

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



Université Constantine -1-
Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-
Alimentaires (I.N.A.T.A.A.)
Département de Technologies Alimentaires

N° d'ordre:
N° de série:

Mémoire

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

Panification sans gluten à base de riz et féverole : effet améliorant d'une adjonction combinée HPMC-Xanthane

présenté par:

BOULEMKAHEL Souad

Soutenu le : 22 / 06 / 2014

Devant le jury composé de :

Président :	ZIDOUNE M. N.	Prof. I.N.A.T.A.A., Univ. Constantine 1.
Rapporteur :	BENATALLAH Le.	M.C. I.N.A.T.A.A., Univ. Constantine 1.
Examineurs :	BARKAT M.	Prof. I.N.A.T.A.A., Univ. Constantine 1.
	OULAMARA H.	M.C. I.N.A.T.A.A., Univ. Constantine 1.

Année universitaire 2013-2014

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, Le Tout Puissant et Le Miséricordieux, de m'avoir donné la santé, la volonté, la patience et le courage pour mener à terme ma formation de Magister.

Sincères remerciements, A

Mon enseignant Monsieur ZIDOUNE Mohammed Nasreddine, Professeur à l'université Constantine -1- et Chef de l'équipe Transformation et Elaboration des Produits Agro-alimentaires (T.E.P.A.) du Laboratoire de Recherche en Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.), pour m'avoir donné la chance de travailler sous sa direction et pour son esprit scientifique et ses précieux conseils et pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury et d'évaluer mon travail.

Mon encadreur Madame BENATALLAH Leila, Maitre de conférences à l'I.N.A.T.A.A. , pour m'avoir dirigée tout au long de la réalisation de ce travail et pour son esprit scientifique, ses précieux conseils et ses encouragements. Son intérêt à mon sujet de mémoire, et ses précieuses et clairvoyantes orientations. Egalement, je lui témoigne, de ma profonde gratitude et reconnaissance pour la patiente assistance, les savants conseils, orientations et suivis, qu'elle m'a prodigué. Soyez assurés de tout mon respect et de ma profonde gratitude.

Aux membres du Jury qui ont pris sur leur temps et ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail :

Madame le professeur BARKAT qui a eu l'amabilité de participer à ce Jury ;

Madame le docteur OULAMARA qui a bien voulu examiner mon travail.

Je tiens à remercier mes amis et mes collègues : Mademoiselles BOUREKOVA Hayat, FETTOUHI Aouatif, BOUZIANE Keltoum, BOUDECHICHA Hiba Rjma, SABOUNI Rjma, BOUDOUIRA Nassira, DIB Ahlam, Messieurs BOUASSLA Abedallah, SIAR El-houcine et DERARDJA Ala-edine pour leur aide inestimable, mais aussi pour leur amitié précieuse et leurs encouragements.

Un grand merci à toutes les personnes que j'ai côtoyées au cours de la réalisation de cette étude : personnel et enseignants de l'INATAA, et à tous les autres.

Enfin, je remercie du fond de mon cœur, ma petite et ma grande famille qui m'a soutenue, encouragée et motivée tout au long de mes études.

Je dédie ce travail

A La mémoire de mon grand père

A mes chères parents « Mahmoud » et « Fadhila »

*Qui m'ont tout donné pour me voir réussir
dans la vie, qui ont toujours été là
pour moi et qui sont toujours
avec moi dans toutes
les situations.*

A mon chère mari « Tarek »

*Pour son aide et ses
encouragements.*

A mes adorables sœurs « Lynda » et « Ahlem »

*et leurs maris, et mes chères frères
« Riad » et « Brahim » et
leurs femmes, à qui je
souhaite beaucoup
de bonheur.*

A ma nièce « Ichraf » et mes neveux

*« Mounib » et « Sami » que j'aime
très fort et qui sont comblés
ma famille de bonheur
et de joie.*

A mon oncle « Saïd » et sa femme « Houria »,

*ainsi tous mes oncles et mes tantes
coté paternel et maternel.*

Tous mes cousins et cousines : Radia, Imen,

Iness, Nouha, Anwer, Ahmed, Fares,

Riad et Wail, à qui je souhaite

*Une vie pleine de prospérité,
de santé et de réussite.*

A ma chère « Samia », « Souad », « Abir »,

*« Rayen », « Norhene » et toutes mes belles
sœurs et à ma grand-mère et ma belle
mère, à qui je souhaite une
bonne santé et une
longue vie.*

Souad

Sommaire

Sommaire

Liste des Abréviations

Liste des Figures

Liste des Tableaux

INTRODUCTION..... 01

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : PANIFICATION A BASE DE BLE

I. BLE TENDRE 03

I.1. Farine de blé tendre..... 03

I.2. Caractéristiques de la farine de blé tendre..... 03

I.3. Eléments constituant de la farine du blé tendre et leurs intérêts en panification.... 04

I.3.1. Humidité..... 04

I.3.2. Amidon 04

I.3.3. Fibres alimentaires 05

I.3.4. Protéines..... 06

I.3.5. Lipides..... 07

I.3.6. Enzymes 07

I.3.7. Vitamines et matières minérales..... 07

II. TECHNOLOGIE DE PANIFICATION..... 07

II.1. Pétrissage..... 08

II.2. Fermentation..... 09

II.3. Cuisson..... 11

Chapitre II : PANIFICATION SANS GLUTEN

I. MATIERES DE BASE POUVANT ETRE IMPLIQUEES EN PANIFICATION

SANS GLUTEN..... 12

I.1. Riz 12

I.1.1. Classification du riz..... 12

I.1.2. Différents types du riz..... 12

I.1.3. Composition biochimique de la farine du riz..... 13

I.1.3.1. Amidon..... 13

I.1.3.2. Protéines.....	13
I.1.3.3. Lipides.....	14
I.1.3.4. Polyosides non amylacés	14
I.1.3.5. Vitamines et sels minéraux.....	14
I.2. Féverole.....	14
I.2.1. Propriétés nutritionnelles des composants de la féverole.....	14
I.2.1.1. Protéines.....	15
I.2.1.2. Glucides.....	15
I.2.1.3. Lipides.....	15
I.2.1.4. Polysaccharides non amylacés.....	15
I.2.1.5. Vitamines et minéraux.....	15
I.2.2. Facteurs antinutritionnels et toxiques des légumes secs.....	16
II. SUPPLEMENTATION CEREALES-LEGUMES SECS.....	16
Chapitre III : PRINCIPAUX HYDROCOLLOÏDES EN PANIFICATION SANS	
GLUTEN	
I. GENERALITE SUR LES HYDROCOLLOÏDES.....	17
I.1. Définition des hydrocolloïdes.....	17
I.2. Classification des hydrocolloïdes	17
I.3. Propriétés fonctionnelles des hydrocolloïdes.....	17
I.3.1. Propriétés épaississantes.....	18
I.3.2. Propriétés gélifiantes.....	18
I.3.3. Propriétés stabilisantes.....	18
II. UTILISATION DES HYDROCOLLOÏDES EN PANIFICATION SANS	
GLUTEN.....	18
II.1. HydroxyPropylMethylCellulose (HPMC).....	20
II.1.1. Structure et propriétés physico-chimiques de l'HPMC	20
II.1.2. Impact de l'HPMC sur la qualité du pain sans gluten.....	20
II.2. Gomme de Xanthane.....	22
II.2.1. Structure et propriétés physico-chimiques de la gomme de xanthane.....	22
II.2.2. Intérêt de la gomme de xanthane en panification sans gluten.....	22
Chapitre VI : CARACTERISATION DE LA STRUCTURE ALVEOLAIRE	
I. ANALYSE D'IMAGE.....	24

I.1. Morphologie mathématique.....	24
I.2. Analyse de texture.....	25
II. ANALYSE D'IMAGE DES PRODUITS ALVÉOLÉS.....	25

ETUDE EXPERIMENTALE

MATERIEL ET METHODES

I. MATIERES PREMIERES UTILISEES.....	27
I.1. Farine de blé tendre.....	27
I.2. Farines exemptes en gluten.....	27
I.3. Autres ingrédients.....	27
II. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES FARINES UTILISÉES...	28
II.1. Distribution granulométrique des farines.....	28
II.2. Composition biochimique des farines.....	29
II.2.1. Teneur en eau (Humidité).....	29
II.2.2. Dosage des cendres totales.....	30
II.2.3. Dosage des protéines totales.....	31
II.2.4. Dosage des matières grasses totales.....	33
II.2.5. Détermination des glucides totaux.....	34
III. CARACTERISATION RHEOLOGIQUE DES PATES PAR	
 L'ALVEOGRAPHIE CHOPIN.....	34
IV. FORMULATION SANS GLUTEN ETUDIEE.....	39
V. PLAN D'EXPERIENCE.....	39
V.1. Modèle mathématique.....	40
V.2. Niveaux des variables.....	41
V.3. Représentation du plan d'expérience central composite à deux variables.....	41
V.4. Détermination des variables réelles	43
V.4.1. Teneur en HPMC.....	43
V.4.2. Teneur en Xanthane.....	43
VI. TEST DE PANIFICATION.....	44
VI.1. Préparation de la pâte.....	45
VI.2. Pétrissage	46
VI.3. Mise en moule.....	46

VI.4. Fermentation.....	46
VI.5. Cuisson.....	47
VI.6. Refroidissement.....	47
VII. APPRECIATION DE LA QUALITE DES PAINS OBTENUS.....	47
VII.1. Mesure des volumes spécifiques des pains.....	47
VII.2. Analyse de la texture de la mie par morphologie mathématique.....	48
VIII. CARACTERISATION SENSORIELLE DES PAINS.....	53
IX. ANALYSE STATISTIQUE.....	54

RESULTATS ET DISCUSSION

I. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES FARINES	56
I.1. Distribution granulométrique des farines.....	56
I.2. Composition biochimique des farines et de la formule étudié.....	57
I.2.1. Teneur en eau (Humidité).....	57
I.2.2. Teneur en cendres.....	58
I.2.3. Teneur en protéines.....	59
I.2.4. Teneur en lipides.....	59
I.2.5 Teneur en glucides.....	60
II. CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUE DES PATES PAR L'ALVEOGRAPHIE CHOPIN.....	60
II.1. Indice de gonflement.....	61
II.2. Rapport de configuration.....	62
II.3. Travail de déformation.....	62
III. FORMULATION ET FABRICATION DES PAINS SANS GLUTEN.....	63
III.1. Validation du plan d'expérience	64
III.2. Volumes spécifiques des pains sans gluten selon le plan d'expérience	64
III.3. Surface de réponse du volume spécifique des pains sans gluten de la FRF en fonction des taux (<i>HPMC-Xanthane</i>)	65
III.4. Optimisation des pains sans gluten.....	69
III.5. Confirmation des résultats de l'optimisation.....	71
III.5.1. Test de panification	71
III.5.2. Volumes spécifiques des pains sans gluten des points de vérification.....	73
III.5.3. Propriétés texturales des mies par Analyse d'Image et classification des	

pains par Analyse en Composante Principale (ACP).....	75
<i>a) Propriétés texturales des mies par Analyse d'Image.....</i>	75
<i>b) Classification des pains par Analyse en Composantes Principales (ACP)....</i>	76
IV. CARACTERISTIQUES SENSORIELLES DES PAINS	78
<i>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</i>	83
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</i>	85
<i>ANNEXE</i>	

Liste des abréviations

2D : 2 Dimensions

A : Teneur en azote totale de la farine

AACC : Association Américaine des Chimistes de Céréales

AAE : Acides Aminés Essentiels

ACP : Analyse en Composante Principale

AFNOR: Association Française de Normalisation

ANOVA : Analysis Of Variance

C : Teneur en cendres de la farine

CCD : Central Composite Design

CMC : CarboxyMéthylCellulose

CUD : Coefficient d'Utilisation Digestive

DG : Distribution Granulométrique

E.N.A.sel : Entreprise Nationale Algérienne du sel

FAO : Food and Agriculture Organization

Farine K_{blé} : Farine de blé tendre

FF : Farine de Féverole

FR : Farine de Riz

FRF : Formule Riz-Féverole

G : Indice de Gonflement

GT : Teneur en glucides totaux de la farine

H : Teneur en humidité de la farine

HPMC : HydroxyPropylMéthylCellulose

Ie : Indice d'Elasticité de la courbe

IRM : Imagerie en Résonance Magnétique

IRRI : Institut International de Recherche sur le Riz

ISO : International Organization for Standardization

L : Extensibilité de la pâte

MEA : Masse d'Eau à Ajouter

MF : Mase de la Formule

MG : Teneur en matières grasses de la farine

MS : Matière Sèche

MSR : Méthodologie des Surfaces de Réponse

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

P : ténacité de la pâte

P : Teneur en protéines de la farine

P/L : Rapport de configuration de la courbe

PGA : Alginate de Glycol de Propylène

pH : potentiel Hydrogène

ppm : partie par million

PSG : Pain Sans Gluten

r : Coefficient de corrélation

RSG : Régime Sans Gluten

S-S : ponts disulfures

TIFF: Tagged Image File Format

Vi : Volume de l'image

Vsp : Volume Spécifique

W : travail de déformation

µm : Micro mètre

Liste des figures

Figure 01. Formation du réseau du gluten durant le pétrissage (MEZIANI, 2011).....	08
Figure 02. Représentation schématique de l'observation d'une pâte à pain aux échelles macroscopique (a), microscopique (b) et macromoléculaire (c) (BLOKSMA, 1990 ; ELIASSON et LARSON, 1993 ; LASSOUAD, 2005).....	09
Figure 03. Représentation schématique de l'évolution de la taille et de la forme (de sphérique à polyédrique) des cellules gazeuses dans une pâte en cours de fermentation (BLOKSMA, 1990 et VAN VLIET et <i>al.</i> , 1992).....	10
Figure 04. Structure de l'HydroxyPropylMéthylCellulose (HONG et KINAM, 2011)...	20
Figure 05. Structure de la gomme de xanthane (DE REYNAL, 2009).....	22
Figure 06. Appareil d'Alvéographe Chopin (I.N.A.T.A-A, 2014).....	35
Figure 07. Etapes de développement de la pâte pendant l'analyse alvéographique (DEL FRATE et STEPHAN, 2005).....	37
Figure 08. Alvéogramme type d'une pâte à base de farine de blé tendre (DEL FRATE et STEPHAN, 2005).....	37
Figure 09. Représentation graphique du plan d'expérience central composite à deux facteurs (X_1 et X_2) et trois niveaux (-1,0 et +1) avec les valeurs extrêmes $\pm \alpha$	41
Figure 10. Diagramme de fabrication des pains témoin et des pains sans gluten à base de la formule riz-féverole.....	45
Figure 11. Mélangeur à trois doigts (I.N.A.T.A-A, 2014).....	46
Figure 12. Moule en Téflon Proflex (I.N.A.T.A-A, 2014).....	46
Figure 13. Etuve pour fermentation (I.N.A.T.A-A, 2014).....	46
Figure 14. Four électrique (I.N.A.T.A-A, 2014).....	47
Figure 15. Observation visuelle des pâtons au cours de la cuisson.....	47
Figure 16. Refroidissement des pâtons cuits à l'air ambiant.....	47
Figure 17. Principe de codage des intensités des niveaux de gris d'une image monochrome sous la forme d'un tableau chiffré (LASSOUED, 2005).....	49
Figure 18. Exemple d'application d'étapes d'érosion et de dilatation de taille 5, 15 et 25 sur la région d'intérêt d'une tranche de pain fabriquée.....	50
Figure 19. Courbe de décroissance de la somme des niveaux de gris selon les étapes de dilatations et d'érosions (LASSOUED, 2005).....	51

Figure 20. Courbe de texture granulométrique en niveaux de gris (LASSOUED, 2005).	52
Figure 21. Surface de réponse du volume spécifique (Vsp) des pains sans gluten de la FRF en fonction des taux <i>HPMC-Xanthane</i>	66
Figure 22. Surface de réponse du volume spécifique (Vsp) des pains sans gluten de la FRF en fonction des taux <i>Hydratation-HPMC</i> (BENATALLAH, 2009).....	67
Figure 23. Surface de réponse du volume spécifique (Vsp) des pains sans gluten de la FRF en fonction des taux <i>Hydratation-Xanthane</i> (GHERAIRIA, 2011).....	68
Figure 24. Surface de réponse du volume spécifique (Vsp) des pains sans gluten en fonction des taux <i>HPMC-Xanthane</i> (HAGER et K. ARENDT, 2013).....	69
Figure 25. Courbe de niveau des Vsp de nos pains sans gluten de la FRF en fonction des taux <i>HPMC-Xanthane</i>	70
Figure 26. Photos des pains sans gluten des couples (<i>HPMC,Xanthane</i>) à l'intérieur et en dehors de la zone optimale délimitée et le témoin blé.....	72
Figure 27. Représentation des Volumes spécifiques (Vsp) et du grain de mie des pains sans gluten des points de vérification et du témoin blé.....	73
Figure 28. Courbes granulométriques en niveaux de gris des pains sans gluten des points de vérification et de témoin de blé tendre.....	76
Figure 29. Carte de ressemblance issue de l'analyse en composantes principales (ACP) sur les courbes de texture granulométriques des images des pains sans gluten des points de vérification et de témoin de blé tendre.....	77
Figure 30. Echantillons des pains destinés à la caractérisation sensorielle.....	79
Figure 31. Profil sensoriel des pains fabriqués.....	81

Liste des tableaux

Tableau 01. Différents types de farine de blé tendre en fonction du taux de cendres et du taux d'extraction (BOUTROUX, 2010).....	04
Tableau 02. Composition biochimique en (g) pour 100 g de farine de blé tendre (ATWELL, 2001).....	04
Tableau 03. Classification du riz selon la taille et la forme des grains (JULIANO, 1994 ; JEANGUYOT et AHMEDI, 2002 ; <i>Codex Alimentarius</i> , 2007).....	12
Tableau 04. Principaux constituants biochimiques de riz blanchi (VIERLING, 2008).....	13
Tableau 05 : Principaux composants biochimiques de la farine de féverole (CUQ et LEYNOUD-ROUAUD, 1992 ; BOUTIN et DRONNE, 2008).....	15
Tableau 06. Classification des hydrocolloïdes (JEANTET et <i>al.</i> , 2007).....	17
Tableau 07. Matrice d'expérience du plan composite orthogonal centré à deux facteurs....	42
Tableau 08. Relation entre les niveaux codés et les niveaux réels utilisés dans le plan d'expérience central composite à 2 facteurs.....	44
Tableau 09. Descripteurs sensoriels pour le pain.....	54
Tableau 10. Distribution granulométrique des farines destinées à la panification.....	56
Tableau 11. Composition biochimiques des farines et de la formule étudiée.....	57
Tableau 12. Caractéristiques alvéographiques de la farine témoin de blé tendre, de matières premières exemptes en gluten et de la formule étudiée sans améliorant (FRF).....	61
Tableau 13. Test d'analyse de la variance de paramètre de traçage des surfaces de réponse des pâtes de la formule Riz-Fèverole.....	64
Tableau 14. Volumes spécifiques des pains sans gluten des 13 points du plan central composite à deux facteurs et à cinq niveaux.....	65
Tableau 15. Couples (<i>HPMC, Xanthane</i>) de vérification après optimisation par MSR de pains sans gluten de la FRF.....	71
Tableau 16. Test ANOVA pour les notes des attributs des échantillons de pains.....	80

Introduction

La maladie cœliaque est considérée actuellement comme l'une des maladies gastro-intestinales les plus fréquentes. C'est une entéropathie auto-immune induite par l'ingestion de gluten chez des sujets génétiquement prédisposés (SCHMITZ et GARNIER-LENGLINE, 2008). Elle se traduit par une atrophie de la muqueuse de la partie supérieure de l'intestin grêle (*duodénum, jéjunum*) (BERREBI, 2005).

Les études épidémiologiques récentes ont montré que 10‰ de cas dans le monde entier souffre de la maladie cœliaque. Un tel taux, établit cette maladie comme l'une des intolérances alimentaires les plus communes (BRIANI *et al.*, 2008 ; LERNER, 2010). En Algérie, peu de données sont disponibles sur la fréquence de cette maladie. Elle reste, cependant, dangereuse, à cause de ses complications dues surtout à l'inobservance du régime alimentaire, très contraignant (SAIDAL, 2010). Les données dont on dispose montrent des prévalences d'environ 1,09‰ chez les enfants de 15 ans dans l'Ouest Algérien (ville d'Oran) (BOUDRAA *et al.*, 2008), d'au moins 1,33‰ sur trois villes de l'Est (Guelma, Mila et Khenchla) (BENATALLAH, 2009) et de 0,97‰ dans la ville de Constantine (BOUASLA, 2011).

Actuellement, le seul traitement scientifiquement prouvé de la maladie cœliaque est diététique et réside en un Régime Sans Gluten (RSG), qui consiste à supprimer les aliments contenant l'une et/ou l'autre des quatre céréales toxiques suivantes : blé, seigle, orge et/ou avoine et à les substituer par d'autres céréales exemptes en gluten tel que le riz et le maïs (ROUQUETTE, 2002 ; NIEWINSKY, 2008).

Selon BENATALLAH (2009), les produits diététiques du commerce destinés à cette tranche de population sont pour la plupart importés, onéreux, peu diversifiés, de texture et de goût peu appréciés. Il fallait donc mettre à leurs disposition un aliment diététique (léger et nutritif) et appétant. L'enquête effectuée par cet auteur, montre que le pain venait en tête de listes des produits réclamés par ces malades. Par ailleurs, sa fabrication à base d'ingrédients sans gluten reste difficile. Elle est généralement caractérisée par un volume nettement inférieur et une mie plus ferme par rapport au pain témoin du blé tendre (HAGER *et al.*, 2012 ; BENATALLAH *et al.*, 2012). Cela est dû à l'absence de la protéine structurale « le gluten » nécessaire à la fabrication du pain, qui possède des propriétés viscoélastiques responsables de la rétention gazeuse, donnant une pâte extensible, avec une bonne structure de la mie, engendrant un produit fini léger et bien alvéolé (GALLAGHER, 2009 ; FRIESEN, 2013).

