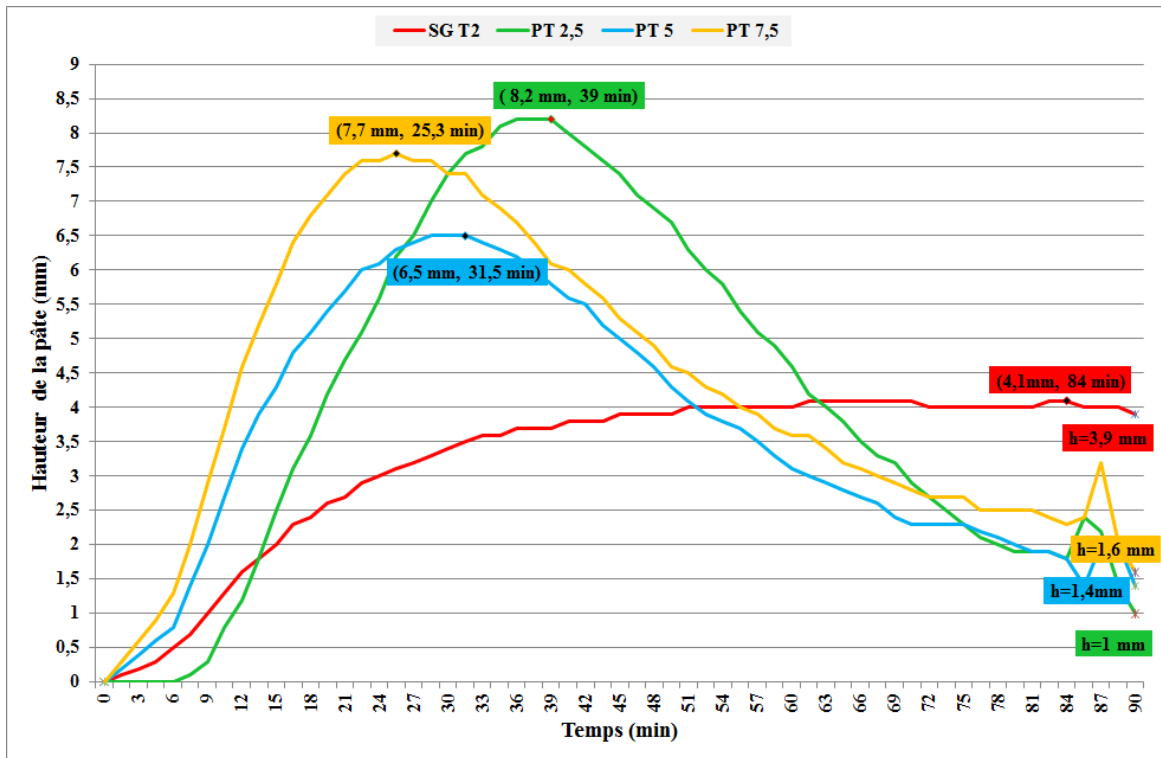
La hauteur maximale ajustée ( $H^{adj}_m$ ) de tous les échantillons s'est avérée inférieure à  $H_m$  après avoir isolé l'effet de l'activité de la levure. Ce qui indique probablement que la  $H_m$  est liée à l'activité de la levure et pas seulement à la rhéologie de la pâte, où les sous-produits utilisés ont un effet accélérant sur l'activité de la levure.



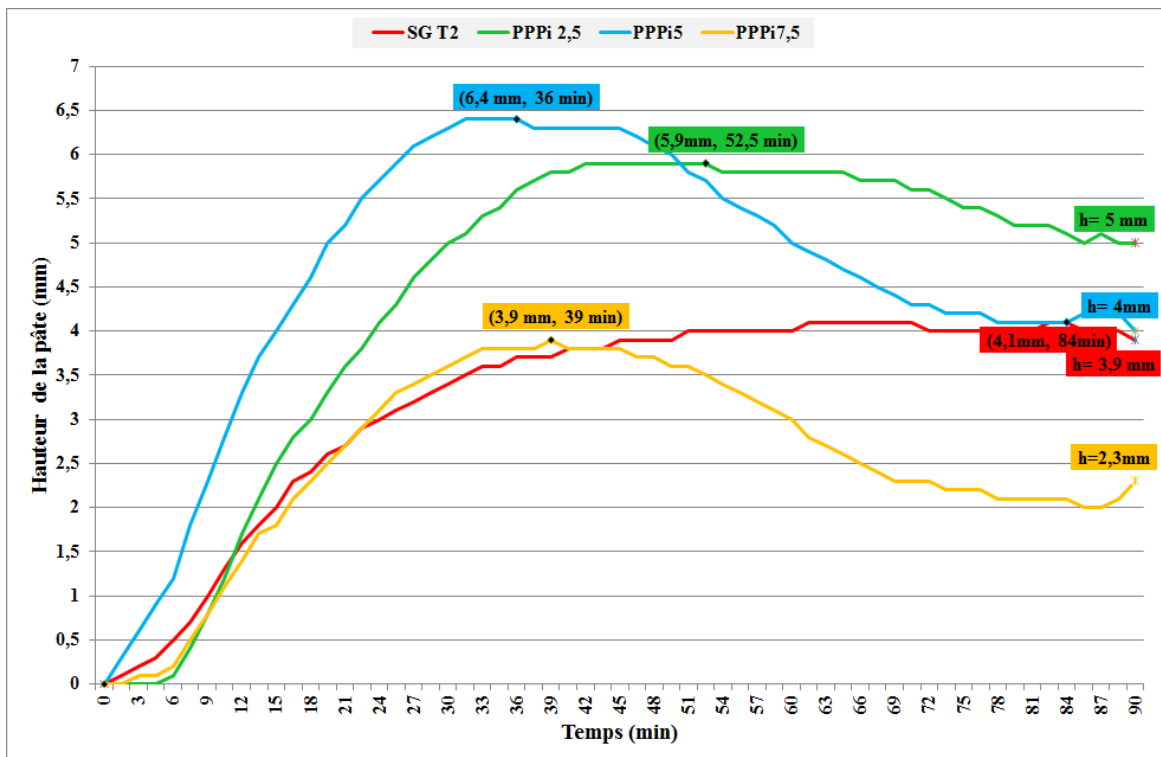
**Figure 17 :** développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit d’orange pendant 90 min (SG T<sub>2</sub>: témoin sans gluten, MSGO: poudre de marc sans graine d’orange, h: hauteur de la pâte à la fin de l’essai)



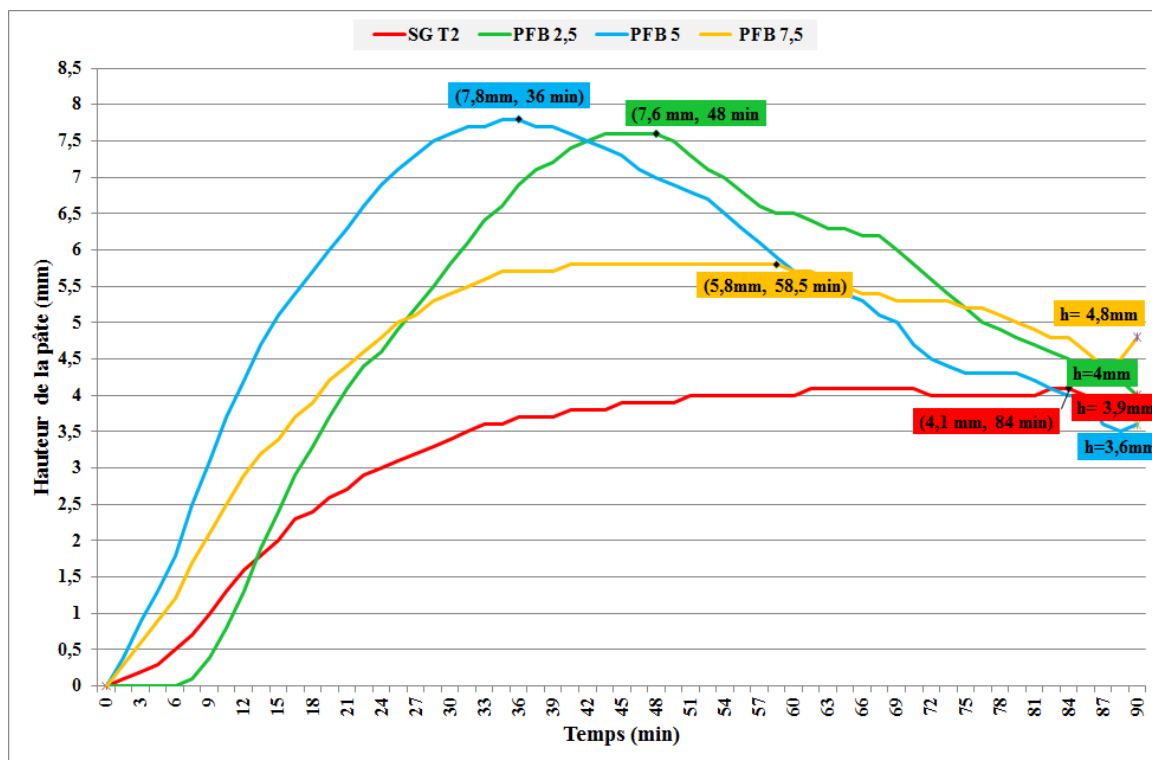
**Figure 18:** développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de pomme pendant 90 min (SG T<sub>2</sub>: témoin sans gluten, MSGPo: poudre de marc sans graine de pomme, h: hauteur de la pâte à la fin de l’essai)



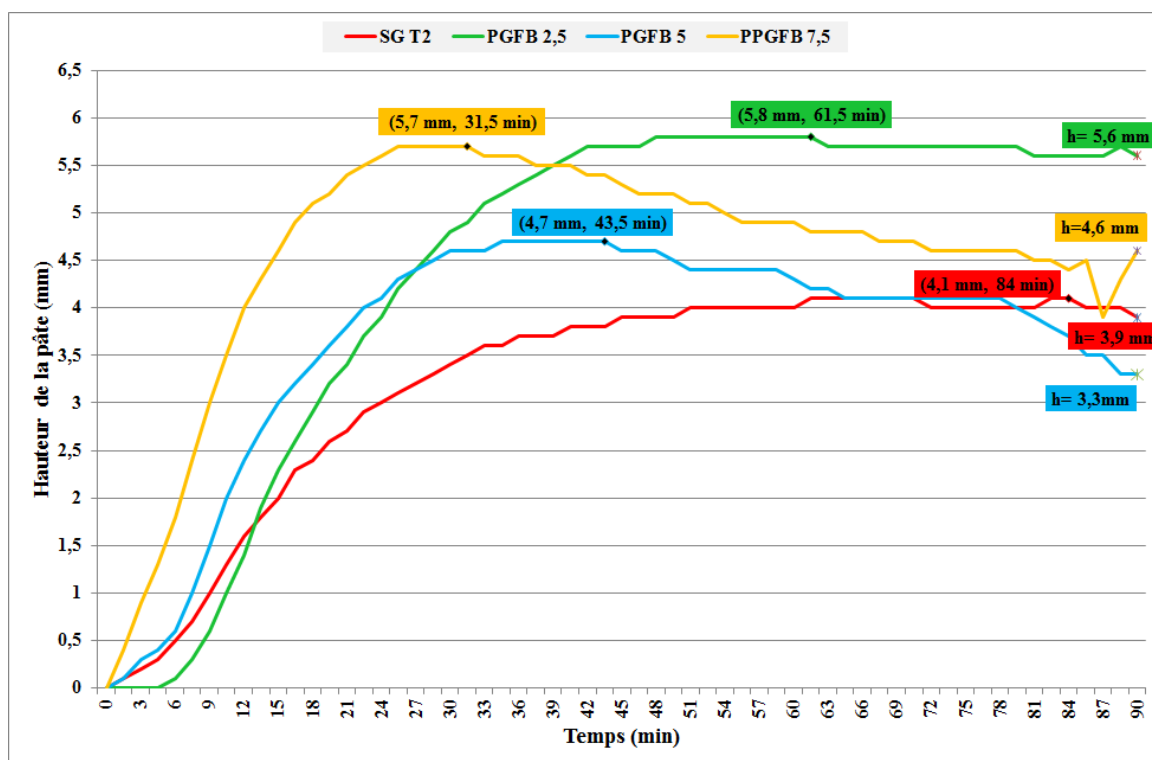
**Figure 19 :** développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de la tomate pendant 90 min (SG T<sub>2</sub> : témoin sans gluten, PT : poudre de la pelure de tomate, h : hauteur de la pâte à la fin de l'essai)



**Figure 20 :** développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de piment pendant 90 min (SG T<sub>2</sub> : témoin sans gluten, PPPi : poudre de pelure avec le placenta du piment, h : hauteur de la pâte à la fin de l'essai)



**Figure 21:** développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de la pelure de la figue de barbarie pendant 90 min (**SG T<sub>2</sub>**: témoin sans gluten, **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie, **h**: hauteur de la pâte à la fin de l'essai)



**Figure 22:** développement de la pâte sans gluten avec et sans ajout de sous-produit de la pelure des graines de la figue de barbarie pendant 90 min (**SG T<sub>2</sub>**: témoin sans gluten, **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie, **h**: hauteur de la pâte à la fin de l'essai)



## Conclusion

Les pâtes sans gluten enrichies en sous-produits sont plus visqueuses que la pâte de la formule de base sans gluten, où l'ajout des sous-produits à la formule de base sans gluten augmente la consistance de la pâte ( $k$ ) sauf à 7,5 g pour MSGO, MSGPo, PT et /ou PPPi. La pâte enrichie en sous-produits a exhibé un comportement pseudo-plastique avec un indice d'écoulement  $n$  inférieure à 1.

L'ajout de sous-produits à la formule sans gluten de base améliore la production et la capacité de rétention du  $CO_2$ , augmente la hauteur maximale de la pâte ( $H_m$ ) et la hauteur maximale de dégagement de gaz ( $H'_m$ ) et accélère l'activité de la levure où il y'a une réduction du temps  $T_1$  pour atteindre la hauteur maximal, par rapport au témoin sans gluten.

## 3. Incidences de l'incorporation des sous-produits sur la qualité finale des pains

L'effet de l'incorporation des sous-produits sur la perte du poids à la cuisson, le volume spécifique, le pH et l'humidité finale des différents pains ont été déterminés.

### 3.1. Perte de poids

Le tableau 17 représente les résultats de la perte de poids à la cuisson des témoins, pain à base de blé et sans gluten, et des pains sans gluten enrichies en sous-produits.

**Tableau 17:** perte de poids du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés

	addition (g p 100g)	Perte de poids (%)
<b>Blé T1</b>	<b>0</b>	25±0,015 <sup>bcd</sup>
<b>SG T2</b>	<b>0</b>	18,09±0,22 <sup>gh</sup>
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	18,33±2,35 <sup>h</sup>
	<b>5</b>	26,11±0,78 <sup>ab</sup>
	<b>7,5</b>	27,77±1,57 <sup>a</sup>
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	23,88±0,78 <sup>cde</sup>
	<b>5</b>	26,66±3,14 <sup>ab</sup>
	<b>7,5</b>	25,55±0,00 <sup>bc</sup>
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	20,45±0,37 <sup>f</sup>
	<b>5</b>	20,45±0,29 <sup>f</sup>
	<b>7,5</b>	20,51±0,33 <sup>f</sup>
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	23,88±0,78 <sup>cde</sup>
	<b>5</b>	23,33±0,00 <sup>de</sup>
	<b>7,5</b>	19,42±0,007 <sup>fg</sup>
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	19,05±0,01 <sup>fg</sup>
	<b>5</b>	19,28±0,08 <sup>fg</sup>
	<b>7,5</b>	22,76±0,16 <sup>e</sup>
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	20,32±0,10 <sup>f</sup>
	<b>5</b>	20,84±0,48 <sup>f</sup>
	<b>7,5</b>	20,9±0,26 <sup>f</sup>
<b>P</b>		< 0,0001

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc sans graine d'orange; **MSGPo**: poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie;

Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ )

Ce tableau montre que la perte de poids a augmenté pour toutes les formules par rapport au pain témoin sans gluten ( $P < 0,05$ ). La perte de poids à la cuisson de la formule maïs/pois chiche (18,09%) est inférieure à la valeur obtenue par Kahraman *et al.*(2022) (20,44%) pour la formule riz/ pois chiche.

Il n'y a pas une différence significative entre les valeurs de perte de poids du pain contenant différentes quantités de sous-produits PPPi et PGFB. La perte de poids du pain sans gluten a augmenté avec l'augmentation des taux d'addition de MSGO, de MSGPo et de PFB tandis qu'elle a diminué avec l'augmentation des taux d'addition de PT. Avec un taux élevé (7,5 g ) de MSGO, de MSGPo ou de PFB, l'eau ne peut pas retenir dans le pain, cela pourrait être dû à la grande capacité de rétention d'eau des sous-produits.

La perte de poids avant et après la cuisson du pain est en général spécifiquement liée à la perte d'eau. L'ajout de sous-produits pré-hydratés augmente la perte d'eau pendant la cuisson, ce qui augmente la perte de poids du pain (Bchir *et al.*, 2014).

Par rapport au pain témoin sans gluten, le pourcentage de perte de poids est plus élevé pour le pain témoin de blé (25%), le pain MSGO à 5 et 7,5 g d'ajout (26,11 % et 27,77% respectivement) et le pain MSGPo à 5 et 7,5 g d'ajout (26,66% et 25,55% respectivement). De même, le pain MSGO à 2,5 g d'ajout présente une faible perte de poids (18,33 %). En ce qui concerne les résultats de perte de poids, les échantillons avec PFB semblent être plus efficaces pour réduire la perte de poids (19,05-22,76) %.

Selon Milde *et al.* (2012), une faible perte de poids a été recherchée pour assurer une bonne teneur en humidité qui empêche la déshydratation du pain et réduit sa dureté.

### 3.2. Teneur en eau du pain

Le tableau 18 montre les résultats de la teneur en eau des pains témoins, à base de blé et sans gluten, et sans gluten avec les sous-produits.

**Tableau 18:** humidité finale du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés

	addition (g p 100g)	H <sub>f</sub> (%)
<b>Blé T1</b>	<b>0</b>	27,21±0,01 <sup>k</sup>
<b>SG T2</b>	<b>0</b>	29,60±0,23 <sup>h</sup>
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	31,13±0,06 <sup>a</sup>
	<b>5</b>	30,19±0,42 <sup>d</sup>
	<b>7,5</b>	30,02±0,50 <sup>f</sup>
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	30,24±0,04 <sup>d</sup>
	<b>5</b>	30,20±0,16 <sup>d</sup>
	<b>7,5</b>	30,42±0,01 <sup>c</sup>
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	29,57±0,36 <sup>h</sup>
	<b>5</b>	29,63±0,29 <sup>h</sup>
	<b>7,5</b>	30,72±0,12 <sup>b</sup>
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	29,01±0,20 <sup>i</sup>
	<b>5</b>	29,57±0,08 <sup>h</sup>
	<b>7,5</b>	29,57±0,40 <sup>h</sup>
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	30,00±0,03 <sup>e</sup>
	<b>5</b>	30,35±0,09 <sup>c</sup>
	<b>7,5</b>	29,70±0,21 <sup>g</sup>
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	28,71±0,12 <sup>j</sup>
	<b>5</b>	30,20±0,05 <sup>d</sup>
	<b>7,5</b>	30,22±0,03 <sup>d</sup>
<b>P</b>		< 0,0001

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc sans graine d'orange; **MSGPo**: poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie; **H<sub>f</sub>**: humidité finale.

Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ ).

D'après le tableau 18, la teneur en eau du pain (H<sub>f</sub>) varie de 27,21% à 31,13%. Le pain témoin au blé présente la plus faible valeur d'humidité finale, alors que la teneur en eau la plus élevée est observée pour le pain de MSGPo avec un niveau d'addition de 2,5 g. Il a été remarqué que l'ajout de MSGO, MSGPo, PFB et PGFB augmente la teneur en eau du pain sans gluten. La valeur la plus basse de l'humidité des pains sans gluten enrichies en sous-produits est observée pour le PGFB à 2,5g d'ajout (28,71%). Il a été constaté que la teneur en eau du pain sans gluten augmente progressivement avec l'ajout de PPPi et PGFB et diminue avec l'ajout de MSGPo. Les valeurs de la teneur en eau ne montrent aucune différence significative entre le pain témoin sans gluten, le pain PPPi à 2,5 et 5 g d'ajout et le pain PT à 5 et 7,5 g d'ajout. L'augmentation de la teneur en eau du pain contribue à une augmentation de poids du pain.

### 3.3. Valeur du pH du pain

Les valeurs de pH de pains à base de blé, sans gluten et sans gluten enrichis en sous-produits sont représentées dans le tableau 19.

**Tableau 19:** pH du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés

	addition (g p 100g)	pH
<b>Blé T1</b>	<b>0</b>	5,65±0,02 <sup>gh</sup>
<b>SG T2</b>	<b>0</b>	5,76±0,12 <sup>c</sup>
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	5,59±0,06 <sup>k</sup>
	<b>5</b>	5,26±0,23 <sup>n</sup>
	<b>7,5</b>	5,21±0,50 <sup>o</sup>
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	5,68±0,16 <sup>ef</sup>
	<b>5</b>	5,58±0,03 <sup>l</sup>
	<b>7,5</b>	5,51±0,01 <sup>m</sup>
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	5,68±0,36 <sup>tg</sup>
	<b>5</b>	5,57±0,20 <sup>l</sup>
	<b>7,5</b>	5,63±0,40 <sup>l</sup>
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	5,57±0,08 <sup>l</sup>
	<b>5</b>	5,66±0,10 <sup>h</sup>
	<b>7,5</b>	5,70±0,01 <sup>e</sup>
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	5,73±0,40 <sup>d</sup>
	<b>5</b>	5,80±0,14 <sup>b</sup>
	<b>7,5</b>	5,68±0,03 <sup>tg</sup>
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	5,61±0,08 <sup>l</sup>
	<b>5</b>	5,61±0,04 <sup>l</sup>
	<b>7,5</b>	5,87±0,06 <sup>a</sup>
<b>P</b>		< 0,0001

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc sans graine d'orange; **MSGP**: poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie;

Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ )

La valeur du pH du pain varie de 5,21 et 5,87. À l'exception du pain au PFB à 5 g et du pain au PGFB à 7,5 g, toutes les formules présentent une valeur de pH significativement inférieure à celle du pain sans gluten témoin ( $p < 0,05$ ). Ce résultat peut être expliqué par la grande perte d'eau pendant la cuisson des pains enrichis en sous-produits.

Aucune différence significative n'est constatée entre le pH du pain PGFB à un niveau d'addition de 2,5g et 5g et le pain PPPi à un taux d'addition de 7,5 g. Les sous-produits PT et le PGFB ont augmenté le pH du pain.

Le pH du pain sans gluten diminue avec l'augmentation de la quantité de MSGO et/ou de MSGPo ajoutée. Des résultats similaires ont été obtenus par Majzoobi *et al.* (2017) pour la

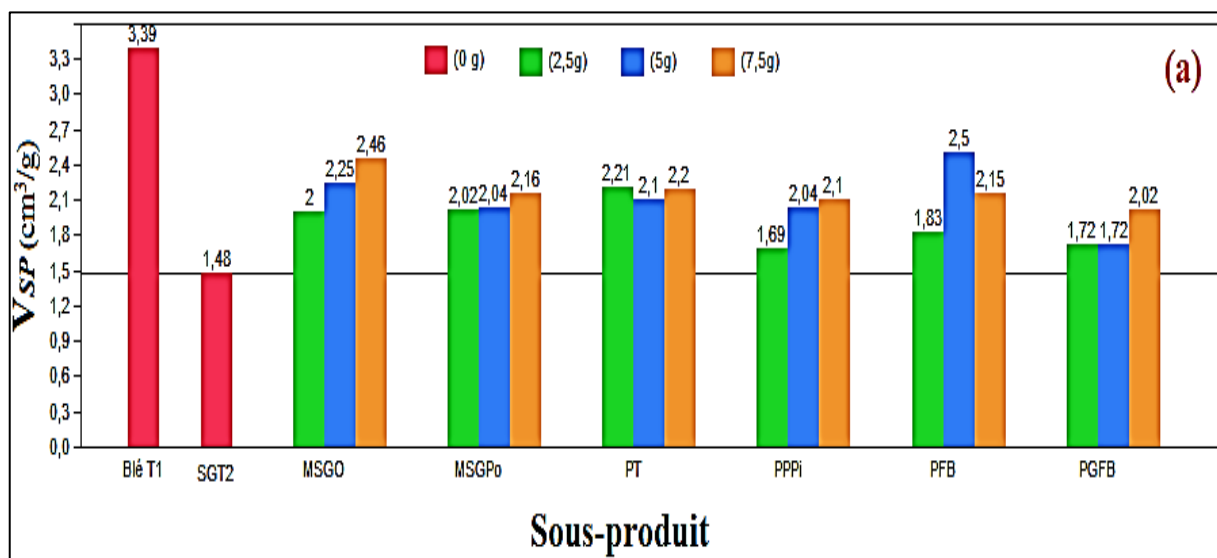
poudre de marc de carotte ou la valeur du pH des gâteaux sans gluten est réduite, en raison de la présence d'acide organique (Khosravi *et al.*, 2015), d'acides aminés (Gómez-Ariza *et al.*, 2005; Tezcan *et al.*, 2013) et d'autres composants de caractère acide dans ce sous-produit.

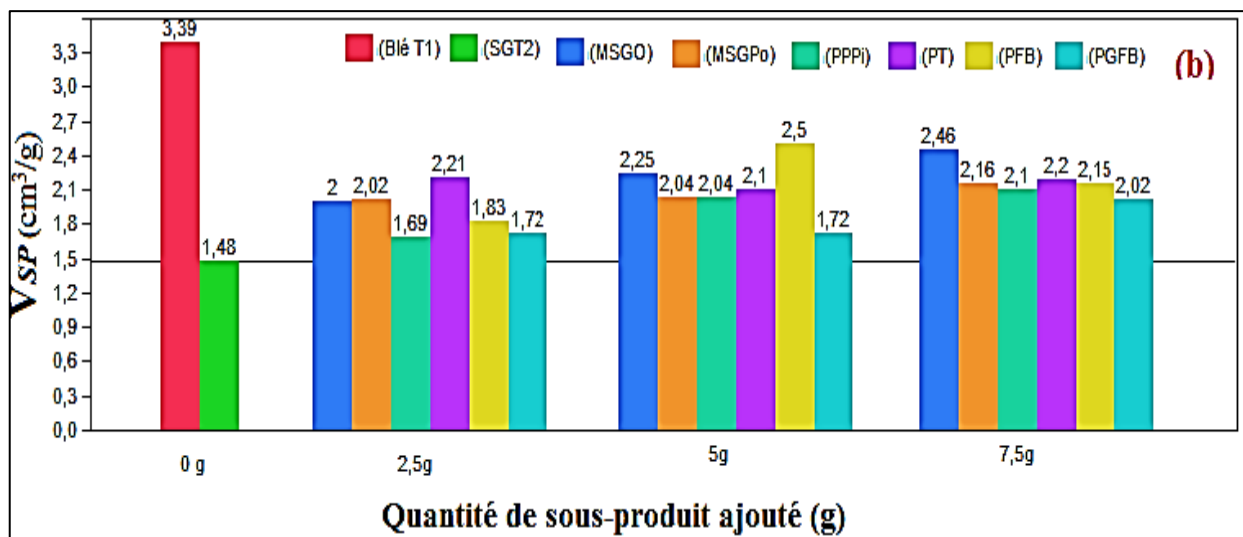
Des recherches antérieures montrent que l'acidification chimique (acide lactique et l'acide acétique) a rendu la pâte sans gluten plus fluide que la pâte témoin et le pH du pain sans gluten a diminué (Moore *et al.*, 2007).

### 3.4. Volume spécifique de pain

Le volume spécifique du pain sans gluten est l'une des caractéristiques visuelles primordiales qui influencent le choix des consommateurs. Le volume spécifique du pain sans gluten diffère selon les ingrédients et le processus de préparation (Parra *et al.*, 2015) et il dépend de plusieurs facteurs, notamment la teneur en amylose et en amylopectine de l'amidon, la viscosité de la pâte, l'agrégation de la protéine présente lors du chauffage et la présence de composés tensioactifs (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010).