Pour aborder ces problèmes, de nombreuses études ont été menées sur la substitution du gluten par des ingrédients capables d'imiter ses propriétés fonctionnelles et viscoélastiques, tels que les hydrocolloïdes : les gommés arabiques, le caroube et le xanthane, les alginates, les pectines et les dérivés cellulosiques (HPMC) (GALLAGHER *et al.*, 2004 ; SINHA, 2007 ; BENATALLAH, 2009 ; TORBICA *et al.*, 2010 ; GHERAIRIA, 2011) .

Dans le souci de présenter un aliment diététique qui répond aux besoins des consommateurs cœliaques algériens, une des formules en cours d'étude au niveau de l'équipe de Transformation et Elaboration de Produits Agro-Alimentaires (T.E.P.A) du Laboratoire de Recherche en Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.) de l'I.N.A.T.A-A a été proposée. L'ingrédient de base choisi pour cette formulation est le riz. Deuxième céréales la plus produite dans le monde (FAO, 2009). Celle-ci se distingue par ses propriétés hypoallergénique, son pouvoir énergétique élevé et sa forte digestibilité, en particulier par rapport au maïs (GUJRAL *et al.*, 2003). Une supplémentation à l'aide de féverole est envisagée en vue de rehausser la valeur nutritionnelle de pain sans gluten fabriqué. D'un point de vue nutritionnel, cette Formule Riz-Féverole (FRF) proposée est basée sur les avantages connus de la supplémentation céréales-légumes secs (STRIGLER, 2011).

Ce présent travail s'insère dans les programmes de recherche développés par l'équipe (T.E.P.A) et vise à améliorer et diversifier l'alimentation des malades cœliaques algériens. Cette recherche donne suite aux travaux réalisés par BENATALLAH (2009) et de GHERAIRIA (2011). Elles ont respectivement étudiées l'effet de l'*HPMC* et de *Xanthane* comme améliorants sur la qualité du pain sans gluten. Leurs résultats ont montré la nécessité de l'étude de l'effet de la combinaison de ces deux hydrocolloïdes (*HPMC, Xanthane*) sur le pain sans gluten. Pour cela, nous nous sommes tracés les objectifs suivants :

1. Formulation et fabrication d'un pain sans gluten à base de riz et de féverole amélioré par la combinaison de deux hydrocolloïdes *l'HPMC* et le *Xanthane* ;
2. Optimisation de la panification sans gluten ;
3. Caractérisation sensorielle des optima.

Etude Bibliographique

Chapitre I :
Panification à base de
blé

Les céréales sont définies comme des graines amylacées regroupant un certain nombre de plantes appartenant à la famille des Graminées, dont les grains peuvent être transformés en farine et en semoule à usages alimentaires (FREDOT, 2005 ; BRANGER *et al.*, 2007).

I. BLE TENDRE

Le blé est la céréale la plus représentative. C'est une monocotylédone appartenant au genre *Triticum* de la famille des *Gramineae*. Le grain est un fruit sec et indéhiscant, appelé caryopse. Il est constitué d'une graine et de téguments (ŠRAMKOVA *et al.*, 2009).

Il regroupe deux espèces: le blé dur (*Triticum durum*) et le blé tendre (*Triticum aestivum*). L'amande dure du premier, le rend apte à donner des semoules utilisées dans la fabrication de pâtes alimentaires, de couscous et de certains pains traditionnels. Le second se caractérise par une amande relativement friable qui donne une bonne aptitude à la transformation en farine. Celle-ci est utilisée dans les produits de boulangerie, pâtisserie et biscuiterie (ADRIAN, 1995 ; NOUT *et al.*, 2003).

I.1. Farine de blé tendre

La farine est l'ingrédient de base des produits de panification. Outre l'abondance de blé tendre, son utilisation très répandue est liée à la capacité de la pâte à retenir le gaz permettant, ainsi, son expansion lors de la cuisson (GAN *et al.*, 1995).

I.2. Caractéristiques de la farine de blé tendre

Elle est caractérisée par ses taux d'extraction, de blutage et de cendres.

▪ **Taux d'extraction** : est exprimé par le rapport « poids de la farine extraite sur 100 kg de blé mis en œuvre » (ARSAN, 2011). Plus il est élevé, plus il y a un risque que la farine contienne du son. Les faibles taux d'extraction donnent des farines avec meilleures caractéristiques organoleptiques (aspect plus blanc) et fonctionnelles (pâte boulangère) (CHEFTEL et CHEFTEL, 1992).

▪ **Taux de blutage** : représente la quantité de son et remoulages recueillis au cours de la mouture de 100 kg de blé (BOUTROUX, 2010). Pour une farine fortement blutée, ce taux est inversement proportionnel à la quantité de farine obtenue (FREDOT, 2005).

▪ **Taux de cendres** : exprime la pureté de la farine et correspond à la quantité de minéraux, puisque ils se trouvent essentiellement dans les couches externes du grain qui vont donner le son (DUPIN *et al.*, 1992). Selon BOUTROUX (2010), ce taux définit le type de farine et dépend du taux d'extraction de celle-ci (Tableau 01). En effet, les farines dont le taux de cendres est élevé sont plus riches en son. Actuellement, le type 55 est le plus utilisé en panification (CALVEL, 1984).

Tableau 01. Différents types de farine de blé tendre en fonction du taux de cendres et du taux d'extraction (BOUTROUX, 2010)

Type	Taux d'extraction (%)	Taux de cendres (%)	Description	Utilisation
Type 45	70 à 76	< 0,50	Farine très blanche	Pâtisserie
Type 55	75 à 78	de 0,50 à 0,60	Farine blanche	Pain ordinaire
Type 65	77 à 80	de 0,62 à 0,75	Farine crème	Pains spéciaux
Type 80	80 à 85	de 0,75 à 0,90	Farine bise	Pains spéciaux
Type 110	85 à 90	de 1,00 à 1,20	Farine complète	Pain bis
Type 150	90 à 98	> 1,40	Farine intégrale	Pain complet

I.3. Eléments constituant la farine du blé tendre et leurs intérêts en panification

Le passage du grain du blé entier à la farine blanche se solde par une perte considérable en micronutriments (LANZMANN-PETITHORY, 2002). Celle-ci s'appauvrit en protides, lipides, sucres simples mais s'enrichit en amidon et perd une grande partie des fibres végétales et de minéraux (Tableau 02). Par conséquent, la quantité des principaux nutriments énergétiques s'élève d'où une augmentation de l'apport énergétique (FREDOT, 2005).

Tableau 02. Composition biochimique en (g) pour 100 g de farine de blé tendre (ATWELL, 2001)

Constituants	Eau	Protéines	Amidon	Polysaccharides non amylacés	Lipides
% MS	14	7-15	63-72	4,5-5	1-2

Les constituants de la farine interviennent à travers leurs propriétés techno-fonctionnelles dans la formation de la pâte en lui conférant différentes propriétés rhéologiques tout au long du processus de fabrication (CHEFTEL et CHEFTEL, 1992).

I.3.1. Humidité

Comme tous les produits dérivés des céréales, la farine de blé tendre est hygroscopique. Sa teneur en eau est estimée à 14%, selon FEILLET (2000). C'est une condition importante pour sa bonne conservation. En aucun cas, elle ne doit être supérieure à 16%. Plus la teneur en eau est faible, plus il est possible de lui ajouter de l'eau au pétrissage pour arriver à une consistance optimale de la pâte (COLAS, 1991 ; GRANDVOINET et PRATX, 1994).

I.3.2. Amidon

Il fait parti des glucides assimilables qui représentent environ 61% des glucides totaux (FREDOT, 2005). C'est un matériel composite constitué d'une fraction glucidique (98 à 99%) et

d'une fraction non glucidique mineure (<1% : lipides, protéines et phosphore) (WRIGLEY, 2004). La fraction glucidique est constituée de deux polymères de structures différentes, l'amylose (26%) et l'amylopectine (74%), dont les proportions changent en fonction des espèces et variétés (ALAIS et LINDEN, 1997).

Ils jouent chacun un rôle déterminant dans la fonctionnalité finale de l'amidon : viscosité, résistance au cisaillement, gélatinisation, solubilité, pouvoir adhésif, ... Un lien a par exemple été établi entre de faibles teneurs en amylose, une viscosité à chaud élevée, une faible tenue de la viscosité à chaud et un faible pouvoir épaississant à froid de l'amidon de blé (MASSAUX *et al.*, 2006).

D'après ALAIS *et al.* (2008), plus une farine est blanche, plus elle est riche en amidon et meilleur sera son coefficient d'utilisation digestive (CUD). Des études ont reportées que le comportement rhéologique des pâtes de la farine de blé est influencé par les propriétés spécifiques des surfaces des grains d'amidon (LARSSON et ELIASSON, 1997) et par la présence d'enzymes amylolytiques (MARTÍNEZ-ANAYA et JIMÉNEZ, 1997).

L'amidon intervient de différentes manières au cours de la fabrication du pain : c'est une source intéressante de sucres fermentescibles assurant la multiplication et la croissance des levures (FEILLET, 2000), un fixateur d'eau puisqu'il en absorbe plus de 46% au cours de la préparation de la pâte et enfin, une bonne charge de remplissage assurant une fonction de dilution du gluten (ROUSSEL et CHIRON, 2003).

1.3.3. Fibres alimentaires

Ce sont des glucides non assimilables. Le grain de blé en contient 9,5%, localisées principalement dans l'enveloppe. Ils se repartissent en pentosanes solubles et insolubles dans l'eau (FREDOT, 2005).

D'après FEILLET (2000), il est admis qu'ils ont des actions antagonistes sur le volume final du pain. Les pentosanes solubles adsorbent facilement l'eau à chaud et à froid. Ils possèdent donc des propriétés épaississantes et contribuent également à donner des gels assez résistants. Les caractéristiques visqueuses de ces gels interviennent sur la tenue, l'extensibilité et l'aptitude au développement des pâtes en stabilisant les alvéoles gazeuses. De plus, ils limiteraient la diffusion du gaz carbonique et participeraient ainsi à un meilleur développement du pain (JEANTET *et al.*, 2007). D'autre part, les pentosanes insolubles favoriseraient une prise d'eau initiale hétérogène et trop importante, qui provoquerait un déséquilibre dans la répartition de l'eau dans le milieu, par conséquent, les protéines du gluten seraient à leur tour inégalement hydratées et le réseau protéique ne pourrait se former (FEILLET, 2000).

I.3.4. Protéines

Les principaux facteurs déterminant la qualité boulangère d'une farine de blé est la qualité et la quantité de ses protéines (GOESAERT *et al.*, 2007). D'après FREDOT (2005), elles représentent 12 % du poids du grain. Il existe deux types de protéines : solubles (albumines et globulines) et insolubles (gliadines et gluténines) dans les différentes solutions.

- **Les albumines et les globulines** sont les protéines de structure du grain, qui représentent 15 à 20% des protéines de la farine dans lesquelles se trouvent la plupart des enzymes : α et β amylases, protéases et oxydoréductases (FEILLET, 2000).

- **Les gliadines et les gluténines** représentent les protéines de réserve du grain du blé. Ce sont les principaux constituants du **gluten** dont le comportement affecte considérablement les propriétés rhéologiques des pâtes (CARIP, 2009). Les premières représentent 40 à 50 % des protéines totales et sont solubles dans les solutions alcooliques (COME et CORBINEAU, 2006). Elles se concentrent surtout dans l'amande et elles confèrent au gluten ses caractéristiques visqueuses (plasticité, extensibilité et viscosité) (JEANTET *et al.*, 2007). Les gluténines quand à elles représentent 30 à 40 % des protéines totales du blé. Elles sont solubles dans les solutions acides ou alcalines. Elles confèrent au gluten ses caractéristiques élastiques, sa cohésion et sa résistance aux déformations ou ténacité. On les trouve principalement dans l'albumen du grain (LEUREUX, 1999).

• Effets du gluten sur les propriétés rhéologiques de la pâte en panification

Le gluten est le constituant responsable de l'élasticité des produits à base de céréales. Il se trouve principalement dans le blé, le seigle et en quantité moindre dans l'orge. En revanche, il est absent dans le riz, le maïs et le millet (LAFAY, 2010).

Le gluten est principalement constitué par rapport à la matière sèche, de protéines (75 à 85%), d'amidon (8 à 10 %), de sucres réducteurs (1 à 2 %), de lipides (5 à 10 %), de pentosanes (2%) et de matières minérales (1 %) (BOUTROUX, 2010).

Selon GODON et WILLM (1991), il présente en panification plusieurs rôles. Il a le pouvoir de fixer 2 à 3 fois son poids en eau. Cette propriété permet de diminuer les phénomènes de collant et d'augmenter la consistance de la pâte, ce qui s'accompagne par l'amélioration de sa stabilité et par l'augmentation de sa résistance élastique souvent au détriment de son extensibilité.

En plus de ses propriétés rhéologiques, les protéines du gluten (gliadines et gluténines) sont insolubles dans l'eau. Elles se fixent par affinité sur les granules d'amidon. Cette association protéine/amidon donne une élasticité suffisante à la pâte pour retenir le gaz carbonique (CO₂), ce qui confère à la mie sa structure caractéristique et au pain son volume considérable (FOULD, 1996 ; BRANGER *et al.*, 2007).

Les propriétés particulières du gluten (ténacité, élasticité et hydratation), lui permettent de former un réseau élastique et continu au moment du pétrissage, à retenir le CO₂ au moment de la fermentation de la pâte et à former une structure alvéolaire fine et régulière après expansion gazeuse au moment de la cuisson. Ces propriétés sont à peu près inexistantes ou non équivalentes dans les autres céréales et sont exclusives au blé (BOUDREAU et MENARD, 1992).

1.3.5. Lipides

Les grains de blé sont pauvres en lipides. Ils en contiennent seulement 2 % et ceux-ci sont essentiellement localisés dans le germe et l'assise protéique (FREDOT, 2005).

Selon BOUDREAU et MENARD (1992), ils sont divisés en deux groupes, les lipides de réserve (apolaires) et ceux de structure (polaires). Les premiers ont un rôle d'agent lubrifiant et tensio-actif en association avec les protéines et l'amidon, facilitant ainsi le développement de la pâte boulangère au moment du pétrissage. Les lipides polaires quand à eux améliorent les performances de rétention gazeuses des pâtes et joueraient un rôle sur l'augmentation du volume du pain.

D'un autre côté, les lipides auraient un rôle important sur la qualité du gluten. En effet, VIERLING (2003) a trouvé qu'un gluten délipidé perdait une partie de ses propriétés panifiables.

1.3.6. Enzymes

Bien que, de masse pondérale infiniment réduite, ces substances jouent un rôle capital dans la vie du grain de blé et de la farine (FRANÇOIS, 2009). Les plus courantes sont les protéases, les lipases, les lipoxygénases et les α et β -amylases (VIERLING et FRENOT, 2001).

1.3.7. Vitamines et matières minérales

Le blé contient surtout les vitamines B1, B2 et PP (B3). Par ailleurs, on note la présence d'autres vitamines telles que la B6. La vitamine E y est considérée comme un antioxydant naturel (GODON, 1991).

Egalement, on trouve des matières minérales en faibles proportions et inégalement réparties (BRANGER *et al.*, 2009). Ainsi 80% des cendres se trouvent dans les enveloppes contre 20% dans l'amande (BADOU *et al.*, 2010). Elles ont un rôle de nutriments pour les levures et favoriseraient leur action dans la pâte (VIERLING, 2003).

II. TECHNOLOGIE DE PANIFICATION

Le pain, comme la plupart des aliments constitue un système biochimique complexe. C'est la résultante de la cuisson d'une pâte obtenue avec un mélange de farine panifiable, d'eau potable, de sel et d'un agent de fermentation (levure et/ou levain) (RIVAL, 2005).

Sa fabrication regroupe les trois étapes successives suivantes : *le pétrissage, la fermentation et la cuisson*. Dans un premier temps, les différents ingrédients sont longuement mélangés dans un pétrin, c'est le pétrissage. Puis, vient l'étape de fermentation, pendant laquelle la pâte « pousse » : les levures métabolisent l'amidon en produisant du gaz carbonique. Enfin, pendant la cuisson, il y a passage de la pâte de l'état liquide à l'état solide caoutchoutique (CAMARA *et al.*, 2008).

II.1. Pétrissage

C'est une étape cruciale dont dépend la qualité du produit fini. Durant cette opération, un ensemble complexe de transformations biochimiques et physiques a lieu suite à l'application de forces mécaniques (LEVAVASSEUR, 2007 ; VANDERGOOT *et al.*, 2010).

Selon DELACHARLERIE *et al.*, (2008), le pétrissage assure trois fonctions concomitantes et intimement liées qui sont essentielles pour l'obtention d'une pâte bien aérée :

- **Homogénéisation** : Le pétrissage permet de répartir d'une manière homogène les différents constituants, favorisant ainsi leur contact notamment celui de la farine avec l'eau et donc leur hydratation (ROUSSEL et CHIRON, 2002). Il permet aussi de former un milieu macroscopiquement homogène, structuré, et capable de se déformer sans se rompre lors de l'expansion des alvéoles gazeuses au cours de la fermentation (LEVAVASSEUR, 2007).

- **Aération de la pâte** : Au cours du pétrissage, les particules de farines s'hydratent. De l'air est incorporé dans la pâte, une partie se dissout dans la phase aqueuse de celle-ci et l'autre se rassemble au sein de micro-bulles gazeuses, qui se répartissent de manière aléatoire au sein de la pâte en formation et constituent les noyaux des futures alvéoles de la mie (FEILLET, 2000).

- **Structuration du réseau protéique** : Pendant le pétrissage, les acides aminés soufrés s'oxydent et entraînent la création des ponts disulfures (S-S) intra et inter moléculaires (figure 01). La tenue du réseau serait due à des liaisons non covalentes telles que les liaisons hydrogènes, hydrophobes ainsi qu'à des enchevêtrements entre les chaînes (FEILLET, 2000).

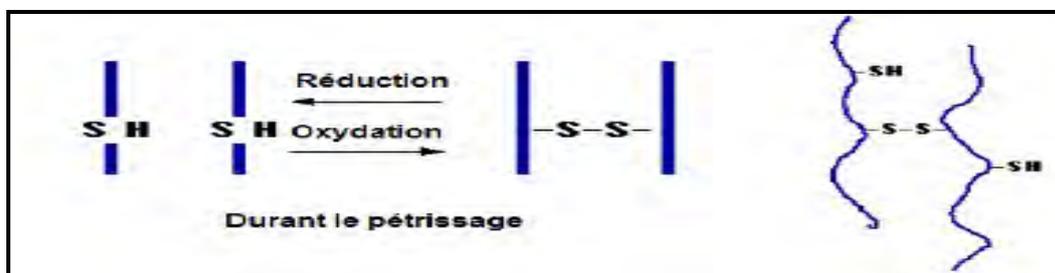


Figure 01. Formation du réseau du gluten durant le pétrissage (MEZIANI, 2011)

D'après SHAPTER (2007), le pétrissage serait proportionnel au développement du gluten et par conséquent à son aptitude à retenir le gaz de la fermentation. Cela permet d'avoir une mie à petites alvéoles, régulières, nombreuses dont les parois sont fines et avec des textures moelleuses.

Ces trois actions simultanées aboutissent en fin de pétrissage à une pâte homogène, consistante, lisse, souple et facile à manier (LE BLANC, 2008). La figure 02 montre que la pâte obtenue est un mélange complexe comprenant deux phases, une première continue correspondant au réseau de gluten hydraté et une deuxième discontinue comprenant les grains d'amidon enchâssés dans le gluten et l'air inclus au cour du pétrissage (ALAIS *et al.*, 2008).

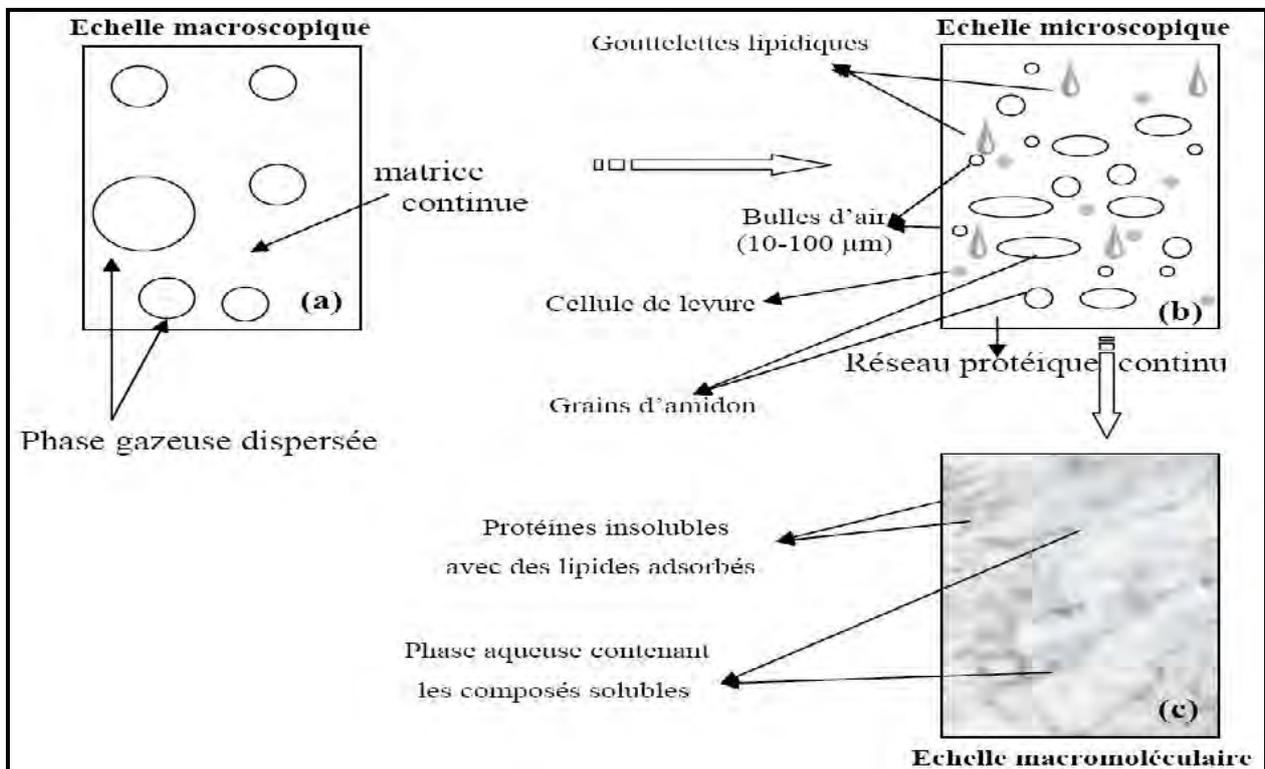


Figure 02. Représentation schématique de l'observation d'une pâte à pain aux échelles macroscopique (a), microscopique (b) et macromoléculaire (c) (BLOKSMA, 1990 ; ELIASSON et LARSON, 1993 ; LASSOUAD, 2005)

II.2. Fermentation

La fermentation, étape spécifique aux produits de panification, a pour rôle d'enrichir la pâte en dioxyde de carbone (CO_2) (MONTEL *et al.*, 2005). Elle provoque une perte en matière totale (de l'ordre de 2 à 3%) par transformation des sucres en alcool et en CO_2 accumulé dans le réseau protéique formé principalement de gluten, provoquant la croissance et la coalescence des alvéoles. Elle se traduit par une augmentation du volume de la pâte (CHARGELEGUE *et al.*, 1994).

D'après FEILLET (2000), la force fermentaire des levures est influencée par un certain nombre des facteurs tels que : la température, le pH, la teneur en eau, la pression osmotique et la dose de la levure utilisée.

Dès la phase de pétrissage, la fermentation débute sous l'action de la levure : *Saccaromyces cerevisiae*. Elle va utiliser les glucides libres ou libérés à partir de l'amidon par les amylases de la farine, en produisant du CO₂, de l'éthanol et des acides organiques (BRANGER *et al.*, 2007).

Saccaromyces cerevisiae se comporte différemment en présence ou en absence d'oxygène. Selon ROUSSEL et CHIRON (2003), L'oxygène introduit au cours du pétrissage permet à celle-ci d'établir un métabolisme de type respiratoire :



Peu de temps après la fin de pétrissage, elle consomme tout l'oxygène introduit, donc le métabolisme s'oriente vers la fermentation alcoolique :



D'après BLOKSMA (1990) et VAN VLIET *et al.* (1992), Le gaz carbonique produit se dissout d'abord dans la matrice continue de la pâte. Dès que celle-ci arrive à saturation, il s'accumule sous forme gazeuse dans les nucléi et exerce une pression interne sur le réseau du gluten non perméable aux gaz. Au début de cette phase d'accumulation, l'espace disponible pour la fraction gazeuse est suffisant pour le maintien de la forme sphérique de l'ensemble des bulles gazeuses. Au dessus d'un certain niveau d'accumulation (volume relatif = 3,3), et sous l'effet de la force de compression induite par l'excès de pression à l'intérieur des cellules, la pâte entourant les cellules, qui grossissent, est étirée tangentiellement (parallèle à la surface des cellules) dans deux directions et compressée radialement (perpendiculairement à la surface des cellules). Une telle déformation est dite « *extention biaxiale* ». Les cellules gazeuses se déforment d'une manière prononcée et la pâte à cellules sphériques est transformée en une pâte à cellules plus ou moins *polyédriques* (Figure 03).

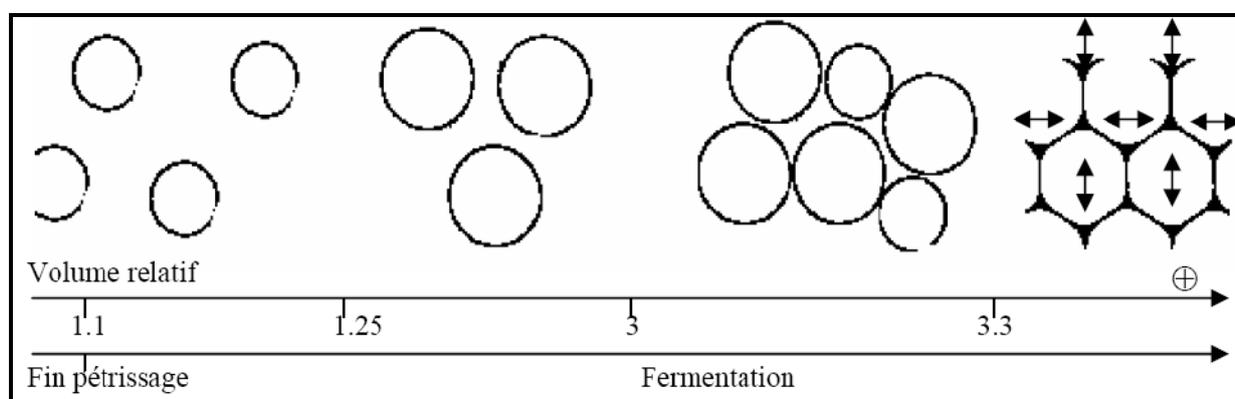


Figure 03. Représentation schématique de l'évolution de la taille et de la forme (de sphérique à polyédrique) des cellules gazeuses dans une pâte en cours de fermentation (BLOKSMA, 1990 et VAN VLIET *et al.*, 1992)

II.3. Cuisson

Au cours de la dernière étape de panification, la cuisson, plusieurs transformations physiques, chimiques et biochimiques se produisent simultanément aboutissant au pain, telles que, l'expansion du produit, la perte d'eau par évaporation, la formation d'une structure alvéolaire plus ou moins développée due à la dilatation des alvéoles gazeuses, la dénaturation des protéines, la gélatinisation de l'amidon, la réaction de Maillard et la formation de la croûte (SABLANI *et al.*, 1998 ; PEREZ, 2001).

Selon FREDOT (2005), les transformations des différents constituants de la pâte correspondent à l'élévation de la température au cours de la cuisson et sont :

- **A partir de 60°C**, une partie des zones cristallines de l'amidon est désorganisée, ce qui provoque un gonflement de ses grains. C'est « *l'empesage ou gélatinisation* ». L'amidon de la mie qui avait une structure « semi cristalline » prend alors une structure « amorphe » souple. De plus, les amylases fongiques sont inactivées et la levure est détruite.
- **A 70°C**, les protéines du gluten subissent « *une dénaturation et une coagulation* » ce qui augmente leur digestibilité. Elles perdent leur affinité pour l'eau qui s'oriente vers l'amidon. Cette eau joue, à côté du CO₂ un rôle dans la structure alvéolaire du pain (BLOKSMA, 1990). Une inactivation des amylases du blé est également notée.
- **Au dessus de 75°C**, l'expansion du CO₂ s'accroît et l'éthanol s'évapore.
- **Vers 100°C**, l'eau libre se transforme en vapeur se répartissant dans la pâte, ce qui accroît son gonflement. En même temps, se forment la croûte et la mie. Pour cette dernière, la température ne dépasse pas 100°C alors que celle de la croûte atteint 200°C.
- **Dès 110°C**, il y a « *dextrinisation* » de l'amidon c'est-à-dire dégradation partielle de celui-ci en dextrines.
- **A 150°C**, il ya torréfaction et grillage des produits glucidiques. Ainsi, au niveau de la croûte, « *des réactions de Maillard* » ont lieu. Ce sont des réactions entre glucides et protéines qui forment des composés bruns appelés « mélanoides » qui intensifient donc la coloration du pain.

Après le défournement, on laisse refroidir le pain pendant un temps variable suivant sa forme et son poids. La vapeur d'eau et le CO₂ diffusent alors à travers la croûte et sont remplacés progressivement par de l'air ambiant.

Chapitre II :
Panification sans
gluten

Le gluten est la protéine structurale nécessaire pour la réussite de la fabrication du pain. Ses propriétés viscoélastiques sont responsables à la formation des cellules gazeuses, y compris la stabilisation et la rétention gazeuse, donnant une pâte extensible, avec une bonne structure de mie (GALLAGHER, 2009 ; FRIESEN, 2013). Cependant, il doit être éliminé du régime des patients cœliaques, dont le seul traitement est diététique : un régime sans gluten (SCIARINI *et al.*, 2008).

I. MATIERES DE BASE POUVANT ETRE IMPLIQUEES EN PANIFICATION SANS GLUTEN

I.1. Riz

Le riz est la culture céréalière la plus importante dans le monde en développement. Il constitue l'aliment de base de plus de la moitié de la population du globe. La presque totalité du riz cultivé appartient à l'espèce *Oryza sativa* L. (JULIANO, 1994).

C'est la céréale la plus appropriée pour les préparations sans gluten, grâce à ses propriétés hypoallergéniques, son pouvoir énergétique élevé et son excellente digestibilité (GUJRAL *et al.*, 2003).

I.1.1. Classification du riz

L'institut International de Recherche sur le Riz (IRRI) a proposé une classification selon la taille et la forme des grains du riz (JULIANO, 1994). Egalement, JEANGUYOT et AHMEDI (2002), considèrent que ces deux critères sont les éléments les plus simples à percevoir. Le grain peut être long, court ou moyen, gros, rond ou fin. Examinant le projet de norme pour le riz, le comité de la commission du *Codex Alimentarius* (2007) a proposé une classification de cette céréale sur la base du rapport longueur du grain sur sa largeur (Tableau 03).

Tableau 03. Classification du riz selon la taille et la forme des grains (JULIANO, 1994 ; JEANGUYOT et AHMEDI, 2002 ; *Codex Alimentarius*, 2007)

	Classification selon la taille du grain		Classification selon la forme du grain (JULIANO, 1994)	
	Longueur (mm) (JULIANO, 1994)	Rapport longueur/largeur (<i>Codex Alimentarius</i> , 2007)		Rapport longueur/largeur
Extra long	> 7,5	-	Mince	> 3
Long] 6,61 – 7,50]	≥ 3,1	Moyen] 2,1 – 3,0]
Moyen] 5,51 – 6,61]	2,1 – 3	Large] 1,1 – 2,0]
Court	< 5,50	≤ 2	Rond	< 1,0

I.1.2. Différents types du riz

Selon les traitements appliqués sur les enveloppes des grains du riz, on peut avoir :

- **Le riz paddy** ou **riz paille** : c'est un riz qui n'a subi aucune opération technologique après sa récolte. Les grains sont encore vêtus de leur enveloppes (FAO, 1990) ;
- **Le riz cargo** ou **riz décortiqué** : c'est un riz *paddy* débarrassé de ses balles plus ou moins adhérentes. Il conserve une mince pellicule jaune-brun. Il est riche en sels minéraux (magnésium, potassium, fer), vitamines (B₁, B₂ et B₃) et en fibres (PACAUT, 2005).
- **Le riz usiné, riz blanchi** ou **riz blanc** : c'est un riz *cargo* dont on a retiré de la pellicule. Il donnera **le riz poli** qui ne contient que l'amande. Celle-ci est riche en protéines, en minéraux et en vitamine B₁. C'est la présentation commerciale la plus courante du riz (SPILLER et SPILLER, 2007).

I.1.3. Composition biochimique de la farine du riz

Le riz est le produit de consommation le plus important dans le monde (GUIMARÃES, 2009). Bien que parfaite du point de vue nutritionnel, la farine de riz est très peu utilisée en panification. En effet, comme elle est exempte en gluten, elle est difficile à lever. L'absence de cohésion entre ses particules rend impossible sa mise en forme au cours de l'extrusion (RIVAL, 2005). Le tableau 04 représente la composition biochimique de riz blanchi.

Tableau 04. Principaux constituants biochimiques de riz blanchi (VIERLING, 2008)

Nutriments	Protéines	Lipides	Glucides	Fibres	Minéraux
Teneur en g / 100 g de MS	6,3-7,1	0,3-0,5	77-89	0,2-0,5	0,3-0,8

I.1.3.1. Amidon

Le riz est un aliment énergétique, il contient plus de 73% d'amidon souvent plus facile à digérer par les intestins fragiles, car ses petites granules le rendent facilement attaquant par les enzymes digestibles (ROUX et CATIER, 2007). Ses caractéristiques sont dues essentiellement au taux élevé de branchement en courtes chaînes d'amylopectine (JULIANO, 1994).

La teneur en amylose du riz est importante car, il existe une forte corrélation entre celle-ci et sa qualité culinaire (LAIGNELET, 1997). Selon JEANGUYOT et AHMEDI (2002), cette teneur serait proportionnelle à la fermeté du riz. Egalement, l'amylose serait déterminant pour l'opacité ou la translucidité du grain.

I.1.3.2. Protéines

Les protéines sont le second constituant le plus important du riz. Elles sont relativement bien équilibrées en acides aminés, mais sont déficientes en lysine comme toutes les céréales. Néanmoins,

la teneur du riz en cet acide aminé essentiel varie de 3,5 à 4%, soit l'une des plus élevées parmi les protéines céréalières (QA International Collectif, 1996 ; STRIGLER, 2011).

I.1.3.3. Lipides

Ils sont concentrés au niveau du germe et de l'assise protéique du grain. Le riz en contient de 0,3 à 0,5%, sous forme de lipides non amyliques (JULIANO, 1994). Les principaux acides gras sont les acides linoléique, oléique et palmitique (JEANGUYOT et AHMEDI, 2002).

I.1.3.4. Polyosides non amyliques

Les polyosides non amyliques se composent de polyosides hydrosolubles et de fibres alimentaires insolubles. Ils peuvent s'associer à l'amidon, et il se peut qu'ils aient un effet hypocholestérolémique (JULIANO, 1985). Les fibres végétales du riz se situent principalement dans les balles et le péricarpe (SPILLER et SPILLER, 2007).

I.1.3.5. Vitamines et sels minéraux

Selon la FAO, le riz n'est pas seulement une source importante d'énergie alimentaire mais, il est aussi une bonne source de vitamines du groupe B (thiamine, riboflavine, niacine) et de vitamine E. Cependant, il est pauvre en vitamines A, C et D (JULIANO, 1994).

Le grain du riz contient des quantités appréciables de sels minéraux, en particulier le calcium, le magnésium, le potassium et le zinc, mais, il est pauvre en sodium (FONTAN, 2008).

I.2. Féverole

Les graines de légumineuses appartiennent à une famille botanique très importante du point de vue économique et nutritionnel (DUPIN *et al.*, 1992). Ces graines sont caractérisées par une forte teneur en protéines d'où le terme protéagineux. Elles constituent une bonne source d'énergie et fournissent de nombreux éléments minéraux essentiels, comme le calcium et le fer avec une teneur faible en lipides (MOLINIER, 2007).

Parmi ces grains on peut citer *la féverole* (*Vicia faba L.*). C'est une légumineuse de la famille des *Papilionacées*, qui représente une source très importante d'aliments pour l'homme (DUPIN *et al.*, 1992). Elle appartient à la variété *minor* dite aussi *equina* (PESSON et LOUVEAUX, 1994).

I.2.1. Propriétés nutritionnelles des composants de la féverole

D'après CARIP (2009), Les légumes secs sont des aliments très intéressants du point de vue nutritionnel, ils sont riches en glucides complexes, en protéines, en sels minéraux, en vitamines et en fibres. Le tableau 05 présente la composition biochimique de la farine de féverole.

Tableau 05 : Principaux composants biochimiques de la farine de féverole (CUQ et LEYNOUD-ROUAUD, 1992 ; BOUTIN et DRONNE, 2008)

Nutriments	Protéines	Lipides	Glucides	Fibres	Minéraux
Teneur en g / 100 g de MS	27-33	1,5-2	48,9-56,9	10	4,5

1.2.1.1. Protéines

Les légumes secs sont une source de protéines végétales de bonne valeur biologique. Selon FREDOT (2005), elles peuvent être divisées en : *globulines* (60%, sont déficientes en acides aminés soufrés), *albumines* (25%), *prolamines et des formes azotées non protéiques* (15%).

L'analyse quantitative des légumineuses en acides aminés montre, par rapport au profil type en Acides Aminés Essentiels (AAE) proposé par l'OMS en 1989, une insuffisance en méthionine, cystine et tryptophane, qui constituent les facteurs limitant des protéines qu'ils contiennent, avec une richesse en lysine qui en font un complément efficace des céréales (VIERLING, 2008).

1.2.1.2. Glucides

Bien que riches en glucides, les légumes secs présentent un indice glycémique faible (forte teneur en protéines, anti-amylases et en fibres), ce qui en fait un aliment de choix dans le régime des diabétiques et des patients souffrant d'hypercholestérolémie (ROUDOUT et LEFRENCO, 2005).

L'amidon de la féverole est nettement moins riche en amylose que l'amidon de blé. Cette teneur en amylose varie en fonction de l'origine botanique (FRODOT, 2005).

1.2.1.3. Lipides

Les légumes secs sont des aliments pauvres en lipides avec pour la plus part une teneur inférieure à 3% (PROLEA, 2007).

1.2.1.4. Polysaccharides non amylacés

D'après FREDOT (2005), les 2/3 des fibres des légumes secs sont dures et insolubles dans l'eau. Elles sont représentées par l'hémicellulose, la cellulose et la lignine. Elles jouent le rôle d'un régulateur du transit intestinal et préviendraient du cancer du côlon. Elles auraient un effet hypocholestérolémique (augmentent le catabolisme du cholestérol en freinant l'absorption des sels biliaires) et préviendraient également les maladies cardiovasculaires (MOLINIER, 2007).

1.2.1.5. Vitamines et minéraux

Selon VIERLING (2008), les légumes secs apportent des quantités importantes en vitamines du groupe B. En plus, ils sont particulièrement intéressants en potassium, en fer et en magnésium. Ils contiennent également du zinc et du cuivre (QA International Collectif, 1996).

I.2.2. Facteurs antinutritionnels et toxiques des légumes secs

Les légumineuses contiennent des facteurs antinutritionnels, éléments qui font partie de l'arsenal de défense de la plante contre les prédateurs (BOUTIN et DRONNE, 2008).

Leur concentration est cependant faible et ils sont généralement détruits par les traitements thermiques ou solubilisés dans l'eau de cuisson. Ils sont aussi pour la plupart éliminés au cours de la germination ou après fermentation (ROUDAUT et LEFRANCQ, 2005).

Selon FREDOT (2005), parmi ces facteurs: l'*acide phytique* (diminue l'absorption des cations bivalents), *les composés cyanogénétiques* (libèrent l'acide cyanhydrique qui est toxique), *les facteurs du favisme : les lectines ou phyto-hémagglutinines* (altèrent et atrophiaient les villosités de la muqueuse digestive et précipitent les globules rouges), *inhibiteur de la trypsine* (des peptides complexent la trypsine et la chymotrypsine entraînant une inhibition de ces protéines pancréatiques), *les α -galactosides* (causent les flatulences, crampes abdominales et des diarrhées).

II. SUPPLEMENTATION CEREALES-LEGUMES SECS

En général, le but de la supplémentation ou de la complémentation est, au minimum, d'augmenter la quantité de protéines assimilables d'environ 20% (CHEGRANI-CONAN, 2007).

Selon la FAO et l'OMS (2007), la supplémentation protéique en nutrition est un moyen d'accroître la qualité d'une protéine déficiente par l'addition d'une quantité moyenne d'une autre protéine ayant une forte concentration de l'acide aminé essentiel qui constitue le facteur limitant de la protéine déficiente.

Les céréales et les légumineuses représentent d'excellentes sources en protéines, mais aucune de ces deux catégories d'aliment n'apporte la totalité des acides aminés essentiels. Leur association permet de résoudre ce problème, car la lysine absente dans les céréales, est présente dans les légumineuses qui, elles, sont déficientes en méthionine, présente dans les céréales (STRIGLER, 2011). L'équilibre en acides aminés apporté par cette supplémentation devra permettre une meilleure assimilation de ceux-ci par l'organisme.

Pour une complémentarité optimale, il faudrait consommer approximativement 65% de céréales et 35% de légumineuses, donc un rapport de 2/1 (FAO, 1982).

MCARDLE *et al.*, (2004) proposent quelques exemples : galette à base de maïs et de haricots secs, riz et haricots secs, riz et lentille, riz et pois cassés, blé et pois chiche, pâtes et haricots ainsi que cacahuète et pain sont consommés ensemble par de nombreuses populations, car ces combinaisons d'aliments représentent des sources complémentaires de tous les acides aminés essentiels se trouvant dans le règne végétale.

Chapitre III :
Principaux
hydrocolloïdes en
panification sans
gluten

En panification, lorsque les propriétés fonctionnelles des ingrédients de base ne suffisent pas à donner aux pâtes les caractéristiques requises pour la réussite des pains, les spécialistes font appel à des améliorants, à titre d'exemple les hydrocolloïdes.

I. GENERALITES SUR LES HYDROCOLLOÏDES

I.1. Définition des hydrocolloïdes

Les hydrocolloïdes sont des polymères hydrosolubles de nature glucidique ou protéique, qui en réagissant avec les molécules d'eau, changent la rhéologie du milieu aqueux dans lequel elles se trouvent. Egalement, ils créent, modifient ou stabilisent la structure physico-chimique des produits alimentaires. Ils exercent leurs actions au cours des traitements technologiques (thermiques, mécaniques) et/ou au cours du stockage (JEANTET *et al.*, 2007 ; BADOUD *et al.*, 2010).

I.2. Classification des hydrocolloïdes

Selon JEANTET *et al.* (2007), les hydrocolloïdes peuvent être classés en quatre groupes en fonction de leur origine (Tableau 06). Hydrocolloïdes d'origine végétale ou animale. Ceux d'origine microbienne, sont obtenus par leur synthèse avec des souches sélectionnées de micro-organismes en conditions contrôlées dans les fermenteurs (xanthane). Pour les hydrocolloïdes synthétiques, ils sont obtenus par modification ou dérivation des substances naturelles (dérivés de cellulose comme HPMC).

Tableau 06. Classification des hydrocolloïdes (JEANTET *et al.*, 2007)

Origine	Exemple	Fonctions	
Origine végétale	- Extrait de plantes	Gomme arabique	Epaississant, stabilisant
	- Extrait de fruits	Pectines	Epaississant, gélifiant
	- Extrait de graines	Caroube	Emulsifiant, agent de suspension
	- Extrait d'algues	Agar	Epaississant, stabilisant, gélifiant
Origine animale	Gélatine, Caséinates	Gélifiant, épaississant	
Origine microbienne	Xanthane	Gélifiant, épaississant	
Origine synthétique	Dérivés de cellulose (HPMC)	Epaississant, gélifiant	

I.3. Propriétés fonctionnelles des hydrocolloïdes

Sur le plan chimique, les hydrocolloïdes sont généralement de nature polysaccharidique. Ils ont été depuis des décennies utilisés dans les applications alimentaires pour leurs propriétés fonctionnelles (RINAUDO, 1994). Selon GUICHARD et VOILLEY (2012), ce sont des additifs alimentaires utilisés pour épaissir les solutions, stabiliser les suspensions et les émulsions, fixer

l'eau, retarder la cristallisation et former des gels. Toutes ces utilisations dépendent étroitement des interactions qui se créent entre les macromolécules elles-mêmes et entre celles-ci et l'eau.