Les effets de l'ajout des sous-produits aux farines sur le volume spécifique de pain sont illustrés dans la figure 23.





**Figure 23 :** volume spécifique du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés, a : en fonction de la source de sous-produit, b : en fonction de la quantité de sous-produit ajoutée

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc sans graine d’orange; **MSGPo**: poudre de marc sans graine de pomme; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie; **V<sub>sp</sub>**: Volume spécifique

D’après les résultats obtenus, l’ajout de sous-produits affecte de façon différente le volume spécifique du pain ( $p < 0,0001$ ). Le volume spécifique du pain sans gluten enrichi en sous-produits est affecté par deux facteurs : la source (figure 23a) et la quantité de ces sous-produits ajoutés (figure 23b).

Le volume spécifique du pain sans gluten varie de 1,48 à 2,50  $\text{cm}^3/\text{g}$ , ce qui correspond à une multiplication par deux de volume spécifique par rapport à la formule témoin sans gluten. Le volume spécifique varie de 2 à 2,46  $\text{cm}^3/\text{g}$  pour MSGO, de 2,02 à 2,16  $\text{cm}^3/\text{g}$  pour MSGPo, de 1,69 à 2,10  $\text{cm}^3/\text{g}$  pour PPPi, 2,10 à 2,21  $\text{cm}^3/\text{g}$  PT, de 1,83 à 2,50  $\text{cm}^3/\text{g}$  pour PFB et de 1,72 à 2,02  $\text{cm}^3/\text{g}$  pour PGFB (figure 23 a).

Toutes les formules sans gluten avec les sous-produits présentent un volume spécifique significativement plus important que le pain témoin sans gluten (1,48  $\text{cm}^3/\text{g}$ ), mais un volume spécifique inférieur à celui du pain témoin au blé (3,39  $\text{cm}^3/\text{g}$ ).

Le pain de formule maïs / pois chiche a montré un volume spécifique inférieur à celui du pain riz/pois chiche obtenu par Kahraman *et al.* (2022)(2,51  $\text{cm}^3/\text{g}$ ). De même, Miñarro *et al.* (2012) ont montré que l’ajout de farine de pois chiche au pain sans gluten à base d’amidon de maïs entraîne une augmentation du volume spécifique (3,26  $\text{cm}^3/\text{g}$ ). Ces différences des

résultats trouvés dans la littérature sont essentiellement dus aux différentes quantités de farine de pois chiche ajoutées dans les formulations et aux types de farines utilisées dans le mélange.

Le volume spécifique du pain sans gluten enrichi en sous-produit est plus important pour le pain PFB à 5g (2,50 cm<sup>3</sup>/g) suivi par MSGO (2,46 cm<sup>3</sup>/g) à 7,5g et le volume spécifique le plus petit est enregistré pour le pain PPPi (1,69 cm<sup>3</sup>/g) à 2,5 g d'ajout (figure 23b). Ces résultats sont confirmés par O'shea *et al.* (2015a) avec un ajout de 4 % de marc d'orange ( $V_{sp} = 2,47\text{cm}^3/\text{g}$ ). Il n'y a aucune différence significative entre le volume spécifique du pain MSGO à 2,5 g, pain MSGPo à 2,5 g et pain PPPi à 5g d'addition.

Dans l'ensemble, le volume spécifique augmente avec l'augmentations des taux d'ajout de sous-produits, sauf pour la PFB, ainsi le volume spécifique maximum est enregistré pour 7,5g. Les volumes spécifiques des pains sans gluten les plus importants sont obtenus à partir des pâtes de consistance plus faible. Donc, dans le cas de MSGO, MSGPo, PPPi et PT, une augmentation du volume spécifique avec une diminution de la consistance de la pâte sans gluten a été notée, lorsque le taux des sous-produits ajoutés à la pâte est augmenté.

Ces résultats ont été approuvés par Arslan *et al.* (2017) qui ont étudié l'impact de la poudre de pulpe de goyave sur le pain sans gluten à quatre taux (2,5%, 5%, 7,5% et 10%) et par Singh *et al.* (2016), qui ont évalué l'impact des fibres alimentaires du marc de carotte noire sur les muffins de riz sans gluten à trois taux (3%, 6%, et 9%) et TÜRKEr *et al.* (2016), qui ont étudié l'effet de la pelure de banane verte sur les gâteaux sans gluten, où, le volume spécifique a diminué à partir d'un taux de supplémentation particulier, 7,5% pour la pulpe de goyave, 6% pour le marc de carotte noire et 10% pour la pelure de banane verte. Selon ces auteurs, l'ajout de sous-produits au-delà de 7,5 % réduit le volume spécifique des produits sans gluten.

Parra *et al.* (2015) ont rapporté qu'un équilibre approprié entre les quantités de marc de pomme et d'eau permet d'obtenir un pain sans gluten avec un volume spécifique acceptable, où les volumes spécifiques sont maintenus supérieurs à 2,6 cm<sup>3</sup>/g lorsque le taux de marc de pomme est inférieur à 9% et la quantité de l'eau est comprise entre 115 et 150g. Cependant, si le taux de marc de pomme atteint 12,5 % et que la quantité de l'eau est comprise entre 115 et 137 g, il est possible d'obtenir des volumes spécifiques supérieurs à 2 cm<sup>3</sup>/g.

En outre, dans le cas des fibres de marc d'orange et de betterave sucrière, le volume spécifique du pain sans gluten augmente en même temps que les quantités de fibres et l'eau

augmente jusqu'à un certain niveau, au-delà de ce niveau, un effet de réduction du volume spécifique est observé (O'shea *et al.*, 2015b; Djordjević *et al.*, 2019).

Les sous-produits contiennent des fibres alimentaires qui agissent comme des éléments structurants permettant une meilleure rétention des gaz par le pain sans gluten, où les fibres sont principalement impliquées aux interactions entre les composés des fibres alimentaires insolubles et les protéines présentes dans la formule sans gluten (Djordjević *et al.*, 2022).

Selon Föste *et al.* (2020) et Sciarini *et al.* (2017), l'influence négative des fibres alimentaires insolubles sur le volume spécifique du pain sans gluten enrichi en fibres peut être expliquée par les propriétés d'hydratation des fibres et la présence d'eau dans le mélange de pâte. Lorsque le mélange de pâte sans gluten contient des quantités d'eau insuffisantes, l'ajout de la fibre alimentaire insoluble possédant une forte affinité pour l'eau entraîne la formation d'une structure de pâte sans gluten rigide, inflexible et incapable de se lever.

Par ailleurs, l'augmentation de l'absorption d'eau de la pâte sans gluten lors de l'ajout des fibres alimentaires insolubles nécessite une augmentation supplémentaire des quantités d'eau, ce qui, dans de nombreux cas, entraîne la dilution des ingrédients structurants et la production de bulles d'air inégales et instables et, par conséquent, il résulte un mélange de pâte sans gluten incapable de retenir le gaz (Djordjević *et al.*, 2022).

### **3. 5. Couleur de la croûte et de la mie du pain**

Les résultats de la couleur de la croûte et de la mie sont présentés dans le tableau 20. Une croûte brune dorée et une mie de pain blanc crémeux sont les facteurs d'attractivité les plus importants qui indiquent la qualité d'un produit de boulangerie aux consommateurs (Kurek et Wyrwisz, 2015).



**Tableau 20** :Couleurs de la croûte et de la mie du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés

	Addition (g p 100g)	Couleur de la croûte			Couleur de la mie		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
<b>Blé T1</b>	<b>0</b>	81,06±2,23 <sup>a</sup>	4,78±1,69 <sup>cdef</sup>	45,58±1,11 <sup>k</sup>	91,62±2,09 <sup>a</sup>	-2,8±0,51 <sup>hi</sup>	24,18±3,54 <sup>n</sup>
<b>SGT2</b>	<b>0</b>	74,6±3,95 <sup>bc</sup>	4,4±1,54 <sup>def</sup>	53,96±2,06 <sup>bcd</sup>	80,42±2,62 <sup>bc</sup>	-1,64±0,70 <sup>gh</sup>	45,36±1,30 <sup>de</sup>
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	69,46±9,63 <sup>cd</sup>	2,075±1,69 <sup>f</sup>	47,84±1,96 <sup>ijk</sup>	66,86±0,96 <sup>gh</sup>	-0,64±0,42 <sup>fg</sup>	34,42±1,49 <sup>kl</sup>
	<b>5</b>	58,82±3,02 <sup>gh</sup>	14,52±1,89 <sup>bc</sup>	52,68±3,91 <sup>defg</sup>	68,4±2,27 <sup>fg</sup>	-0,12±0,94 <sup>ef</sup>	35,24±2,05 <sup>jk</sup>
	<b>7,5</b>	62,68±2,42 <sup>efg</sup>	10,48±2,32 <sup>bcd</sup>	51,88±2,30 <sup>defgh</sup>	65,84±1,32 <sup>gh</sup>	1,76±1,46 <sup>cd</sup>	40,36±1,28 <sup>fgh</sup>
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	66,58±6,88 <sup>de</sup>	9,58±2,93 <sup>bcd</sup>	54,25±3,32 <sup>bcd</sup>	64,12±1,55 <sup>hi</sup>	0,00±1,33 <sup>ef</sup>	33,2±1,47 <sup>klm</sup>
	<b>5</b>	62,12±2,05 <sup>efgh</sup>	8,54±3,06 <sup>bcd</sup>	50,88±3,35 <sup>fghi</sup>	61,2±2,1 <sup>ijk</sup>	0,49±1,08 <sup>def</sup>	31,66±1,06 <sup>lm</sup>
	<b>7,5</b>	63,56±3,72 <sup>ef</sup>	5,82±1,89 <sup>bcd</sup>	46,36±2,60 <sup>jk</sup>	60,74±1,95 <sup>k</sup>	1,08±0,81 <sup>de</sup>	31,66±1,06 <sup>m</sup>
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	70,88±4,12 <sup>cd</sup>	10,32±2,48 <sup>bc</sup>	56,1±1,04 <sup>abc</sup>	72,56±6,52 <sup>de</sup>	3,48±1,49 <sup>b</sup>	44,14±2,17 <sup>e</sup>
	<b>5</b>	71,08±3,32 <sup>cd</sup>	12,88±2,29 <sup>bcd</sup>	54,64±1,38 <sup>abcd</sup>	78,94±1,47 <sup>c</sup>	3,32±1,02 <sup>b</sup>	47,48±1,22 <sup>bc</sup>
	<b>7,5</b>	66,84±5,78 <sup>de</sup>	15,48±2,64 <sup>b</sup>	53,2±1,97 <sup>cd</sup>	70,5±1,54 <sup>ef</sup>	9,00±0,44 <sup>a</sup>	48,58±1,04 <sup>b</sup>
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	57,52±1,29 <sup>h</sup>	13,36±0,89 <sup>bcd</sup>	52,14±1,68 <sup>defgh</sup>	63,88±1,71 <sup>hij</sup>	1,82±1,25 <sup>cd</sup>	38,92±2,03 <sup>hi</sup>
	<b>5</b>	56,7±2,28 <sup>gh</sup>	14,04±1,57 <sup>bcd</sup>	54,5±2,17 <sup>bcd</sup>	60,86±1,21 <sup>jk</sup>	3,98±0,89 <sup>b</sup>	42,04±2,12 <sup>f</sup>
	<b>7,5</b>	62,68±2,7 <sup>efg</sup>	6,9±0,81 <sup>bc</sup>	54,66±0,86 <sup>abcd</sup>	74,06±1,52 <sup>d</sup>	3,06±0,97 <sup>bc</sup>	51,18±1,58 <sup>a</sup>
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	70,56±3,13 <sup>cd</sup>	12,7±2,07 <sup>a</sup>	57,66±1,75 <sup>a</sup>	80,66±1,97 <sup>bc</sup>	-1,88±0,60 <sup>gh</sup>	46,06±1,24 <sup>cde</sup>
	<b>5</b>	69,66±3,59 <sup>cd</sup>	7,46±1,42 <sup>bcd</sup>	56,64±2,46 <sup>ab</sup>	80,48±2,99 <sup>bc</sup>	3,56±1,22 <sup>i</sup>	46,24±1,79 <sup>cd</sup>
	<b>7,5</b>	56,86±9,17 <sup>gh</sup>	14,58±1,74 <sup>bc</sup>	51,22±3,91 <sup>efghi</sup>	60,72±2,15 <sup>k</sup>	3,70±1,81 <sup>b</sup>	47,02±1,13 <sup>bcd</sup>
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	80,34±2,73 <sup>ab</sup>	3,36±1,18 <sup>ef</sup>	50,82±4,77 <sup>fghi</sup>	82,2±2,05 <sup>b</sup>	-1,86±0,82 <sup>gh</sup>	41,04±0,79 <sup>fg</sup>
	<b>5</b>	62,18±6,19 <sup>efgh</sup>	12,84±1,5 <sup>bcd</sup>	50,68±1,40 <sup>ghi</sup>	74,46±3,28 <sup>d</sup>	0,25±0,36 <sup>def</sup>	39,62±0,71 <sup>gh</sup>
<b>7,5</b>	73,28±4,81 <sup>c</sup>	6,28±3,00 <sup>bcd</sup>	49,32±0,75 <sup>hij</sup>	77,74±2,39 <sup>c</sup>	-0,24±0,87 <sup>f</sup>	37,06±1,35 <sup>ij</sup>	
<b>P</b>		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

**Blé T1** : témoin de blé, **SG T2** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc d'orange sans graine; **MSGPo**: poudre de marc de pomme sans graine; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie

Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ ).

L'ajout de sous-produits a affecté de manière significative ( $p < 0,05$ ) les caractéristiques de la couleur de la croûte et de la mie.

La luminosité (L\*) de la croûte et de la mie a montré des valeurs significativement plus faibles avec une couleur plus foncée que celles du pain témoin au blé et au pain témoin sans gluten, sauf pour la PGFB à 2,5g p100 g. Ceci peut être dû à la couleur naturelle plus foncée des sous-produits et /ou à la fixation de l'eau par la fibre, car eau constitue un milieu de réactions entre les sucres et les acides aminés (Feili *et al.*, 2013). Un effet similaire sur la luminosité (L\*) de la croûte a été rapporté par Kohajdová *et al.* (2012) après l'ajout de poudre de marc de carotte et par Lauková *et al.* (2016) après l'ajout de fibres alimentaires de pomme de terre.

Pour chaque sous-produit, la luminosité de la croûte et de la mie diminue avec l'augmentation du taux de sous-produits. La PT à 5g et le PFB à 7,5g ont donné une couleur plus foncée de la croûte. En fait, une couleur de mie plus foncée avec un indice de L\* plus faible (60,74) a été observée dans le pain enrichie en MSGPo à un niveau d'addition de 7,5g p100 g.

L'augmentation des taux de MSGO, de PPPi, de PT et de PFB a permis d'accroître la couleur jaune ( $b^*$ ) et rouge ( $a^*$ ) en particulier dans la mie du pain sans gluten. Cela pourrait être dû aux pigments (lycopène et carotènes) de ces sous-produits. En effet, les valeurs de couleur du pain de blé témoin sont plus vertes ( $a^*=-2,8\pm 0,51$ ) et de couleur jaune très pâle ( $b^*= 24,18\pm 3,54$ ). La couleur de la mie du pain sans gluten enrichi en sous-produits sont directement liée aux ingrédients utilisés pour la fabrication de la pâte.

La couleur du pain dépend de la formulation et/ou des conditions de cuisson. La réaction de Maillard et la caramélisation des sucres de la croûte sont responsables des changements des paramètres de couleur entre la croûte et la mie et du développement d'une couleur brune à la surface du pain à haute température (la température de cuisson est supérieure à 110 °C). Cependant, la couleur provenant des ingrédients utilisés dans la formulation du pain peut masquer cette couleur (Capriles et Arêas, 2014; Kurek et Wyrwisz, 2015; Boubaker *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2017). Les propriétés physico-chimiques de la formulation (teneur en eau, en sucres réducteurs et en acides aminés, pH), ainsi que les conditions de cuisson (température, humidité relative, modes de transfert de chaleur) affectent également la couleur du pain (Djordjević *et al.*, 2022). Une teneur élevée en eau dans les formulations est généralement liée à une couleur de croûte pâle due à la dilution des sucres réducteurs et des acides aminés, reflétant une diminution de la vitesse des réactions de Maillard (Sabanis *et al.*, 2009; Pérez-Quirce *et al.*, 2014; Djordjević *et al.*, 2019).

L'assombrissement général des paramètres de couleur, dû à la supplémentation avec ces sous-produits, pourrait être très intéressant pour améliorer l'aspect du pain sans gluten qui présente généralement une couleur pâteuse (Masure *et al.*, 2016).

### **3. 6. Structure de la mie du pain**

La structure de la mie de pain a été déterminée par le biais d'une analyse d'image. Plusieurs paramètres ont été déterminés : le nombre des alvéoles, la taille moyenne des alvéoles, la proportion de l'aire, le périmètre, la circularité et la solidité de la structure cellulaire de la mie qui sont indiqués dans le tableau 21.

**Tableau 21** : Structure de la mie du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés

	Addition (g p100g)	NA	TMA (mm <sup>2</sup> )	Proportion de l'aire (%)	Périmètre	Circularité	Solidité
<b>Blé T1</b>	<b>0</b>	203±8 <sup>bcd</sup>	1,672±0,26 <sup>a</sup>	18,25±1,34 <sup>a</sup>	4,32±0,27 <sup>a</sup>	0,81±0,007 <sup>i</sup>	0,85±0,006 <sup>f</sup>
<b>SG T2</b>	<b>0</b>	239±13 <sup>abc</sup>	0,46±0,12 <sup>cde</sup>	12,85±3,18 <sup>bc</sup>	2,28±0,29 <sup>defgh</sup>	0,87±0,01 <sup>cdefg</sup>	0,87±0,00 <sup>cdef</sup>
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	122±23 <sup>ef</sup>	0,55±0,19 <sup>cde</sup>	5,85±2,33 <sup>hi</sup>	2,64±0,50 <sup>cdef</sup>	0,85±0,02 <sup>gh</sup>	0,86±0,00 <sup>def</sup>
	<b>5</b>	78±6 <sup>f</sup>	0,91±0,14 <sup>b</sup>	7,25±0,49 <sup>efgh</sup>	3,08±0,06 <sup>bc</sup>	0,86±0,01 <sup>cdefg</sup>	0,881±0,01 <sup>cd</sup>
	<b>7,5</b>	100±0 <sup>f</sup>	0,67±0,04 <sup>bc</sup>	5,9±0,57 <sup>ghi</sup>	2,80±0,15 <sup>bcd</sup>	0,86±0,01 <sup>hi</sup>	0,85±0,01 <sup>def</sup>
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	86±6 <sup>f</sup>	0,49±0,16 <sup>cde</sup>	3,65±0,92 <sup>i</sup>	2,15±0,15 <sup>efgh</sup>	0,89±0,03 <sup>bcde</sup>	0,89±0,03 <sup>bc</sup>
	<b>5</b>	116±20 <sup>f</sup>	0,61±0,09 <sup>cd</sup>	6,57±2,21 <sup>fghi</sup>	2,67±0,25 <sup>cde</sup>	0,86±0,02 <sup>efgh</sup>	0,87±0,01 <sup>def</sup>
	<b>7,5</b>	125±21 <sup>ef</sup>	0,65±0,17 <sup>bc</sup>	7,97±0,61 <sup>efgh</sup>	2,80±0,32 <sup>cd</sup>	0,85±0,02 <sup>gh</sup>	0,86±0,01 <sup>ef</sup>
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	308±25 <sup>a</sup>	0,34±0,05 <sup>e</sup>	11,65±1,91 <sup>bcd</sup>	2,02±0,20 <sup>gh</sup>	0,88±0,02 <sup>cdef</sup>	0,88±0,01 <sup>cd</sup>
	<b>5</b>	200±2 <sup>cde</sup>	0,36±0,02 <sup>de</sup>	6,90±0,99 <sup>fghi</sup>	1,87±0,17 <sup>h</sup>	0,91±0,00 <sup>ab</sup>	0,91±0,00 <sup>ab</sup>
	<b>7,5</b>	239±35 <sup>abc</sup>	0,37±0,02 <sup>de</sup>	9,25±0,78 <sup>defg</sup>	2,08±0,07 <sup>fgh</sup>	0,89±0,01 <sup>bc</sup>	0,89±0,00 <sup>bc</sup>
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	210±9 <sup>bcd</sup>	0,46±0,12 <sup>cde</sup>	9,30±1,25 <sup>def</sup>	2,35±0,25 <sup>defgh</sup>	0,87±0,02 <sup>cdef</sup>	0,88±0,00 <sup>cde</sup>
	<b>5</b>	262±37 <sup>ab</sup>	0,48±0,08 <sup>cde</sup>	11,95±0,59 <sup>bcd</sup>	2,50±0,06 <sup>defg</sup>	0,85±0,02 <sup>gh</sup>	0,86±0,01 <sup>f</sup>
	<b>7,5</b>	242±58 <sup>abc</sup>	0,50±0,03 <sup>cde</sup>	10,30±3,11 <sup>cde</sup>	2,35±0,01 <sup>defgh</sup>	0,90±0,00 <sup>bc</sup>	0,89±0,00 <sup>bc</sup>
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	308±8 <sup>a</sup>	0,52±0,05 <sup>cde</sup>	14,10±0,42 <sup>bc</sup>	2,46±0,15 <sup>defgh</sup>	0,88±0,01 <sup>bcdef</sup>	0,88±0,00 <sup>bcd</sup>
	<b>5</b>	175±7 <sup>de</sup>	0,89±0,11 <sup>b</sup>	14,55±1,20 <sup>b</sup>	3,37±0,22 <sup>b</sup>	0,86±0,01 <sup>defgh</sup>	0,87±0,01 <sup>def</sup>
	<b>7,5</b>	190±8 <sup>cd</sup>	0,49±0,19 <sup>cde</sup>	11,05±2,33 <sup>cd</sup>	2,39±0,52 <sup>defgh</sup>	0,85±0,01 <sup>fgh</sup>	0,87±0,01 <sup>def</sup>
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	115±76 <sup>f</sup>	0,59±0,31 <sup>cde</sup>	5,20±0,85 <sup>hi</sup>	2,37±0,63 <sup>defgh</sup>	0,93±0,02 <sup>a</sup>	0,92±0,00 <sup>a</sup>
	<b>5</b>	223±56 <sup>bcd</sup>	0,44±0,04 <sup>cde</sup>	10,45±1,06 <sup>cde</sup>	2,20±0,01 <sup>efgh</sup>	0,90±0,03 <sup>bcd</sup>	0,89±0,02 <sup>bc</sup>
	<b>7,5</b>	302±29 <sup>a</sup>	0,43±0,09 <sup>cde</sup>	13,05±1,20 <sup>bc</sup>	2,11±0,24 <sup>fgh</sup>	0,87±0,01 <sup>cdefg</sup>	0,88±0,00 <sup>cd</sup>
<b>P</b>		< 0,0001	0,001	< 0,0001	0,004	0,000	0,001

**Blé T1** : témoin de blé, **SG T2** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc d'orange sans graine; **MSGPo**: poudre de marc de pomme sans graine; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie, **NA** : nombre des alvéoles, **TMA** : Taille moyenne des alvéoles.

Les moyennes avec des lettres différentes dans la même colonne sont statistiquement différentes ( $p < 0,05$ ).

Le nombre des alvéoles varie de 78 à 308 cellules/mm<sup>2</sup>. Le nombre des alvéoles est plus élevé pour le PFB et le PPPi à 2,5g, suivi par PGFB à 7,5g, et plus faible pour le MSGO à 5g et le MSGPo à 2,5g. Une taille moyenne plus élevée a été obtenue pour le pain de blé

témoin (1,672 mm). La taille moyenne de la mie augmente de manière significative avec l'ajout de MSGPo, de PPPi et de PT et diminue avec l'ajout de PGFB. La proportion de l'aire du pain de blé témoin est importante (18,25%) suivi par PFB à 5g et à 2,5g (14,55% et 14,10% respectivement).

La mie du pain de blé témoin, du MSGO et de PFB à 5g sont caractérisés par un périmètre important. Le pain sans gluten avec le nombre élevé des alvéoles est caractérisé par une structure aérée par rapport aux miettes avec de faible nombre des alvéoles. Selon Jafari *et al.* (2018), un nombre des alvéoles plus faible et une taille moyenne plus élevée reflètent une structure aérée. La solidité des échantillons se situent entre 0,85 et 0,92. Elle mesure le désordre de la forme des cellules de gaz, la valeur de solidité est plus faible pour une forme irrégulière des alvéoles et plus élevée pour une forme régulière (Goriewa-Duba *et al.*, 2018; Alba *et al.*, 2020). La forme des alvéoles de PPPi à 5 g et de PGFB à 2,5 g est caractérisée par des structures régulières et une forme uniforme (solidité = 0,91 et 0,92, respectivement) et plus ronde (circularité = 0,91 et 0,93, respectivement) par rapport au pain sans gluten témoin.

Le témoin de blé est caractérisé par une forme plus allongée des cellules de gaz (Circularité=0,81). L'aspect de la mie du Blé T1, du SG T2 et du pain enrichi est illustré à la figure 24.

La présence des gros trous (dans la mie du pain) au-dessous de la croûte du pain additionnés de 5g de PPPi, PFB et PGFB (figure 24) peut être due à une répartition inégale du CO<sub>2</sub> ou une combinaison de petites et de grandes alvéoles dans la mie du pain. En plus, des travaux précédents (Gómez *et al.*, 2003; Rinaldi *et al.*, 2020) utilisant des fibres de différentes origines, ils ont observé une diminution significative du volume spécifique et une variation de la distribution des classes de taille des alvéoles, due à la compétition pour l'eau par les différents ingrédients.

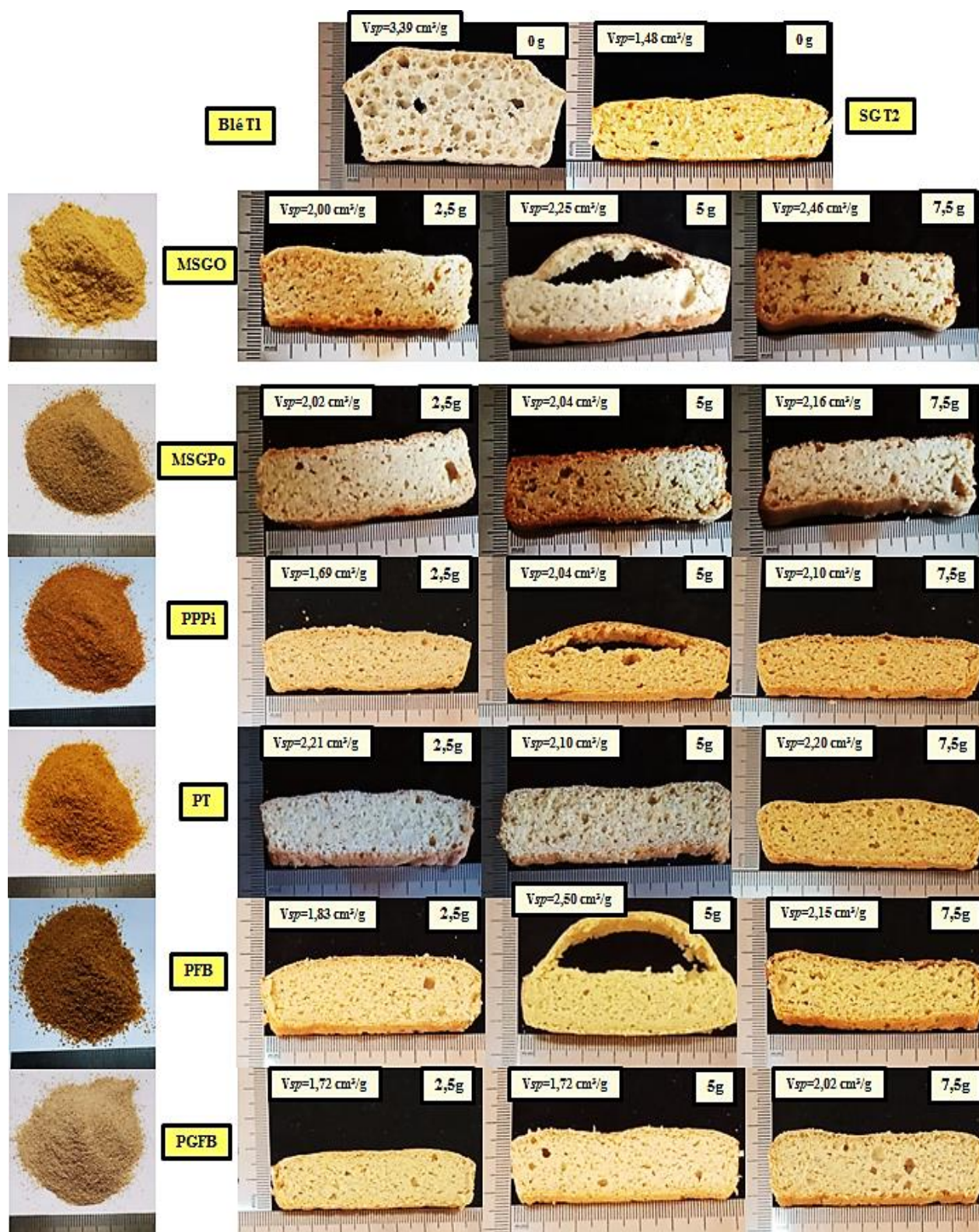


Figure 24 : Images de la mie du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans sous-produits ajoutés

Blé T<sub>1</sub> : témoin de blé, SG T<sub>2</sub> : témoin sans gluten, MSGO: poudre de marc d'orange sans graine; MSGPo: poudre de marc de pomme sans graine; PPPi: poudre de pelure avec le placenta du piment; PT: poudre de la pelure de tomate; PFB: poudre de pelure de la figue de barbarie; PGFB: pelure des graines de la figue de barbarie, V<sub>sp</sub>: volume spécifique.