A cet égard, ils peuvent avoir des fonctions épaississantes, gélifiantes et/ou stabilisantes.

1.3.1. Propriétés épaississantes

L'effet épaississant des hydrocolloïdes est caractérisé par une augmentation de la viscosité de la solution, mais sans la rendre solide (VIERLING et FRENOT, 2001). Le degré d'épaississement varie avec le type de l'hydrocolloïde. On rencontre peu qu'ils donnent de faibles viscosités à hautes concentrations tandis que la majorité entre eux développent de grandes viscosités à très faible concentration en polymère en-dessous de 1% habituellement (GLICKSMAN, 1982). Au niveau moléculaire, l'épaississement se caractérise par des liaisons intramoléculaires inexistantes ou extrêmement faibles (GUEGUEN et Duc, 2008).

1.3.2. Propriétés gélifiantes

Au niveau moléculaire, l'effet gélifiant des hydrocolloïdes peut être décrit simplement par l'association des macromolécules ou des fragments des macromolécules pour former un réseau tridimensionnel continu retenant entre ses mailles la phase liquide et capable de résister à certaines contraintes physiques (ALISTAIR, 2010). Selon BADOUD et *al.*, (2010), la formation de ces réseaux suppose donc l'organisation progressive des macromolécules initialement distribuées au hasard dans la solution par l'intermédiaire «des zones de jonction» entre ces macromolécules.

1.3.3. Propriétés stabilisantes

La stabilisation d'une solution par les hydrocolloïdes s'applique à une dispersion aqueuse où la phase continue est de l'eau et la phase dispersée est soit un solide, un liquide ou un gaz (ALISTAIR, 2010). Dans tous les systèmes, la phase dispersée a tendance à se déstabiliser ou se séparer. L'ajout d'une quantité des hydrocolloïdes appropriés contribue à augmenter la viscosité de la phase aqueuse et par conséquent la tendance de la phase dispersée à migrer ou à fusionner est inhibée ou minimisée (RINAUDO, 1994). En effet, pour jouer le rôle de stabilisant, les hydrocolloïdes agissent comme des agents de liaison, stabilisant des mousses et des suspensions, des émulsifiants, des inhibiteurs de cristallisation et de synérèse (VIERLING et FRENOT, 2001).

Les hydrocolloïdes par leurs propriétés adhésives, gélifiantes, épaississantes et de fouettage ont pour rôle au final d'améliorer la texture des produits alimentaires.

II. UTILISATION DES HYDROCOLLOÏDES EN PANIFICATION SANS GLUTEN

La réussite de la fabrication des pains dépend de la qualité du gluten de la farine, et par conséquent de la bonne rétention gazeuse de la pâte (ROSELL *et al.*, 2007). En panification sans

gluten, l'absence de cette protéine « gluten » implique la nécessité de l'utilisation d'hydrocolloïdes, afin d'imiter la structure du réseau glutineux. Dans ce sens, plusieurs études ont montré l'intérêt de ces substances en panification sans gluten. Les chercheurs ont noté une amélioration des propriétés rhéologiques des pâtes et des volumes spécifiques des pains en relation avec les propriétés technofonctionnelles de ces améliorants ajoutés (GALLAGHER *et al.*, 2004 ; SINHA, 2007 ; BENATALLH, 2009 ; TORBICA *et al.*, 2010 ; HAGER *et al.*, 2012).

➤ Effet des hydrocolloïdes sur la qualité du pain sans gluten

La plupart des hydrocolloïdes sont des polysaccharides comme les gommés arabiques, le guar, le caroube et le xanthane, les carraguénanes, les alginates, les pectines et les dérivés cellulosiques (HPMC) (SHARADANANT et KHAN, 2003 ; GUARDA *et al.*, 2004 ; BADOUD *et al.*, 2010 ; BROWN, 2012). Leurs effets sur la performance fonctionnelle de la pâte et sur la qualité du pain dépendent étroitement de la nature, de l'origine de la taille des particules des composants, de la concentration en hydrocolloïdes incorporés dans la pâte et des conditions de formulation (REGINA et TELIS, 2012).

Les propriétés fonctionnelles des hydrocolloïdes permettent de les utiliser comme agents épaississants, stabilisants d'émulsions, inhibiteurs de synérèses, améliorants de la capacité de rétention d'eau et des propriétés texturales pour la formation de films et de gels (BROWN, 2011 ; GUICHARD et VOILLEY, 2012). Ils sont également utilisés pour contrôler la mobilité de l'eau, pour augmenter la durée de conservation des pains en retardant le rassissement (WARD et ANDON, 2002 ; CATO *et al.*, 2002 ; MOORE *et al.*, 2004 ; AHLBORN *et al.*, 2005 ; PRUSKA-KEDZIOR *et al.*, 2008).

Plusieurs études ont été conduites pour montrer le potentiel d'utilisation de ces hydrocolloïdes en panification sans gluten. Par exemple le CarboxyMéthylCellulose (CMC) et les gommés de guar ont été additionnés à des pains à base de seigle en vue d'améliorer leur qualité boulangère (METTLER et SEIBEL, 1995 ; ARENDT et DAL BELLO, 2011). D'autre part, une amélioration de la stabilité des pâtes est notée au cours de l'étape de la fermentation avec les alginates, les carraguénanes, les gommés de xanthanes et les HydroxyPropylMéthylCelluloses (HPMC) (ROSELL *et al.*, 2001).

MI, HYUN et HAE (1997a, 1997b et 1997c), ont montré que certains hydrocolloïdes ajoutés à différents taux aux farines exemptes en gluten (1 à 4,5% d'HPMC, 1,5% de graines de caroube et 1 % pour chacune des gommés de carraguénane, de guar, de xanthane et d'agar), donnaient lieu à des pains avec des volumes spécifiques optima. Egalement, BENATALLAH (2009), GHERAIRIA (2011) ; BENATALLAH *et al.* (2012) ont montré que l'utilisation d'une formule sans gluten à base de la farine du riz et de féverole incorporée respectivement à 3,32% d'HPMC et 0,19% de Xanthane

permettaient d’obtenir des pains sans gluten avec des volumes spécifique optima les plus proches à ceux du témoin de blé tendre.

D’autre part, une amélioration du grain de mie, de sa couleur, de sa fermeté ont été noté lors de l’utilisation de différents hydrocolloïdes en panification sans gluten (TOUFEILI *et al.*, 1994 ; COLLAR *et al.*, 1999 ; SANCHEZ *et al.*, 2002 ; GALLAGHER *et al.*, 2003 ; McCARTHY *et al.*, 2005). L’ajout d’HPMC sur la formule Riz-Féverole (2/1), a permis l’obtention des pains de distribution alvéolaire hétérogène et légèrement plus grossière que celle du témoin de blé tendre (BENATALLAH *et al.*, 2012).

II.1. HYDROXYPROPYLMETHYLCELLULOSE (HPMC)

Grâce à sa fonctionnalité multiple, l’HPMC convient parfaitement pour être utilisé dans presque tous les domaines de l’industrie alimentaire moderne par exemple : comme agent stabilisant, agent filmogène, épaississant, gélifiant, liant ou émulsifiant (GUARDA *et al.*, 2004).

II.1.1. Structure et propriétés physico-chimiques de l’HPMC

L’HydroxyPropylMéthylCellulose (HPMC) est un éther de cellulose, obtenu par l’addition de groupements méthyls et hydroxypropyles à la chaîne de cellulose constituée par des unités de D-glucose liées en β -(1,4) (figure 04) (HAGER et ARENDT, 2013).

Ce dérivé cellulosique est commercialisé sous forme d’une poudre blanche qui a une odeur et un goût pratiquement neutre. Il est soluble dans l’eau et les solvants organiques et donne des gels après chauffage. Ces gels sont thermiquement réversibles, et se défont lorsque les solutions sont refroidies. Egalement, c’est un composant non ionique et non calorique. Il forme une solution transparente avec un comportement pseudoplastique, il présente une résistance aux enzymes et une stabilité aux variations de pH (GALLAGHER, 2009).

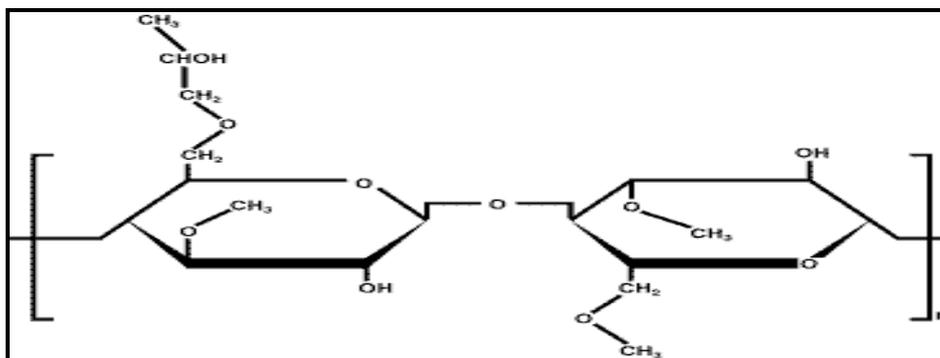


Figure 04. Structure de l’HydroxyPropylMéthylCellulose (HPMC) (HONG et KINAM, 2011)

II.1.2. Impact de l’HPMC sur la qualité du pain sans gluten

L’HPMC est connu pour être l’hydrocolloïde qui confère aux pains sans gluten les meilleures propriétés organoleptiques (COLLAR *et al.*, 1999 ; PREEDY *et al.*, 2011). Il permet

d'améliorer son volume spécifique vue sa capacité à retenir les gaz, également sa texture à cause de ses propriétés d'absorption d'eau qui permettent de prolonger sa durée de conservation (YLIMAKI *et al.*, 1991 ; MARCO et ROSELL, 2008 ; BEMILLER, 2008 ; SABANIS et TZIA, 2011).

L'HPMC se caractérise par d'importantes surfaces actives qui permettent d'améliorer la capacité de la pâte à retenir le gaz et des propriétés uniques d'hydratation-déshydratation lorsqu'il est en solution et au cours des changements de température (BÀRCENAS et ROSELL, 2005).

D'après SARKAR et WALKER (1995), malgré la présence de groupements hydrophobes dans les chaînes d'HPMC, ces polymères maintiennent les propriétés hydrophiles de la cellulose. Ces propriétés permettent à l'HPMC d'agir en tant qu'émulsifiant qui diminuerait la tension superficielles aux différentes interfaces et de renforcer le grain de mie et d'augmenter sa rétention en eau (BELL, 1990 ; DZICZAK, 1991).

BELL (1990), était parmi les premiers auteurs à formuler des hypothèses concernant le mécanisme d'action de l'HPMC et son habilité à améliorer le volume des pains. Cet auteur rapporte que lorsque les chaînes hydratées de ce polymère sont soumises à un traitement thermique, elles relâchent les molécules d'eau qui y étaient attachées donnant lieu à de fortes interactions entre elles. En conséquence, un réseau temporaire est formé. Ce réseau donne aux cellules gazeuses de la force au cours de la fermentation et leur permet l'expansion au cours de la cuisson et l'amélioration des volumes de pains (BELL, 1990 ; DZIEZAK, 1991 ; HAQUE *et al.*, 1993 ; SARKAR et WALKER, 1995). En plus de ceci, le réseau formé par l'HPMC au cours de la cuisson pourrait agir en tant que barrière à la diffusion des gaz, diminuant ainsi les pertes d'eau par évaporation et augmentant les teneurs en eau des mies ralentissant ainsi le rassissement des pains (BELL, 1990 ; DZIEZAK, 1991 ; HUI, 2008).

En 2004, SIVARAMAKRISHNAN *et al.*, ont étudié les propriétés rhéologiques de pâtes de riz en vue de panification. Ils ont trouvé que les pains ayant donné les expansions optimales après cuisson sont ceux obtenus avec des farines de riz long incorporées à 3% d'HPMC.

BENATALLH *et al.* (2012), ont montré que l'incorporation de 3,32% d'HPMC à une formule à base de la farine du riz et de féverole permet d'avoir un volume spécifique du pain sans gluten optimum et plus proche au témoin du blé tendre.

Plus récemment, PHIMOLSIRIPOL *et al.* (2012), ont montré que l'incorporation de l'HPMC (3%), d'émulsifiant (1,5%) et de blanc d'œuf (2%) dans la farine du riz permet une amélioration de la qualité nutritionnelle, sensorielle et la durée de conservation des pains sans gluten.

II.2. GOMME DE XANTHANE

C'est un polysaccharide qui présente des applications industrielles nombreuses et variées grâce à ses propriétés rhéologiques exceptionnelles (SIMON et CERLES, 2000). C'est le premier

hydrocolloïde d'origine microbienne à avoir été commercialisé à la fin des années 1960 (BADOUD *et al.*, 2010).

II.2.1. Structure et propriétés physico-chimiques de la gomme de xanthane

Il s'agit d'un hétéro-polysaccharide extracellulaire produit par fermentation aérobie de la bactérie *Xanthomonas campestris* sur substrat glucidique et dans des conditions de milieu déterminées (pH : 6-7,5 et température : 18-31°C). A la suite de la fermentation, et après stérilisation, la gomme de xanthane est récupérée par précipitation alcoolique puis séchée et broyée (BORN *et al.*, 2002 ; WENNIGER, 2005 ; DE REYNAL, 2009). Elle est constituée d'une chaîne principale de D-glucose liée en β -(1,4) et de chaînes latérales composées de α -D-mannose et d'acide β -D-glucuronique. Certains résidus mannose peuvent être acétylés en C-6 (Figure 05) (BADOUD *et al.*, 2010). Sa masse moléculaire est estimée entre 2 à $5,5 \times 10^3$ KDa. Sa formule brute approximative est la suivante : $(C_{67}H_{102}O_{56})_n$ ($n = 830$ à 2800) (LAPASIN et PRICL, 1995 ; SIMON, 2001).

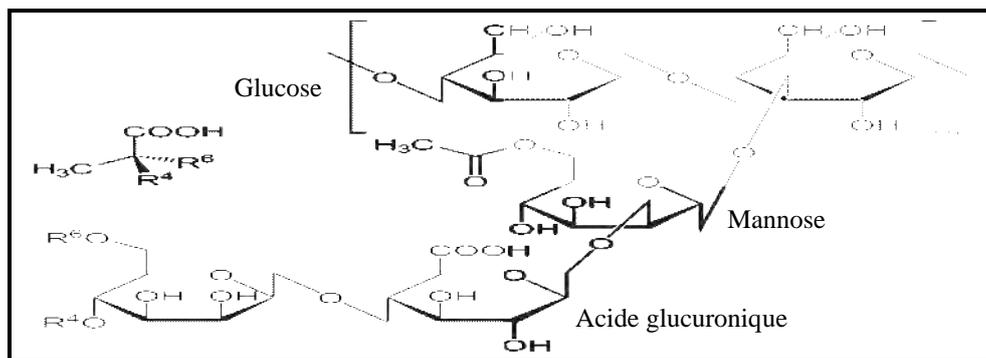


Figure 05. Structure de la gomme de xanthane (DE REYNAL, 2009)

Les dispersions aqueuses de xanthane sont thixotropiques. La structure faible de gel formé se traduit par une viscosité exceptionnellement élevée à des concentrations faibles en polymère, qui peut être utilisée pour épaissir des échantillons aqueux et de stabiliser des émulsions, des mousses et des particules en suspensions (MORRIS, 1995). Ce comportement résulte de la capacité des molécules de xanthane de former en solution des agrégats par liaisons hydrogènes et l'enchevêtrement de polymère. Ce réseau très ordonné de molécules enchevêtrées, engendre une viscosité élevée à faibles concentrations (ROSALAM et ENGLAND, 2006).

La gomme de xanthane est commercialisée sous forme d'une poudre blanchâtre inodore et insipide (SIMON et CERLES, 2000). Ce polymère se caractérise par une haute solubilité dans l'eau froide (grâce à son caractère ramifié et la présence de groupements carboxyles) ou chaude, une viscosité élevée même à faibles concentrations (600-2000 ppm), une grande stabilité sur une large gamme de température (jusqu'à 90°C), de pH (2-11) et de concentration en Na Cl (jusqu'à 150g/L).

Il est également stable en milieu acide et supporte très bien la congélation et la décongélation (KALOGIANNIS *et al.*, 2010).

II.2.2. Intérêt de la gomme de xanthane en panification sans gluten

La gomme de xanthane est principalement employée dans l'industrie alimentaire en tant qu'agent épaississant, émulsifiant et stabilisant (YOSHIDA et TANNER, 1993 ; VANCE et LACALAMITA, 2011). En panification, elle a été utilisée comme substituant de gluten pour améliorer la qualité du pain (FRIESEN, 2013).

En 2007, LAZARIDOU *et al.*, ont étudié l'effet des hydrocolloïdes sur les paramètres rhéologiques de la pâte et la qualité du pain. Ils ont prouvé que le xanthane n'a aucun effet sur le volume spécifique du pain mais il a eu l'effet le plus prononcé sur les propriétés viscoélastiques des pâtes en les rendant plus consistantes donnant lieu à des mies plus fermes.

D'après SHITTU *et al.* (2009), l'addition du xanthane a des effets significatifs sur la ténacité et l'extensibilité de la pâte et sur l'acceptabilité sensorielle du pain frais.

GUERAIRIA (2011) a trouvé que l'incorporation de 0,19% de Xanthane à une formule sans gluten à base de la farine du riz et de féverole permet d'avoir des pains sans gluten avec des volumes spécifique optimums

En 2011, PERESSINI *et al.*, ont étudié les effets de l'ajout de la gomme de xanthane et l'alginate de glycol de propylène (PGA) sur les propriétés rhéologiques des pâtes et leurs performances en panification des pains à base de riz-sarrasin. Ils ont conclu que ces deux hydrocolloïdes permettent une amélioration de volume spécifique des pains sans gluten, des propriétés mécaniques de la mie et sa structure alvéolaire mais à des faibles taux (<0,5%).

Egalement, des études faites par PERESSINI et SENSIDONI, 2009 ; SCIARINI *et al.*, 2010 ; CROCKETT *et al.*, 2011; SABANIS et TZIA, 2011, ont montré que seulement les faibles taux en xanthane (< 0,5%) permettent d'améliorer le volume spécifique des pains sans gluten. Par contre, des niveaux élevés contribueraient à une forte consistance et résistance de la pâte, avec une expansion limitée des cellules gazeuses provoquant ainsi une diminution du volume des pains.

Récemment, en 2013, HAGER et ARENDT ont étudié l'influence de l'HPMC, du Xanthane et de leur combinaison sur le volume spécifique et la structure des mies des pains à base de riz, de maïs et de sarrasin. Ils ont conclu que ces deux hydrocolloïdes sont des ingrédients potentiels, conférant aux pains sans gluten des caractéristiques similaires à celles des pains témoins à base de blé tendre.

Chapitre VI:
*Caractérisation de la
structure alvéolaire*

La structure alvéolaire est assurée par l'accumulation du gaz carbonique dans le réseau protéique formé principalement de gluten (BRANGER *et al.*, 2007). L'évaluation de la structure alvéolaire des produits de panification se base sur plusieurs critères tels que la taille et la forme des alvéoles ainsi que l'épaisseur de leurs parois (KAMMAN, 1970). L'évaluation visuelle pour décrire les variations observées à l'œil par des experts a longtemps été utilisée pour cette fin mais reste cependant qualitative et subjective (SCANLON et ZGHAL, 2001). Par ailleurs, la quantification de la distribution spatiale de cette structure alvéolaire est possible par "*l'analyse de la texture*" (LASSOUED, 2005 ; DEVAUX *et al.*, 2005).

I. ANALYSE D'IMAGE

L'analyse d'image a pour objectif la description aussi complète que possible des caractéristiques d'une image. Par ailleurs, une image est constituée d'objets et pour en extraire des informations quantitatives plusieurs démarches sont possibles, telles que la détermination de tous les paramètres relatifs à cette image, ou alors seulement le choix de quelques paramètres pour la caractériser (DROOGENBROECK, 1994).

I.1. Morphologie mathématique

La morphologie mathématique se définit comme une théorie essentiellement non linéaire, utilisée en particulier en analyse d'images, dont le but est l'étude des objets en fonction de leur forme, de leur taille, des relations avec leur voisinage, de leur texture, et de leurs niveaux de gris ou de leur couleur. Par les transformations qu'elle propose, la morphologie mathématique se situe à différents niveaux du traitement d'images (filtrage, segmentation, mesures, *analyse de texture*) et fournit ainsi des outils pour la reconnaissance des formes (BLOCH, 2003).

Elle a été développée à l'origine à l'Ecole des Mines de Paris. Elle repose essentiellement sur les travaux de G. MATHERON (1960-1970) (BLOCH, 2003). Son intérêt pour l'analyse de la taille des alvéoles des pains a été montré par LASSOUAD (2005).

L'idée de base de la morphologie mathématique est de comparer l'ensemble à analyser (image) avec un ensemble de géométrie connu appelé élément structurant (taille et forme définies) (BLANCHARD, 2007). Par convention, un élément structurant carré de $(2n+1)$ pixels de côté est dit de taille n . Le pixel central de ce masque est appelé pixel de référence et sa valeur est modifiée lors des translations, en fonction de la valeur de ses voisins dans l'élément structurant.

Selon BLOCH (2003), cet élément structurant définit un voisinage autour de chaque point de l'image et ce sont donc des propriétés locales des objets qui sont ainsi mises en évidence. Parmi les opérations fondamentales du traitement d'image morphologique, l'érosion et la dilatation. L'érosion fait correspondre au pixel central la valeur minimum des niveaux de gris de ses voisins dans

l'élément structurant. La dilatation est l'opération duale, c'est-à-dire qu'elle fait correspondre au pixel central la valeur maximale des niveaux de gris de ses voisins dans l'élément structurant (COSTER et CHERMANT, 1985 ; SOILLE, 2003).

I.2. Analyse de texture

L'analyse de texture se diffère à l'analyse dite d'image, qui consiste à caractériser la taille et la forme des particules. L'analyse de texture quant à elle, signifie chercher et quantifier les corrélations et les relations entre les niveaux de gris des pixels en fonction de la distance qui les sépare (OLIVIER, 2010).

II. ANALYSE D'IMAGE DES PRODUITS ALVÉOLÉS

L'analyse d'images est considérée comme une méthode objective et est devenue presque la norme dans l'évaluation de la mie du pain dans les dernières décennies (ZAYAS, 1993; CHTIOUI *et al.*, 1996 ; MAGDIC, 1999).

ROMANO *et al.*, (2013) montrant l'utilisation de cette analyse comme un outil utile pour quantifier les caractéristiques de la mie du pain, telles que, la taille des alvéoles, la distribution des alvéoles, la fraction de vide et le facteur de forme et même le volume du produit fini. Le suivi des changements dans la structure de pâte à pain pendant la panification par l'application de cette technique s'est avéré très utile.

Les moyens d'acquisition d'images soit en 2D (appareils photos, scanners et caméras) (SAPIRSTEIN *et al.*, 1994), soit par imagerie en résonance magnétique (IRM) (NAITO *et al.*, 2003) permettent l'obtention d'images en couleur. Mais, en analyse d'image les mesures sont réalisées sur des images binaires ou des images en niveaux de gris. La binarisation oppose les alvéoles (noires) aux parois (blanches), alors qu'une image en niveaux de gris est une distribution spatiale dans laquelle chaque pixel est associé à l'intensité de son niveau de gris.

La structure est évaluée par acquisition d'images (photographie d'échantillons en taille réelle ou en observation par microscopie photoniques ou électroniques). L'information recueillie peut être traitée à l'aide de techniques d'analyse d'images. Il est par exemple possible de caractériser une structure alvéolaire en quantifiant la distribution en taille et en orientation des alvéoles et leur forme. Cette méthode a été appliquée à des extrudés et à la mie de pain (GODON et LOISEL, 1997).

La première étude d'analyse de texture sur du pain a été effectuée par BERTRAND *et al.* (1992). Elle a porté sur la différenciation de la structure alvéolaire de pains formulés avec 7 types de surfactants. Une méthode mathématique basée sur la transformation de Haar à deux dimensions a

été utilisée. Les images ont été classées sur une carte sur laquelle le facteur 1 est corrélé à l'épaisseur des parois des alvéoles et le facteur 2 à la taille des alvéoles.

L'équipe de SAPIRSTEIN (1994) a développé un logiciel d'analyse d'images (langage C) pour différencier des mies de pains fabriquées avec différents teneurs en oxydants. Une étape de segmentation par seuillage a été intégrée au début du traitement d'image : les informations issues de l'image brute, réparties sur une échelle de niveaux de gris allant de 0 (noir) à 255 (blanc), sont condensées par le choix d'un seuil permettant de réduire les niveaux de gris considérés.

L'image obtenue est plus facilement exploitable (SAPIRSTEIN *et al.*, 1994). Cette valeur seuil peut être choisie arbitrairement (subjectivement) en la variant jusqu'à ce que l'image ne conserve que les informations essentielles (BAARDSETH *et al.*, 2000), ou par calcul mathématique. Ils ont choisi un algorithme (k-moyens) permettant de déterminer un seuil optimum pour chaque image en fonction de la luminosité globale de la mie et de la distribution des niveaux de gris. Plusieurs paramètres ont été mesurés à partir des images seuillées : le nombre d'alvéoles, leur densité et l'épaisseur de leurs parois. Des mesures de densité complémentaires ont montré, néanmoins, que cette méthode des k-moyens sous-estimait la fraction volumique des alvéoles et donc surestimait l'épaisseur des parois (ZGHAL *et al.*, 1999), d'où l'importance du niveau de seuillage sur les paramètres de texture.

▪ **Caractérisation de la structure alvéolaire par Morphologie Mathématique**

La complexité de la structure de la mie est probablement à l'origine des surestimations de certains paramètres de texture. *La morphologie mathématique* est une approche qui a été utilisée pour la caractérisation de la structure alvéolaire des biscuits extrudés (SMOLARZ *et al.*, 1989) et du pain Français (ROUILLE *et al.*, 2005). Elle a été appliquée avec succès pour la différenciation de mies de pains à base des farines reconstituées à différents teneurs en fraction soluble. Les auteurs ont montré que cette fraction ajoutée est inversement proportionnelle au nombre de petites cellules ayant des parois de bulles très épaisses (>1,24 mm). Le classement des structures alvéolaires par une Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis d'expliquer plus de 80% des différences observées selon l'axe principal 1, qui était directement relié à la taille des bulles gazeuses (ROUILLE *et al.*, 2005).

Etude Expérimentale

Matériel et Méthodes

I. MATIERES PREMIERES UTILISEES

Au cours de notre expérimentation, nous avons utilisé trois types de farines comme matières de base et également d'autres ingrédients.

I.1. Farine de blé tendre

Elle est considérée comme le témoin auquel est comparée à une formule sans gluten (avec et sans améliorants). Il s'agit de la matière première classiquement utilisée pour la fabrication du pain, en raison de sa teneur en gluten qui confère à la pâte ses propriétés technologiques et rhéologiques spécifiques.

La farine de blé tendre utilisée dans notre étude provenait d'un lot de mélange de farine commerciale qu'on nommera Farine K_{blé}. Elle est conditionnée dans des sachets étanches d'une contenance de 1 kg. Tous les essais ont été réalisés avec le même lot, pour garder ses mêmes critères pendant toute l'expérimentation.

I.2. Farines exemptes en gluten

Ces farines sont obtenues à partir des grains de riz et de féverole, préalablement séparés des impuretés puis, broyés à l'aide d'un broyeur à meules de marque UMA Rouiba-Algérie de type MG E3. Après mouture, toute la quantité de broyat est tamisée avec un tamis normalisé dont les ouvertures sont de 200 µm, selon une granulométrie répondant aux exigences de la panification (< 200 µm).

La farine du riz utilisée dans cette étude provient d'un riz long blanchi (*Oriza sativa*), d'origine Indienne de variété *Basmati*, récolté en 2012. Celui-ci a été acheté au super marché EL-RITTEJ de Constantine, sous forme des grains complets et ensaché dans des sacs de 1 kg.

La farine de féverole utilisée provient d'une féverole (*Vicia faba minor*) d'origine Egyptienne, récoltée en 2012. Elle a été achetée au super marché de Fadila SAADANNE de Constantine, sous forme de grains cassés et ensachée dans des sacs de 25 kg.

I.3. Autres ingrédients

La préparation des pâtes dans le cadre de cette étude a nécessité l'emploi des ingrédients suivants :

L'eau d'hydratation: est une eau distillée, obtenue à partir d'un distillateur de marque SCOTSMAN du laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.), ayant un pH de $6,5 \pm 0,1$.

Le sel : est un sel fin ordinaire de cuisine, iodé, produit par l'Entreprise Nationale Algérienne de sel (E.N.A sel).

La levure boulangère : *Saccharomyces cerevisiae* de marque " S.I. Lesaffe France". Elle se présente sous forme lyophilisée en paquet de 250g.

Les améliorants : dans notre étude, l'HPMC et le Xanthane ont été utilisés comme des substituants de la fraction protéique "gluten" responsable de la levée de la pâte, qui est absente dans la farine du riz et de féverole.

* **HPMC** : L'HydroxyPropylMéthyleCellulose est un échantillon de Methocel F50 (Dow Chemical, US). Il a été utilisé dans les recettes de pain sans gluten. Ce polysaccharide est obtenu à partir de la cellulose extraite du coton et sur laquelle des groupements hydroxypropylméthyle sont greffés de façon covalente par réaction chimique. Une fois fonctionnalisé dans l'eau, l'HPMC donne un gel à partir de 62-68°C.

* **Xanthane** : C'est un polysaccharide produit par *Xanthomonas campestris*, de marque G1253 ; Sigma-Aldrich Steinheim Allemagne. Il est commercialisé sous forme d'une poudre.

II. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES FARINES UTILISÉES

II.1. DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES FARINES

D'après FEILLET (2000), la granulométrie est l'étude de la distribution de la taille des particules d'une farine. Elle permet d'apprécier son comportement lors de l'hydratation. En boulangerie, la quantité d'eau absorbée ainsi que la vitesse d'absorption d'eau lors de la formation de la pâte, augmentent avec la finesse des particules de la farine (COLAS et THARRAULT, 1997).

C'est une caractéristique fondamentale, en relation directe avec toutes les opérations unitaires réalisées sur les grains entiers : broyage, séparation, mélange et transfert mais aussi avec les phénomènes d'échange et de réactivité, qu'ils soient physiques (migration d'eau, séchage, solubilisation), chimiques (oxydation) ou enzymatiques (digestion des aliments) (MELCION, 2000).

Selon la FAO (1996), une granulométrie inférieure à 200 µm est exigée pour une farine panifiable.

• Principe

Le tamisage de nos trois farines a été réalisé à l'aide d'une tamiseuse de laboratoire de marque Retsch AS 200 (annexe 2). Son principe consiste à faire passer une quantité donnée d'échantillon au travers d'une batterie (série) de tamis calibrés et normalisés, dont les

caractéristiques sont connues, récupérer et peser séparément les fractions retenues sur chaque tamis.

• Mode opératoire

Un échantillon de 100 g de farine est déposé et réparti d'une manière uniforme au sommet d'un empilement de cinq tamis d'ouverture de mailles décroissante (200, 150, 125, 100 et 75 μ m). Cette tamiseuse est animée par un mouvement vibratoire automatique, où on va régler l'amplitude de rotation (100 mm) et le temps de tamisage (5 minutes), selon des essais préliminaires donnant un tamisage maximum. Les particules dont les dimensions inférieures aux dimensions des ouvertures traversent facilement le tamis (le passant), alors que celles les plus grosses sont retenues (le refus). Les refus et les passants de chaque tamis sont ensuite pesés avec une balance analytique *Sartorius* (0,1g).

• Expression des résultats

Le refus retenu sur chacun des tamis est rapporté à la quantité d'échantillon totale pour déterminer la distribution granulométrique (**DG**) exprimée en (%) ; selon la formule suivante :

$$\text{DG} = 100 \cdot P_1 / P_0$$

Avec :

P₀ : Masse de la prise d'essai (g) ;

P₁ : Masse de la fraction retenue sur chacun des tamis (g).

II.2. COMPOSITION BIOCHIMIQUE DES FARINES

Nous avons effectué des dosages de l'humidité (H), des cendres (C), des protéines totales (P), des matières grasses (MG) et par soustraction, ces mesures permettent de calculer la teneur en glucides totaux (G).

II.2.1. Teneur en eau (Humidité)

Cette mesure est importante d'une part pour la caractérisation de nos farines et d'autre part afin de calculer la masse d'eau à ajouter à celles-ci au cours de pétrissage.

• Principe

La teneur en eau de nos trois farines est déterminée selon la norme AFNOR NFV 03-707 de juin 1989 (AFNOR, 1991).

- **Mode opératoire**

Avec une balance analytique de marque *Sartorius* (0,1g), nous avons pesé $5 \pm 0,1$ g de farine, bien étalée sur une boîte de Pétri, entreposée sans couvercle dans une étuve de marque MEMMERT (annexe 2) réglée à 130°C pendant 2 heures. A la sortie de l'étuve, la boîte de Pétri est mise dans un dessiccateur, qui contient un agent dessiccant pour éviter l'absorption de l'humidité de l'air au cours de son refroidissement en vue de réaliser la pesée. L'opération de séchage est répétée 30 minutes jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

- **Expression des résultats**

Cette teneur en eau (**H**) exprimée en g d'eau pour 100 g de produit humide est égale :

Avec:

$$\mathbf{H = [M_1 - M_2 / M_1 - M_0] \times 100}$$

M_0 : masse en (g) de la boîte de Pétri vide et de son couvercle ;

M_1 : masse en (g) de la boîte de Pétri, de son couvercle et de la prise d'essai avant déshydratation ;

M_2 : masse en (g) de la boîte de Pétri, de son couvercle et de la prise d'essai après la déshydratation.

II.2.2. Dosage des cendres totales

Les cendres correspondent au résidu restant après l'incinération de la matière organique dans les aliments (HARBERS, 1998).

- **Principe**

Concernant les farines de blé tendre et de riz, nous avons adopté la norme AFNOR NFV03-720 de décembre 1981 avec une incinération à 900°C et la norme AFNOR NFV03-760 de décembre 1981 pour la farine de féverole, à 550°C (AFNOR, 1991).

- **Mode opératoire**

La méthode consiste à réaliser une incinération d'une prise d'essai de $3 \pm 0,001$ g de farine pendant 3 heures dans un four à moufle de marque Heraeus M110 (annexe 2), jusqu'à la combustion totale de la matière organique et l'obtention d'un résidu minéral ayant un poids constant.

• Expression des résultats

Le taux de cendres totales (C) exprimé en g pour 100 g de matière sèche (MS) est égal :

$$C = [100 \cdot P_1 / P_0] \times [100 / (100 - H)]$$

Avec :

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

P_1 : Masse de résidu après incinération (g) ;

H : Teneur en eau de l'échantillon (%).

II.2.3. Dosage des protéines totales

La détermination de la quantité des protéines totales existantes dans les différents types de farines permet d'apprécier leurs qualités.

• Principe

La teneur en azote total d'une farine est déterminée selon la norme AFNOR N.F. V03-050 de septembre 1970 (AFNOR, 1991) par la méthode de KJELDAHL. Ensuite, cette teneur est convertie en protéines totales en appliquant un facteur de conversion qui est de 6,25 pour la farine de blé tendre (AFNOR, 1991) et de 5,70 pour le riz et les légumes secs (BAR, 1995 ; AFNOR, 1991).

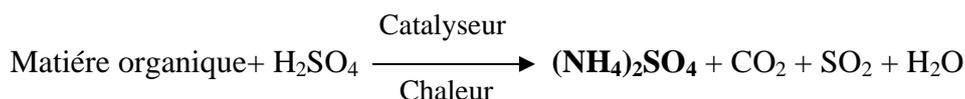
• Mode opératoire

Le principe de la méthode consiste en une minéralisation à chaud de la farine (1g) par l'acide sulfurique concentré. L'azote minéralisé se trouve alors sous forme de sulfate d'ammonium qui sera déplacé par la lessive de soude ; l'ammoniac produit est titré par de l'acide sulfurique 0,1 N. Les trois étapes sont les suivantes:

a. Minéralisation

La minéralisation est effectuée pendant 2 heures dans un minéralisateur de marque Gerhardt bonn (annexe 2) à l'aide d'un excès d'acide sulfurique H_2SO_4 (96%, $d=1,84$) concentré et chaud ($T^\circ=420^\circ C$), en présence d'un mélange de catalyseurs (sulfate de potassium : K_2SO_4 et sulfate de cuivre : $CuSO_4$). Elle se poursuit jusqu'à la décoloration complète du contenu des matras. Au cours de cette étape, l'acide sulfurique est partiellement décomposé et réduit en SO_2 et SO_3 qui forment des fumées blanches irritantes et toxiques.

L'azote total est donc obtenu sous la forme minérale NH_4 (ammonium):



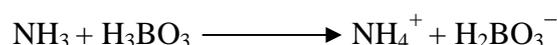
b. Distillation

Pour transformer les ions ammonium (NH_4^+) du minéralisât en ammoniac (NH_3), on doit l'alcaliniser ; pour cela on utilise un large excès de base forte : la lessive de soude NaOH à 30%, afin de changer le pH acide en un pH basique. Cette opération est réalisée dans un distillateur de marque Gerhardt (annexe 2) Ainsi, le minéralisât est tout d'abord neutralisé puis alcalinisé. On a alors :



Au cours de la distillation, l'ammoniac libéré (NH_3) est entraîné par les vapeurs d'eau, condensé, puis récupéré dans l'acide borique H_3BO_3 (4%) en présence d'un indicateur coloré (rouge de méthyle).

L'acide borique va retenir l'ammoniac (NH_3) sous sa forme acide (NH_4^+), comme suit :



c. Titration

Elle est effectuée aussi rapidement que possible, une fois la distillation terminée en s'assurant que la température du distillat ne dépasse pas 25°C pour éviter les pertes d'ammoniac. L'ammoniac récupéré est titré avec une solution de d'acide sulfurique à 0,1N, jusqu'au virage de la couleur jaune au rose-violet. Cette opération est réalisée manuellement à l'aide d'une burette de titration (annexe 2).

- **Expression des résultats**

La teneur en azote total (**A**) exprimée en g pour 100 g de MS est égale :

$$\boxed{\mathbf{A = [N \cdot 14 \cdot D \cdot V \cdot 100 / P_0 \cdot 1000] \times [100 / (100 - H)]}}$$

Avec :

N : Normalité de l'acide sulfurique titrant ;

14 : Masse d'un atome gramme d'azote ;

D : Coefficient de dilution de l'échantillon ;

V : Volume de l'acide sulfurique utilisé pour la titration (ml) ;

P₀ : Masse de la prise d'essai (g) ;

H : Teneur en eau de l'échantillon (%).

La teneur en protéines (**P**) est approchée en multipliant la teneur en azote total (**A**) par un facteur de conversion approprié (**K**), qui est de 6,25 pour la farine de blé tendre (AFNOR, 1991) et de 5,70 pour le riz et les légumes secs (BAR, 1995 ; AFNOR, 1991). Le résultat exprimé en g pour 100 g de matière sèche est donné par la formule suivante :

$$P = A \times K$$

II.2.4. Dosage des matières grasses totales

La teneur en matières grasses totales de nos trois farines est déterminée selon la FAO (1997), avec l'appareil SOXTEC HT (annexe 2). Il comprend deux compartiments principaux : l'unité d'extraction 1043 et le module thermostat 1044 (bain d'huile).

- **Principe**

Le principe de cette méthode consiste à réaliser une extraction de la matière grasse par un solvant organique "hexane" dans l'unité d'extraction en deux phases. Premièrement, l'échantillon est immergé dans le solvant en ébullition et la plupart des matières solubles sont extraites. En deuxième étape, cet échantillon placé au-dessus du solvant est rincé par ses vapeurs. Après l'extraction, on procède à l'évaporation du solvant puis, sa récupération en balayant le système avec de l'air provenant de module thermostat.

- **Mode opératoire**

Après le remplissage de module thermostat en l'huile appropriée, et le réglage de la température correspondante à l'hexane (140°C), une prise d'essai de 3g de farine est placée dans des cartouches tarées, ces dernières sont mises dans des nacelles métalliques contenant le solvant (50 ml) et qui sont préalablement pesées vide, l'ensemble des cartouches et des nacelles sont installées dans l'unité d'extraction. Laisser l'opération d'extraction se dérouler pendant 1 heure du temps, puis, lancer l'étape d'évaporation pendant 30 min. Après rinçage des farines, et lorsque la presque totalité du solvant est récupérée, libérer les nacelles contenant le résidu lipidique et encore une fois faire leurs pesés.

- **Expression des résultats**

La teneur en matières grasses totales (**MG**) exprimée en % de la MS est égale:

$$MG = [100 \cdot P_1 / P_0] \times [100 / (100 - H)]$$

Avec :

P₀ : Masse de la prise d'essai (g) ;

P₁ : Masse du résidu lipidique après extraction (g) ;

H : Teneur en eau de l'échantillon (%).

II.2.5. Détermination des glucides totaux

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

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

Avec :

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

P : Teneur en protéines totales (% de MS) ;

MG : Teneur en matière grasses totales (% de MS).

III. CARACTERISATION RHEOLOGIQUE DES PATES PAR L'ALVEOGRAPHIE CHOPIN

Selon FEILLET (2000), l'intérêt de cette mesure réside dans la similitude des déformations observées avec celles qui s'exercent au cours de la formation et l'expansion des alvéoles de gaz au sein de la pâte pendant la fermentation, sous la pression de gaz carbonique et la cuisson.

• Principe

Ce test fait l'objet de la norme NF ISO 5530-4, intitulée "Farine de blé tendre- Caractéristiques physiques des pâtes - Détermination des caractéristiques rhéologiques au moyen de l'Alvéographe" (LECOMTE, 2005).

L'Alvéographe Chopin (figure 06) est l'appareil le plus utilisé pour l'appréciation de la force boulangère d'une farine. C'est une analyse essentielle en matière de qualité technologique d'une pâte, qui consiste à mesurer ses capacités de résistance et d'extensibilité.

Le principe de la mesure consiste à former une bulle en insufflant de l'air sous une pression donnée à l'intérieur de la pâte, jusqu'à sa rupture (TAUPIER-LETAGE, 2005).



Figure 06. Appareil d'Alvéographe Chopin (I.N.A.T.A-A, 2014)

▪ Type des pâtes testées par l'Alvéographe Chopin

Au niveau de notre travail, nous avons réalisé la caractérisation des propriétés boulangères pour les pâtes suivantes :

1. *la pâte du témoin de blé tendre.* Cette dernière est considérée comme la référence qui devrait présenter les meilleures caractéristiques alvéographiques (G, W et P/L) auxquelles seront comparées celles des pâtes sans gluten testées ;

2. *Les matières premières exemptes en gluten* (farine de riz (FR) et de fève (FF)), *la formule riz-fèves sans améliorants* (FRF) et *la formule riz-fèves avec améliorants* donnant le meilleur *Vsp*, en vue de les caractériser

▪ Détermination de la quantité d'eau à ajouter

Pour le test alvéographique, Il faut impérativement travailler sur une farine dont on connaît sa teneur en eau (l'humidité), pour ajuster précisément la quantité d'eau à ajouter.

La norme NF ISO 5530-4 impose une hydratation de 50% pour une farine dont l'humidité est de 15% (soit 125g d'eau ajoutées pour 250 g de farine de blé tendre) (DEL FRATE, 2005).

La recherche des propriétés boulangères de pâtes à base de farine de blé tendre et de formules sans gluten n'a pas permis l'application stricte de cette norme (NF ISO 5530-4), puisque, toutes les farines ne contiennent pas forcément 15% d'eau. Pour cela, nous avons travaillé comme suit :

1. *Pour la farine témoin de blé tendre,* la quantité d'eau ajoutée est déterminée à partir d'un tableau comprend des valeurs d'humidité et la masse d'eau à ajouter correspondante.

2. Pour les farines exemptes en gluten (FR et FF) et la formule testée (FRF), les taux d'hydratation ont été fixés sur la base des essais préliminaires à l'alvéographe Chopin ayant donné les meilleurs alvéogrammes.