## Conclusion

Le volume spécifique du pain sans gluten enrichi en sous-produits varie de 1,69 à 2,50 cm<sup>3</sup>/g, le volume spécifique le plus grand est enregistré dans le pain PFB. Ces valeurs sont supérieures à celle du pain témoin sans gluten (1,48 cm<sup>3</sup>/g) et inférieures à celle du pain témoin au blé (3,39 cm<sup>3</sup>/g).

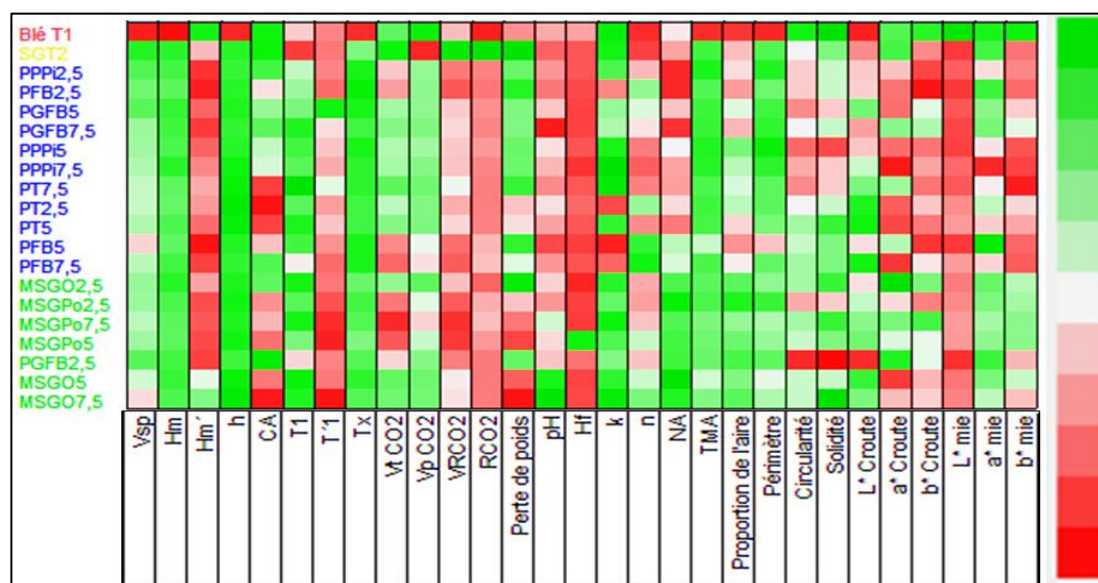
Après l'ajout des sous-produits, la perte de poids à la cuisson et l'humidité finale (H<sub>f</sub>) des pains augmentent, tandis que le pH de ces pains devient légèrement plus acide que le pain témoin sans gluten.

L'ajout des sous-produits donne des pains avec un nombre des alvéoles plus élevée, une taille moyenne des alvéoles (TMA) plus grande, et une couleur de la croûte et de la mie plus foncé que le pain non enrichi.

## 4. Analyse et recherche de corrélation situant l'effet des différentes incorporations

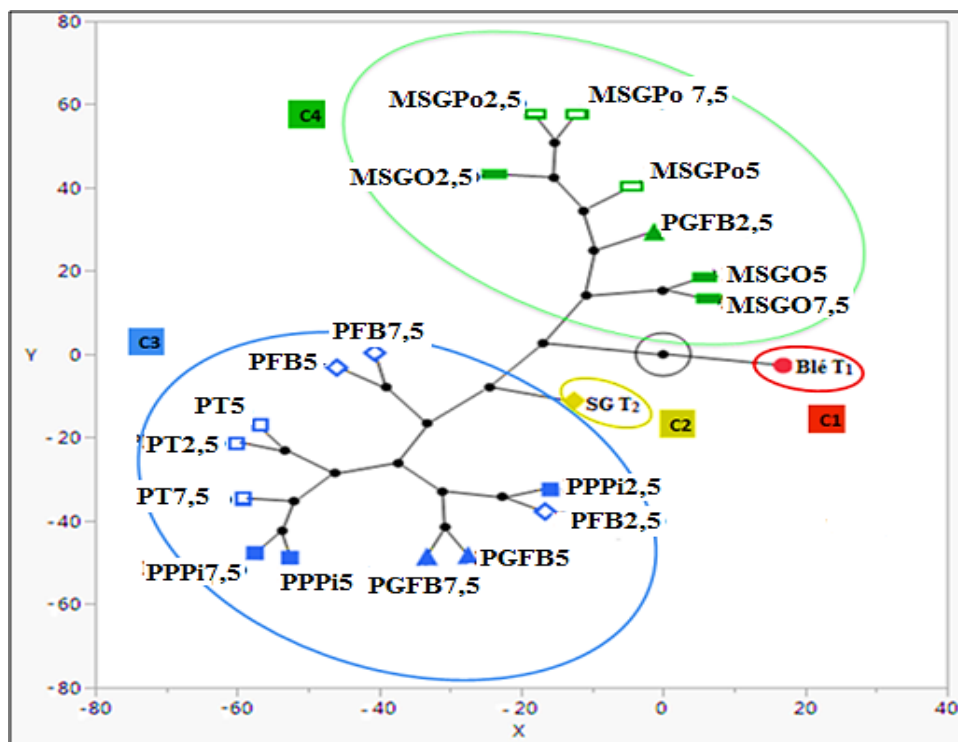
### 4.1. Classification hiérarchique des effets des sous-produits sur le pain sans gluten

Un graphique en constellation (figure 25) et une classification hiérarchique en grappes (figure 26) sont réalisés pour identifier la similarité des effets des sous-produits sur les propriétés des pâtes et des pains.



**Figure 25 :** Diagramme de constellation des échantillons de blé et des pains sans gluten avec et sans sous-produit étudiés, selon la méthode de Ward (augmentation du niveau : rouge, diminution du niveau : vert).

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO** : poudre de marc d'orange sans graine; **MSGPo** : poudre de marc de pomme sans graine; **PPPi** : poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT** : poudre de la pelure de tomate; **PFB** : poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB** : pelure des graines de la figue de barbarie.



**Figure 26 :** classification hiérarchique des échantillons de blé et des pains sans gluten avec et sans sous-produit étudiés, selon la méthode de Ward en fonction des paramètres rhéologiques de la pâte et la qualité finale des pains

**Blé T<sub>1</sub> :** témoin de blé, **SG T<sub>2</sub> :** témoin sans gluten, **MSGO :** poudre de marc d'orange sans graine; **MSGP :** poudre de marc de pomme sans graine; **PPPi :** poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT :** poudre de la pelure de tomate; **PFB :** poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB :** pelure des graines de la figue de barbarie

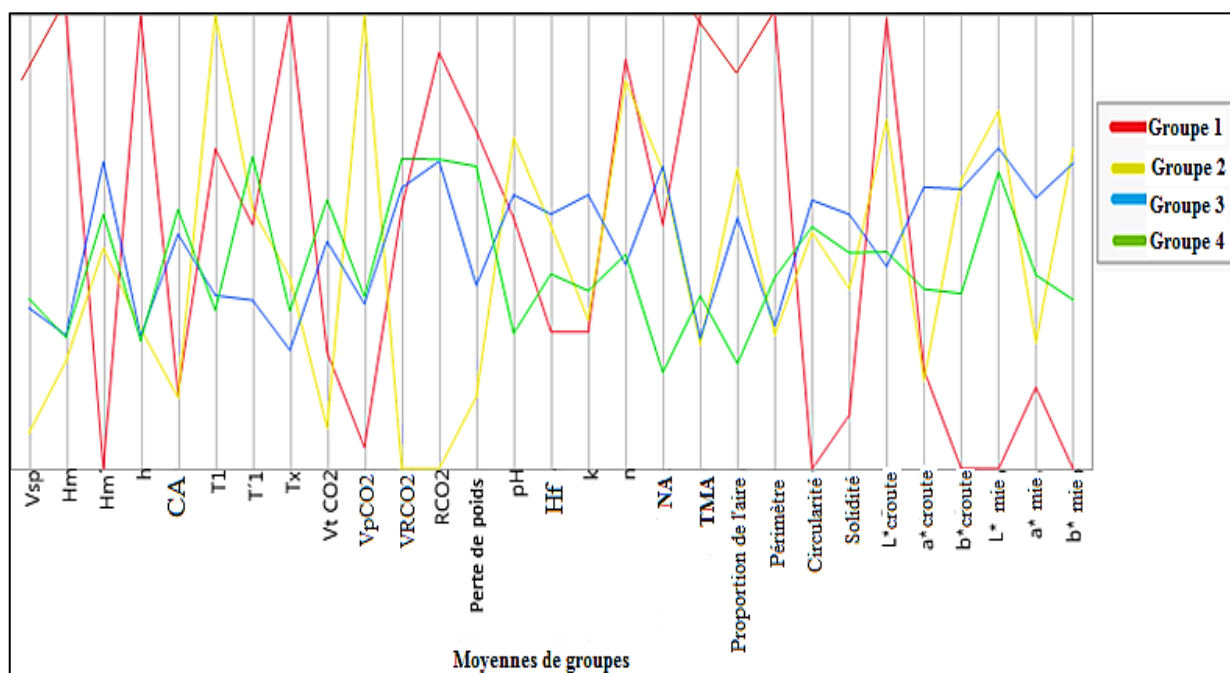
Le graphe de constellation est composé de quatre groupes. Le groupe A comprend une classe (C<sub>1</sub>) contenant uniquement le pain témoin au blé, le groupe B comprend trois classes, la classe (C<sub>2</sub>) renferme le pain de la formule de base sans gluten, les classes C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> renferment les pains sans gluten contenant différents sous-produits. La classe C<sub>3</sub> comprend le plus grand nombre de pains similaires.

La classe C<sub>3</sub> regroupe les pelures de tomate, de piment et de figue de barbaries et de ses graines aux taux d'addition de 5 g et 7,5 g. La classe C<sub>4</sub> regroupe les marcs d'orange et de pomme et la pelure des graines de figue de barbarie au taux d'addition de 2,5 g.

La similitude entre la PT, PPPi, PFB et /ou la PGFB aux taux d'addition de 5 g et 7,5 g est observée dans le groupe C<sub>3</sub> et la même similarité a été trouvée pour le pain enrichie en MSGO, MSGPo et/ou de PGFB aux taux d'addition de 2,5 g dans le groupe C<sub>4</sub>.

Le pain témoin au blé et le pain témoin sans gluten sont complètement différents de

tous les échantillons contenant les sous-produits (figure 26 et 27).



**Figure 27 :** Écarts types des groupes des pains en fonction des paramètres rhéologiques de la pâte et la qualité finale des pains

**Classe1:** témoin blé, **Classe 2:** témoin sans gluten, **Classe 3:** pppi (2,5g, 5g, 7,5g), PT (2,5g, 5g, 7,5g), PFB (2,5g, 5g, 7,5g) et PGFB (5g, 7,5g). **Classe4:** MSGO (2,5g, 5g, 7,5g), MSGPo (2,5g, 5g, 7,5g) et PGFB2,5g.

En comparaison entre tous les pains préparés :

- le pain témoin au blé est caractérisé par des valeurs plus élevées de développement de la pâte ( $H_m$  et  $h$ ), de la production de gaz ( $T_x$  et  $RCO_2$ ), de volume spécifique  $V_{SP}$ , de taille moyenne des alvéoles et de périmètre de la mie.
- le pain témoin sans gluten nécessite un temps long  $T_1$  pour atteindre la hauteur maximale de la pâte ( $H_m$ ), la plus grande perte de gaz de  $CO_2$  ( $V_{PCO_2}$ ) et des faibles valeurs de  $H_m$ , de  $RCO_2$  et de  $V_{SP}$ , et la plus petite taille moyenne des alvéoles avec une valeur de pH la plus élevée.
- les pains sans gluten préparés avec du MSGO et/ou du MSGPo (à 2,5, 5 et 7,5g p100g) et/ou de la PGFB à 2, 5 g p100 g présentent des CA,  $T_1'$  et  $V_{RCO_2}$  les plus élevés ; et les pains sans gluten contenant du PPPi, PT, PFB et PGFB à 5 et 7,5 % présentent des  $H_m'$ , K, circularité, solidité,  $a^*$  de la mie et de la croûte les plus élevés (figure 26 et 27).

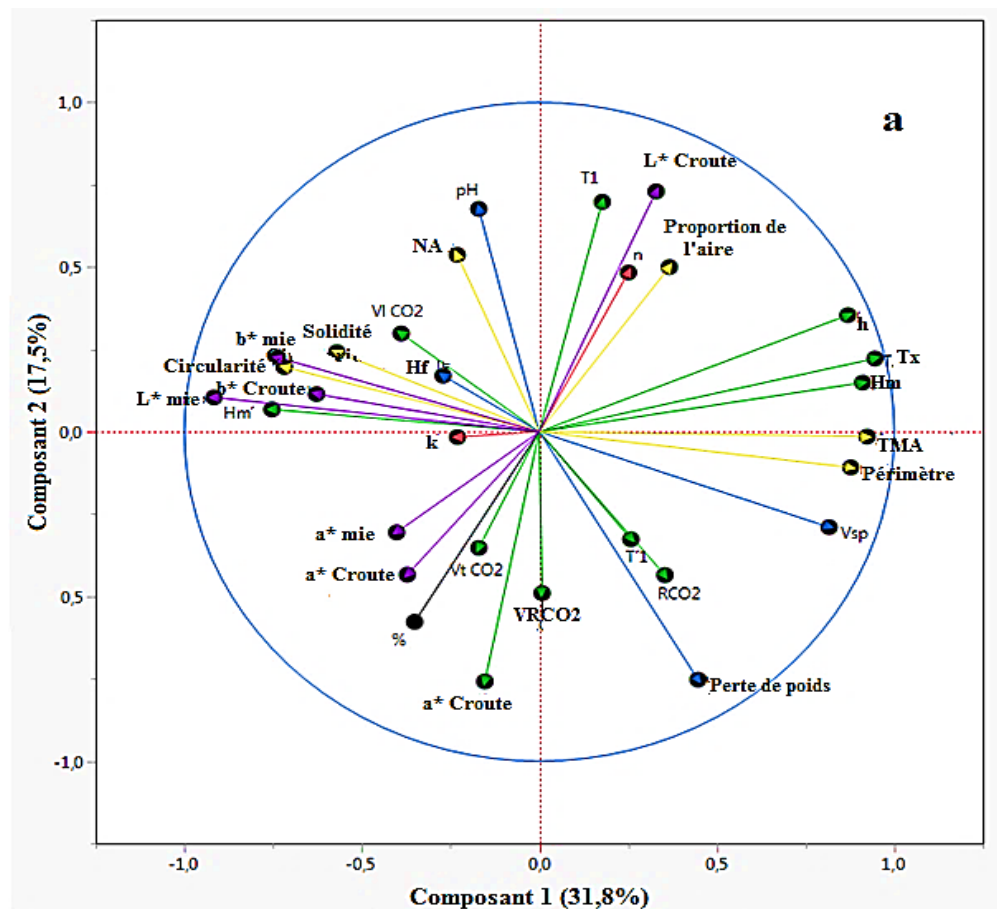
La classe 4 se distingue de la classe 3 par un  $T_1'$  plus long, un CA plus élevé, un  $V_{tCO_2}$  et un  $V_{RCO_2}$  plus importants, une perte de poids à la cuisson plus élevée, un pH légèrement plus

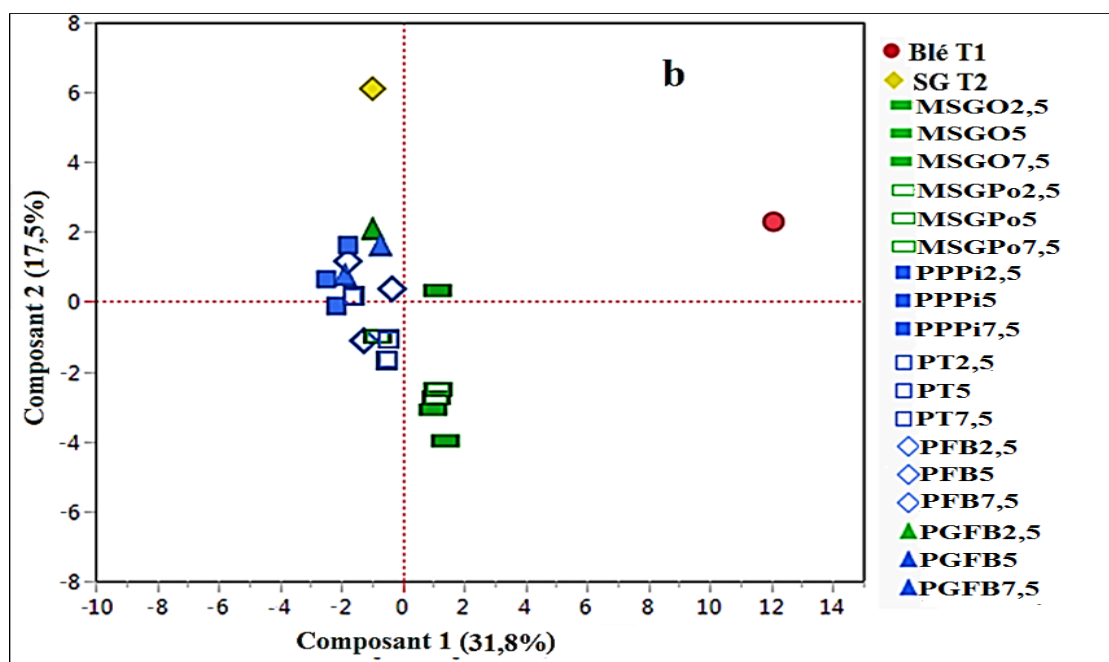


acide et une TMA plus grand. En outre, la classe 3 se diffère essentiellement de la classe 4 par une consistance de la pâte plus grande, une  $H_m'$  plus élevée, une  $H_f$  plus grande, un NA plus élevé, une valeur de  $L^*$  de la croûte plus faible et des valeurs de  $L^*a^*b^*$  de la mie plus grandes.

#### 4.2. Corrélation entre les paramètres rhéologiques des pâtes et la qualité finale des pains

La représentation des variables a été faite sur le cercle des corrélations (figure 28 a) à partir de l'analyse des composantes principales sur les paramètres de rhéofermentomètre, des paramètres rhéologiques de la pâte et de la qualité du pain au blé et sans gluten.





**Figure 28:** Analyse factorielle multiple corrélant les propriétés rhéologiques de la pâte et la qualité finale des pains, **(a)** : Carte montrant les variables, les pourcentages des sous-produits (en noir), paramètres du rhéofermentomètre (en vert) et paramètres rhéologiques de la pâte (en rouge), qualités du pain (en bleu), structure de la mie du pain (en jaune) et couleurs de la croûte et de la mie (en violet) **(b)** : Carte montrant la répartition des 20 types de pain.

La première et la deuxième composante justifie 49,3% de la variabilité. Les variables ayant des vecteurs propres élevés sur la composante principale 1 sont Tx, Hm, la taille moyenne des alvéoles, le périmètre de la mie, h, Vsp, H'm, et L\*de la mie (Figure 28a, annexe 5). Sur la composante principale 1 (CP<sub>1</sub>), le Vsp est positivement corrélé avec les paramètres Hm ( $r = 0,81$ ), Tx ( $r = 0,68$ ), h ( $r = 0,67$ ) et la taille moyenne des alvéoles (TMA) ( $r = 0,84$ ) et négativement corrélé avec la circularité des alvéoles ( $r = -0,64$ ) (annexe 4). Des corrélations hautement significatives ( $p < 0,001$ ) et positives sont notées entre Hm et h ( $r = 0,94$ ), suivies par les paires Tx et Hm ( $r = 0,89$ ), Tx et h ( $r = 0,89$ ) et Hm et TMA ( $r = 0,86$ ) et enfin une corrélation négative significative est détectée entre Tx et Hm' ( $r = -0,72$ )

Les variables présentant des vecteurs propres élevés sur la composante principale 2 (CP<sub>2</sub>) sont CA, perte de poids, L\* croûte, T<sub>1</sub>, pH et humidité finale du pain (Figure 28a, annexe 5).

Des corrélations significatives négatives ( $p = 0,001$ ) sont observées entre le pH et perte de poids ( $r = -0,67$ ), due probablement à la diminution de la quantité d'eau après cuisson, et entre T<sub>1</sub> et taux d'addition des sous-produits (%) ( $r = -0,62$ ), et T<sub>1</sub> et CA ( $r = -0,67$ ) (tableau 22, annexe 4). Une autre corrélation hautement négative est observée entre les variables CA et L\*croûte ( $r = -0,71$ ). Un diagramme de dispersion pour le pain (pain au blé et

les pains sans gluten) est présenté dans la figure 28b. L'analyse en composantes principales a confirmé les résultats hiérarchiques de l'analyse en grappes, dans laquelle le pain témoin au blé et le pain témoin sans gluten se différencient des pains sans gluten contenant des sous-produits.

### **Conclusion**

*On distingue quatre classes de pains, classe de pain au blé, classe de pain à base de la formule de base sans gluten, classe des pains enrichis en marcs d'orange, de pomme et/ ou de la pelure des graines de la figue de barbarie à 2,5g et enfin la classe des pains enrichis en pelure de tomate, de piment, de figue de barbarie et de ses graine à 5 et 7,5 g*

*Tous les sous-produits augmentent  $H_m$ ,  $H'm$ ,  $CA$ ,  $V_{1CO_2}$ ,  $V_{RCO_2}$ ,  $R_{CO_2}$  de la pâte, le  $V_{sp}$  et la perte de poids à la cuisson des pains et la circularité des alvéoles de la mie, et diminuent  $T_1$ ,  $T_x$ ,  $n$ ,  $pH$ , la proportion de l'aire, la valeur de  $L^*$  de la croûte et de la mie par rapport au pain sans gluten témoin.*

## **5. Qualité organoleptique des pains**

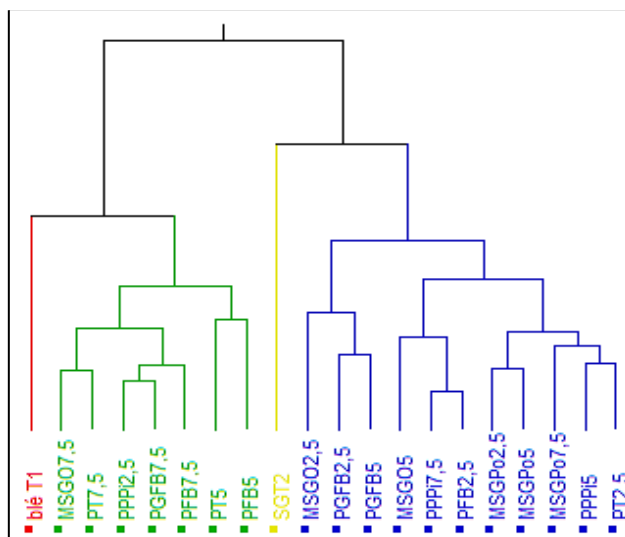
### **5.1. Résultats de l'analyse sensorielle**

Les résultats des notes attribués aux différents types des pains sans gluten en comparaison avec le pain à base de blé sont présentés dans le tableau 22 suivis par les figures 35 et 36.