- **Mode opératoire**

La pâte destinée à la mesure rhéologique avec l'Alvéographe Chopin a été préparée avec 250 g de farine (soit de blé tendre ou de la formule riz-féverole), additionnés d'une quantité d'eau distillée salée (25%) dépend de l'humidité de chaque farine, mais sans ajout de la levure boulangère. Ensuite, ces ingrédients sont pétris dans un mini-pétrin intégré à l'appareil dans des conditions rigoureuses avec une température de 25°C, pendant 8 min. Après son extraction, on prélève par extrusion 5 morceaux de pâte qui sont par la suite lubrifiés avec de l'huile de paraffine, puis, laminés 7 fois à l'aide d'un rouleau par des mouvements « de va et vient » sur un plateau rectangulaire. A l'aide d'un emporte-pièce spécifique, on découpe ces pâtons en éprouvettes circulaires qui sont laissées relaxer 20 min dans la chambre de repos de l'Alvéographe Chopin à une température de 24°C.

Après ce temps de repos, on arrive à l'étape la plus spectaculaire « la réalisation de la bulle ». Chaque pâton est déposé sur la platine de l'alvéographe et un système pneumatique insuffle de l'air en dessous. Le pâton gonfle et forme une bulle. Pendant le gonflement, l'alvéographe enregistre les variations de pression « P » s'exerçant sur les parois internes de cette bulle, jusqu'à éclatement. On obtient ainsi 5 alvéogrammes (un par pâton), dont on fait une moyenne pour obtenir un seul pour chaque type de farine.

La figure 07 indique les étapes de développement de la pâte pendant l'analyse alvéographique (DEL FRATE et STEPHAN, 2005).

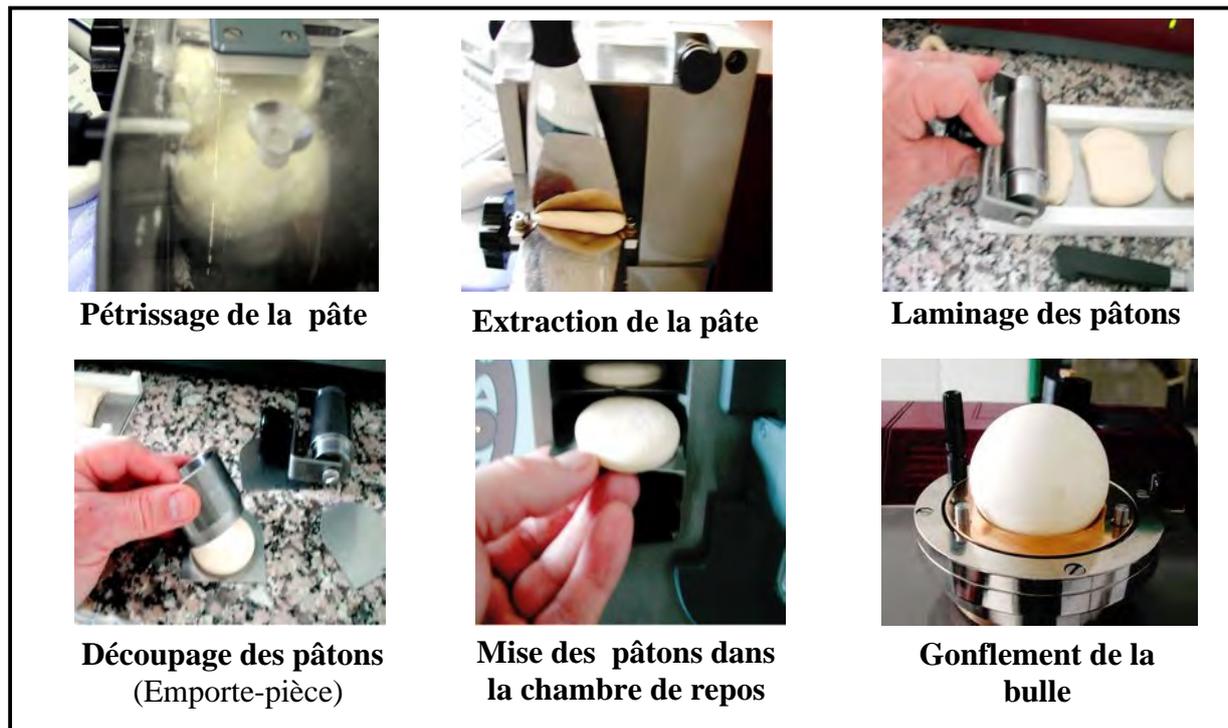


Figure 07. Etapes de développement de la pâte pendant l'analyse alvéographique (DEL FRATE et STEPHAN, 2005)

- **Expression des résultats**

Selon BRANGER et *al.*, (2007), l'alvéogramme représentant la courbe standard obtenue par l'Alvéographe Chopin, indique l'évolution de la pression d'air retenue par la bulle en fonction du temps (figure 08).

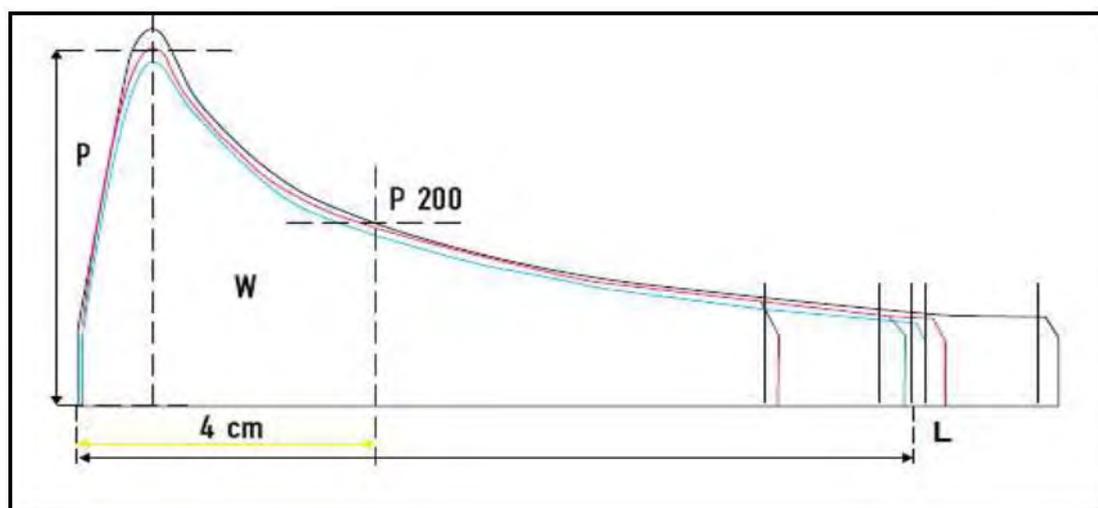


Figure 08. Alvéogramme type d'une pâte à base de farine de blé tendre (DEL FRATE et STEPHAN, 2005).

La lecture de cet alvéogramme se fait à travers les paramètres suivants (DOUMANDJI *et al.*, 2003 ; VIERLING, 2003 ; LECOMTE, 2005 ; JEANTET *et al.*, 2007) :

- **W** : Il vient du mot anglais "Work" et désigne le travail nécessaire pour déformer la pâte. Il donne une indication sur la force boulangère de la farine. Sa valeur est proportionnelle à la surface (S) de la courbe obtenue selon l'équation suivante :

$$\mathbf{W(joules) = 6,54 \times S}$$

Selon TAUPIER-LETAGE (2005), les farines boulangères artisanales présentent un $W=150 - 220$, alors que, les farines boulangères industrielles ont un $W= 220-280$.

- **P** : Correspond à la pression maximale d'air insufflé nécessaire à la déformation de la bulle de la pâte. Il caractérise *la ténacité* de celle-ci et son pouvoir d'absorption d'eau. Elle est proportionnelle à la hauteur de la courbe et est donnée en mm sur l'axe des ordonnées de l'alvéogramme.

- **L** : Ce paramètre correspond à *l'extensibilité* de la pâte depuis le début du gonflement jusqu'à éclatement de la bulle. Elle est proportionnelle à la longueur de la courbe et est donnée en mm sur l'axe des abscisses de l'alvéogramme.

- **G** : Il se rapporte au gonflement qui est la quantité d'air insufflée à l'intérieur de la pâte évolue en fonction de l'extensibilité et la rétention gazeuse. Il est exprimé en cm^3 et est donné par l'équation suivante :

$$\mathbf{G (cm^3) = 2,226 \times \sqrt{L}}$$

- **P/L** : Ce rapport appelé "rapport de configuration de la courbe" ou "rapport de ténacité au gonflement". Il traduit l'équilibre ou le déséquilibre dans les propriétés physiques de la pâte, donc entre la ténacité et l'extensibilité de celle-ci.

Selon la forme de la courbe, il est possible de préjuger de la ténacité et de l'extensibilité d'une farine. Plus le rapport P/L est élevé (courbe plus haute que longue), plus la farine sera tenace. Par contre, si ce rapport est plus faible (courbe plus longue que haute), plus la farine sera extensible. Le "W", quant à lui, peut être identique dans ces deux cas.

- **Ie** : Correspond à l'Indice d'Elasticité de la courbe. Il est donné par l'équation suivante :

$$\mathbf{Ie = (P_{200}/P) \times 100}$$

Où : **P₂₀₀** : Pression à 4 cm du début de la courbe.

IV. FORMULATION SANS GLUTEN ETUDIEE

Il est connu que le seul traitement de la maladie cœliaque réside dans un régime sans gluten (ROUQUETTE, 2002). Il fallait donc de mettre à la disposition de ces malades un aliment diététique (léger et nutritif) et appétant. Une enquête effectuée par BENATALLAH (2009), montre que le pain venait en tête de listes des produits réclamés par ces malades. Pour sa préparation à base des ingrédients sans gluten, une des formules en cours d'étude au niveau de l'équipe de Transformation et Elaboration de Produits Agro-Alimentaires (T.E.P.A.) de l'I.N.A.T.A-A a été proposée. Il s'agit d'une formule à base de riz et de fèveole (FRF) dont le mélange de farines se fait respectivement selon un rapport massique de 2/1. D'un point de vue nutritionnel, cette formule proposée est basée sur les avantages connus de la supplémentation céréales-légumes secs (STRIGLER, 2011). Du côté technologique, les problèmes auxquels il fallait penser étaient essentiellement la faisabilité et l'acceptation des produits fabriqués par les consommateurs. En effet, l'utilisation de riz à lui seul donnerait des produits insipides et de couleur blanchâtre. L'adjonction de fèveole comme légumes secs à la formule l'enrichirait en protéines et laisserait espérer de meilleures propriétés rhéologiques des pâtes sans gluten résultantes en vue d'une panification.

Parmi les projets réalisés au niveau de notre équipe T.E.P.A de l'I.N.A.T.A-A, pour la formulation du pain sans gluten à base de la FRF améliorée par les hydrocolloïdes, ceux de BENATALLAH (2009) et de GHERAIRIA (2011). Elles ont étudiées respectivement l'effet de l'*HPMC* et de *Xanthane* sur la qualité boulangère du pain sans gluten pour les malades cœliaques algériens. Selon leurs résultats obtenus, nous avons trouvé qu'il est nécessaire de faire un travail complémentaire et donc d'étudier l'effet de la combinaison de ces deux hydrocolloïdes (*HPMC-Xanthane*) pour voir s'il y a amélioration de la légèreté et de la texture du pain sans gluten fabriqué à base de la même formule (FRF) et si ces deux améliorants travaillent en synergie.

Pour confirmer nos résultats concernant la fabrication des pains sans gluten à base de la formule riz-fèveole améliorée par les deux hydrocolloïdes : l'*HPMC* et la gomme de *Xanthane*, on doit les comparer avec des pains témoins préparés à partir de la farine de blé tendre.

V. PLAN D'EXPERIENCE

D'après GOUPY(2000), la méthode des plans d'expérience est une technique d'organisation optimale des expériences de manière à obtenir un maximum d'informations en un minimum d'essais avec la meilleure précision possible.

Dans cette investigation, nous avons recherché de fabriquer un pain sans gluten à base de la formule riz- féverole (FRF) améliorée par deux hydrocolloïdes : l'HPMC et la gomme de Xanthane, pour les malades cœliaques algériens, dont les caractéristiques finales se rapprocheraient le plus de celles des pains témoins à base de farine de blé tendre.

Cette approche a été faite par la réalisation d'un plan d'expérience central composite (CCD) à deux variables : la teneur en HPMC (X_1) et la teneur en Xanthane (X_2).

Le modèle étudié étant un modèle à deux facteurs, il permet d'estimer les valeurs des coefficients de modèles du second degré traduisant la relation de cause à effet entre les facteurs retenus (X_1 et X_2) et la réponse étudiée (Y : volume spécifique). Ce plan nécessite la réalisation de huit expériences (quatre points factoriels et quatre axiaux) représentant des combinaisons de trois niveaux attribués à chacun des deux facteurs tout en prenant les réponses correspondantes. Cinq points centraux (00) ont été ajoutés pour appuyer ce plan d'expériences ; ce qui donne un total de 13 essais.

La validité du modèle obtenu est vérifiée en déterminant les coefficients de corrélation multiple (r) et r ajusté. Lorsque r est large, la régression a été alors expliquée pour une large proportion de variabilité totale des valeurs observées de Y , ce qui favorise le modèle.

V.1. Modèle mathématique

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2. Il traduisant la dépendance de la réponse étudiée Y en fonction des deux variables codées (X_1 et X_2) s'écrit :

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

Avec :

Y : la réponse étudiée ;

X_1, X_2 : les formes codées des variables explicatives ;

b_0 : la constante du modèle ;

b_1, b_2 : les coefficients linéaires (l'effet principal de chaque variable) ;

b_{11}, b_{22} : les coefficients quadratiques (si l'une des deux variables donne un maximum ou un minimum dans le domaine expérimental) ;

b_{12} : le coefficient d'interaction (l'interaction entre les deux variables).

V.2. Niveaux des variables

Nous avons attribué pour chaque variable codée (X_i) trois niveaux, **-1, 0 et +1**, Les $\pm \alpha$ représentent les valeurs extrêmes (max, min). Pour que le plan soit orthogonal et rotatable, la valeur de α a été fixée par le logiciel à 1,414.

V.3. Représentation du plan d'expérience central composite à deux variables

On peut donner par une figure les domaines d'étude et les points d'expériences, qu'ils ont pour coordonnées les niveaux bas et les niveaux hauts des facteurs (figure 09) représentant ainsi un plan central composite à deux facteurs.

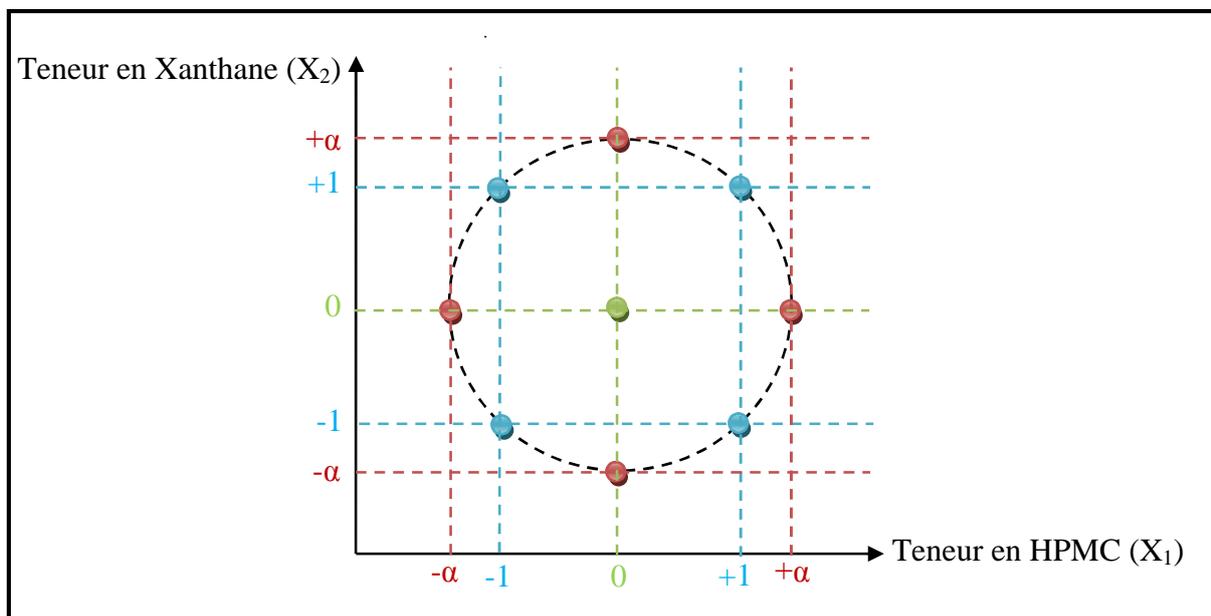


Figure 09. Représentation graphique du plan d'expérience central composite à deux facteurs (X_1 et X_2) et trois niveaux (-1,0 et +1) avec les valeurs extrêmes $\pm \alpha$

Ce plan d'expérience central composite à deux variables est composé de :

- *Points factoriels* : également appelés points du cube, ils sont codés -1 et +1 (en bleu) ;
- *Points axiaux* : également appelés étoiles, sont à $(+\alpha, 0)$, $(-\alpha, 0)$, $(0, +\alpha)$, $(0, -\alpha)$ (en rouge) ;
- *Points centraux* : le central du plan est à $(0,0)$ (en vert).

Le nombre total d'essais n à réaliser est la somme des essais de ces trois parties, du plan factoriel (n_f), du plan en étoile (n_ϵ) et les essais au centre (n_0). Donc : $n = n_f + n_\epsilon + n_0$.

On peut également représenter ce plan par des tableaux, en utilisant soit les grandeurs habituelles ou légales, soit les grandeurs codées (X_1 et X_2). Avec les grandeurs codées, le tableau prend le nom de *plan d'expériences* ou de *matrice d'expériences* (tableau 07).

Tableau 07. Matrice d'expérience du plan composite orthogonal centré à deux facteurs

Essais	Matrice	
	X_1 (Teneur en HPMC)	X_2 (Teneur en Xanthane)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1.414	0
6	+1.414	0
7	0	-1.414
8	0	+1.414
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

La relation entre les valeurs codées (X_i) des variables entrées et ses valeurs réelles (A_i) (tableau 07 et 08) est décrite par l'équation suivante :

$$X_i = (A_i - A_0) / \Delta A$$

Avec :

X_i : valeur codée du facteur ;

A_i : valeur réelle de ce facteur ;

A_0 : valeur réelle du même facteur au niveau central ;

ΔA : pas entre le niveau central et les niveaux ± 1 .

V.4. Détermination des variables réelles

En premier lieu, nous avons réalisés un plan d'expérience central composite à 3 facteurs (X_1 : taux d'hydratation, X_2 : teneur en HPMC et X_3 : teneur en Xanthane) et à cinq niveaux. Après traitement des résultats, nous avons obtenus un manque d'ajustement du modèle, mais nous avons conclu que plus le taux d'hydratation est élevé mieux que le volume spécifique du pain sans gluten obtenu. Donc, nous avons fixés la teneur en eau de notre formule sans gluten (FRF) à 115 ml. Ensuite, nous avons réalisés un plan d'expérience central composite à deux facteurs, X_1 : teneur en HPMC et X_2 : teneur en Xanthane et à cinq niveaux.

V.4.1. Teneur en HPMC

En 2004, SIVARAMAKRISHNAN *et al.*, ont étudié les propriétés rhéologiques de pâtes à pain à base de la farine du riz incorporée de 1,5 - 3,0 et 4,5% d'HPMC. Ils ont obtenu des pains réussis avec des volumes d'expansion optima.

Egalement, BENATALLAH (2009) a étudié l'effet d'addition de l'HPMC avec un intervalle de 0 - 4,5% sur la qualité du pain sans gluten.

Plus récemment, des études faites par BLANCO *et al.* (2011), ont montré que l'addition de 2% d'HPMC à la farine du riz donne lieu à des pains développés et bien alvéolés, en comparant avec le témoin à base de blé tendre.

Dans le cadre de notre étude, les bornes de l'intervalle concernant cette variable "HPMC" ont été choisies égales à **0** et **4,5%** à partir des résultats de la littérature,

V.4.2. Teneur en Xanthane

Contrairement à l'HPMC, les concentrations de Xanthane les plus couramment utilisées sont faibles (inférieures à 2%) (SHUTTI *et al.*, 2009 ; DEMIRKESEN *et al.*, 2010).

En 2011, GHERAIRIA a étudié l'effet d'utilisation de la gomme de Xanthane comme améliorant sur les propriétés boulangère du pain sans gluten. Les teneurs utilisés en ce hydrocolloïde sont comprise entre 0 et 1%.

D'après la littérature, les bornes de l'intervalle de la gomme de Xanthane ont été choisies égales à **0** et **1%**, pour notre expérimentation.

Plus récemment, HAGER et ARENDT (2013), ont étudié l'influence de HPMC, Xanthane et de leur combinaison sur le volume spécifique et la structure de mie des pains à base du riz et de maïs. L'intervalle choisi est de **0** et **2%** de HPMC/Xanthane. Ils ont conclu

que ces deux hydrocolloïdes sont des ingrédients potentiels, conférant aux pains sans gluten ses meilleures caractéristiques similaires à celles des pains témoins à base de blé tendre.

Selon les travaux réalisés au niveau de l’I.N.A.T.A-A et ceux donnés dans la littérature, nous avons essayé d’élargir l’intervalle de deux facteurs (X_1 : HPMC et X_2 : Xanthane) pour détecter s’il y a une synergie entre ces hydrocolloïdes et leurs effets sur la qualité boulangère du pain sans gluten.

Le tableau 08 représente les valeurs calculées des variables codées (X_1 et X_2) correspondant aux cinq niveaux attribués réels utilisées dans notre plan d’expérience central composite à 2 facteurs.

Tableau 08. Relation entre les niveaux codés et les niveaux réels utilisés dans le plan d’expérience central composite à 2 facteurs

Facteurs	Niveaux codés				
	-1,414	-1	0	+1	+1,414
X_1 : HPMC (g pour 100 g de FRF)	0	0,66	2,25	3,84	4,5
X_2 : Xanthane (g pour 100 g de FRF)	0	0,14	0,5	0,85	1

FRF : Formule Riz-Fèverole.