**Tableau 22:** profil sensorial et d'acceptabilité globale du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans ajout des sous-produits

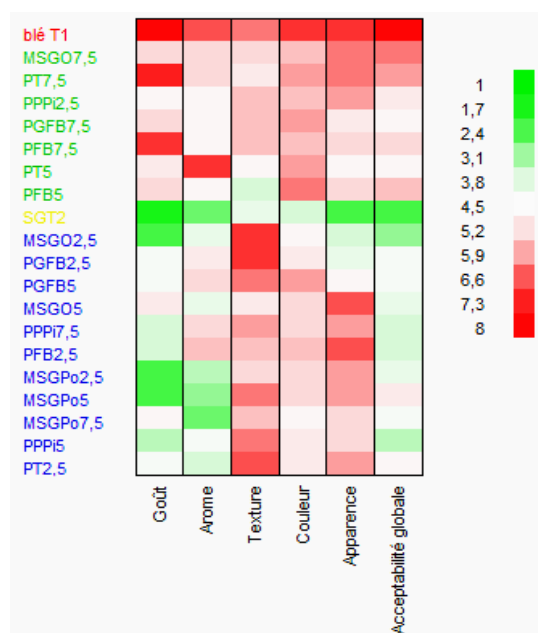
	Addition (g p 100g)	Goût	Arôme	Texture	Couleur	Apparence	Acceptabilité globale
<b>Blé T1</b>	<b>0</b>	8,00±1,00 <sup>a</sup>	6,67±2,08 <sup>a</sup>	6,33±3,06 <sup>abc</sup>	7,00±2,00 <sup>a</sup>	7,00±1,00 <sup>a</sup>	8,00±1,73 <sup>a</sup>
<b>SGT2</b>	<b>0</b>	1,67±0,58 <sup>d</sup>	2,67±0,58 <sup>d</sup>	4,00±1,00 <sup>bc</sup>	3,67±2,31 <sup>b</sup>	2,33±1,53 <sup>c</sup>	2,33±1,53 <sup>d</sup>
<b>MSGO</b>	<b>2,5</b>	2,33±1,53 <sup>cd</sup>	4,00±3,61 <sup>bcd</sup>	7,00±2,00 <sup>a</sup>	4,67±3,51 <sup>a</sup>	3,67±2,31 <sup>bc</sup>	3,00±2,00 <sup>cd</sup>
	<b>5</b>	5,00±3,00 <sup>abcd</sup>	4,00±1,73 <sup>bcd</sup>	5,00±1,00 <sup>abc</sup>	5,33±2,31 <sup>a</sup>	6,67±1,53 <sup>a</sup>	4,00±1,73 <sup>abcd</sup>
	<b>7,5</b>	5,33±3,51 <sup>abc</sup>	5,33±1,53 <sup>abc</sup>	5,33±0,58 <sup>abc</sup>	5,67±2,52 <sup>a</sup>	6,33±1,53 <sup>ab</sup>	6,33±2,52 <sup>ab</sup>
<b>MSGPo</b>	<b>2,5</b>	2,33±0,58 <sup>cd</sup>	3,33±0,58 <sup>bcd</sup>	5,33±1,53 <sup>abc</sup>	5,33±2,52 <sup>a</sup>	6,00±2,00 <sup>ab</sup>	4,00±2,00 <sup>abcd</sup>
	<b>5</b>	2,33±0,58 <sup>cd</sup>	3,00±1,00 <sup>cd</sup>	6,33±1,15 <sup>abc</sup>	5,33±3,06 <sup>a</sup>	6,00±1,73 <sup>ab</sup>	5,00±2,00 <sup>abcd</sup>
	<b>7,5</b>	4,67±2,08 <sup>abcd</sup>	2,67±0,58 <sup>d</sup>	5,67±1,53 <sup>abc</sup>	4,67±2,08 <sup>a</sup>	5,33±1,53 <sup>ab</sup>	4,33±3,21 <sup>abcd</sup>
<b>PPPi</b>	<b>2,5</b>	4,67±0,58 <sup>abcd</sup>	4,67±1,53 <sup>abcd</sup>	5,67±1,53 <sup>abc</sup>	5,67±1,15 <sup>a</sup>	6,00±0,00 <sup>ab</sup>	5,00±0,00 <sup>abcd</sup>
	<b>5</b>	3,33±2,08 <sup>cd</sup>	4,33±1,15 <sup>bcd</sup>	6,33±1,15 <sup>abc</sup>	5,00±2,00 <sup>a</sup>	5,33±1,15 <sup>ab</sup>	3,33±2,52 <sup>bcd</sup>
	<b>7,5</b>	3,67±1,53 <sup>bcd</sup>	5,33±0,58 <sup>abc</sup>	6,00±1,73 <sup>abc</sup>	5,33±0,58 <sup>a</sup>	6,00±1,00 <sup>ab</sup>	3,67±1,53 <sup>bcd</sup>
<b>PT</b>	<b>2,5</b>	4,33±3,21 <sup>abcd</sup>	3,67±1,15 <sup>bcd</sup>	6,67±0,58 <sup>ab</sup>	5,00±1,73 <sup>a</sup>	6,00±2,00 <sup>ab</sup>	4,67±2,52 <sup>abcd</sup>
	<b>5</b>	5,00±2,65 <sup>abcd</sup>	7,00±0,00 <sup>a</sup>	4,67±2,08 <sup>abc</sup>	6,00±1,73 <sup>a</sup>	4,67±2,31 <sup>abc</sup>	4,67±2,52 <sup>abcd</sup>
	<b>7,5</b>	7,33±0,58 <sup>a</sup>	5,33±2,08 <sup>abc</sup>	5,00±1,73 <sup>abc</sup>	6,00±1,00 <sup>a</sup>	6,33±0,58 <sup>ab</sup>	6,00±1,73 <sup>abc</sup>
<b>PFB</b>	<b>2,5</b>	3,67±1,53 <sup>bcd</sup>	5,67±1,15 <sup>ab</sup>	5,67±1,53 <sup>abc</sup>	5,67±1,15 <sup>a</sup>	6,67±0,58 <sup>a</sup>	3,67±2,08 <sup>bcd</sup>
	<b>5</b>	5,33±0,58 <sup>abc</sup>	4,67±0,58 <sup>abcd</sup>	3,67±2,08 <sup>c</sup>	6,33±2,08 <sup>a</sup>	5,33±2,08 <sup>ab</sup>	5,67±1,15 <sup>abc</sup>
	<b>7,5</b>	7,00±0,00 <sup>ab</sup>	4,67±1,53 <sup>abcd</sup>	5,67±3,21 <sup>abc</sup>	5,67±2,52 <sup>a</sup>	5,33±1,15 <sup>ab</sup>	5,33±0,58 <sup>abcd</sup>
<b>PGFB</b>	<b>2,5</b>	4,33±2,31 <sup>abcd</sup>	5,00±1,73 <sup>abcd</sup>	7,00±1,00 <sup>a</sup>	5,00±2,65 <sup>a</sup>	4,00±1,73 <sup>abc</sup>	4,33±0,58 <sup>abcd</sup>
	<b>5</b>	4,33±3,51 <sup>abcd</sup>	5,33±2,08 <sup>abc</sup>	6,33±2,08 <sup>abc</sup>	6,00±1,73 <sup>a</sup>	4,67±3,21 <sup>abc</sup>	4,33±2,08 <sup>abcd</sup>
	<b>7,5</b>	5,33±2,31 <sup>abc</sup>	4,67±2,08 <sup>abcd</sup>	5,67±3,21 <sup>abc</sup>	6,00±2,65 <sup>a</sup>	5,00±3,00 <sup>abc</sup>	4,67±1,53 <sup>abcd</sup>

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc d'orange sans graine; **MSGPo**: poudre de marc de pomme sans graine; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie.



**Figure 29:**Dendrogramme de profil sensoriel et d'acceptabilité globale du pain de blé et du pain sans gluten avec et sans ajout des sous-produits selon la méthode de Ward

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc d'orange sans graine; **MSGPo**: poudre de marc de pomme sans graine; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie.



**Figure 30:** Carte thermique de profil sensoriel et d'acceptabilité globale du pain au blé et du pain sans gluten avec et sans ajout des sous-produits (Plus la couleur rouge est foncée, plus la note de l'attribut sensoriel et l'acceptabilité globale du pain est élevée. De même, plus la couleur verte est intense, plus la note de l'attribut sensoriel et l'acceptabilité globale du pain est faible).

**Blé T<sub>1</sub>** : témoin de blé, **SG T<sub>2</sub>** : témoin sans gluten, **MSGO**: poudre de marc d'orange sans graine; **MSGPo**: poudre de marc de pomme sans graine; **PPPi**: poudre de pelure avec le placenta du piment; **PT**: poudre de la pelure de tomate; **PFB**: poudre de pelure de la figue de barbarie; **PGFB**: pelure des graines de la figue de barbarie.

D'une manière générale et d'après les dégustateurs, le pain témoin à base de blé est le plus apprécié ( $p < 0,05$ ) par rapport aux pains sans gluten avec et sans ajout de sous-produits pour les paramètres sensorielles choisis.

En ce qui concerne les pains sans gluten, l'ajout de sous-produits entraîne des changements de goût, d'arôme, de couleur, de texture, d'apparence et de l'acceptabilité globale et présentent des scores plus élevés ( $p < 0,05$ ) par rapport au pain témoin sans gluten de base et cela pour tous les attributs sensoriels. Le pain le moins apprécié par les dégustateurs est celui fabriqué avec la formule témoin sans gluten.

Quel que soit la source de sous-produit, les pains sans gluten avec 7,5g d'enrichissement présentent les meilleurs scores pour le goût. Le pain avec 7,5g de PT est le plus apprécié par les dégustateurs suivis par le pain avec 7,5g de PFB. De plus, le score pour le goût augmente avec l'augmentation de taux d'ajout des sous-produit ajouté.

Le pain sans gluten fabriqué avec addition de 5g de PT a plus de notes et est le plus apprécié pour son arôme ( $p < 0,05$ ). Les pains sans gluten avec 2,5 g de PGFB et le pain avec 2,5g de MSGO présentent les meilleures notes pour la texture suivis par le pain avec 2,5g de PT. Le pain le moins apprécié par rapport à sa texture est celui fabriqué avec 5g de PFB. L'amélioration de la texture des pains enrichis en sous-produits est probablement due à l'humidité finale élevée des pains améliorés et de la moindre sensation de sécheresse par rapport au pain de la formule de base sans gluten.

En comparaison avec le pain témoin sans gluten, l'acceptabilité de la couleur et d'apparence des pains sans gluten enrichis en sous-produits est satisfaisante. Aucune différence significative n'a été observée en ce qui concerne la couleur entre le témoin de blé et les pains préparés avec des sous-produits.

Concernant l'acceptabilité globale, les pains sans gluten avec 7,5g de MSGO et 7,5g de PT sont les plus acceptables par les dégustateurs. Le pain le moins acceptable est celui fabriqué par addition de 2,5 g de MSGO.

L'analyse de regroupement des pains selon le profil sensoriel et l'acceptabilité globale (figure 29), fait ressortir quatre principales classes, classe 1 comprend le pain témoin à base de blé, classe 2 comprend les pains sans gluten avec 7,5 g d'addition (MSGO, PT, PGFB et PFB), les pains avec 2,5g de PPPi et les pains avec 5g de PT et 5g de PFB. La classe 3 comprend le pain témoin sans gluten alors que les autres pains sans gluten sont classés dans le groupe 4.

D'après la carte thermique de profil sensoriel et de l'acceptabilité globale (figure 30), les pains du groupe 2 présentent la plus faible variation des propriétés sensorielles par rapport au témoin à base de blé. L'ajout de sous-produits (MSGO, PT, PGFB et PFB) à 7,5 g améliore la qualité sensorielle des pains sans gluten avec des notes des dégustateurs allant de 4,5 à 8. Les pains de groupe 4 sont les moins appréciables pour le goût, l'arôme et l'acceptabilité globale.

D'une manière générale, l'addition de sous-produits améliore considérablement le goût, l'arôme, la texture, la couleur et l'apparence des pains sans gluten par rapport au témoin sans gluten. Les pains sans gluten qui donnent des caractéristiques sensorielles proches de celles du pain témoin à base de blé sont ceux fabriqués avec 7,5 g de sous-produits.

Une corrélation hautement significative a été établie entre l'acceptabilité globale et les appréciations du goût ( $r=0,81$ ,  $p=0,0006$ ) et entre l'acceptabilité et de la couleur ( $r=0,79$ ,  $p<0,0001$ ) (tableau 23, annexe6).

L'appréciation de goût est corrélée avec l'arôme ( $r = 0,59$ ,  $p = 0,019$ ). En outre l'appréciation du goût est corrélée avec la couleur ( $r=0,73$ ,  $p=0,0003$ ).

L'appréciation de couleur est hautement reliée à l'arôme ( $r=0,74$ ,  $p =0,0003$ ). En effet, la réaction de Maillard responsable de brunissement de la croûte, recherché chez les produits céréaliers cuits, est probablement à l'origine des composés aromatiques.

## **5.2. Corrélation -acceptabilité globale - qualité finale des pains**

Le tableau 23 montre les coefficients de corrélation trouvés entre les caractéristiques sensorielles et la qualité finale des pains avec et sans gluten.

Les deux attributs sensoriels goût et couleur montrent des corrélations positives significatives avec la taille moyenne des alvéoles (TMA) ( $r=0,49$ ) et ( $r=0,48$ ) respectivement et des corrélations négatives avec  $L^*$  de la mie ( $r= -0,467$  et  $r= -0,456$  respectivement). La couleur des pains est également en corrélation avec le volume spécifique ( $r= 0,633$ ).

Une corrélation positive est détectée entre l'apparence des pains et le volume spécifique avec une valeur de  $r = 0,578$ . Une autre corrélation significative négative de la texture avec  $b^*$  de la mie est observée, avec une valeur de corrélation de  $r= -0,514$ .

En outre, l'acceptabilité globale a révélé une corrélation élevée et positive avec le volume spécifique ( $r =0,7873$ ,  $p <0,0001$ ) et la TMA ( $r=0,6492$ ,  $p= 0,002$ ) et une corrélation négative élevée ( $p= 0,001$ ) avec  $L^*$  de la mie ( $r= -0,6504$ ) (annexe6).

## **Conclusion**

*Quel que soit la source de sous-produit utilisé, les pains sans gluten enrichis en sous-produit présentent une meilleure qualité sensorielle (goût, arôme, texture, couleur et apparence).*

*Les pains sans gluten qui donnent des caractéristiques sensorielles proches de celles du pain témoin à base de blé sont ceux fabriqués avec 7,5 g de sous-produits.*

*Les pains enrichis avec 7,5g de MSGO et/ou 7,5g de PT sont les plus acceptables par les dégustateurs.*

*L'utilisation de sous-produits pourrait être une méthode pour améliorer les propriétés sensorielles de pain sans gluten.*



**Tableau 23** : matrice de corrélation entre les attributs sensoriels et la qualité finale des pains

	Vsp	pH	Hf	NA	TMA	L* Croute	a* Croute	b* Croute	L* mie	a* mie	b* mie	Goût	Arome	Texture	Couleur	Apparence	Acceptabilité globale
Vsp	<b>1</b>																
pH	-0,206	<b>1</b>															
Hf	-0,110	0,031	<b>1</b>														
NA	-0,214	<b>0,641</b>	0,185	<b>1</b>													
TMA	<b>0,842</b>	-0,176	-0,192	-0,287	<b>1</b>												
L* Croute	0,057	0,380	0,026	0,154	0,322	<b>1</b>											
a* Croute	-0,055	-0,254	0,102	0,194	-0,300	<b>-0,645</b>	<b>1</b>										
b* Croute	-0,393	0,208	0,158	0,359	-0,444	-0,143	<b>0,450</b>	<b>1</b>									
L* mie	<b>-0,802</b>	0,135	0,276	0,140	<b>-0,785</b>	-0,109	0,120	<b>0,591</b>	<b>1</b>								
a* mie	-0,145	-0,148	0,113	0,229	<b>-0,516</b>	<b>-0,474</b>	<b>0,603</b>	0,167	0,104	<b>1</b>							
b* mie	-0,443	0,257	0,355	<b>0,471</b>	<b>-0,598</b>	-0,140	0,365	<b>0,734</b>	<b>0,671</b>	0,436	<b>1</b>						
Goût	<b>0,648</b>	-0,015	0,134	0,182	<b>0,497</b>	-0,071	0,076	-0,204	<b>-0,468</b>	0,046	0,017	<b>1</b>					
Arome	0,388	0,083	0,184	0,421	0,279	0,093	0,244	0,105	-0,302	0,146	0,174	<b>0,593</b>	<b>1</b>				
Texture	-0,005	-0,178	-0,224	-0,144	-0,039	0,157	-0,076	-0,515	-0,217	0,113	-0,345	-0,096	0,022	<b>1</b>			
Couleur	<b>0,634</b>	0,148	-0,065	0,249	<b>0,490</b>	0,007	0,181	-0,007	<b>-0,454</b>	-0,060	-0,111	<b>0,735</b>	<b>0,745</b>	-0,064	<b>1</b>		
Apparence	<b>0,579</b>	-0,307	-0,177	-0,029	0,366	-0,224	0,435	0,097	-0,401	0,175	-0,160	<b>0,475</b>	0,298	0,080	<b>0,606</b>	<b>1</b>	
Acceptabilité globale	<b>0,787</b>	-0,089	-0,251	-0,020	<b>0,649</b>	0,015	-0,068	-0,253	<b>-0,650</b>	-0,107	-0,267	<b>0,819</b>	<b>0,500</b>	-0,026	<b>0,799</b>	<b>0,588</b>	<b>1</b>

# CONCLUSION GENERALE

## **Conclusion générale**

L'ajout à notre formule de base sans gluten des différents types de sous-produits (marcs d'orange ou de pomme, pelures de tomate ou de piment avec le placenta de piment ou de figue de barbarie et de ses graines) aux trois différents taux (2,5, 5 ou 7,5 g/100 g) a montré des modifications aux niveaux physicochimique, rhéologique et qualité finales des pains. Il a été conclu ce qui suit.

- **Sur le plan des modifications physico-chimiques**

Les propriétés physicochimiques des sous-produits suggèrent que, les pelures de tomate, de graine de figue de barbarie et de piment peuvent être utilisées comme source d'enrichissement en fibres alimentaires. La pelure de figue de barbarie peut être aussi utilisée comme source de protéines et le marc d'orange sans graines peut servir comme source de lipides dans divers produits alimentaires.

Les marcs d'orange et de pomme et les pelures de figue de barbarie et de ses graines constituent des sources intéressantes de pectine, entre autres, destinées à la formulation des produits alimentaires qui nécessitent une correction du rapport viscoélastique.

Le marc d'orange a présenté la plus grande capacité de rétention d'eau suivi du marc de pomme et de la pelure de tomate. Ils peuvent être suggérés comme ingrédients fonctionnels pour modifier la viscosité et la texture des pains sans gluten.

- **Sur le plan rhéologiques et qualité finale du pain**

➤ Notre pain sans gluten de base (maïs/pois chiche) de moindre qualité, comparativement au pain de blé tendre montrait les insuffisances suivantes à améliorer :

- un long temps T1 (84 min contre 63 min) pour atteindre une hauteur maximale de la pâte nettement plus faible ( $H_m = 4,1\text{mm}$  contre  $34,6\text{ mm}$ ), une valeur de volume de gaz perdu la plus élevée ( $V_{pCO_2} = 259\text{ mL}$  contre  $37\text{ mL}$ ), un  $R_{CO_2}$  la plus faible (70,4 % contre 96,1%) et un coefficient d'affaiblissement ( $CA = 4,9\%$  contre  $5,8\%$ ) plus petit avec un temps ( $T_x$ ) où la pâte commence à laisser échapper du  $CO_2$  plus tôt ( $T_x = 31,5\text{ min}$  contre  $55,5\text{ min}$ ).

- un volume spécifique la plus faible ( $V_{sp} = 1,48\text{ cm}^3/\text{g}$  contre  $3,39\text{ cm}^3/\text{g}$ ).

- une luminosité ( $L^*$ ) de la croûte et de la mie la plus foncé que les pains sans gluten enrichis en sous-produits ( $L^* \text{ coute} = 74,6$  contre  $81,6$  et  $L^* \text{ mie} = 80,42$  contre  $91,62$ ).

- une taille moyenne des alvéoles plus petite ( $TMA = 0,46\text{ mm}^2$  contre  $1,67\text{ mm}^2$ ).

➤ En comparaison avec la pâte de la formule de base, les gains dus aux incorporations de sous-produits sont :

- augmentation de la hauteur maximale de la pâte (Hm) de 4,1 mm à 8,2 mm (une augmentation entre 0,6 mm et 4,1 mm) et accélération le processus de fermentation où le temps de développement maximal de la pâte ( $T_1$ ) réduit de 84 min à 25,5min (une réduction entre 22,5 min et 58,5 min) ;

- diminution du volume de gaz perdu ( $V_{pCO_2}$ ) de 259 mL à 80 mL (une diminution entre 95 mL et 179 mL) et augmentation de coefficient de rétention du  $CO_2$  ( $R_{CO_2}$ ) de 70,4% à 91,9 % (une augmentation entre 16 % et 21,5 %).

- amélioration du  $V_{sp}$  des pains sans gluten avec des valeurs varient entre 1,69 et 2,50  $cm^3/g$  (une augmentation entre 0,21 et 1,02  $cm^3/g$ ) mais ces valeurs restent inférieure au  $V_{sp}$  de témoin de blé. La valeur du volume spécifique la plus élevée est donnée par la pelure de figue de barbarie à 5 g p 100g (2,50  $cm^3/g$ ) suivi par marc d'orange à 7,5 g (2,46  $cm^3/g$ ).

- amélioration de la luminosité ( $L^*$ ) de la croûte (80,34) et de la mie (82,2) pour le pain sans gluten enrichie 2,5 g p 100 g de pelure des graines de figue de barbarie.

- augmentation de la taille moyenne des alvéoles (0,46 à 0,91  $mm^2$ ) à l'exception des pains enrichies en pelure de piment.

➤ Les effets inverses des sous-produits et les insuffisances sont :

- un effet négatif sur le coefficient d'affaiblissement (CA) où il y'a une augmentation de CA de 15,3% à 87,8% (une augmentation entre 10,4% et 82,9%), sauf pour le pain enrichie PGFB à 2,5g p 100g qui a un effet positif sur le CA (3,4%).

- pas d'amélioration de temps  $T_x$ , où le gaz de  $CO_2$  a commencé de s'échapper de la pâte plus tôt que la formule de base sans gluten (varie de 22,5 min à 30 min).

➤ En comparaison entre les effets de différents sous-produits sur la formule de base sans gluten, le groupe de marc d'orange et de pomme avec la pelure de graines de figues de barbarie à 2,5 g ont un coefficient d'affaiblissement plus élevé, un temps nécessaire pour obtenir du maximum de formation de gaz ( $T'_1$ ) plus long, un volume de gaz total ( $V_{tCO_2}$ ) et un volume de gaz retenu par la pâte ( $V_{Rco_2}$ ) plus important, une perte de poids à la cuisson plus élevée, un pH de pain légèrement plus acide, une taille moyenne des alvéoles (TMA) plus grands que le deuxième groupe de pelure de tomate, piment, et de figue de barbarie et ces

graines à 5g et 7g , alors que ce dernier se caractérise par une  $H_m$  plus élevée, une teneur en eau finale ( $H_f$ ) plus importante, une pâte plus consistante, un nombre des alvéoles plus élevée et une couleur plus foncée de la croûte ( $L^*$  croûte plus petit) et une couleur plus claire de la mie ( $L^*$  mie plus grand) que le premier groupe.

- **L'analyse sensorielle distingue les différents pains selon la nature et le taux d'incorporation des sous-produits étudiés**

- Le pain le moins apprécié par les dégustateurs est celui fabriqué avec la formule témoin sans gluten.
- L'addition de sous-produits a un effet positif sur le goût, l'arôme, la texture, la couleur et l'apparence des pains sans gluten par rapport au témoin sans gluten.
- Les pains sans gluten qui donnent des caractéristiques sensorielles proches de celles du pain témoin à base de blé sont ceux fabriqués avec 7,5 g de sous-produits.
- Les pains sans gluten avec 7,5 g de marc d'orange et 7,5 g de pelure de tomate sont les plus acceptables par les dégustateurs.

Malgré les pains sans gluten obtenus n'ont pas présenté de meilleurs paramètres de qualité que le pain témoin de blé, mais, les caractéristiques rhéologiques, nutritionnelles et fonctionnelles de ces sous-produits nous permettent de les utiliser comme améliorants naturels, disponibles en grande quantité et peu coûteux car issus de notre production locale.

Les résultats de cette étude mettent à la disposition des transformateurs des IAA des informations utiles pour une meilleure valorisation de leurs sous-produits et de réduire leur quantité, ainsi que la production de nouveaux produits à base de sous-produit d'orange, de pomme, de piment, de tomate et de la figue de barbarie.

Compte tenu des résultats positifs et encourageants obtenus, on peut recommander de:

- optimiser le diagramme de fabrication de pain, on joue sur les paramètres de diagramme ;
- étudier l'effet de la combinaison entre les sous-produits en espérant une synergie entre les améliorations apportées par ces sous-produits au pain sans gluten
- utiliser de ces sous-produits intéressants dans d'autres aliments avec et sans gluten (Pâte alimentaires, fromage, confiture, yaourt...) pour obtenir des effets positifs sur l'économie et la durabilité environnementale.
- vérifier si les incorporations étudiées peuvent assurer une meilleure durée de conservation des pains proposés.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## **Références bibliographiques**

1. Aacc, 2000. American Association of Cereal Chemists. Approved methods of the AACC. The Association, St Paul, Minnesota.
2. Abedi, E., Pourmohammadi, K., 2020. Physical modifications of wheat gluten protein: An extensive review. *Journal of Food Process Engineering* 44, e13619.
3. Abid, M., Cheikhrouhou, S., Renard, C.M., Bureau, S., Cuvelier, G., Attia, H., Ayadi, M., 2017. Characterization of pectins extracted from pomegranate peel and their gelling properties. *Food Chemistry* 215, 318-325.
4. Aguilar, N., Albanell, E., Miñarro, B., Capellas, M., 2015. Chickpea and tiger nut flours as alternatives to emulsifier and shortening in gluten-free bread. *LWT-Food science and Technology* 62, 225-232.
5. Ahmad, F., Khan, S.T., 2019. Potential industrial use of compounds from by-products of fruits and vegetables, *Health and Safety Aspects of Food Processing Technologies*, Springer, pp. 273-307.
6. Ai, Y., Jane, J.I., 2016. Macronutrients in corn and human nutrition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15, 581-598.
7. Al-Juhaimi, F., Özcan, M.M., 2013. Determination of some mineral contents of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) seed flours. *Environmental monitoring and assessment* 185, 3659-3663.
8. Al Juhaimi, F., Özcan, M.M., Uslu, N., Ghafoor, K., Babiker, E.E., 2018. Effect of microwave heating on phenolic compounds of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) seeds. *Journal of Food Processing and Preservation* 42, e13437.
9. Alba, K., Rizou, T., Paraskevopoulou, A., Campbell, G.M., Kontogiorgos, V., 2020. Effects of blackcurrant fibre on dough physical properties and bread quality characteristics. *Food Biophysics*, 1-10.
10. Ali, R.F., El-Anany, A.M., Mousa, H.M., Hamad, E.M., 2020. Nutritional and sensory characteristics of bread enriched with roasted prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) seed flour. *Food & function* 11, 2117-2125.
11. Altuna, L., Ribotta, P.D., Tadini, C.C., 2015. Effect of a combination of enzymes on dough rheology and physical and sensory properties of bread enriched with resistant starch. *LWT-Food Science and Technology* 64, 867-873.
12. Alvarez-Jubete, L., Auty, M., Arendt, E.K., Gallagher, E., 2010. Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free bread formulations. *European Food Research and Technology* 230, 437-445.
13. Anal, A., 2018. *Food processing by-products and their utilization*. Wiley Online Library.
14. ANG, J.F., 1991. Water retention capacity and viscosity effect of powdered cellulose. *Journal of Food Science* 56, 1682-1684.
15. Anwar, M., Sallam, E., 2016a. Utilization of prickly pear peels to improve quality of pan bread. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications* 49, 151-163.
16. Anwar, M., Sallam, E., 2016b. Utilization of prickly pear peels to improve quality of pan bread. *Arab J Nucl Sci Appl* 49, 151-163.
17. AOAC, 2005. Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists: Rockville, MD, USA.
18. Arslan, M., Rakha, A., Khan, M.R., Zou, X., 2017. Complementing the dietary fiber and antioxidant potential of gluten free bread with guava pulp powder. *Journal of Food Measurement and Characterization* 11, 1959-1968.

19. Arslan, M., Rakha, A., Xiaobo, Z., Mahmood, M.A., 2019. Complimenting gluten free bakery products with dietary fiber: Opportunities and constraints. *Trends in food science & technology* 83, 194-202.
20. Asif, M., Rooney, L.W., Ali, R., Riaz, M.N., 2013. Application and opportunities of pulses in food system: a review. *Critical reviews in food science and nutrition* 53, 1168-1179.
21. Ayala-Zavala, J.F., González-Aguilar, G., Siddiqui, M.W., 2018. *Plant Food By-products: Industrial Relevance for Food Additives and Nutraceuticals*. CRC Press.
22. Ayala-Zavala, J.F., González-Aguilar, G.A., 2011. Use of additives to preserve the quality of fresh-cut fruits and vegetables. *Advances in fresh-cut fruits and vegetables processing*, 231-254.
23. Ayala-Zavala, J., Rosas-Domínguez, C., Vega-Vega, V., González-Aguilar, G., 2010. Antioxidant enrichment and antimicrobial protection of fresh-cut fruits using their own byproducts: Looking for integral exploitation. *Journal of food science* 75, R175-R181.
24. Baenas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D., García-Viguera, C., 2019. Industrial use of pepper (*Capsicum annum* L.) derived products: Technological benefits and biological advantages. *Food chemistry* 274, 872-885.
25. Bchir, B., Rabetafika, H.N., Paquot, M., Blecker, C., 2014. Effect of pear, apple and date fibres from cooked fruit by-products on dough performance and bread quality. *Food and Bioprocess Technology* 7, 1114-1127.
26. Bedrníček, J., Jirotková, D., Kadlec, J., Laknerová, I., Vrchotová, N., Tříška, J., Samková, E., Smetana, P., 2020. Thermal stability and bioavailability of bioactive compounds after baking of bread enriched with different onion by-products. *Food chemistry* 319, 126562.
27. Belhadj Slimen, I., Najar, T., Abderrabba, M., 2021. Bioactive Compounds of Prickly Pear [*Opuntia Ficus-Indica* (L.) Mill.]. *Bioactive Compounds in Underutilized Vegetables and Legumes*, 171-209.
28. Benatallah, L., Zidoune, M.N., Michon, C., 2012. Optimization of HPMC and water addition for a gluten-free formula with rice and field bean based on rheological properties of doughs. *International Review of Chemical Engineering* 4, 474-481.
29. Bhat, M.A., Hafiza, A., 2016. Physico-chemical characteristics of cookies prepared with tomato pomace powder. *Journal of Food Processing and Technology* 7. Biesiekierski, J.R., 2017. What is gluten? *Journal of gastroenterology and hepatology* 32, 78-81.
30. Bird, L.G., Pilkington, C.L., Saputra, A., Serventi, L., 2017. Products of chickpea processing as texture improvers in gluten-free bread. *Food Science and Technology International* 23, 690-698.
31. Borchani, M., Yaich, H., Abbès, F., Blecker, C., Besbes, S., Attia, H., Masmoudi, M., 2021. Physicochemical, Functional and Antioxidant Properties of the Major Protein Fractions Extracted from Prickly Pear (*Opuntia ficus indica* L.) Seed Cake. *Waste and Biomass Valorization* 12, 1749-1760.
32. Bostanci, H., Ok, S., Yilmaz, E., 2017. Valorization of capia pepperseed flour-I: spreadable new products development. *Waste and Biomass Valorization* 10, 681-690.
33. Bouazizi, S., Montevecchi, G., Antonelli, A., Hamdi, M., 2020. Effects of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel flour as an innovative ingredient in biscuits formulation. *Lwt* 124, 109155.
34. Boubaker, M., Omri, A.E., Blecker, C., Bouzouita, N., 2016. Fibre concentrate from artichoke (*Cynara scolymus* L.) stem by-products: Characterization and application as a bakery product ingredient. *Food Science and Technology International* 22, 759-768.
35. Bourekoua, H., Gawlik-Dziki, U., Różyło, R., Zidoune, M.N., Dziki, D., 2020. Acerola fruit as a natural antioxidant ingredient for gluten-free bread: An approach to improve bread quality. *Food science and technology international = Ciencia y tecnología de los alimentos internacional* 27, 13-21.



36. Bourekoua, H., Różyło, R., Benatallah, L., Wójtowicz, A., Łysiak, G., Zidoune, M.N., Sujak, A., 2017. Characteristics of gluten-free bread: quality improvement by the addition of starches/hydrocolloids and their combinations using a definitive screening design. *European Food Research and Technology* 244, 345-354.
37. Brites, C., Trigo, M.J., Santos, C., Collar, C., Rosell, C.M., 2010. Maize-based gluten-free bread: influence of processing parameters on sensory and instrumental quality. *Food and Bioprocess Technology* 3, 707-715.
38. Calvo, M., García, M.L., Selgas, M.D., 2008. Dry fermented sausages enriched with lycopene from tomato peel. *Meat science* 80, 167-172.
39. Campos, D.A., Gómez-García, R., Vilas-Boas, A.A., Madureira, A.R., Pintado, M.M., 2020. Management of fruit industrial by-products—a case study on circular economy approach. *Molecules* 25, 320.
40. Cappa, C., Lucisano, M., Raineri, A., Fongaro, L., Foschino, R., Mariotti, M., 2016. Gluten-free bread: Influence of sourdough and compressed yeast on proofing and baking properties. *Foods* 5, 69.
41. Capriles, V.D., Arêas, J.A.G., 2014. Novel approaches in gluten-free breadmaking: interface between food science, nutrition, and health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 13, 871-890.
42. Carlson, B.L., Knorr, D., WATKINS, T.R., 1981. Influence of tomato seed addition on the quality of wheat flour breads. *Journal of Food Science* 46, 1029-1031.
43. Cauvain, S.P., Young, L.S., 2007. *Technology of breadmaking*. GaithersburgMD:Aspen Publishers, Inc.p 295.
44. Chen, C., Ren, M., 2014. The significance of license plate location based on Lab color space, 2nd International Conference on Information, Electronics and Computer, Atlantis Press, pp. 78-81.
45. Chouaibi, M., Rezig, L., Hamdi, S., Ferrari, G., 2019. Chemical characteristics and compositions of red pepper seed oils extracted by different methods. *Industrial Crops and Products* 128, 363-370.
46. CodexAlimentariusCommission, 2008. Norme pour les aliments diététiques ou de régime destinés aux personnessouffrant d'une intolérance au gluten, Codex Standard 118–1979.
47. Coman, V., Teleky, B.-E., Mitrea, L., Martău, G.A., Szabo, K., Călinoiu, L.-F., Vodnar, D.C., 2020. Bioactive potential of fruit and vegetable wastes, *Advances in food and nutrition research*, Elsevier, pp. 157-225.
48. Dai, S., Qi, F., Tanner, R., 2011. Interpreting shear creep data for bread dough using a damage function model. *Applied Rheology* 21.
49. Dalal, N., Neeraj, V.B., Dhakar, U., 2020. Potential of fruit and vegetable waste as a source of pectin. *IJCS* 8, 3085-3090.
50. De Moraes Crizel, T., Jablonski, A., de Oliveira Rios, A., Rech, R., Flôres, S.H., 2013. Dietary fiber from orange byproducts as a potential fat replacer. *LWT-Food Science and Technology* 53, 9-14.
51. Djeghim, F., Bourekoua, H., Benatallah, L., Zidoune, M.N., 2018. Effect of pregelatinized corn and rice flour on specific volume of gluten-free traditional Algerian bread KhobzEddar using central composite design. *African Journal of Food Science* 12, 272-282.
52. Djordjević, M., Djordjević, M., Šoronja-Simović, D., Nikolić, I., Šereš, Z., 2022. Delving into the Role of Dietary Fiber in Gluten-Free Bread Formulations: Integrating Fundamental Rheological, Technological, Sensory, and Nutritional Aspects. *Polysaccharides* 3, 59-82.
53. Djordjević, M., Šoronja-Simović, D., Nikolić, I., Djordjević, M., Šereš, Z., Milašinović-Šeremešić, M., 2019. Sugar beet and apple fibres coupled with hydroxypropylmethylcellulose as

- functional ingredients in gluten-free formulations: Rheological, technological and sensory aspects. *Food chemistry* 295, 189-197.
54. Doukani, K., Tabak, S., 2015. Profil Physicochimique du fruit "Lendj"(Arbutus unedo L.). *Nature & Technology*, 51.
  55. Drabińska, N., Ciska, E., Szymatowicz, B., Krupa-Kozak, U., 2018. Broccoli by-products improve the nutraceutical potential of gluten-free mini sponge cakes. *Food chemistry* 267, 170-177.
  56. Drozdek, K.D., Faller, J.F., 2002. Use of a dual orifice die for on-line extruder measurement of flow behavior index in starchy foods. *Journal of food engineering* 55, 79-88.
  57. Durmuş, F., 2008. Industrial utilization of red pepper seeds: Protein extraction, functional properties, application in mayonnaise production.
  58. e Chiocchetti, G.d.M., Fernandes, E.A.D.N., Bacchi, M.A., Pazim, R.A., Sarriés, S.R.V., Tome, T.M., 2013. Mineral composition of fruit by-products evaluated by neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 297, 399-404.
  59. El-Neney, B.A., Zeedan, K.I., El-Kotamy, E., Gad, G.G., Abdou, A., 2019. Effect of using prickly pear as a source of dietary feedstuffs on productive performance, physiological traits and immune response of rabbit. 2-prickly pear peels. *Egyptian Journal of Nutrition and Feeds* 22, 91-106.
  60. El Khoury, D., Balfour-Ducharme, S., Joye, I.J., 2018. A review on the gluten-free diet: technological and nutritional challenges. *Nutrients* 10, 1410.
  61. El Kossori, R.L., Villaume, C., El Boustani, E., Sauvaire, Y., Méjean, L., 1998. Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus indica* sp.). *Plant Foods for Human Nutrition* 52, 263-270.
  62. Embaby, H.E.S., Mokhtar, S.M., 2011. Chemical composition and nutritive value of lantana and sweet pepper seeds and nabak seed kernels. *Journal of Food Science* 76, C736-C741.
  63. Européen, P., Européen, C., 2008. DIRECTIVE 2008/98/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives. *Journal Officiel de l'Union Européenne*, 3-30.
  64. Ezejiofor, T.I.N., Enebaku, U.E., Ogueke, C., 2014. Waste to wealth-value recovery from agro-food processing wastes using biotechnology: a review. *Biotechnology Journal International*, 418-481.
  65. FAO, 2019. Valeur de la Production Agricole. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QV>, consulter le 23/05/2021.
  66. FAO, 2020. Fruit and vegetables – your dietary essentials. The International Year of Fruits and Vegetables 2021. Background Paper. Rome, 82.
  67. Feili, R., Zzaman, W., Abdullah, W.N.W., Yang, T.A., 2013. Physical and sensory analysis of high fiber bread incorporated with jackfruit rind flour. *Food Science and Technology* 1, 30-36.
  68. Feng, W., Ma, S., Wang, X., 2020. Quality deterioration and improvement of wheat gluten protein in frozen dough. *Grain & Oil Science and Technology* 3, 29-37.
  69. Föste, M., Verheyen, C., Jekle, M., Becker, T., 2020. Fibres of milling and fruit processing by-products in gluten-free bread making: A review of hydration properties, dough formation and quality-improving strategies. *Food chemistry* 306, 125451.
  70. Fraiha, M., Biagi, J.D., Ferraz, A.C.d.O., 2011. Rheological behavior of corn and soy mix as feed ingredients. *Food Science and Technology* 31, 129-134.
  71. Gabriela, M.-M.I., Ganjyal, G., 2018. Fruit Processing By-Products: A Rich Source for Bioactive Compounds and Value Added Products, *Food Processing By-Products and their Utilization*, Wiley Online Library, pp. 11-26.

72. Gómez-Ariza, J., Villegas-Portero, M., Bernal-Daza, V., 2005. Characterization and analysis of amino acids in orange juice by HPLC–MS/MS for authenticity assessment. *Analytica Chimica Acta* 540, 221-230.
73. Gómez, M., Martínez, M.M., 2018. Fruit and vegetable by-products as novel ingredients to improve the nutritional quality of baked goods. *Critical reviews in food science and nutrition* 58, 2119-2135.
74. Gómez, M., Ronda, F., Blanco, C.A., Caballero, P.A., Apesteguía, A., 2003. Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality. *European Food research and technology* 216, 51-56.
75. Gómez, M., Talegón, M., De La Hera, E., 2013. Influence of mixing on quality of gluten-free bread. *Journal of Food Quality* 36, 139-145.
76. Goriewa-Duba, K., Duba, A., Wachowska, U., Wiwart, M., 2018. An evaluation of the variation in the morphometric parameters of grain of six Triticum species with the use of digital image analysis. *Agronomy* 8, 296.
77. Gowe, C., 2015. Review on potential use of fruit and vegetables by-products as a valuable source of natural food additives. *Food Science and Quality Management* 45, 47-61.
78. Grigelmo-Miguel, N., Martín-Belloso, O., 1998. Characterization of dietary fiber from orange juice extraction. *Food research international* 31, 355-361.
79. Gumul, D., Ziobro, R., Korus, J., Kruczek, M., 2021. Apple Pomace as a Source of Bioactive Polyphenol Compounds in Gluten-Free Breads. *Antioxidants* 10, 807.
80. Gunes, R., Palabiyik, I., Toker, O.S., Konar, N., Kurultay, S., 2019. Incorporation of defatted apple seeds in chewing gum system and phloridzin dissolution kinetics. *Journal of Food Engineering* 255, 9-14.
81. Gustafson, K.L., 2016. Impact of ingredients on quality and sensory characteristics of gluten-free baked goods.
82. Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., Meybeck, A., 2011. Global food losses and food waste, FAO Rome.
83. Hassan, A.B., von Hoersten, D., Ahmed, I.A.M., 2019. Effect of radio frequency heat treatment on protein profile and functional properties of maize grain. *Food chemistry* 271, 142-147.
84. He, X., Pei, Q., Xu, T., Zhang, X., 2020. Smartphone-based tape sensors for multiplexed rapid urinalysis. *Sensors and Actuators B: Chemical* 304, 127415.
85. Henneberg, W., Stohmann, F., 1864. Beiträge zur Begründung einer rationellen Fütterung der Wiederkäuer. Vol. 2.
86. Hicks, C.I., See, H., 2010. The rheological characterisation of bread dough using capillary rheometry. *Rheologica acta* 49, 719-732.
87. Hoskeney, R., 1984. Gas retention in bread doughs [Yeast, fermentation]. *Cereal Foods World* 29 (5), 305-308.
88. Hosseini, S.S., Khodaiyan, F., Kazemi, M., Najari, Z., 2019. Optimization and characterization of pectin extracted from sour orange peel by ultrasound assisted method. *International journal of biological macromolecules* 125, 621-629.
89. Houben, A., Höchstötter, A., Becker, T., 2012. Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: an overview. *European Food Research and Technology* 235, 195-208.
90. Huc-Mathis, D., Journet, C., Fayolle, N., Bosc, V., 2019. Emulsifying properties of food by-products: Valorizing apple pomace and oat bran. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 568, 84-91.
91. Ibanoglu, E., Erçelebi, E.A., 2007. Thermal denaturation and functional properties of egg proteins in the presence of hydrocolloid gums. *Food Chemistry* 101, 626-633.

92. ICC, 1996. Standard methods of the international association for cereal science and technology. International Association for Cereal Chemistry, Vienna, Austria.
93. Jafari, M., Koocheki, A., Milani, E., 2018. Functional effects of xanthan gum on quality attributes and microstructure of extruded sorghum-wheat composite dough and bread. *LWT* 89, 551-558.
94. Janevska, D.P., Gospavic, R., Pacholewicz, E., Popov, V., 2010. Application of a HACCP–QMRA approach for managing the impact of climate change on food quality and safety. *Food research international* 43, 1915-1924.
95. Jayathilakan, K., Sultana, K., Radhakrishna, K., Bawa, A., 2012. Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. *Journal of food science and technology* 49, 278-293.
96. Joye, I.J., Shang, J., Brijs, K., Delcour, J.A., 2010. Effect of the coenzymes NAD (P)(H) in straight-dough breadmaking on protein properties and loaf volume. *Cereal chemistry* 87, 420-427.
97. Jun, Y., Bae, I.Y., Lee, S., Lee, H.G., 2014. Utilisation of preharvest dropped apple peels as a flour substitute for a lower glycaemic index and higher fibre cake. *International journal of food sciences and nutrition* 65, 62-68.
98. Juszczak, L., Witczak, T., Ziobro, R., Korus, J., Cieřlik, E., Witczak, M., 2012. Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Carbohydrate polymers* 90, 353-360.
99. Kahraman, G., Harsa, S., Casiraghi, M.C., Lucisano, M., Cappa, C., 2022. Impact of Raw, Roasted and Dehulled Chickpea Flours on Technological and Nutritional Characteristics of Gluten-Free Bread. *Foods* 11, 199.
100. Keskin, S.O., Sumnu, G., Sahin, S., 2004. Bread baking in halogen lamp–microwave combination oven. *Food Research International* 37, 489-495.
101. Khedr, M., Abdelgaleel, M., Bessar, B., Salama, A., 2016. Effect of using tomato peels as a fat replacer on the sensory, Nutritional and physical properties of beef burger and sausages. *J. Agric. Res. Kafr El-Sheikh Univ* 42, 469-490.
102. Khosravi, F., Iranmanesh, B., Olia, S.S.S.J., 2015. Determination of Organic Acids in Fruit juices by UPLC. *International Journal of Life Sciences* 9, 41-44.
103. Knoblich, M., Anderson, B., Latshaw, D., 2005. Analyses of tomato peel and seed byproducts and their use as a source of carotenoids. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 1166-1170.
104. Kohajdová, Z., Karovičová, J., Jurasová, M., 2012. Influence of carrot pomace powder on the rheological characteristics of wheat flour dough and on wheat rolls quality. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria* 11, 381-387.
105. Korus, J., Juszczak, L., Witczak, M., Ziobro, R., 2020. Effect of citrus fiber on the rheological properties of dough and quality of the gluten-free bread. *Applied Sciences* 10, 6633.
106. Korus, J., JUSZCZAK, L., ZIOBRO, R., Witczak, M., Grzelak, K., SÓJKA, M., 2012. Defatted strawberry and blackcurrant seeds as functional ingredients of gluten-free bread. *Journal of Texture Studies* 43, 29-39.
107. Krokida, M., Maroulis, Z., Saravacos, G., 2001. Rheological properties of fluid fruit and vegetable puree products: compilation of literature data. *International Journal of food properties* 4, 179-200.
108. Krupa-Kozak, U., Drabińska, N., Bączek, N., Šimková, K., Starowicz, M., Jeliński, T., 2021. Application of Broccoli Leaf Powder in Gluten-Free Bread: An Innovative Approach to Improve Its Bioactive Potential and Technological Quality. *Foods* 10, 819.
109. Kurek, M., Wyrwicz, J., 2015. The application of dietary fiber in bread products. *Journal of Food Processing and Technology* 6, 447-450.

110. Lauková, M., Kohajdová, Z., Karovicova, J., 2016. Effect of incorporating potato dietary fibre to wheat dough on the quality of baked rolls. *Acta Chimica Slovaca* 9, 14.
111. Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., Biliaderis, C.G., 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of food engineering* 79, 1033-1047.
112. Legland, D., 2019. Le traitement d'images pour les nuls.
113. Leroy, J.-F., 1943. Les Piments. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* 23, 196-218.
114. Li, J.-M., Nie, S.-P., 2016. The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids* 53, 46-61.
115. Liew, S.Q., Chin, N.L., Yusof, Y.A., 2014. Extraction and characterization of pectin from passion fruit peels. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2, 231-236.
116. Lipinski, B., Hanson, C., Waite, R., Searchinger, T., Lomax, J., Kitinoja, L., 2013. Reducing food loss and waste.
117. Littardi, P., Rinaldi, M., Grimaldi, M., Cavazza, A., Chiavaro, E., 2021. Effect of Addition of Green Coffee Parchment on Structural, Qualitative and Chemical Properties of Gluten-Free Bread. *Foods* 10, 5.
118. Lu, Z., Wang, J., Gao, R., Ye, F., Zhao, G., 2019. Sustainable valorisation of tomato pomace: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology* 86, 172-187.
119. Majzoobi, M., Ghavi, F.S., Farahnaky, A., Jamalian, J., Mesbahi, G., 2011. Effect of tomato pomace powder on the physicochemical properties of flat bread (Barbari bread). *Journal of Food Processing and Preservation* 35, 247-256.
120. Majzoobi, M., Poor, Z.V., Jamalian, J., Farahnaky, A., 2016. Improvement of the quality of gluten-free sponge cake using different levels and particle sizes of carrot pomace powder. *International Journal of Food Science & Technology* 51, 1369-1377.
121. Majzoobi, M., Vosooghi Poor, Z., Mesbahi, G., Jamalian, J., Farahnaky, A., 2017. Effects of carrot pomace powder and a mixture of pectin and xanthan on the quality of gluten-free batter and cakes. *Journal of texture studies* 48, 616-623.
122. Martínez, M.M., Díaz, Á., Gómez, M., 2014. Effect of different microstructural features of soluble and insoluble fibres on gluten-free dough rheology and bread-making. *Journal of Food Engineering* 142, 49-56.
123. Martins, Z., Pinho, O., Ferreira, I., 2017. Fortification of Wheat Bread with Agroindustry By-Products: Statistical Methods for Sensory Preference Evaluation and Correlation with Color and Crumb Structure. *Journal of food science* 82, 2183-2191.
124. Mastromatteo, M., Danza, A., Guida, M., Del Nobile, M.A., 2012. Formulation optimisation of vegetable flour-loaded functional bread Part I: screening of vegetable flours and structuring agents. *International journal of food science & technology* 47, 1313-1320.
125. Masure, H.G., Fierens, E., Delcour, J.A., 2016. Current and forward looking experimental approaches in gluten-free bread making research. *Journal of Cereal Science* 67, 92-111.
126. Matos, M.E., Rosell, C.M., 2012. Relationship between instrumental parameters and sensory characteristics in gluten-free breads. *European Food Research and Technology* 235, 107-117.
127. Matos, M.E., Sanz, T., Rosell, C.M., 2014. Establishing the function of proteins on the rheological and quality properties of rice based gluten free muffins. *Food Hydrocolloids* 35, 150-158.
128. Matz, S., 1960. *Bakery Technology and Engineering*, The AVI Pub. Inc., Westport, CT, 12.

129. McConnell, A., Eastwood, M., Mitchell, W., 1974. Physical characteristics of vegetable foodstuffs that could influence bowel function. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 25, 1457-1464.
130. Melini, F., Melini, V., Luziatelli, F., Ruzzi, M., 2017. Current and forward-looking approaches to technological and nutritional improvements of gluten-free bread with legume flours: a critical review. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 16, 1101-1122.
131. Milde, L.B., Ramallo, L.A., Puppo, M.C., 2012. Gluten-free bread based on tapioca starch: texture and sensory studies. *Food and Bioprocess Technology* 5, 888-896.
132. Miñarro, B., Albanell, E., Aguilar, N., Guamis, B., Capellas, M., 2012. Effect of legume flours on baking characteristics of gluten-free bread. *Journal of cereal science* 56, 476-481.
133. Miranda, D.V., Rojas, M.L., Pagador, S., Lescano, L., Sanchez-Gonzalez, J., Linares, G., 2018. Gluten-free snacks based on brown rice and amaranth flour with incorporation of cactus pear peel powder: Physical, nutritional, and sensorial properties. *International journal of food science* 2018.
134. Mohammed, I., Ahmed, A.R., Senge, B., 2012. Effects of chickpea flour on wheat pasting properties and bread making quality. *Journal of food science and technology* 51, 1902-1910.
135. Mohammed, I., Ahmed, A.R., Senge, B., 2014. Effects of chickpea flour on wheat pasting properties and bread making quality. *Journal of food science and technology* 51, 1902-1910.
136. Monteiro, J.S., Farage, P., Zandonadi, R.P., Botelho, R., de Oliveira, L.d.L., Raposo, A., Shakeel, F., Alshehri, S., Mahdi, W.A., Araújo, W., 2021. A Systematic Review on Gluten-Free Bread Formulations Using Specific Volume as a Quality Indicator. *Foods* 10, 614.
137. Moore, M., Juga, B., Schober, T., Arendt, E., 2007. Effect of lactic acid bacteria on properties of gluten-free sourdoughs, batters, and quality and ultrastructure of gluten-free bread. *Cereal Chemistry* 84, 357-364.
138. Moroni, A.V., Dal Bello, F., Arendt, E.K., 2009. Sourdough in gluten-free bread-making: an ancient technology to solve a novel issue? *Food microbiology* 26, 676-684.
139. Nagarajaiah, S.B., Prakash, J., 2016. Chemical composition and bioactivity of pomace from selected fruits. *International Journal of Fruit Science* 16, 423-443.
140. Naqash, F., Gani, A., Gani, A., Masoodi, F., 2017. Gluten-free baking: Combating the challenges- A review. *Trends in Food Science & Technology* 66, 98-107.
141. Nunes, M.H.B., Moore, M.M., Ryan, L.A., Arendt, E.K., 2009. Impact of emulsifiers on the quality and rheological properties of gluten-free breads and batters. *European Food Research and Technology* 228, 633-642.
142. O'Shea, N., Arendt, E.K., Gallagher, E., 2012. Dietary fibre and phytochemical characteristics of fruit and vegetable by-products and their recent applications as novel ingredients in food products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 16, 1-10.
143. O'shea, N., Ktenioudaki, A., Smyth, T., McLoughlin, P., Doran, L., Auty, M., Arendt, E., Gallagher, E., 2015a. Physicochemical assessment of two fruit by-products as functional ingredients: Apple and orange pomace. *Journal of food engineering* 153, 89-95.
144. O'shea, N., Röbke, C., Arendt, E., Gallagher, E., 2015b. Modelling the effects of orange pomace using response surface design for gluten-free bread baking. *Food Chemistry* 166, 223-230.
145. Ocen, D., Xu, X., 2013. Effect of citrus orange (*Citrus sinensis*) by-product dietary fiber preparations on the quality characteristics of frozen dough bread. *American Journal of Food Technology* 8, 43-53.
146. Okino Delgado, C.H., Fleuri, L.F., 2016. Orange and mango by-products: Agro-industrial waste as source of bioactive compounds and botanical versus commercial description—A review. *Food Reviews International* 32, 1-14.

147. Oreopoulou, V., Russ, W., 2007. Utilization of by-products and treatment of waste in the food industry. Springer.
148. Oreopoulou, V., Tzia, C., 2007. Utilization of plant by-products for the recovery of proteins, dietary fibers, antioxidants, and colorants, Utilization of by-products and treatment of waste in the food industry, Springer, pp. 209-232.
149. Özcan, M.M., Al Juhaimi, F.Y., 2011. Nutritive value and chemical composition of prickly pear seeds (*Opuntia ficus indica* L.) growing in Turkey. *International journal of food sciences and nutrition* 62, 533-536.
150. PA Silva, Y., Borba, B.C., Pereira, V.A., Reis, M.G., Caliari, M., Brooks, M.S.-L., Ferreira, T.A., 2019. Characterization of tomato processing by-product for use as a potential functional food ingredient: nutritional composition, antioxidant activity and bioactive compounds. *International journal of food sciences and nutrition* 70, 150-160.
151. Pacheco, M.T., Moreno, F.J., Villamiel, M., 2019. Chemical and physicochemical characterization of orange by-products derived from industry. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99, 868-876.
152. Padayachee, A., Day, L., Howell, K., Gidley, M., 2017. Complexity and health functionality of plant cell wall fibers from fruits and vegetables. *Critical reviews in food science and nutrition* 57, 59-81.
153. Padmanabhan, M., Bhattacharya, M., 1991. Flow behavior and exit pressures of corn meal under high-shear–high-temperature extrusion conditions using a slit die. *Journal of Rheology* 35, 315-343.
154. Pandharipande, S., Makode, H., 2012. Separation of oil and pectin from orange peel and study of effect of pH of extracting medium on the yield of pectin. *Journal of Engineering Research and Studies* 3, 6-9.
155. Parafati, L., Restuccia, C., Palmeri, R., Fallico, B., Arena, E., 2020. Characterization of prickly pear peel flour as a bioactive and functional ingredient in bread preparation. *Foods* 9, 1189.
156. Parra, A.F.R., Ribotta, P.D., Ferrero, C., 2015. Starch–apple pomace mixtures: pasting properties and microstructure. *Food and bioprocess technology* 8, 1854-1863.
157. Pathak, P.D., Mandavgane, S.A., Kulkarni, B.D., 2017. Fruit peel waste: characterization and its potential uses. *Current Science*, 444-454.
158. Pérez-Quirce, S., Collar, C., Ronda, F., 2014. Significance of healthy viscous dietary fibres on the performance of gluten-free rice-based formulated breads. *International Journal of Food Science & Technology* 49, 1375-1382.
159. Quiles, A., Campbell, G.M., Struck, S., Rohm, H., Hernando, I., 2018. Fiber from fruit pomace: A review of applications in cereal-based products. *Food Reviews International* 34, 162-181.
160. Rabetafika, H.N., Bchir, B., Aguedo, M., Paquot, M., Blecker, C., 2014. Effects of processing on the compositions and physicochemical properties of fibre concentrate from cooked fruit pomaces. *Food and bioprocess technology* 7, 749-760.
161. Rachwa-Rosiak, D., Nebesny, E., Budryn, G., 2015. Chickpeas—composition, nutritional value, health benefits, application to bread and snacks: a review. *Critical reviews in food science and nutrition* 55, 1137-1145.
162. Ramsey, M., 2019. Rheology, Viscosity, and Fluid Types. *Practical Wellbore Hydraulics and Hole Cleaning*, 217-237.
163. Rao, D., 2009. *Fundamentals of food engineering*. PHI Learning Pvt. Ltd.
164. Renzetti, S., Dal Bello, F., Arendt, E.K., 2008. Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science* 48, 33-45.