VI. TEST DE PANIFICATION

Dans le cadre de notre étude, les essais de panification ont été réalisés avec trois types de farine, l’une témoin à base de blé tendre et les deux autres incluent dans une formule sans gluten à base de la farine de riz et de féverole (FRF).

Le diagramme de fabrication adopté (figure 10) comprend les principales étapes de panification. Il consiste à mélanger et pétrir les différents ingrédients avec les proportions appropriées, mise en forme de la pâte, fermentation puis cuisson.

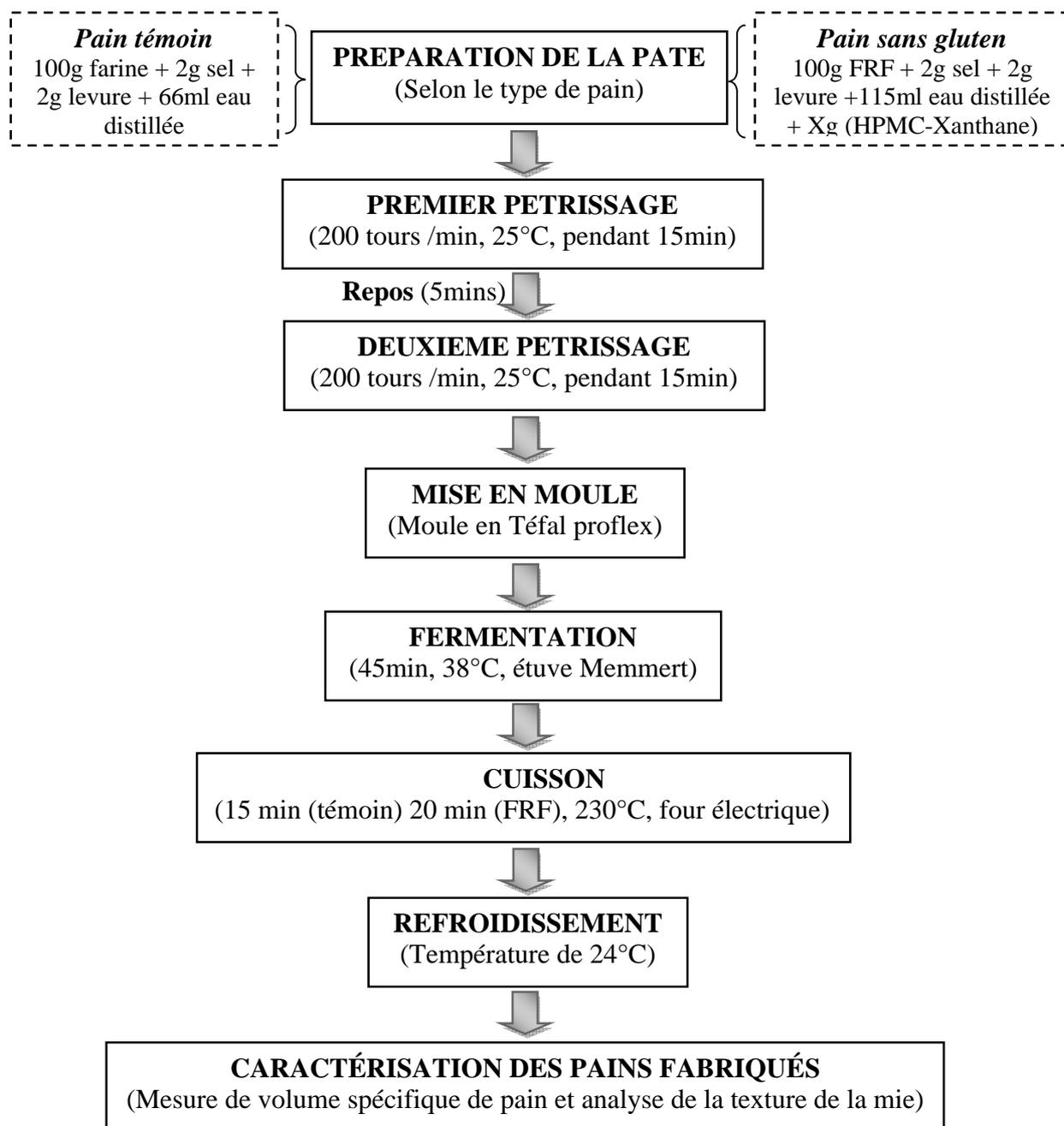


Figure 10. Diagramme de fabrication des pains témoin et des pains sans gluten à base de la formule riz-féverole

VI.1. Préparation de la pâte

La préparation de la pâte est faite en deux sortes selon le type de pain :

○ Pour *le pain témoin*, 100g de farine de blé tendre est additionnée de 2g de sel et de levure boulangère (*Saccharomyces cerevisiae*) chacune, avec une quantité d'eau distillée de 66ml, cette valeur d'hydratation est fixée à base des essais préliminaires donnant le meilleur volume spécifique de pain.

○ Pour **le pain sans gluten**, à 100g de la formule riz- féverole (2/1) on ajoute 2g de sel et de levure, avec des teneurs en améliorants l'HPMC et la gomme de Xanthane varient selon le plan d'expérience central composite étudié. Dans ce cas, le volume d'eau nécessaire pour la formation de la pâte est fixée à 115ml, en fonction d'un premier plan d'expérience central composite à trois facteur, montrant que plus on ajoute d'eau aux ingrédients sans gluten, mieux que le volume spécifique des pains fabriqués.

VI.2. Pétrissage

Pour les deux types de pain, les ingrédients sont pétris à la température ambiante (25°C), en deux temps de 15 min chacun séparés par un repos de 5 min, dans un mélangeur à trois doigts de marque HEIDOLPH type RZR 2020 (Allemagne), avec une vitesse de 200 tours/min (figure 11).



Figure 11. Mélangeur à trois doigts (I.N.A.T.A-A, 2014)

VI.3. Mise en moule

À la fin de pétrissage, on obtient une pâte homogène et bien pétrie, qui est par la suite divisée en 6 pâtons égaux de 70g chacun. Ces derniers sont mis dans un moule sans couvercle, en Téflon Proflex, souple, de dimensions (10,5 x 5,3 x 4 cm³) et d'une capacité de 222,6 cm³ (figure12).



Figure 12. Moule en Téflon Proflex (I.N.A.T.A-A, 2014)

VI.4. Fermentation

La fermentation des pâtons se fait à une température de 38°C pendant 45 min en présence de buée, dans une étuve de marque MEMMERT, sa température maximale est de 225°C (figure13).



Figure 13. Etuve pour fermentation (I.N.A.T.A-A, 2014)

VI.5. Cuisson

La cuisson a été réalisée dans un four électrique de marque SAMSUNG, à une température allant de 50°C à 250°C, doté d'une lampe électrique et d'une minuterie (figure14). Dans le but d'assurer une atmosphère humide pour éviter le dessèchement rapide des surfaces des pâtons, un récipient contenant de l'eau bouillante a été placé au fond du four.



Figure 14. Four électrique (I.N.A.T.A-A, 2014)

Le temps de cuisson a été fixé par une observation visuelle jusqu'à l'apparition de la couleur marron-dorée de la surface des pâtons (figure 15). Donc, pour le pain témoin, la cuisson est faite à 230°C pendant 14min, tandis que les pâtons sans gluten prennent plus du temps environ 20min pour la même température.



Figure 15. Observation visuelle des pâtons au cours de la cuisson.

VI.6. Refroidissement

Les pains cuits sont refroidis à une température ambiante (24°C) pendant un temps suffisant (figure 16), en vue de les caractériser, par mesure de leurs volumes spécifiques et également par analyse de la texture de la mie par analyse d'image.



Figure 16. Refroidissement des pâtons cuits à l'air ambiant.

VII. APPRECIATION DE LA QUALITE DES PAINS OBTENUS

Dans notre étude, la caractérisation des pains fabriqués s'est faite par la :

1. Mesure de leurs volumes spécifiques (cm^3/g);
2. Analyse de la texture de la mie par morphologie mathématique.

VII.1. Mesure des volumes spécifiques des pains

Selon HAGER et K. ARENDT (2013), le volume spécifique est l'une des caractéristiques visuelles la plus importante de pains, influençant fortement le choix du

consommateur. Par conséquent, c'est un paramètre clé examiné pour évaluer la qualité du pain.

- **Principe**

Le volume spécifique des pains (cm^3/g) est déterminé selon la méthode décrite par BENATALLAH (2009). La mesure se fait indirectement par déplacement de petites particules solides sphériques (*Semsem*) de volume spécifique connu dans un récipient où le pain fabriqué est placé.

- **Mode opératoire**

Prendre un récipient de volume plus grand que celui des pains et le remplir à ras avec les particules sphériques de volume spécifique connu ($0,72 \text{ cm}^3/\text{g}$). Pour la mesure en elle même, on vide à moitié ce récipient de son contenu en *semsem*, on place le pain et on verse dessus le reste de ces grains sphériques. Après arasement de la surface de récipient de mesure, on récupère le *semsem* en excès, ensuite, on le pèse. Son volume correspond à celui de pain.

- **Expression des résultats**

Le volume spécifique de pain (V_{sp}) exprimé en cm^3/g est le rapport de son volume (V) et de sa masse (M) :

$$V_{sp} (\text{cm}^3/\text{g}) = V/M$$

Avec:

$$V : \text{Volume de pain (cm}^3) = V_{\text{semsem en excès}} \times 0,72.$$

VII.2. Analyse de la texture de la mie par morphologie mathématique

L'analyse de texture a pour objectif la quantification de la distribution spatiale ainsi que les variations locales de niveaux de gris. Selon SOILLE (2003), l'analyse granulométrique en niveaux de gris issue du domaine de la morphologie mathématique permet l'interprétation directe de la taille et la de forme des objets observés.

- **Principe de la granulométrie en niveaux de gris**

Le principe de base de la morphologie mathématique est de transformer l'image au travers d'un masque de géométrie connue appelé élément structurant que l'on déplace successivement de façon à ce que son origine passe par toutes les positions de cette image. Pour chaque position, le niveau de gris du pixel central est modifié en fonction des niveaux de gris de ses voisins recouverts par l'élément structurant. La taille et la forme de ce dernier sont choisies pour mettre en évidence certaines caractéristiques de l'image. Deux opérations

fondamentales qui sont l'érosion et la dilatation sont alors appliquées sur les images. L'érosion consiste à donner au pixel central la valeur minimale en niveau de gris observée dans la fenêtre définie par l'élément structurant et la dilatation, on lui attribue la valeur maximale (DEVAUX *et al.*, 2009).

• Mode opératoire

Après refroidissement à la température ambiante, les échantillons sont découpés au milieu par une lame fine pour la prise d'image par un scanner informatique (type EPSON scan). Les tranches de pain sont placées au centre du scanner et sont recouvertes d'une boîte noire afin d'optimiser le contraste entre le fond noir et les tranches claires.

Les images sont prises avec une résolution de 300 dpi. Elles sont enregistrées en format TIFF non compressé. Le traitement d'images se fait par le logiciel *Granulomorphogui*, qui est une interface graphique développée sous *Matlab*.

❖ Traitement d'images

Le traitement des images scannées des tranches de pain comporte les étapes suivantes :

a. Conversion des images en niveau de gris : Toutes les images prises initialement en couleurs sont converties en niveaux de gris "échelle 8", Cette opération est obtenu sous *imageJ*. Chaque image est codée sous forme d'un tableau de chiffres correspondant aux niveaux de gris des pixels qui la constituent (figure 17). Une image pixélisée est constituée de petits éléments de forme carrée appelés pixels. Dans le cas des images monochromes, chacun des pixels possède sa propre teinte de niveau de gris qui sera codée informatiquement.

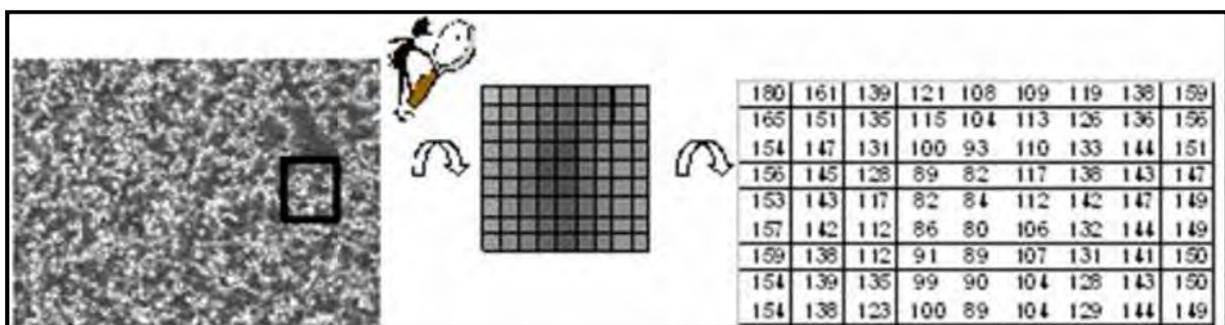


Figure 17. Principe de codage des intensités des niveaux de gris d'une image monochrome sous la forme d'un tableau chiffré (LASSOUED, 2005)

b. Sélection de la région d'intérêt : L'analyse granulométrique ne doit porter que sur la mie, appelée région d'intérêt, après l'élimination de l'épaisseur de la croûte et le fond noir.

c. Choix de l'élément structurant : L'élément structurant carré est caractérisé par la taille de son côté. Les alvéoles sont presque toutes fermées en l'utilisant. En pratique, les éléments structurants carrés permettent d'analyser les petites dimensions et c'est la raison pour laquelle on l'a choisi dans cette analyse (DEVAUX *et al.*, 2009).

d. Erosion et dilatation : n étapes d'érosions sont appliquées à la zone d'intérêt délimité de l'image. Le niveau de gris total diminue après l'application de chaque étape de cette opération, et les parois des alvéoles se modifient, donc, l'érosion assombrit une image. Pareillement, n étapes de dilations sont appliquées à la même région d'intérêt. Cette opération modifie les alvéoles de la mie suite à l'augmentant du niveau de gris total de l'image, la dilatation éclaircit une image. Le nombre d'étapes d'érosion et de dilatation est choisi en fonction de la texture des pâtons et de la résolution de l'image. En général, il correspond à la disparition complète de la texture ou d'objets dans l'image.

Dans notre cas, 25 étapes de dilatation et d'érosion ont été suffisantes pour la disparition totale des d'alvéoles de la mie de notre pain (figure 18).

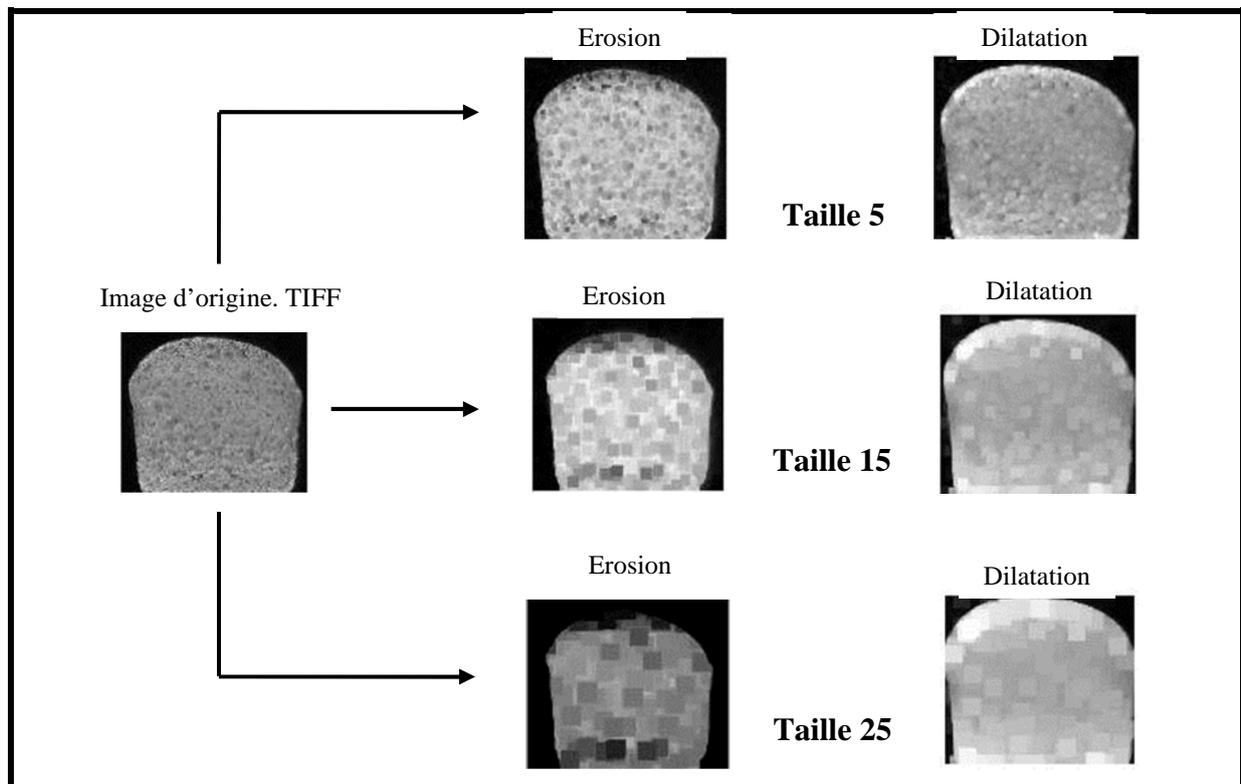


Figure 18. Exemple d'application d'étapes d'érosion et de dilatation de taille 5, 15 et 25 sur la région d'intérêt d'une tranche de pain fabriqué

• Expression des résultats

D'après DEVEAUX *et al.* (2005), il est possible de déduire des informations quantitatives sur la texture des images de mies (de type granulométrique) à partir de l'évolution de la somme des niveaux de gris à chaque étape d'érosion et de dilatation. La somme des niveaux de gris à chaque $i^{\text{ème}}$ étape de transformation correspond au volume de l'image V_i . Ce volume est fonction de la présence d'objets sombres (alvéoles) et clairs (parois des alvéoles) de l'image. L'évolution de V_i (figure 19) est fonction du nombre d'objets, de leurs dimensions et aussi de leur niveau de gris. C'est donc simultanément une caractéristique des distributions de taille et des niveaux de gris des objets d'une image.

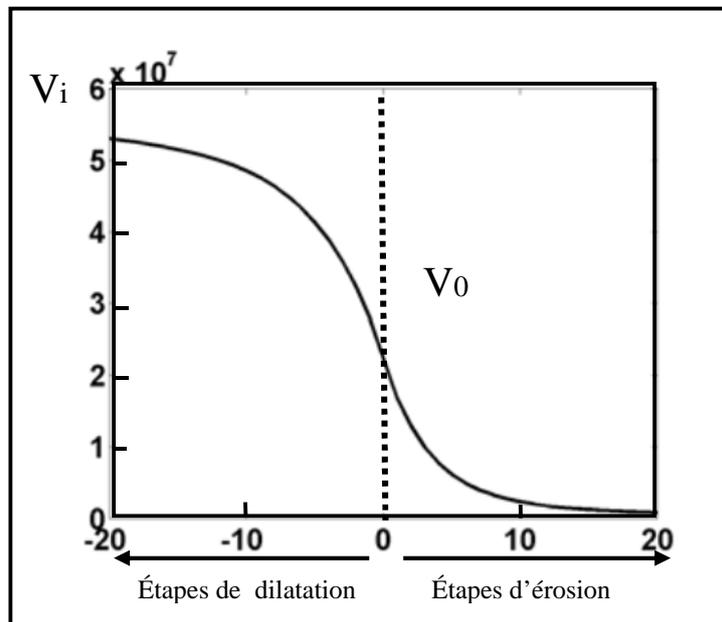


Figure 19. Courbe de décroissance de la somme des niveaux de gris selon les étapes de dilatations et d'érosions (LASSOUED, 2005)

La comparaison des courbes de texture de l'ensemble des images de mies scannées nécessite une étape de normalisation. Chacune des courbes dépend de la taille de la région d'intérêt considérée ainsi que de la somme des niveaux de gris initiale correspondante. La normalisation de chacune des deux parties de la courbe associées respectivement aux n étapes d'érosion et aux n étapes de dilatation est effectuée selon la formule suivante:

$$g_i = [V_i - V_f / V_0 - V_f] \times 100$$

Avec :

g_i : Volume normé de l'image à la $i^{\text{ème}}$ étape d'érosion ou de dilatation ;

V_0 : Volume (somme des niveaux de gris) de l'image initiale ;

V_i : Volume de l'image à la $i^{\text{ème}}$ étape d'érosion ou de dilatation ;

V_f : Volume de l'image à la $n^{\text{ème}}$ étape d'érosion ou de dilatation.

La courbe de texture granulométrique normalisée (évolution de g_i en fonction des n étapes d'érosion et de dilatation) exprime en pourcentage relatif les variations d'intensité observées entre l'image initiale et la $n^{\text{ème}}$ étape de transformation (figure 20). La partie gauche de cette courbe correspond à l'analyse des alvéoles (dilatation) et la partie droite à celle des parois des alvéoles (érosion). La présence de petites alvéoles provoque des variations de niveaux de gris plus fréquentes que les grandes alvéoles ce qui induit une texture visuelle plus fine.

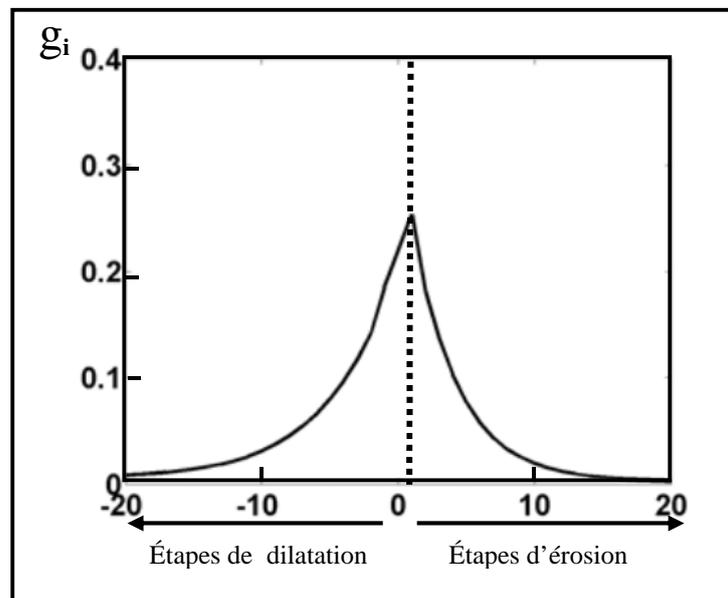


Figure 20. Courbe de texture granulométrique en niveaux de gris (LASSOUED, 2005)

Les courbes granulométriques sont tracées en fonction de la taille de l'élément structurant exprimée en pixel ou en μm . Des procédures d'analyse granulométrique en niveaux de gris ont été développées sous *Matlab* pour être appliquées à des collections d'images.