165. Rinaldi, M., Littardi, P., Paciulli, M., Caligiani, A., Chiavaro, E., 2020. Effect of cocoa bean shells granulometries on qualitative properties of gluten-free bread during storage. *European Food Research and Technology* 246, 1583-1590.
166. Rocha Parra, A.F., Ribotta, P.D., Ferrero, C., 2015. Apple pomace in gluten-free formulations: effect on rheology and product quality. *International Journal of Food Science & Technology* 50, 682-690.
167. Ronda, F., Pérez-Quirce, S., Villanueva, M., 2017. Rheological properties of gluten-free bread doughs: relationship with bread quality, *Advances in food rheology and its applications*, Elsevier, pp. 297-334.
168. Rostamian, M., Milani, J.M., Maleki, G., 2014. Physical properties of gluten-free bread made of corn and chickpea flour. *International Journal of Food Engineering* 10, 467-472.
169. Russ, W., Meyer-Pittroff, R., 2004. Utilizing waste products from the food production and processing industries. *Critical reviews in food science and nutrition* 44, 57-62.
170. Sabanis, D., Lebesi, D., Tzia, C., 2009. Effect of dietary fibre enrichment on selected properties of gluten-free bread. *LWT-Food Science and Technology* 42, 1380-1389.
171. Salim, N., Abdelwaheb, C., Rabah, C., Ahcene, B., 2009. Chemical composition of *Opuntia ficus-indica* (L.) fruit. *African Journal of Biotechnology* 8.
172. Schieber, A., Stintzing, F.C., Carle, R., 2001. By-products of plant food processing as a source of functional compounds—recent developments. *Trends in food science & technology* 12, 401-413.
173. Schober, T.J., 2009. Manufacture of gluten-free specialty breads and confectionery products. *Gluten-free food science and technology*, 130-180.
174. Schoenlechner, R., Mandala, I., Kiskini, A., Kostaropoulos, A., Berghofer, E., 2010. Effect of water, albumen and fat on the quality of gluten-free bread containing amaranth. *International journal of food science & technology* 45, 661-669.
175. Sciarini, L.S., Bustos, M., Vignola, M.B., Paesani, C., Salinas, C., Perez, G.T., 2017. A study on fibre addition to gluten free bread: Its effects on bread quality and in vitro digestibility. *Journal of food science and technology* 54, 244-252.
176. Shalini, R., Gupta, D., 2010. Utilization of pomace from apple processing industries: a review. *Journal of food science and technology* 47, 365-371.
177. Simonovska, J., Rafajlovska, V., Kavrakovski, Z., Srbinoska, M., 2014. Nutritive and bioactive compounds in hot fruits of *Capsicum annuum* L. from Macedonia. *Macedonian journal of chemistry and chemical engineering* 33, 97-104.
178. Singh, J.P., Kaur, A., Singh, N., 2016. Development of eggless gluten-free rice muffins utilizing black carrot dietary fibre concentrate and xanthan gum. *Journal of Food Science and Technology* 53, 1269-1278.
179. Sivam, A.S., Sun-Waterhouse, D., Quek, S., Perera, C.O., 2010. Properties of bread dough with added fiber polysaccharides and phenolic antioxidants: A review. *Journal of food science* 75, R163-R174.
180. Skinner, R.C., Gigliotti, J.C., Ku, K.-M., Tou, J.C., 2018. A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace. *Nutrition reviews* 76, 893-909.
181. Sluimer, P., 2005. Principles of breadmaking: functionality of raw materials and process steps. St. Paul: American Association of Cereal Chemists Inc.p 224.
182. Sluimer, P., Sluimer, P., 2005. Principles of breadmaking: functionality of raw materials and process steps.



183. Struyf, N., Van der Maelen, E., Hemdane, S., Verspreet, J., Verstrepen, K.J., Courtin, C.M., 2017. Bread dough and baker's yeast: An uplifting synergy. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 16, 850-867.
184. Sudha, M., 2011. Apple pomace (by-product of fruit juice industry) as a flour fortification strategy, *Flour and breads and their fortification in health and disease prevention*, Elsevier, pp. 395-405.
185. Sundarraj, A.A., Ranganathan, T.V., 2017. A review-Pectin from Agro and industrial waste. *International Journal of Applied Environmental Sciences* 12, 1777-1801.
186. Sung, J., Lee, J., 2016. Capsicoside G, a furostanol saponin from pepper (*Capsicum annum* L.) seeds, suppresses adipogenesis through activation of AMP-activated protein kinase in 3T3-L1 cells. *Journal of Functional Foods* 20, 148-158.
187. Taneya, M., Biswas, M., Ud-Din, M.S., 2014. The studies on the preparation of instant noodles from wheat flour supplementing with sweet potato flour. *Journal of the Bangladesh Agricultural University* 12, 135-142.
188. Tanner, R.I., Qi, F., Dai, S.-C., 2008. Bread dough rheology and recoil: I. Rheology. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 148, 33-40.
189. Tezcan, F., Uzaşçı, S., Uyar, G., Öztekin, N., Erim, F.B., 2013. Determination of amino acids in pomegranate juices and fingerprint for adulteration with apple juices. *Food chemistry* 141, 1187-1191.
190. Tokuşoğlu, Ö., 2018. *Food By-product Based Functional Food Powders*. CRC Press.
191. Toldrá, F., 2019. *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press.
192. Turabi, E., Sumnu, G., Sahin, S., 2008. Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend. *Food hydrocolloids* 22, 305-312.
193. TÜRKER, B., Savlak, N., Kaşıkçı, M.B., 2016. Effect of green banana peel flour substitution on physical characteristics of gluten-free cakes. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal* 4, 197-204.
194. Verheyen, C., Jekle, M., Becker, T., 2014. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* on the structural kinetics of wheat dough during fermentation. *LWT-Food Science and Technology* 58, 194-202.
195. Viuda-Martos, M., Ruiz-Navajas, Y., Fernández-López, J., Pérez-Álvarez, J., 2010. Effect of orange dietary fibre, oregano essential oil and packaging conditions on shelf-life of bologna sausages. *Food Control* 21, 436-443.
196. Walker, G.M., Stewart, G.G., 2016. *Saccharomyces cerevisiae* in the production of fermented beverages. *Beverages* 2, 30.
197. Wang, X., Chen, Q., Lü, X., 2014. Pectin extracted from apple pomace and citrus peel by subcritical water. *Food Hydrocolloids* 38, 129-137.
198. Wang, X., Kristo, E., LaPointe, G., 2019. The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt. *Food Hydrocolloids* 91, 83-91.
199. Wieser, H., 2007. Chemistry of gluten proteins. *Food microbiology* 24, 115-119.
200. Witczak, M., Korus, J., Ziobro, R., Juszczak, L., 2010. The effects of maltodextrins on gluten-free dough and quality of bread. *Journal of Food Engineering* 96, 258-265.
201. Yılmaz, E., Emir, D.D., 2017. Compositional and functional characterisation of poppy seed (*Papaver somniferum* L.) press cake meals. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods* 9, 141-151.
202. Yılmaz, E., Sevgi Arsunar, E., Aydeniz, B., Güneşer, O., 2015. Cold pressed capia pepperseed (*Capsicum Annum* L.) oils: Composition, aroma, and sensory properties. *European Journal of Lipid Science and Technology* 117, 1016-1026.

203. Yu, Z., Fan, Y., Wang, X., Xia, M., Cai, Y., 2020. In vitro and in vivo digestibility of pea and chickpea powder prepared by cooking and drying treatment. *International Journal of Food Properties* 23, 1187-1199.
204. 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.
205. Zhang, Y., Pan, Z., Venkatasamy, C., Ma, H., Li, Y., 2015. Umami taste amino acids produced by hydrolyzing extracted protein from tomato seed meal. *LWT-Food Science and Technology* 62, 1154-1161.
206. Zhu, F., Sakulnak, R., Wang, S., 2016. Effect of black tea on antioxidant, textural, and sensory properties of Chinese steamed bread. *Food Chemistry* 194, 1217-1223.

# ANNEXES

## **Annexe 1**

### **FICHE DE TEST HEDONIQUE**

NOM : .....

PRENOM : .....

DATE : .....

Veillez examiner et goûter chaque échantillon de pain, et donnez une note de 1 à 9 selon l'intensité du caractère (1: je n'aime pas, 5: neutre, 9: j'aime extrêmement)

<b>Couleur</b>	
<b>Goût</b>	
<b>Arôme</b>	
<b>Texture</b>	
<b>Apparence</b>	
<b>Acceptabilité globale</b>	

## Annexe 2

**Tableau 1 :** effet de l'incorporation de 2,5 g de sous-produit d'orange sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>MSGO : apports de 2,5 g (en mg)</b>	0,25	0,14	0,10	0,31	0,10	1,60
<b>Maïs/pois chiche : apports de 97,5 g (en mg)</b>	9,46	12,27	2,57	3,18	1,39	68,60
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,71	12,41	2,67	3,49	1,49	70,20

**Tableau2 :** effet de l'incorporation de 5 g de sous-produit d'orange sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>MSGO : apports de 5 g (en mg)</b>	0,49	0,27	0,22	0,62	0,19	3,21
<b>Maïs/pois chiche : apports de 95 g (en mg)</b>	9,22	11,96	2,51	3,10	1,35	66,86
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,71	12,23	2,73	3,72	1,54	70 ,07

**Tableau 3 :** effet de l'incorporation de 7,5 g de sous-produit d'orange sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>MSGO : apports de 7,5g (en mg)</b>	0,74	0,41	0,33	0,93	0,28	4,81
<b>Maïs/pois chiche : apports de 92,5 g (en mg)</b>	8,98	11,64	2,44	3,02	1,32	65,1
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,72	12,05	2,77	3,95	1,60	69,91

## Annexe 2 (suite)

**Tableau 4:** effet de l'incorporation de 2,5 g de sous-produit de pomme sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>MSGPo : apports de 2,5 g (en mg)</b>	0,30	0,10	0,08	0,40	0,04	1,58
<b>Maïs/pois chiche : apports de 97,5 g (en mg)</b>	9,46	12,27	2,57	3,18	1,39	68,60
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,76	12,37	2,65	3,58	1,43	70,18

**Tableau 5:** effet de l'incorporation de 5 g de sous-produit de pomme sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>MSGPo : apports de 5 g (en mg)</b>	0,57	0,18	0,16	0,80	0,08	3,21
<b>Maïs/pois chiche : apports de 95 g (en mg)</b>	9,22	11,96	2,51	3,10	1,35	66,86
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,79	12,14	2,67	3,90	1,43	70,07

**Tableau 6:** effet de l'incorporation de 7,5 g de sous-produit de pomme sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>MSGPo : apports de 7,5g (en mg)</b>	0,85	0,27	0,23	1,20	0,11	4,82
<b>Maïs/pois chiche : apports de 92,5 g (en mg)</b>	8,98	11,64	2,44	3,02	1,32	65,10
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,83	11,91	2,67	4,22	1,43	69,92

## Annexe 2 (suite)

**Tableau 7:** effet de l'incorporation de 2,5 g de sous-produit de piment sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PPPi : apports de 2,5 g (en mg)</b>	0,15	0,11	0,06	1,23	0,07	0,88
<b>Maïs/pois chiche : apports de 97,5 g (en mg)</b>	9,46	12,27	2,57	3,18	1,39	68,60
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,61	12,38	2,63	4,41	1,46	69,48

**Tableau 8:** effet de l'incorporation de 5 g de sous-produit de piment sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PPPi : apports de 5 g (en mg)</b>	0,30	0,22	0,12	2,50	0,15	1,76
<b>Maïs/pois chiche : apports de 95 g (en mg)</b>	9,22	11,96	2,51	3,10	1,35	66,86
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,52	12,18	2,63	5,60	1,50	68,62

**Tableau 9:** effet de l'incorporation de 7,5 g de sous-produit de piment sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PPPi : apports de 7,5g (en mg)</b>	0,45	0,33	0,18	3,68	0,22	2,64
<b>Maïs/pois chiche : apports de 92,5 g (en mg)</b>	8,98	11,64	2,44	3,02	1,32	65,10
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,43	11,97	2,62	6,7	1,54	67,74

## Annexe 2 (suite)

**Tableau 10 :** effet de l'incorporation de 2,5 g de sous-produit de tomate sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PT : apports de 2,5 g (en mg)</b>	0,13	0,2	0,08	1,32	0,09	0,68
<b>Maïs/pois chiche : apports de 97,5 g (en mg)</b>	9,46	12,27	2,57	3,18	1,39	68,60
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,59	12,47	2,65	4,50	1,48	69,28

**Tableau 11:** effet de l'incorporation de 5 g de sous-produit de tomate sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PT: apports de 5 g (en mg)</b>	0,26	0,39	0,17	2,64	0,18	1,35
<b>Maïs/pois chiche : apports de 95 g (en mg)</b>	9,22	11,96	2,51	3,10	1,35	66,86
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,48	12,35	2,68	5,74	1,53	68,21

**Tableau 12:** effet de l'incorporation de 7,5 g de sous-produit de tomate sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PT: apports de 7,5g (en mg)</b>	0,40	0,60	0,25	4,00	0,27	2,03
<b>Maïs/pois chiche : apports de 92,5 g (en mg)</b>	8,98	11,64	2,44	3,02	1,32	65,10
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,38	12,24	2,69	7,02	1,59	67,13



## Annexe 2 (suite)

**Tableau 13:** effet de l'incorporation de 2,5 g de pelure de figue de barbarie sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PFB : apports de 2,5 g (en mg)</b>	0,25	0,21	0,04	0,19	0,50	1,31
<b>Maïs/pois chiche : apports de 97,5 g (en mg)</b>	9,46	12,27	2,57	3,18	1,39	68,60
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,71	12,48	2,61	3,37	1,89	69,91

**Tableau 14:** effet de l'incorporation de 5 g de pelure de figue de barbarie sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PFB: apports de 5 g (en mg)</b>	0,51	0,42	0,08	0,37	0,98	2,62
<b>Maïs/pois chiche : apports de 95 g (en mg)</b>	9,22	11,96	2,51	3,10	1,35	66,86
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,73	12,38	2,59	3,47	2,33	69,48

**Tableau 15:** effet de l'incorporation de 7,5 g de pelure de figue de barbarie sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PFB: apports de 7,5g (en mg)</b>	0,77	0,64	0,13	0,55	1,47	3,94
<b>Maïs/pois chiche : apports de 92,5 g (en mg)</b>	8,98	11,64	2,44	3,02	1,32	65,10
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,75	12,28	2,57	3,57	2,79	69,04

## Annexe 2 (suite)

**Tableau 16:** effet de l'incorporation de 2,5 g de pelure des graines de la figue de barbarie sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PGFB : apports de 2,5 g (en mg)</b>	0,20	0,18	0,03	1,27	0,41	0,42
<b>Maïs/pois chiche : apports de 97,5 g (en mg)</b>	9,46	12,27	2,57	3,18	1,39	68,60
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,66	12,45	2,60	4,45	1,80	69,02

**Tableau 17:** effet de l'incorporation de 5 g de pelure des graines de la figue de barbarie sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

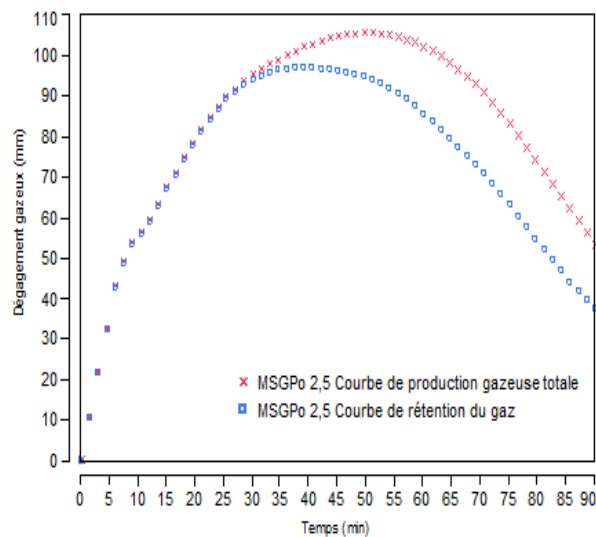
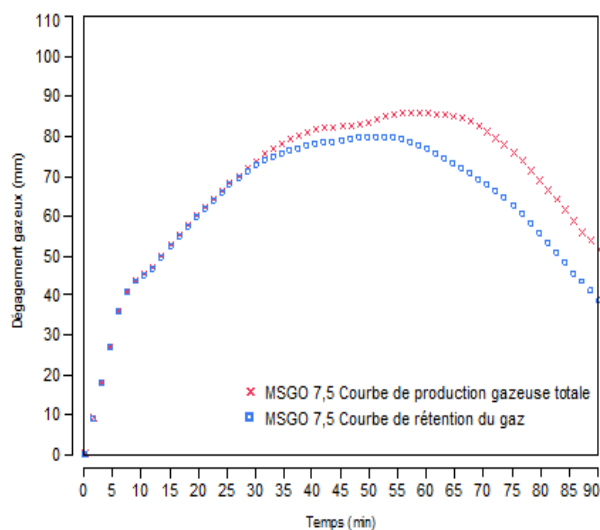
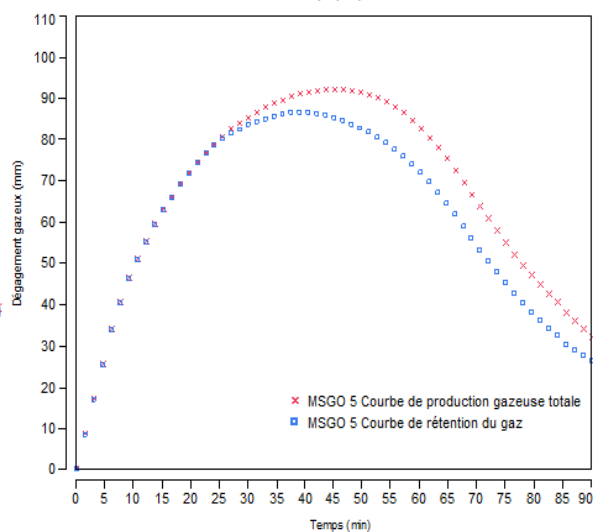
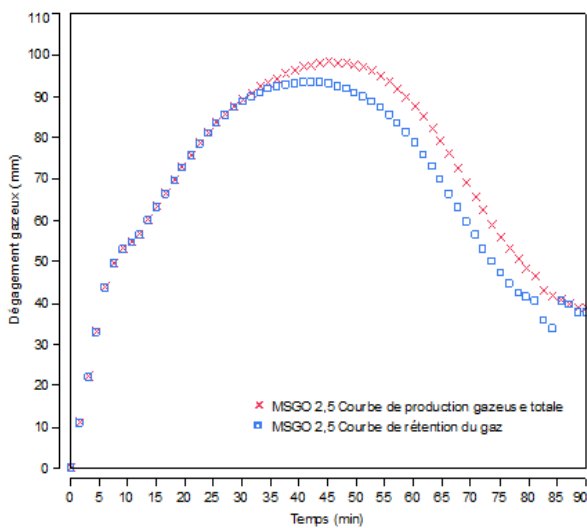
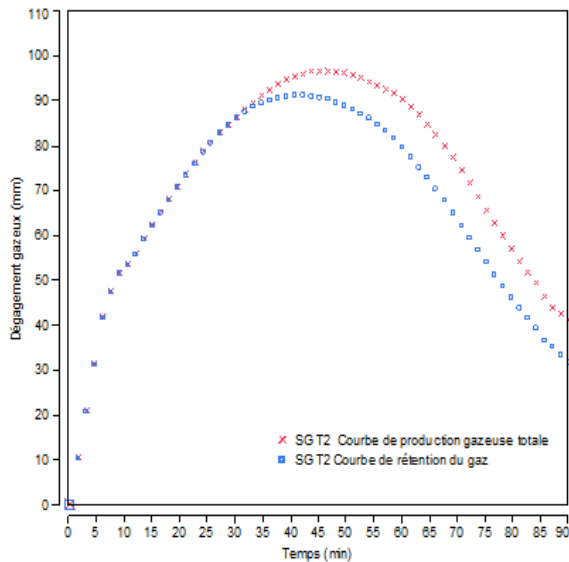
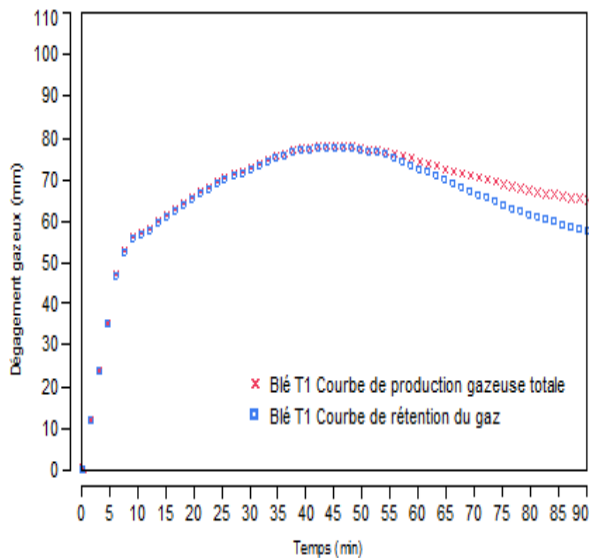
	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PGFB: apports de 5 g (en mg)</b>	0,40	0,35	0,05	2,54	0,82	0,84
<b>Maïs/pois chiche : apports de 95 g (en mg)</b>	9,22	11,96	2,51	3,10	1,35	66,86
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,62	12,31	2,56	5,64	2,17	67,70

**Tableau 18:** effet de l'incorporation de 7,5 g de pelure des graines de la figue de barbarie sur la composition physico-chimiques de la formule maïs/pois chiche.

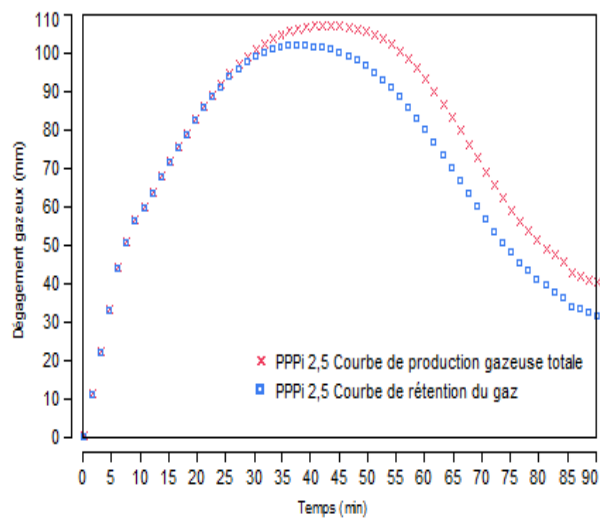
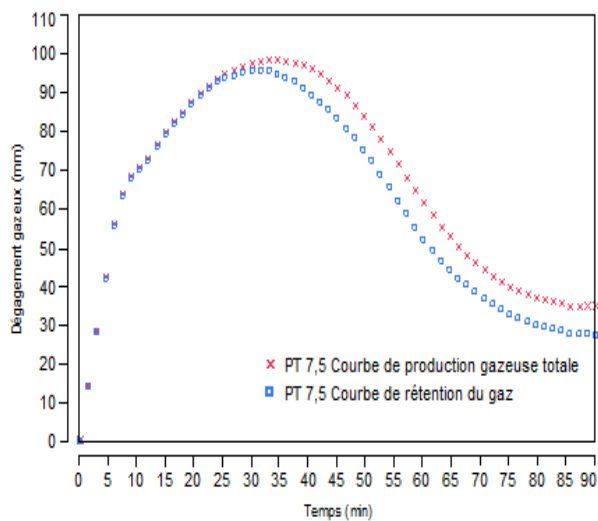
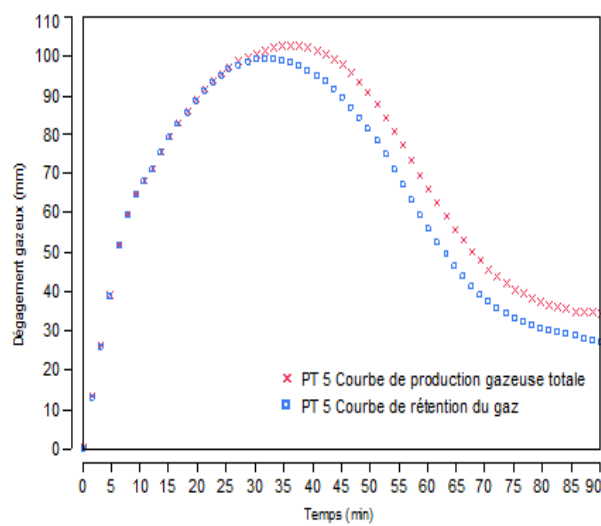
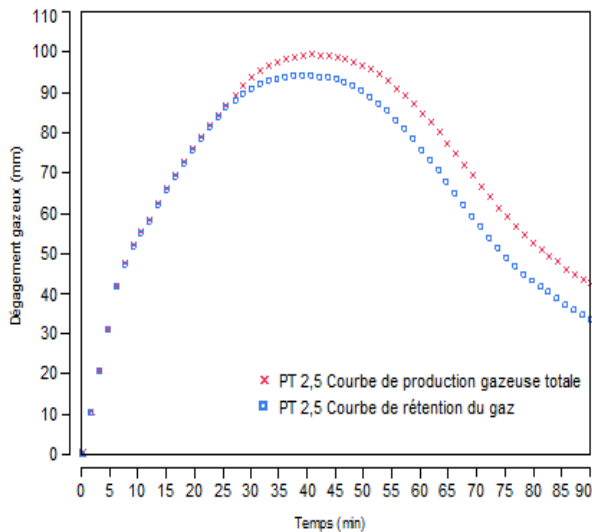
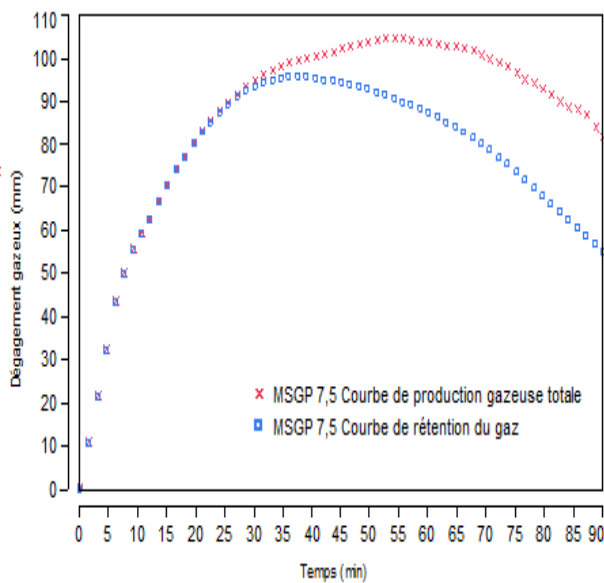
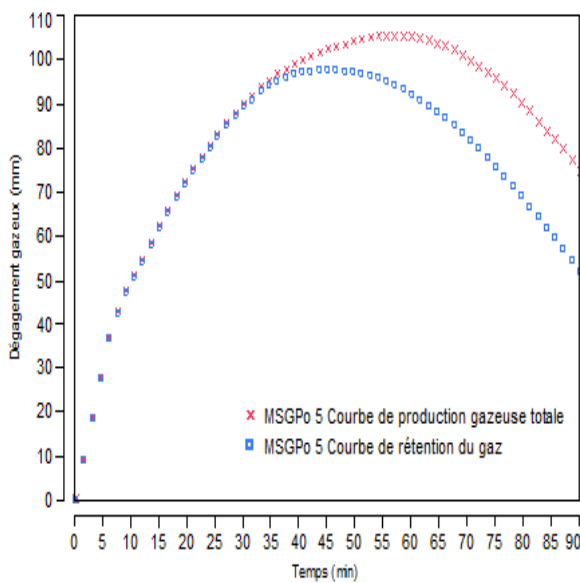
	<b>Humidité (%)</b>	<b>Protéine (%)</b>	<b>Lipide (%)</b>	<b>Fibre (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>	<b>Glucide (%)</b>
<b>PGFB: apports de 7,5g (en mg)</b>	0,60	0,52	0,08	3,81	1,23	1,26
<b>Maïs/pois chiche : apports de 92,5 g (en mg)</b>	8,98	11,64	2,44	3,02	1,32	65,10
<b>Total p 100 g de la formule Maïs/pois chiche à améliorer</b>	9,58	12,16	2,52	6,83	2,55	66,36

### Annexe 3

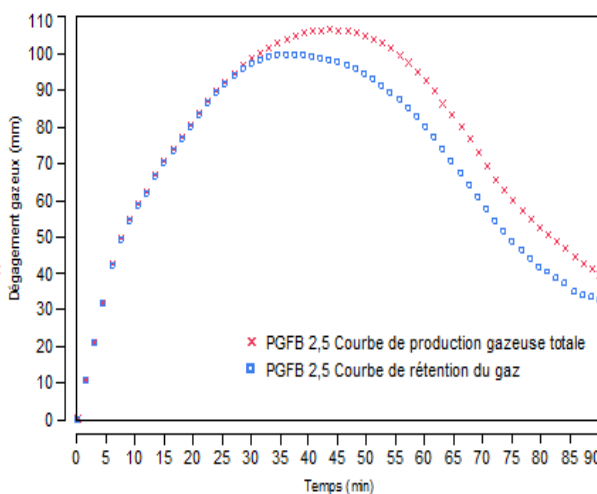
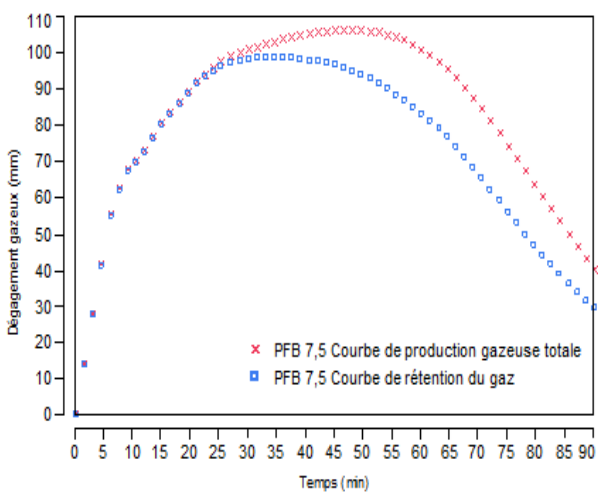
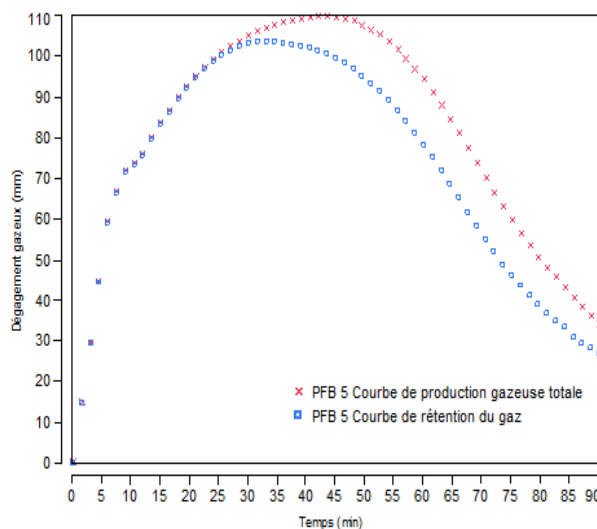
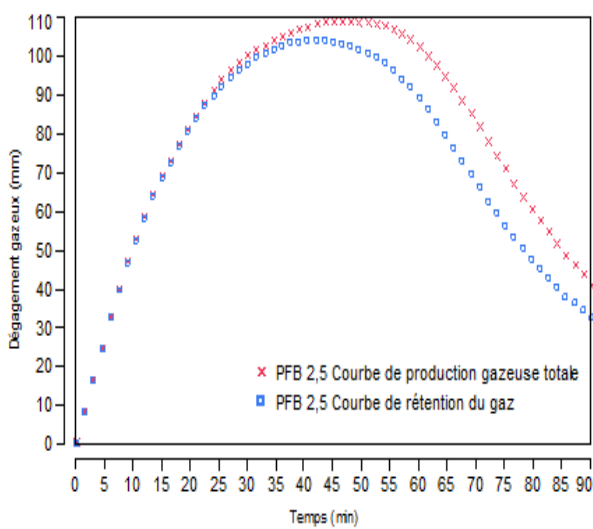
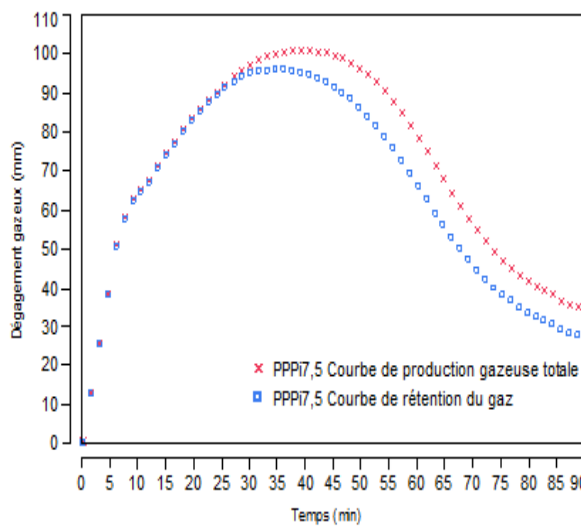
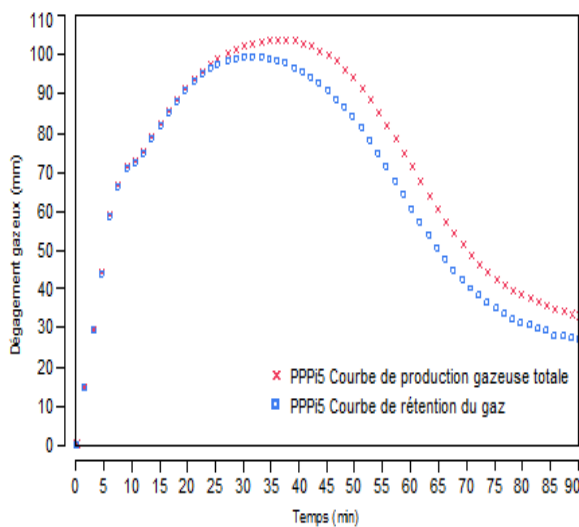
#### Courbes de dégagement gazeux des pâtes avec et sans gluten



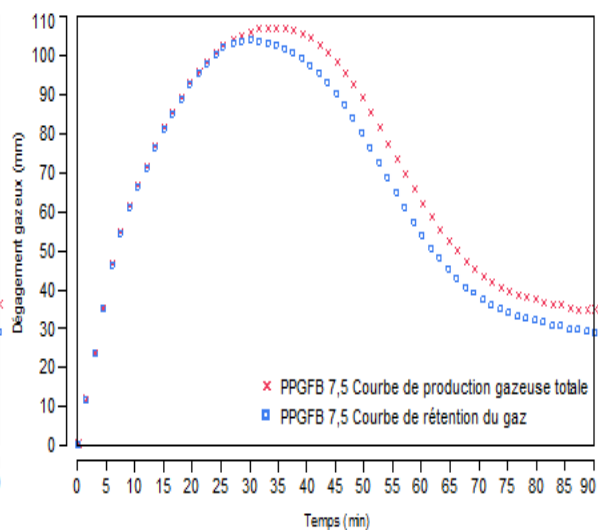
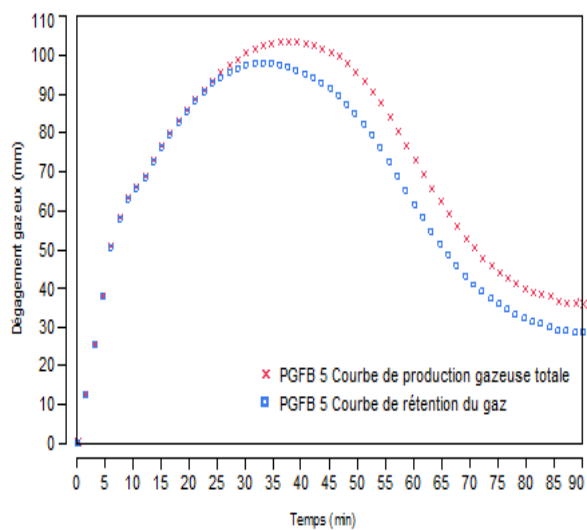
Annexe 3 (suite)



Annexe 3 (suite)



Annexe 3 (suite)



## Annexe 4

Tableau 19: corrélation entre les paramètres rhéologiques et qualité finale des pains

Variable	by Variable	Correlation	Signif Prob
Vsp	%	0,03934203	0,86919816
Hm	%	-0,3851937	0,09351167
<b>Hm</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,81166134</b>	<b>1,39763e-5</b>
Hm'	%	0,20581969	0,38399369
<b>Hm'</b>	<b>Vsp</b>	<b>-0,6562469</b>	<b>0,00167584</b>
<b>Hm'</b>	<b>Hm</b>	<b>-0,6301386</b>	<b>0,00290125</b>
<b>h</b>	<b>%</b>	<b>-0,4537934</b>	<b>0,0444593</b>
<b>h</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,67828753</b>	<b>0,00101184</b>
<b>h</b>	<b>Hm</b>	<b>0,94792336</b>	<b>2,2132e-10</b>
<b>h</b>	<b>Hm'</b>	<b>-0,5717553</b>	<b>0,00844303</b>
CA	%	0,39740308	0,08272423
CA	Vsp	0,18121566	0,44450835
CA	Hm	-0,1865041	0,43109947
CA	Hm'	-0,0550515	0,81768817
<b>CA</b>	<b>H</b>	<b>-0,4810843</b>	<b>0,03175928</b>
<b>T1</b>	<b>%</b>	<b>-0,6269139</b>	<b>0,00309439</b>
T1	Vsp	-0,1839401	0,43757364
T1	Hm	0,25788124	0,27232673
T1	Hm'	-0,086691	0,71629427
<b>T1</b>	<b>H</b>	<b>0,42496093</b>	<b>0,06179302</b>
<b>T1</b>	<b>CA</b>	<b>-0,6772953</b>	<b>0,001036</b>
T'1	%	-0,0894455	0,70765376
T'1	Vsp	0,19446778	0,41131879
T'1	Hm	0,08795543	0,71232373
T'1	Hm'	-0,1351604	0,56993114
T'1	H	0,01867695	0,93770552
T'1	CA	0,16209082	0,49476258
T'1	T1	0,09290437	0,69685248
<b>Tx</b>	<b>%</b>	<b>-0,4653826</b>	<b>0,03865996</b>
<b>Tx</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,68068894</b>	<b>0,00095532</b>
<b>Tx</b>	<b>Hm</b>	<b>0,89856824</b>	<b>7,43152<sup>e</sup>-8</b>
<b>Tx</b>	<b>Hm'</b>	<b>-0,729715</b>	<b>0,00026051</b>
<b>Tx</b>	<b>H</b>	<b>0,89578446</b>	<b>9,38335<sup>e</sup>-8</b>
Tx	CA	-0,2924801	0,21079831
Tx	T1	0,36454564	0,1140454
Tx	T'1	0,19191993	0,41759304
Vt CO2	%	0,18126393	0,44438498
Vt CO2	Vsp	-0,0897451	0,70671588
Vt CO2	Hm	-0,1242158	0,60183099
<b>Vt CO2</b>	<b>Hm'</b>	<b>0,61916234</b>	<b>0,00360275</b>
Vt CO2	H	-0,1637991	0,4901641
Vt CO2	CA	0,08537141	0,72044543
Vt CO2	T1	-0,064482	0,78709495
Vt CO2	T'1	0,38954963	0,08955107
Vt CO2	Tx	-0,2635225	0,26160215
Vp CO2	%	-0,0720065	0,76289618
<b>Vp CO2</b>	<b>Vsp</b>	<b>-0,5097638</b>	<b>0,02167217</b>
Vp CO2	Hm	-0,4212122	0,06437637
Vp CO2	Hm'	0,36456631	0,11402335
Vp CO2	H	-0,352961	0,12689245

## Annexe 4 (suite)

Variable	by Variable	Correlation	Signif Prob
Vp CO2	CA	-0,1459366	0,53926437
<b>Vp CO2</b>	<b>T1</b>	<b>0,45426082</b>	<b>0,04421313</b>
Vp CO2	T'1	0,2095676	0,37520072
Vp CO2	Tx	-0,2736451	0,24303639
Vp CO2	Vt CO2	0,22627315	0,33741381
VRCO2	%	0,21575422	0,36093788
VRCO2	Vsp	0,14437994	0,54364709
VRCO2	Hm	0,06840841	0,77444272
<b>VRCO2</b>	<b>Hm'</b>	<b>0,45180464</b>	<b>0,04551842</b>
VRCO2	h	-0,0033593	0,98878539
VRCO2	CA	0,15470593	0,51488116
VRCO2	T1	-0,2735676	0,24317527
VRCO2	T'1	0,29471364	0,20717286
VRCO2	Tx	-0,1382139	0,56116483
<b>VRCO2</b>	<b>Vt CO2</b>	<b>0,89576217</b>	<b>9,40064e-8</b>
VRCO2	Vp CO2	-0,2302761	0,32870423
RCO2	%	0,16221392	0,49443053
<b>RCO2</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,52030467</b>	<b>0,01868217</b>
RCO2	Hm	0,39563507	0,08422639
RCO2	Hm'	-0,1994999	0,39907837
RCO2	h	0,31032936	0,18298112
RCO2	CA	0,19015568	0,42196763
<b>RCO2</b>	<b>T1</b>	<b>-0,5123326</b>	<b>0,0209107</b>
RCO2	T'1	-0,102999	0,6656553
RCO2	Tx	0,20029818	0,39715522
RCO2	Vt CO2	0,06628522	0,78127775
RCO2	Vp CO2	-0,95535	5,6947e-11
<b>RCO2</b>	<b>VRCO2</b>	<b>0,50225598</b>	<b>0,02402458</b>
Perte de poids	%	0,23586525	0,31676888
<b>Perte de poids</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,48377329</b>	<b>0,03068107</b>
Perte de poids	Hm	0,28996313	0,21493365
Perte de poids	Hm'	-0,4319077	0,05721396
Perte de poids	h	0,11657771	0,62451859
<b>Perte de poids</b>	<b>CA</b>	<b>0,50670475</b>	<b>0,02260749</b>
Perte de poids	T1	-0,2491601	0,28943923
<b>Perte de poids</b>	<b>T'1</b>	<b>0,44746232</b>	<b>0,04789837</b>
Perte de poids	Tx	0,30300277	0,19408088
Perte de poids	Vt CO2	0,18944453	0,42373791
Perte de poids	Vp CO2	-0,2101024	0,37395537
Perte de poids	VRCO2	0,28610681	0,22137256
Perte de poids	RCO2	0,2886918	0,2170426
pH	%	-0,204421	0,38730436
pH	Vsp	-0,2066991	0,38192019
pH	Hm	0,05530813	0,81685201
<b>pH</b>	<b>Hm'</b>	<b>0,51244216</b>	<b>0,02087871</b>
pH	h	0,15452762	0,51537168
<b>pH</b>	<b>CA</b>	<b>-0,4423742</b>	<b>0,0508073</b>
pH	T1	0,32162437	0,16672528
pH	T'1	-0,3204242	0,16840376
pH	Tx	-0,0163528	0,94544554
pH	Vt CO2	0,12725244	0,59290674
pH	Vp CO2	0,25745126	0,27315527
pH	VRCO2	0,00925533	0,96910842
pH	RCO2	-0,2377019	0,31290435
<b>pH</b>	<b>Perte de poids</b>	<b>-0,6762969</b>	<b>0,00106081</b>



## Annexe 4 (suite)

Variable	by Variable	Correlation	Signif Prob
Hf	%	0,10908223	0,64710353
Hf	Vsp	-0,1104853	0,64285238
Hf	Hm	-0,2541613	0,27954674
Hf	Hm'	0,02130538	0,92895862
Hf	H	-0,1652024	0,48640233
Hf	CA	-0,1230645	0,60522906
Hf	Tl	-0,17834	0,4518898
Hf	T'1	-0,2844211	0,22422638
Hf	Tx	-0,3309176	0,15411657
Hf	Vt CO2	-0,2639908	0,26072405
Hf	Vp CO2	0,00162147	0,9945868
Hf	VRCO2	-0,2647798	0,25924882
Hf	RCO2	-0,0613114	0,79734957
Hf	Perte de poids	-0,4048977	0,07657602
Hf	pH	0,03057219	0,89818954
k	%	-0,0386112	0,8716085
k	Vsp	-0,024187	0,91937833
k	Hm	-0,0988985	0,67826737
<b>k</b>	<b>Hm'</b>	<b>0,47627418</b>	<b>0,03376172</b>
k	H	-0,1376654	0,56273518
k	CA	0,04356121	0,85530517
k	Tl	0,08635219	0,71735934
k	T'1	-0,0527727	0,82512061
k	Tx	-0,3290863	0,15654709
k	Vt CO2	0,42649371	0,06075962
k	Vp CO2	0,12362172	0,6035834
k	VRCO2	0,36999409	0,10833832
k	RCO2	-0,0051595	0,98277627
k	Perte de poids	-0,188227	0,42677794
k	pH	0,35975196	0,11924269
k	Hf	0,07089051	0,7664725
n	%	-0,3530438	0,12679713
n	Vsp	0,00040265	0,99865575
n	Hm	0,2884991	0,21736345
n	Hm'	-0,3403176	0,14205227
n	H	0,36460805	0,11397883
n	CA	-0,2884262	0,21748498
n	Tl	0,18896902	0,4249238
n	T'1	-0,1606991	0,49852445
<b>n</b>	<b>Tx</b>	<b>0,46020518</b>	<b>0,04117345</b>
<b>n</b>	<b>Vt CO2</b>	<b>-0,4848478</b>	<b>0,03025832</b>
n	Vp CO2	-0,0597256	0,80249047
<b>n</b>	<b>VRCO2</b>	<b>-0,4572513</b>	<b>0,04266303</b>
n	RCO2	-0,0896285	0,70708109
n	Perte de poids	-0,2061092	0,38331041
n	pH	0,1546236	0,51510763
n	Hf	0,03154672	0,89496113
n	K	-0,7645133	8,66661e-5
NA	%	-0,0464603	0,84578235
NA	Vsp	-0,2138452	0,36530546
NA	Hm	0,03021546	0,89937169
NA	Hm'	0,25064626	0,2864774
NA	H	0,09055609	0,70417967
NA	CA	-0,2521212	0,28355654
NA	Tl	0,19390748	0,41269418

## Annexe 4 (suite)

by Variable	by Variable	by Variable	by Variable
NA	<b>T'1</b>	<b>-0,4677379</b>	<b>0,03755666</b>
NA	Tx	-0,1303683	0,58380774
NA	Vt CO2	-0,2321289	0,32471869
NA	Vp CO2	-0,0285779	0,90480097
NA	VRCO2	-0,2187955	0,35404193
NA	RCO2	-0,05749	0,80975118
NA	<b>Perte de poids</b>	<b>-0,5403821</b>	<b>0,01390097</b>
NA	<b>pH</b>	<b>0,64063167</b>	<b>0,0023408</b>
NA	Hf	0,18506912	0,43471652
NA	k	0,18149425	0,4437966
NA	n	0,1682587	0,47825932
TMA	%	-0,3041227	0,19235567
<b>TMA</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,84201371</b>	<b>3,23318e-6</b>
<b>TMA</b>	<b>Hm</b>	<b>0,8633089</b>	<b>9,53188e-7</b>
<b>TMA</b>	<b>Hm'</b>	<b>-0,6725137</b>	<b>0,00115939</b>
<b>TMA</b>	<b>h</b>	<b>0,81395929</b>	<b>1,26271e-5</b>
TMA	CA	-0,1044091	0,66133767
TMA	Tl	0,14630247	0,53823655
TMA	T'1	0,21506094	0,36252053
<b>TMA</b>	<b>Tx</b>	<b>0,81686474</b>	<b>1,1084<sup>e-5</sup></b>
TMA	Vt CO2	-0,1156322	0,62735023
TMA	Vp CO2	-0,3530006	0,12684684
TMA	VRCO2	0,04585166	0,84778
TMA	RCO2	0,33638402	0,1470173
<b>TMA</b>	<b>Perte de poids</b>	<b>0,38173702</b>	<b>0,09674473</b>
TMA	pH	-0,1761288	0,45760827
TMA	Hf	-0,1921808	0,4169482
TMA	k	-0,0708266	0,76667751
TMA	n	0,09103789	0,70267426
TMA	NA	-0,2873186	0,2193358
Proportion de l'aire	%	-0,214767	0,36319268
Proportion de l'aire	Vsp	0,34733393	0,13349039
<b>Proportion de l'aire</b>	<b>Hm</b>	<b>0,53986072</b>	<b>0,0140112</b>
Proportion de l'aire	Hm'	-0,1402898	0,55523948
<b>Proportion de l'aire</b>	<b>h</b>	<b>0,56777108</b>	<b>0,00901882</b>
Proportion de l'aire	CA	-0,3131411	0,1788379
Proportion de l'aire	Tl	0,35075491	0,12945094
Proportion de l'aire	T'1	-0,26188	0,2646968
Proportion de l'aire	Tx	0,36796144	0,11044277
Proportion de l'aire	Vt CO2	-0,2063814	0,38266863
Proportion de l'aire	Vp CO2	-0,0412616	0,86287254
Proportion de l'aire	VRCO2	-0,1869118	0,43007488
Proportion de l'aire	RCO2	-0,0233519	0,92215359
Proportion de l'aire	Perte de poids	-0,2700144	0,24959537
<b>Proportion de l'aire</b>	<b>pH</b>	<b>0,53870089</b>	<b>0,01425893</b>
Proportion de l'aire	Hf	0,06148515	0,79678662
Proportion de l'aire	k	0,28788288	0,21839154
Proportion de l'aire	n	0,04936256	0,8362699
<b>Proportion de l'aire</b>	<b>NA</b>	<b>0,69406173</b>	<b>0,00068692</b>
<b>Proportion de l'aire</b>	<b>TMA</b>	<b>0,41733783</b>	<b>0,06713092</b>
Périmètre	%	-0,234827	0,31896617
<b>Périmètre</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,82734145</b>	<b>6,79396<sup>e-6</sup></b>
<b>Périmètre</b>	<b>Hm</b>	<b>0,77441256</b>	<b>6,12475<sup>e-5</sup></b>
<b>Périmètre</b>	<b>Hm'</b>	<b>-0,6127103</b>	<b>0,004077</b>
<b>Périmètre</b>	<b>h</b>	<b>0,69603493</b>	<b>0,00065334</b>

## Annexe 4 (suite)

by Variable	by Variable	by Variable	by Variable
Périmètre	CA	0,00396282	0,98677081
Périmètre	T1	0,06570908	0,78313518
Périmètre	T'1	0,27697151	0,23712528
<b>Périmètre</b>	<b>Tx</b>	<b>0,73442855</b>	<b>0,00022664</b>
Périmètre	Vt CO2	-0,0486484	0,83860877
Périmètre	Vp CO2	-0,2961487	0,20486543
Périmètre	VRCO2	0,08751656	0,71370104
Périmètre	RCO2	0,30012935	0,19855472
Périmètre	Perte de poids	0,38723786	0,09163735
Périmètre	pH	-0,1963214	0,40678655
Périmètre	Hf	-0,1925893	0,41593981
Périmètre	K	0,01285039	0,95711823
Périmètre	N	-0,0411141	0,8633583
Périmètre	NA	-0,3055493	0,19017288
<b>Périmètre</b>	<b>TMA</b>	<b>0,96610907</b>	<b>4,9537<sup>e</sup>-12</b>
Périmètre	Proportion de l'aire	0,42495038	0,06180017
Circularité	%	0,09421114	0,69278616
<b>Circularité</b>	<b>Vsp</b>	<b>-0,6424192</b>	<b>0,002255</b>
<b>Circularité</b>	<b>Hm</b>	<b>-0,5496444</b>	<b>0,01205643</b>
<b>Circularité</b>	<b>Hm'</b>	<b>0,48340872</b>	<b>0,03082554</b>
<b>Circularité</b>	<b>H</b>	<b>-0,4834534</b>	<b>0,0308078</b>
Circularité	CA	-0,0440971	0,85354354
Circularité	T1	-0,0136937	0,95430693
Circularité	T'1	-0,3807239	0,09770757
<b>Circularité</b>	<b>Tx</b>	<b>-0,5865761</b>	<b>0,00655803</b>
Circularité	Vt CO2	0,01350889	0,95492292
Circularité	Vp CO2	0,08748482	0,71380069
Circularité	VRCO2	-0,0278522	0,90720842
Circularité	RCO2	-0,1024552	0,66732289
Circularité	Perte de poids	-0,4365313	0,0543122
Circularité	pH	0,10102945	0,67170261
Circularité	Hf	0,15522512	0,51345418
Circularité	K	-0,0182366	0,93917157
Circularité	N	0,083802	0,72539237
Circularité	NA	0,0784183	0,74244094
<b>Circularité</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,6293378</b>	<b>0,00294825</b>
<b>Circularité</b>	<b>Proportion de l'aire</b>	<b>-0,446715</b>	<b>0,04831744</b>
<b>Circularité</b>	<b>Périmètre</b>	<b>-0,7216913</b>	<b>0,00032811</b>
Solidité	%	0	1
<b>Solidité</b>	<b>Vsp</b>	<b>-0,495078</b>	<b>0,02645832</b>
Solidité	Hm	-0,3680581	0,110342
<b>Solidité</b>	<b>Hm'</b>	<b>0,46493349</b>	<b>0,03887313</b>
Solidité	H	-0,2778464	0,23558609
Solidité	CA	-0,1738773	0,46346898
Solidité	T1	0,05188539	0,82801868
Solidité	T'1	-0,3893999	0,08968514
<b>Solidité</b>	<b>Tx</b>	<b>-0,4440523</b>	<b>0,04983335</b>
Solidité	Vt CO2	0,05160831	0,82892407
Solidité	Vp CO2	-0,0013036	0,9956479
Solidité	VRCO2	0,05077223	0,8316573
Solidité	RCO2	0,00151359	0,99494694
Solidité	Perte de poids	-0,4102151	0,07242486
Solidité	pH	0,17518589	0,46005805
Solidité	Hf	0,0933661	0,69541477
Solidité	K	0,05864252	0,80600614

## Annexe 4 (suite)

by Variable	by Variable	by Variable	by Variable
Solidité	n	0,1233821	0,60429079
Solidité	NA	0,06388923	0,78900958
<b>Solidité</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,4555925</b>	<b>0,04351761</b>
Solidité	Proportion de l'aire	-0,3528503	0,12702
<b>Solidité</b>	<b>Périmètre</b>	<b>-0,5963957</b>	<b>0,0055109</b>
<b>Solidité</b>	<b>Circularité</b>	<b>0,91933217</b>	<b>1,02225<sup>s</sup>-8</b>
<b>L* Croute</b>	<b>%</b>	<b>-0,530863</b>	<b>0,01602696</b>
L* Croute	Vsp	0,056815	0,81194648
L* Croute	Hm	0,40455334	0,07685081
L* Croute	Hm'	-0,1146707	0,63023515
<b>L* Croute</b>	<b>h</b>	<b>0,57703445</b>	<b>0,00772664</b>
<b>L* Croute</b>	<b>CA</b>	<b>-0,7178107</b>	<b>0,00036584</b>
<b>L* Croute</b>	<b>T1</b>	<b>0,50659662</b>	<b>0,02264113</b>
L* Croute	T'1	0,04166698	0,86153769
<b>L* Croute</b>	<b>Tx</b>	<b>0,46864631</b>	<b>0,03713775</b>
L* Croute	Vt CO2	-0,1586192	0,50417217
L* Croute	Vp CO2	-0,0419475	0,86061417
L* Croute	VRCO2	-0,1413596	0,55219692
L* Croute	RCO2	-0,0275787	0,90811565
L* Croute	Perte de poids	-0,4236143	0,06271183
L* Croute	pH	0,38043386	0,09798454
L* Croute	Hf	0,02602438	0,91327507
L* Croute	k	-0,1668036	0,48212768
<b>L* Croute</b>	<b>n</b>	<b>0,4578064</b>	<b>0,04237999</b>
L* Croute	NA	0,15434546	0,51587301
L* Croute	TMA	0,32194809	0,16627452
L* Croute	Proportion de l'aire	0,27806821	0,23519693
L* Croute	Périmètre	0,19437972	0,4115348
L* Croute	Circularité	0,13359427	0,57445041
L* Croute	Solidité	0,21552317	0,36146489
a* Croute	%	0,3481595	0,13250752
a* Croute	Vsp	-0,0551144	0,81748304
a* Croute	Hm	-0,2502436	0,28727811
a* Croute	Hm'	0,13659402	0,56580796
a* Croute	h	-0,3272987	0,15894519
a* Croute	CA	0,42092265	0,06457921
a* Croute	T1	-0,2318248	0,32537088
a* Croute	T'1	-0,1974692	0,40399362
<b>a* Croute</b>	<b>Tx</b>	<b>-0,4633517</b>	<b>0,03963131</b>
a* Croute	Vt CO2	0,06300686	0,7918618
a* Croute	Vp CO2	-0,1155665	0,62754737
a* Croute	VRCO2	0,11543055	0,62795497
a* Croute	RCO2	0,14446336	0,54341183
a* Croute	Perte de poids	0,23936788	0,30942345
a* Croute	pH	-0,2540226	0,27981823
a* Croute	Hf	0,10212514	0,66833592
a* Croute	k	0,22726709	0,33523869
a* Croute	n	-0,3228783	0,16498394
a* Croute	NA	0,19388144	0,41275816
a* Croute	TMA	-0,299789	0,19908908
a* Croute	Proportion de l'aire	-0,0272944	0,90905914
a* Croute	Périmètre	-0,298744	0,20073608
a* Croute	Circularité	0,10948098	0,6458943
a* Croute	Solidité	0,13829296	0,56093869
<b>a* Croute</b>	<b>L* Croute</b>	<b>-0,6452377</b>	<b>0,00212507</b>

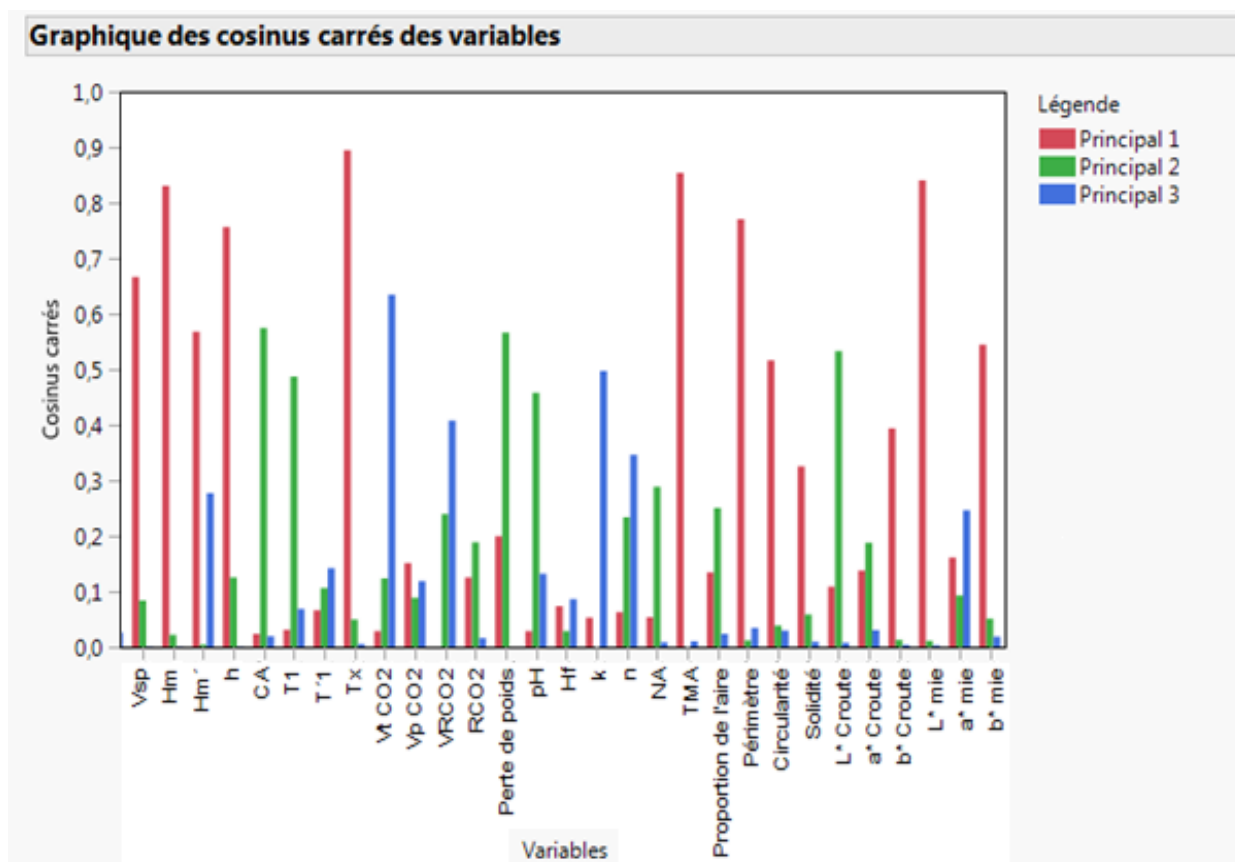
## Annexe 4 (suite)

by Variable	by Variable	by Variable	by Variable
b* Croute	%	-0,0360285	0,88013504
b* Croute	Vsp	-0,3925618	0,08688536
b* Croute	Hm	-0,4282633	0,05958288
b* Croute	Hm´	0,43691973	0,05407366
<b>b* Croute</b>	<b>H</b>	<b>-0,475294</b>	<b>0,03418159</b>
b* Croute	CA	0,27666936	0,23765834
b* Croute	T1	-0,0064385	0,97850779
b* Croute	T´1	-0,0783743	0,74258074
<b>b* Croute</b>	<b>Tx</b>	<b>-0,6197731</b>	<b>0,00356033</b>
b* Croute	Vt CO2	0,0328271	0,89072191
b* Croute	Vp CO2	0,23079331	0,32758879
b* Croute	VRCO2	-0,0733916	0,75846409
b* Croute	RCO2	-0,2420394	0,3038908
b* Croute	Perte de poids	-0,3818931	0,09659697
b* Croute	pH	0,2084617	0,37778336
b* Croute	Hf	0,15801048	0,5058309
b* Croute	K	0,2991272	0,20013111
b* Croute	N	-0,1870505	0,42972656
b* Croute	NA	0,35913579	0,11992282
<b>b* Croute</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,4441568</b>	<b>0,04977317</b>
b* Croute	Proportion de l'aire	0,06144753	0,79690847
b* Croute	Périmètre	-0,4129886	0,07032764
<b>b* Croute</b>	<b>Circularité</b>	<b>0,44547324</b>	<b>0,04901992</b>
b* Croute	Solidité	0,34641296	0,13459292
b* Croute	L* Croute	-0,1426419	0,5485597
<b>b* Croute</b>	<b>a* Croute</b>	<b>0,44980628</b>	<b>0,04660211</b>
L* mie	%	0,25698867	0,2740484
<b>L* mie</b>	<b>Vsp</b>	<b>-0,8024953</b>	<b>0,00002068</b>
<b>L* mie</b>	<b>Hm</b>	<b>-0,8936389</b>	<b>1,11816<sup>e</sup>-7</b>
<b>L* mie</b>	<b>Hm´</b>	<b>0,68760018</b>	<b>0,00080729</b>
<b>L* mie</b>	<b>H</b>	<b>-0,8318121</b>	<b>5,45886<sup>e</sup>-6</b>
L* mie	CA	0,07408053	0,75626228
L* mie	T1	-0,1470997	0,53600007
L* mie	T´1	-0,1886726	0,42566394
<b>L* mie</b>	<b>Tx</b>	<b>-0,8796424</b>	<b>3,22666<sup>e</sup>-7</b>
L* mie	Vt CO2	0,07725097	0,74615312
L* mie	Vp CO2	0,40515169	0,07637378
L* mie	VRCO2	-0,1081902	0,64981187
L* mie	RCO2	-0,4025802	0,07843958
<b>L* mie</b>	<b>Perte de poids</b>	<b>-0,5131581</b>	<b>0,02067059</b>
L* mie	pH	0,13530936	0,56950215
L* mie	Hf	0,27597316	0,23888952
L* mie	K	0,22251925	0,34570323
L* mie	N	-0,2729303	0,24431879
L* mie	NA	0,13955334	0,55733839
L* mie	TMA	-0,7847468	4,18383 <sup>e</sup> -5
L* mie	Proportion de l'aire	-0,3392636	0,14337095
<b>L* mie</b>	<b>Périmètre</b>	<b>-0,7268019</b>	<b>0,00028353</b>
<b>L* mie</b>	<b>Circularité</b>	<b>0,71491745</b>	<b>0,00039632</b>
<b>L* mie</b>	<b>Solidité</b>	<b>0,54816158</b>	<b>0,01233762</b>
L* mie	L* Croute	-0,1090479	0,64720753
L* mie	a* Croute	0,11982908	0,61481964
<b>L* mie</b>	<b>b* Croute</b>	<b>0,59074523</b>	<b>0,00609513</b>
<b>a* mie</b>	<b>%</b>	<b>0,53886965</b>	<b>0,01422267</b>
a* mie	Vsp	-0,1448649	0,54227994

## Annexe 4 (suite)

by Variable	by Variable	by Variable	by Variable
a* mie	Hm	-0,3307166	0,15438195
a* mie	Hm´	0,0927329	0,69738664
a* mie	h	-0,3492901	0,13116987
a* mie	CA	0,24690768	0,29396401
a* mie	Tl	-0,2813583	0,22947298
a* mie	T´l	-0,1175047	0,62174726
a* mie	Tx	-0,352892	0,12697191
a* mie	Vt CO2	-0,0486257	0,83868303
a* mie	Vp CO2	-0,0962682	0,68640167
a* mie	VRCO2	-0,0037318	0,98754199
a* mie	RCO2	0,0969688	0,68423168
a* mie	Perte de poids	0,07082909	0,76666945
a* mie	pH	-0,1479429	0,53363953
a* mie	Hf	0,112971	0,63534747
a* mie	k	-0,283231	0,22625567
a* mie	n	0,15560008	0,51242477
a* mie	NA	0,2288482	0,33179567
<b>a* mie</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,5160003</b>	<b>0,01986055</b>
a* mie	Proportion de l'aire	-0,2307879	0,3276004
<b>a* mie</b>	<b>Périmètre</b>	<b>-0,5217577</b>	<b>0,01829723</b>
a* mie	Circularité	0,20064619	0,39631841
a* mie	Solidité	0,14864604	0,53167468
<b>a* mie</b>	<b>L* Croute</b>	<b>-0,4741422</b>	<b>0,03468018</b>
<b>a* mie</b>	<b>a* Croute</b>	<b>0,60323882</b>	<b>0,00486588</b>
a* mie	b* Croute	0,16670781	0,48238293
a* mie	L* mie	0,10372488	0,66343143
b* mie	%	0,30025283	0,19836106
<b>b* mie</b>	<b>Vsp</b>	<b>-0,44314</b>	<b>0,05036104</b>
<b>b* mie</b>	<b>Hm</b>	<b>-0,5370445</b>	<b>0,01461883</b>
b* mie	Hm´	0,41553093	0,06844546
<b>b* mie</b>	<b>h</b>	<b>-0,4998306</b>	<b>0,02482622</b>
b* mie	CA	0,03716971	0,87636588
b* mie	Tl	0,03027496	0,89917452
b* mie	T´l	-0,2851515	0,22298688
<b>b* mie</b>	<b>Tx</b>	<b>-0,671811</b>	<b>0,00117852</b>
b* mie	Vt CO2	-0,1103666	0,64321162
b* mie	Vp CO2	0,26427299	0,26019581
b* mie	VRCO2	-0,2303815	0,32847674
b* mie	RCO2	-0,3063526	0,18895123
<b>b* mie</b>	<b>Perte de poids</b>	<b>-0,5949123</b>	<b>0,00565962</b>
b* mie	pH	0,25661536	0,27477049
b* mie	Hf	0,35540125	0,12410451
b* mie	k	0,23130426	0,32648899
b* mie	n	-0,1556776	0,51221208
<b>b* mie</b>	<b>NA</b>	<b>0,47125124</b>	<b>0,03595658</b>
<b>b* mie</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,5978733</b>	<b>0,00536599</b>
b* mie	Proportion de l'aire	0,08339032	0,72669176
<b>b* mie</b>	<b>Périmètre</b>	<b>-0,5602214</b>	<b>0,01019756</b>
<b>b* mie</b>	<b>Circularité</b>	<b>0,5429058</b>	<b>0,01337726</b>
b* mie	Solidité	0,41929227	0,0657305
b* mie	L* Croute	-0,1403678	0,55501737
b* mie	a* Croute	0,36546837	0,11306399
<b>b* mie</b>	<b>b* Croute</b>	<b>0,73364331</b>	<b>0,00023201</b>
<b>b* mie</b>	<b>L* mie</b>	<b>0,67121791</b>	<b>0,00119488</b>
b* mie	a* mie	0,43627217	0,05447183

## Annexe 5



**Figure2** : cosinus carrés associés aux composantes principales pour les propriétés rhéologiques et la qualité finale des pains

## Annexe 6

Tableau 20: corrélation entre les caractéristiques sensorielles et la qualité finale des pains

Variable	Par variable	Correlation	Signif Prob
pH	Vsp	-0,2066991	0,38192019
Hf	Vsp	-0,1104853	0,64285238
Hf	pH	0,03057219	0,89818954
NA	Vsp	-0,2138452	0,36530546
<b>NA</b>	<b>pH</b>	<b>0,64063167</b>	<b>0,0023408</b>
NA	Hf	0,18506912	0,43471652
<b>TMA</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,84201371</b>	<b>&lt;0,0001</b>
TMA	pH	-0,1761288	0,45760827
TMA	Hf	-0,1921808	0,4169482
TMA	NA	-0,2873186	0,2193358
L* Croute	Vsp	0,056815	0,81194648
L* Croute	pH	0,38043386	0,09798454
L* Croute	Hf	0,02602438	0,91327507
L* Croute	NA	0,15434546	0,51587301
L* Croute	TMA	0,32194809	0,16627452
a* Croute	Vsp	-0,0551144	0,81748304
a* Croute	pH	-0,2540226	0,27981823
a* Croute	Hf	0,10212514	0,66833592
a* Croute	NA	0,19388144	0,41275816
a* Croute	TMA	-0,299789	0,19908908
<b>a* Croute</b>	<b>L* Croute</b>	<b>-0,6452377</b>	<b>0,00212507</b>
b* Croute	Vsp	-0,3925618	0,08688536
b* Croute	pH	0,2084617	0,37778336
b* Croute	Hf	0,15801048	0,5058309
b* Croute	NA	0,35913579	0,11992282
<b>b* Croute</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,4441568</b>	<b>0,04977317</b>
b* Croute	L* Croute	-0,1426419	0,5485597
<b>b* Croute</b>	<b>a* Croute</b>	<b>0,44980628</b>	<b>0,04660211</b>
<b>L* mie</b>	<b>Vsp</b>	<b>-0,8024953</b>	<b>&lt;0,0001</b>
L* mie	pH	0,13530936	0,56950215
L* mie	Hf	0,27597316	0,23888952
L* mie	NA	0,13955334	0,55733839
<b>L* mie</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,7847468</b>	<b>&lt;0,0001</b>
L* mie	L* Croute	-0,1090479	0,64720753
L* mie	a* Croute	0,11982908	0,61481964
<b>L* mie</b>	<b>b* Croute</b>	<b>0,59074523</b>	<b>0,00609513</b>
a* mie	Vsp	-0,1448649	0,54227994
a* mie	pH	-0,1479429	0,53363953
a* mie	Hf	0,112971	0,63534747
a* mie	NA	0,2288482	0,33179567
<b>a* mie</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,5160003</b>	<b>0,01986055</b>
<b>a* mie</b>	<b>L* Croute</b>	<b>-0,4741422</b>	<b>0,03468018</b>
<b>a* mie</b>	<b>a* Croute</b>	<b>0,60323882</b>	<b>0,00486588</b>
a* mie	b* Croute	0,16670781	0,48238293
a* mie	L* mie	0,10372488	0,66343143



## Annexe 6 (suite)

by Variable	by Variable	by Variable	by Variable
<b>b* mie</b>	<b>Vsp</b>	<b>-0,44314</b>	<b>0,05036104</b>
b* mie	pH	0,25661536	0,27477049
b* mie	Hf	0,35540125	0,12410451
<b>b* mie</b>	<b>NA</b>	<b>0,47125124</b>	<b>0,03595658</b>
<b>b* mie</b>	<b>TMA</b>	<b>-0,5978733</b>	<b>0,00536599</b>
b* mie	L* Croute	-0,1403678	0,55501737
b* mie	a* Croute	0,36546837	0,11306399
<b>b* mie</b>	<b>b* Croute</b>	<b>0,73364331</b>	<b>0,00023201</b>
<b>b* mie</b>	<b>L* mie</b>	<b>0,67121791</b>	<b>0,00119488</b>
b* mie	a* mie	0,43627217	0,05447183
<b>Goût</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,64793219</b>	<b>0,00200676</b>
Goût	pH	-0,0148229	0,95054301
Goût	Hf	0,13430222	0,57240562
Goût	NA	0,18177983	0,44306762
<b>Goût</b>	<b>TMA</b>	<b>0,4974059</b>	<b>0,02564864</b>
Goût	L* Croute	-0,0711166	0,76574747
Goût	a* Croute	0,0764034	0,74885182
Goût	b* Croute	-0,2041736	0,38789157
<b>Goût</b>	<b>L* mie</b>	<b>-0,4679606</b>	<b>0,03745362</b>
Goût	a* mie	0,04553398	0,84882298
Goût	b* mie	0,01673411	0,94417536
Arome	Vsp	0,38794688	0,09099372
Arome	pH	0,08322964	0,72719913
Arome	Hf	0,1844892	0,43618279
Arome	NA	0,42133352	0,06429148
Arome	TMA	0,27873183	0,23403502
Arome	L* Croute	0,0934643	0,69510914
Arome	a* Croute	0,24417226	0,29951694
Arome	b* Croute	0,10463092	0,66065951
Arome	L* mie	-0,3023071	0,19515773
Arome	a* mie	0,14617265	0,53860113
Arome	b* mie	0,17367349	0,46400138
<b>Arome</b>	<b>Goût</b>	<b>0,59297314</b>	<b>0,00585898</b>
Texture	Vsp	-0,0050701	0,98307473
Texture	pH	-0,1776961	0,45355106
Texture	Hf	-0,2239653	0,34249611
Texture	NA	-0,1437536	0,54541513
Texture	TMA	-0,0389718	0,87041891
Texture	L* Croute	0,15676584	0,50923061
Texture	a* Croute	-0,0762012	0,74949598
<b>Texture</b>	<b>b* Croute</b>	<b>-0,5146474</b>	<b>0,02024291</b>
Texture	L* mie	-0,2167111	0,35875993
Texture	a* mie	0,11335615	0,63418763
Texture	b* mie	-0,3448394	0,13649151
Texture	Goût	-0,0963313	0,68620588
Texture	Arome	0,02164917	0,92781512
<b>Couleur</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,6335312</b>	<b>0,002709</b>

## Annexe 6 (suite)

by Variable	by Variable	by Variable	by Variable
Couleur	pH	0,1482643	0,532741
Couleur	Hf	-0,0651945	0,78479517
Couleur	NA	0,24901662	0,2897262
<b>Couleur</b>	<b>TMA</b>	<b>0,48971745</b>	<b>0,02839947</b>
Couleur	L* Croute	0,00710993	0,97626691
Couleur	a* Croute	0,18112014	0,44475251
Couleur	b* Croute	-0,0066045	0,9779536
<b>Couleur</b>	<b>L* mie</b>	<b>-0,4541839</b>	<b>0,04425358</b>
Couleur	a* mie	-0,0603847	0,8003528
Couleur	b* mie	-0,110881	0,64165536
<b>Couleur</b>	<b>Goût</b>	<b>0,73510939</b>	<b>0,00022207</b>
<b>Couleur</b>	<b>Arome</b>	<b>0,74466596</b>	<b>0,00016581</b>
Couleur	Texture	-0,0637821	0,78935581
<b>Apparence</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,57858471</b>	<b>0,00752598</b>
Apparence	pH	-0,3065692	0,18862274
Apparence	Hf	-0,1768116	0,45583854
Apparence	NA	-0,0290392	0,90327102
Apparence	TMA	0,36567274	0,11284744
Apparence	L* Croute	-0,2239946	0,34243126
Apparence	a* Croute	0,4351962	0,05513834
Apparence	b* Croute	0,09708319	0,68387763
Apparence	L* mie	-0,4011414	0,07961346
Apparence	a* mie	0,17470802	0,46130216
Apparence	b* mie	-0,160213	0,49984155
<b>Apparence</b>	<b>Goût</b>	<b>0,4746575</b>	<b>0,03445641</b>
Apparence	Arome	0,29810461	0,20174822
Apparence	Texture	0,08007282	0,73718886
<b>Apparence</b>	<b>Couleur</b>	<b>0,60621026</b>	<b>0,00460589</b>
<b>Acceptabilité globale</b>	<b>Vsp</b>	<b>0,78732813</b>	<b>&lt;0,0001</b>
Acceptabilité globale	pH	-0,089337	0,70799363
Acceptabilité globale	Hf	-0,2506447	0,28648052
Acceptabilité globale	NA	-0,0197198	0,93423424
<b>Acceptabilité globale</b>	<b>TMA</b>	<b>0,64922224</b>	<b>0,0019521</b>
Acceptabilité globale	L* Croute	0,01540352	0,94860833
Acceptabilité globale	a* Croute	-0,0678961	0,77609058
Acceptabilité globale	b* Croute	-0,2529344	0,28195396
<b>Acceptabilité globale</b>	<b>L* mie</b>	<b>-0,6503909</b>	<b>0,00190366</b>
Acceptabilité globale	a* mie	-0,106509	0,65492726
Acceptabilité globale	b* mie	-0,2671174	0,25490915
<b>Acceptabilité globale</b>	<b>Goût</b>	<b>0,81873624</b>	<b>&lt;0,0001</b>
<b>Acceptabilité globale</b>	<b>Arome</b>	<b>0,499966</b>	<b>0,02478092</b>
Acceptabilité globale	Texture	-0,0264072	0,91200419
<b>Acceptabilité globale</b>	<b>Couleur</b>	<b>0,79925547</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>Acceptabilité globale</b>	<b>Apparence</b>	<b>0,58807654</b>	<b>0,00638823</b>

سمحت دراستنا بالتحقق من تأثير دمج العديد من المنتجات الثانوية (ثفل البرتقال والتفاح ، وقشر الطماطم ، وقشر الفلفل ، وقشر التين الشوكي ، وقشر بذور التين الشوكي) ، على الخصائص الفيزيوكيميائية، الريولوجية للعجين والجودة النهائية للخبز الخالي من الغلوتين المصنوع من الذرة والحمص (1/2 وزن / وزن). تم اختبار كل منتج ثانوي بمعدلاتدمج مختلفة ( 5 2,5,0 و 7,5 غ/100 غ من التركيبة الأساسية). تم اعتبار الخبز المصنوع من القمح اللين والخبز الخالي من الغلوتين بدون إضافة منتجات ثانوية كشواهد.

تشير النتائج إلى أن دمج قشور الطماطم أو بذور التين الشوكي أو الفلفل في تركيبتنا الأساسية الخالية من الغلوتين أدى إلى زيادة كبيرة في نسبة الألياف الغذائية ، بينما زاد ثفل البرتقال من محتوى الدهون وزاد قشر التين الشوكي من محتوى البروتين. كما أظهرت إضافة المنتجات الثانوية زيادة في الحد الأقصى لارتفاع العجين وإجمالي إنتاج ثاني أكسيد الكربون ومعامل الاحتفاظ بثاني أكسيد الكربون أثناء التخمر مقارنة بالعجين الأساسي الخالي من الغلوتين و قد لوحظ أن أعلى قيمة لمعامل الاتساق (K) قد سجلت في العجين الذي يحتوي على قشر التين الشوكي. إن إضافة المنتجات الثانوية أدت إلى تحسين حجم الخبز بالمقارنة مع حجم الخبز الخالي من الغلوتين (1,48 سم<sup>3</sup> غ) بدون إضافات. تتصل إلى 2,50 سم<sup>3</sup> غ. سجلت أعلى قيمة لحجم الخبز بعد إضافة 5 غ من قشر التين الشوكي و لكن تبقى هاته القيمة أقل من حجم الخبز المصنوع من القمح (3,39 سم<sup>3</sup> غ). أظهر الخبز المحضر بـ 7,5 غ من المنتجات الثانوية جودة حسية جيدة و كانت التركيبات التي تحتوي على 7,5 غ من ثفل البرتقال و / أو قشر الطماطم هي الأكثر قبولاً من قبل المتذوقين.

يمكن استخدام مسحوق ثفل البرتقال أو التفاح وقشور الطماطم والفلفل والتين الشوكي و قشور بذور التين الشوكي في تحضير وتحسين جودة الخبز الخالي من الغلوتين كإمكانية تثمين لهذه المنتجات الثانوية. كما يسمح بتنويع المنتجات لمرضى الاضطرابات الهضمية السيلياك والاستجابة لطلب المستهلكين الذين يبحثون عن منتجات خالية من الغلوتين بأعلى جودة وخصائص حسية.

Our study has allowed to investigate the effect of the incorporation of various by-products (orange and apple pomace, tomato peel, placenta and pepper peel, prickly pear peel and prickly pear seed peel), on the physico-chemical, rheological properties of the dough and the final quality of the gluten-free bread based on corn and chickpeas (2/1 w/w). Each by-product at different incorporation levels (0, 2.5, 5 and 7.5 g / 100 g base formula) was tested. The wheat-based bread and the gluten-free bread without added by-products were considered as controls.

The results indicate that incorporating the peels of tomatoes, prickly pear seeds or pepper into our basic gluten-free formula resulted in the highest dietary fiber enrichment, while orange pomace increased the lipid content and prickly pear peel increased the protein content. The addition of the by-products showed an increase in the maximum dough height, the total CO<sub>2</sub> production and CO<sub>2</sub> retention coefficient during fermentation compared to the basic gluten-free dough. The highest K-value consistency coefficient was observed for the dough enriched with the prickly pear peel. The addition of by-products significantly ( $p < 0.0001$ ) improved the specific volume of the gluten-free bread (1.48 cm<sup>3</sup>/g), with values up to 2.50 cm<sup>3</sup>/g. The highest value was noted for prickly pear peel at 5 g p 100 g incorporation level. This  $V_{sp}$  value still lower than the value of wheat control (3.39 cm<sup>3</sup>/g). Breads prepared with 7.5g of by-products showed good sensory quality. The formulations with 7.5g of orange pomace and/or tomato peel were the most accepted by the tasters.

The powder of orange or apple pomace and the peels of tomato, pepper, prickly pear and the seeds can be used in the preparation and the improvement of the quality of gluten-free breads as a possibility of valorization of these by-products. This permits to diversify the products for celiac patients and to respond to the demand of consumers who are searching for gluten free products with the highest quality and sensory properties.

---

**Keywords:** gluten-free bread; pomace and peel; rheology; final quality of bread; valorization

## Résumé

Notre étude a permis de situer l'effet de l'incorporation de divers sous-produits (marc d'orange et de pomme, pelure de tomate, placenta et pelure de piment, pelure de figue de barbarie et pelure de graines de figue de barbarie), sur les propriétés physico-chimiques, rhéofermentaires et rhéologiques de la pâte et la qualité finale du pain sans gluten à base de maïs et de pois chiche (2/1 m/m). Chaque sous-produit à différents taux d'incorporation (0, 2,5, 5 et 7,5 g / 100 g de formule de base) a été testé. Le pain à base de blé tendre et le pain sans gluten sans ajout de sous-produits ont été considérés comme témoins.

Les résultats indiquent que l'incorporation à notre formule de base sans gluten de pelures de tomate, de graine de figue de barbarie et de piment avait engendré le plus fort enrichissement en fibres alimentaires, tandis que le marc d'orange augmente la teneur en lipides et la pelure de figue de barbarie rehausse la teneur en protéines. L'ajout des sous-produits a montré un gain en hauteur maximale de la pâte, production totale de CO<sub>2</sub> et coefficient de rétention de CO<sub>2</sub> pendant la fermentation par rapport à la pâte sans gluten de base. Le coefficient de consistance K le plus élevé a été observé pour la pâte enrichie avec la pelure de figue de barbarie. Les sous-produits ont amélioré de manière significative ( $p < 0,0001$ ) le volume spécifique du pain sans gluten (1,48 cm<sup>3</sup>/g), avec des valeurs pouvant atteindre à 2,50 cm<sup>3</sup>/g. Cette valeur la plus élevée de 2,50 cm<sup>3</sup>/g a été notée pour la pelure de figue de barbarie à 5 g p 100 g de taux d'incorporation. Cela reste bien inférieur à la valeur du témoin de blé (3,39 cm<sup>3</sup>/g). Les pains préparés avec 7,5g de sous-produits ont présenté une bonne qualité sensorielle. Les formulations avec 7,5 g de marc d'orange et/ou pelure de tomate ont été les plus acceptées par les dégustateurs.

La poudre des marcs d'orange ou de pomme et les pelures de tomate, piment, figue de barbarie et de ces graines peuvent être utilisées dans la production et l'amélioration de qualité des pains sans gluten comme une possibilité de valorisation de ces sous-produits. Ce qui permet de diversifier les produits pour les malades cœliaques et de répondre à la demande des consommateurs qui recherchent des produits sans gluten, avec une qualité et propriétés sensorielle meilleure.

---

**Mots clés :** pain sans gluten, marc et pelure, rhéologie, qualité final du pain, valorisation