• **Classification des courbes par Analyse en Composantes Principales**

La classification des courbes de texture granulométrique en niveau de gris est réalisée par une technique d'analyse multidimensionnelle : l'Analyse en Composantes Principales (ACP), selon l'équation suivante (SCHWARTZ, 1993 ; DANZART, 1998) :

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^p X_{ik} U_{kj}$$

Avec :

C_{ij} : la valeur de la composante principale j pour le $i^{\text{ème}}$ individu ;

X_{ik} : la valeur de la $k^{\text{ème}}$ variable observée pour l'individu i ;

U_{kj} : la valeur du poids de la variable k dans la composante principale j .

VIII. CARACTERISATION SENSORIELLE DES PAINS

La qualité sensorielle de nos pains a été évaluée en appliquant *le test de classement par rang de Freidman* tels que décrit par WATTS *et al.* (1991).

Le jury se compose de neuf sujets de sexe masculin et féminin, enseignants et étudiants en post- graduation à l'Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaire (I.N.A.T.A-A.), Université Constantine 1. Des explications et des instructions ont été données aux dégustateurs avant le début du test.

➤ **Mode de présentation des échantillons**

Selon les attributs sensoriels choisis, le pain sera présenté entier (apparence extérieure) ou en tranche (texture, descriptions des alvéoles, critères gustatifs). Les différents échantillons (pain témoin du blé tendre, pain sans gluten de la FRF optimum et pain sans gluten de la FRF hors optimum) ont été présentés simultanément à chaque dégustateur, et il peut les goûter autant de fois qu'il le souhaite. Ces échantillons sont codés avec des numéros aléatoires à 3 chiffres. Le classement se fait individuellement sans communication entre les sujets, pour ne pas biaiser les résultats.

➤ **Questionnaire**

Nous avons demandés aux dégustateurs de classer ces échantillons codés en fonction de la préférence sur une fiche appropriée (annexe 1).

Egalement, ils doivent les classer par ordre d'intensité par remplissage d'un questionnaire contenant les descripteurs sensoriel pour le pain (tableau 09).

Tableau 09. Descripteurs sensoriels pour le pain

Couleur	- Brunissement de la croûte - Couleur de la mie
Aspect des pains	- Epaisseur de la croûte - Régularité alvéolaire
Texture	- Croustillance - Moelleux - Elasticité
Arôme	- Arôme de pain de blé - Arôme de torréfaction
Goût	- Salé - Amer - Acide - Sucré

IX. ANALYSE STATISTIQUE

De manière générale, les résultats obtenus dans ce travail correspondent à la moyenne de trois répétitions. Ces résultats sont exprimés sous forme de moyenne \pm écart type.

Les résultats sont traités à l'aide d'un logiciel statistique XLSTAT (2009). Le seuil de signification a été fixé à 0,05.

Le traitement statistique des plans d'expériences utilisés dans ce travail a été réalisé avec le logiciel de "Minitab 15". Le seuil de signification est fixé à $\alpha = 0,05$.

La valeur p permet de déterminer si un facteur est significatif ; en règle générale, cette composante est comparée à la valeur alpha de 0,05. Si la valeur de p est inférieure à 0,05, le facteur est significatif.

La validité du modèle est vérifiée en déterminant les coefficients de détermination R et R ajusté. L'analyse de variance (ANOVA) donne la statistique F de Fisher. En général, pour que les prédictions soient significatives, la valeur F observée doit être plus élevée que la valeur tabulée. Si elle est élevée, les variations des réponses mesurées sont bien dues aux variations des facteurs (GOUPY et CREIGNTON, 2006).

L'exploitation des courbes de texture granulométrique des niveaux de gris des pains a été faite par une technique d'analyse multidimensionnelle l'Analyse en Composante Principales (ACP). Cette méthode permet de décrire les informations contenues dans le tableau des données par la prise en considération des corrélations existantes entre les données.

Nos individus correspondent aux courbes de diminution des niveaux de gris et nos variables aux étapes de transformation (érosion-dilatation). L'opération de centrage des données est obtenue par la soustraction de l'individu moyen aux autres individus. Les composantes principales correspondant aux combinaisons linéaires des variables à l'origine sont classées par ordre décroissant par le pourcentage de la variance initiale qu'ils expliquent. Les courbes des cartes de ressemblance sont dessinées à partir des valeurs des composantes deux à deux. Sur ces courbes, des vecteurs appropriés permettent l'interprétation de la composante principale en accord avec les variations observées sur toutes les courbes (FOUCART 1982 ; SCHWARTZ 1993 ; DANZART 1998).

Le traitement des données pour le test de classement par rang est réalisé en se servant du test de Friedman et de tables statistiques pour un niveau de signification de 5%. Nous avons réalisés une analyse de variance (ANOVA) afin de déterminer s'il y a une différence significative entre les échantillons, puis, des tests à postériori ont été réalisés pour la détermination de la différence par paire.

Résultats et Discussion

I. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES FARINES

I.1. Distribution granulométrique des farines

La détermination de la distribution granulométrique des farines permet d'apprécier la finesse des particules sachant que celle-ci joue un rôle important sur la vitesse d'hydratation et la quantité d'eau absorbée (COLAS et THARRAULT, 1997 ; FEILLET, 2000).

Les résultats de la distribution granulométrique des trois farines étudiées dans ce travail sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10. Distribution granulométrique des farines destinées à la panification

Classes des fractions (μm)	Farine de blé tendre %	Farine de riz %	Farine de féverole %
≥ 200	$0,34 \pm 0,03$	$2,82 \pm 0,46$	$0,24 \pm 0,19$
] 150 - 200]	$20,79 \pm 1,21$	$33,75 \pm 0,80$	$22,16 \pm 1,25$
] 125 - 150]	$17,00 \pm 0,32$	$17,79 \pm 1,39$	$28,35 \pm 0,25$
] 100 - 125]	$15,28 \pm 0,23$	$13,34 \pm 0,51$	$21,51 \pm 0,56$
] 75 - 100]	$41,16 \pm 0,14$	$27,43 \pm 0,87$	$23,28 \pm 0,46$
<75	$5,12 \pm 0,92$	$4,66 \pm 0,49$	$3,84 \pm 0,12$
Total	99,69	99,86	99,38

Ces résultats montrent que nos trois farines présentent plus de 97 % des particules de dimension $< 200 \mu\text{m}$. Ces résultats concordent avec les exigences de la FAO (1996), pour qui, une farine panifiable, doit avoir une granulométrie inférieure à $200 \mu\text{m}$.

C'est la farine du blé tendre qui montre le plus de la fraction fine (41,16%) représentée par l'intervalle]75 - 100] μm , alors que les deux farines exemptes en gluten montrent des quantités moindres avec 27,43% pour le riz et 23,28% pour la féverole, pour le même intervalle.

Pour la farine du riz la majorité de la répartition est portée sur la classe] 150 - 200] μm avec 33,75%. Quand à la féverole, sa transformation en farine se distingue par une distribution plutôt équilibrée entre toutes les classes granulométrique inférieures à $200 \mu\text{m}$ et

supérieures à 75 μm , avec un pourcentage élevé (28,35%), présenté par la classe]125 - 150] μm .

D'après MELCION (2000), l'hétérogénéité dans la répartition des dimensions des particules des farines pourrait être expliquée par l'influence directe des opérations unitaires appliquées sur les grains entiers de céréales ou de légumes secs, tels que le broyage, la séparation, le mélange...

I.2. Composition biochimique des farines et de la formule étudiée

L'ensemble des résultats de la composition biochimique de nos trois farines ainsi que celle de la formule Riz-Féverole sont reportés dans le tableau 11.

Tableau 11. Composition biochimiques des farines et de la formule étudiée

		FBT	FR	FF	FRF¹
Humidité %		14,66±0,41	10,56±0,29	12,36±0,45	11,16±0,34
Cendres %	MF	0,48±0,01	0,97±0,15	2,57±0,01	1,5±0,10
	MS	0,57±0,02	1,08±0,18	2,94±0,03	1,70±0,13
Protéines %	MF	7,88±0,2	5,73±0,3	21,92±0,29	11,12±0,29
	MS	9,22±0,3	6,37±0,34	25±0,32	12,58±0,3
Lipides %	MF	0,68±0,05	0,41±0,06	1,34±0,15	0,72±0,09
	MS	0,8±0,07	0,46±0,06	1,53±0,18	0,81±0,10
Glucides	MF	76,3	82,33	61,81	75,5
totaux %	MS	89,41	92,09	70,53	84,91
Totaux		100	100	100	100

FBT : Farine de blé tendre ; **FR** : Farine de riz ; **FF** : farine de féverole ; **FRF** : Formule Riz-Féverole, **MF** : matière fraîche ; **MS** : matière sèche,

1 : Valeurs obtenues par calcul sur la base de 2/3 (p/p) riz et 1/3 (p/p) féverole.

I.2.1. Teneur en eau (Humidité)

La détermination de la teneur en eau des produits alimentaires est l'une des plus importantes analyses. C'est un facteur de qualité dans leur préservation. Sa connaissance, est utile pour le calcul de leurs valeurs nutritionnelles. Également, elle permet l'expression des autres déterminations analytiques (protéines, cendres, lipides...etc.) sur une base uniforme,

base de matière sèche (BRADLY, 1998). D'autre part, L'association américaine des chimistes de céréales (A.A.C.C) (2000), montre que l'humidité est un indicateur de l'aptitude du stockage. En effet, quand la teneur en eau de la farine est élevée, il peut y avoir une détérioration par développement de moisissures.

En effet, selon CALVEL (1984) et la norme CODEX STAN 152-1985 (Rév. 1-1995), concernant la farine de blé tendre l'humidité maximale ne doit pas dépasser 15,5%. Donc, la teneur d'eau de 14,66 % que présente notre farine témoin de blé tendre est en dessous de ces limites.

Pour les ingrédients sans gluten, les valeurs de l'humidité enregistrées vont de 10,56% pour la farine du riz et 12,36 % pour la farine de féverole. Ces résultats sont en accord avec la norme du *Codex Alimentarius* (FAO, 1996), qui en fixe la valeur de 15 % comme limite maximale, aussi concordent avec ceux obtenus par BENATALLAH (2009) pour la farine de féverole (11,92 %), contrairement à la faible teneur en eau de notre farine du riz (10,56 %), qui peut être due aux conditions de stockage (évaporation d'eau).

En conclusion, la teneur en eau de nos farines se situe entre 10 et 16 %, valeurs qui, d'après CHENE (2001) devrait permettre leur bonne conservation.

I.2.2. Teneur en cendres

Parmi les caractéristiques fondamentales d'une farine, le taux de cendres, qui exprime sa pureté et correspond à sa teneur en minéraux. Également, il permet d'identifier les différents types de farines (RIVAL, 2005 ; BOUTROUX, 2010).

Notre farine de blé tendre présente un taux de cendre de 0,57 %. Elle se classe bien dans le type commercial 55 qui se caractérise par un intervalle de cendres de [0,50 à 0,60] % et est destiné à la fabrication des pains ordinaires, selon la classification proposée par BOUTROUX (2010).

La teneur en cendres rapportée pour la farine du riz est de 1,08 % contre 0,5 %, valeur estimée par NAMOUS (2013) et 0,29 % par BENATALLAH (2009). Cette teneur se situe hors l'intervalle donné par VIERLING (2008), qui préconise des taux en cendres allant de [0,3 à 0,8] % pour la farine du riz. Cette teneur élevée en cendres serait probablement due à la présence d'enveloppes connues pour leur richesse en minéraux dans la farine après broyage.

Pour la farine de féverole, le taux de cendres estimé qui est de 2,94 %, est proche de celui rapporté par BENATALLAH (2009) qui est de 2,43 %. Ce taux de cendre est le plus important que celui de deux autres farines utilisées (farine du blé tendre et du riz).

Comme résultat de la supplémentation, l'addition de la farine de féverole à celle du riz montre une teneur en cendres de la FRF de 1,70 %.

I.2.3. Teneur en protéines

En panification, la teneur en protéines des farines exerce une influence considérable sur les propriétés viscoélastiques des pâtes et sur la qualité du pain (FEILLET, 2000).

Selon le CODEX STAN 152-1985 (Rév. 1-1995) pour la farine de blé tendre, la teneur minimale en protéines est de 7%. D'après les résultats d'analyse de la composition biochimique de notre farine de blé tendre, sa teneur en protéines est de 9,22 %, ce qui est en dessus de cette limite fixée. Également, elle se situe bien dans l'intervalle rapporté par ATWELL (2001), qui est de [7-15 %].

La farine du riz qui est à la base de la formule sans gluten proposée dans ce travail, présente la plus faible teneur en protéine avec 6,37 % contre 7,72 % selon NAMOUS (2013), mais, elle est plus proche à la valeur estimée par BENATALLAH (2009) qui est de 6,60%. Également, cette teneur en protéine de notre farine du riz est incluse dans l'intervalle proposé par VIERLING (2008), qui est entre [6,3 à 7,1] %.

La farine de féverole est la plus riche en protéines avec 25%. Cependant, cette valeur est inférieure à celle évaluée par BENATALLAH (2009) qui est de 30,90%, mais elle est plus proche à l'intervalle de [27 - 33%] donné par BOUTIN et DRONNE (2008). Les variétés utilisées pourraient être à l'origine de ces résultats.

La richesse de la farine de féverole en protéines lui qualifie d'être un excellent complément des céréales pour assurer l'équilibre en acides aminés essentiels. Le calcul basé sur le rapport 2/3 riz et 1/3 féverole utilisé dans ce travail montre une amélioration dans le niveau en protéines de la formule (FRF) en rapport avec la présence de la féverole dans celle-ci. Notre FRF présente une teneur en protéines environ 2 fois plus à celle du riz de base, pour passer de 6,37 % à 12,58 %.

I.2.4. Teneur en lipides

La majorité de la matière grasse des céréales et des légumineuses est contenue dans le germe du grain (JULIANO, 1994 ; JEANGUYOT et AHMEDI, 2002 ; FREDOT, 2005). L'élimination de ce dernier justifierait le faible niveau lipidique des farines.

Les résultats obtenus après dosage de nos trois farines, révèlent des teneurs en lipides par rapport à la matière sèche qui vont de 0,8 % pour la farine de blé tendre, 0,46 % pour la farine du riz et de 1,53 % pour la farine de féverole. Ces résultats concordent avec ceux

établis par ATWELL (2001) qui rapporte une teneur en lipides pour la farine de blé tendre se situant entre [1 à 2] %, par VIERLING (2008) qui donne un intervalle de [0,3 à 0,5] % pour la farine du riz, et par BOUTIN et DRONNE (2008) qui préconisent des valeurs entre [1,5 et 2] % pour la farine de féverole. Ces faibles valeurs lipidiques de nos farines favorisent leur stockage sans qu'il y ait un risque de rancissement.

La supplémentation du riz par la féverole, permet l'enrichissement de la formule en lipides. Elle montre dans le cas de notre formule proposée une élévation de la teneur en lipide à 0,81 %, soit 1,76 % fois plus que celle du riz.

I.2.5 Teneur en glucides

Pour les trois types de farines, la teneur en glucides est déterminée par soustraction de la somme des teneurs en composants majeurs (cendres, protéines et lipides) pour 100g de la matière sèche.

La teneur en glucides totaux pour la farine de blé tendre est de 89,41%, pour la farine de riz est de 92,09%, pour la farine de féverole est de 70,53%, et pour la FRF est de 84,91%.

Conclusion

D'après les résultats de tamisage des matières premières utilisées, on peut conclure que toutes nos farines présentent une granulométrie répondant aux exigences de la panification.

La farine de blé tendre se caractérise par une composition biochimique variée et équilibrée qui lui permet d'être un témoin de comparaison pour les deux autres farines exemptes en gluten. La farine de riz qui est à la base de la formule proposée présente des niveaux faibles en protéines ($6,37 \pm 0,34$)%MS comparativement à la farine de féverole ($25 \pm 0,32$)%MS. Le calcul basé sur le rapport massique 2/1 utilisé pour la supplémentation de la formule montre une majoration de l'apport protéique ($12,58 \pm 0,33$)% en rapport avec la présence de la féverole dans celle-ci.

II. CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DES PATES PAR L'ALVEOGRAPHIE CHOPIN

L'approche de la valeur boulangère d'une pâte et la prédiction de ses propriétés panifiables peut se faire empiriquement à travers la mesure de leurs forces d'expansion par l'Alvéographe Chopin (DELFRATE et STEPHANE, 2005).

Les caractéristiques alvéographiques moyennes de farine témoin de blé tendre, de matières premières exemptes en gluten (FR), (FF) et de la formule sans améliorant (FRF) sont regroupées dans le tableau 12.

Tableau 12. Caractéristiques alvéographiques de la farine témoin de blé tendre, de matières premières exemptes en gluten et de la formule étudiée sans améliorant (FRF)

Farines	G (cm³)	P/L	W (10⁻⁴) J
Témoin :			
Blé tendre (K_{blé})	19,4 ± 0,07	0,89 ± 0,02	159 ± 0,06
Ingrédients sans gluten :			
Riz	4 ± 0,01	0,09 ± 0,02	2,55 ± 0,02
Féverole	6 ± 0,01	3,76 ± 0,01	19,58 ± 0,03
Formule sans améliorants :			
FRF	8 ± 0,01	1,5 ± 0,04	5,3 ± 0,01

G : Indice de Gonflement (cm³) ; **P/L** : Rapport de configuration (élasticité/extensibilité); **W (10⁻⁴)** : Travail de déformation (J).

II.1. Indice de gonflement « G »

L'indice de gonflement « G » renseigne sur l'extensibilité de la pâte, et permet d'apprécier l'aptitude de celle-ci à retenir le gaz carbonique (SAKR et HAJJ MOUSSA, 2007).

La valeur de gonflement de la farine témoin de blé tendre K_{blé} (19,4 cm³) est plus proche aux normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et Françaises de panification (GUINET et GODON, 1994) et à celles apportées par BERLAND et ROUSSEL (2000), qui sont > 20 cm³.

Les valeurs de gonflement des ingrédients sans gluten qui sont de 4 cm³ pour la farine du riz et de 6 cm³ pour la farine de féverole sont nettement plus faibles comparés à ceux de témoin de blé tendre et des normes Algériennes (J.O.R.A. 1991) et Françaises de panification (GUINET et GODON, 1994).

Après l'ajout de la farine de féverole au niveau de la formule sans gluten, une amélioration sensible de l'indice de gonflement a été notée par rapport à la farine du riz de base, à travers le passage de 4 cm³ à 8 cm³, en d'autres termes, 2 fois plus que le riz seul.

II.2. Rapport de configuration « P/L »

Le rapport de configuration de la courbe «P/L» ou le rapport de ténacité au gonflement, représente l'équilibre entre la ténacité et l'extensibilité des pâtes formées (COLAS, 1991).

Le rapport de configuration « P/L » enregistré pour la farine de blé tendre $K_{blé}$ est de 0,89. D'après LIU *et al.* (1996), notre témoin pourrait être orienté à la panification car son rapport de configuration se situe dans l'intervalle de [0,8 à 2]. Cependant, ces valeurs restent supérieures à la gamme des valeurs des normes Algériennes (J.O.R.A. 1991) et Française de panification (GUINET et GODON, 1994) avec des P/L respectifs de [0,45 à 0,65] et de [0,5 à 0,7].

La farine du riz montre un rapport de configuration de 0,09, qui est trop faible reflétant son intense propriété d'extensibilité. Par ailleurs, les rapports de configuration qui sont de 3,76 pour la farine de féverole et de 1,5 pour la FRF sans améliorants sont trop élevés comparativement à ceux du témoin de blé tendre, aux normes Algériennes (J.O.R.A. 1991) et Françaises de panification (GUINET et GODON, 1994), renseignant sur la forte ténacité et la faible extensibilité de ces pâtes.

Selon DELFRATE et STEPHANE (2005), les farines ayant un « P/L » élevé (supérieur à 1) donneront des pâtes trop tenaces, peu tolérantes au pétrissage, montrant une tendance à absorber beaucoup d'eau ainsi qu'un faible gonflement. Alors que, pour des rapports de configuration « P/L » faibles (inférieur à 0,3) les pâtes seront trop extensibles et difficiles à manier.

II.3. Travail de déformation « W »

Le travail de déformation «W » permet de déterminer la force boulangère d'une farine. CALVEL (1980), a noté que si ce paramètre a de l'importance, sa signification reste limitée si l'on ne tient pas compte des autres caractéristiques alvéographiques.

La farine témoin du blé tendre $K_{blé}$ se caractérise par un travail de déformation (W) de 159.10^{-4} J, ce qui la classe comme farine de bonne force boulangère selon les normes algériennes J.O.R.A. 1991 (W entre $(130 \text{ et } 180.10^{-4} \text{ J})$). Ce travail enregistré pour notre témoin s'avère insuffisant par rapport à l'intervalle recommandé par GUINET et GODON (1994), soulignant qu'une bonne valeur boulangère ne s'établit que lorsque le «W » est compris entre $200 \text{ et } 220.10^{-4} \text{ J}$.

Les ingrédients sans gluten présentent des valeurs de travail de déformation (W), qui sont de $2,55.10^{-4}$ J pour la farine du riz, de $19,58.10^{-4}$ J pour la farine de féverole et de $5,3.10^{-4}$ J pour notre FRF sans améliorants. Toutefois, ces résultats sont nettement faibles et loin des valeurs du témoin de blé tendre ainsi que des normes Algériennes (J.O.R.A. 1991) et Françaises de panification (GUINET et GODON, 1994).

Conclusion

D'après nos résultats alvéographiques, on peut déduire que notre farine témoin du blé tendre $K_{blé}$ se prête suffisamment à la panification malgré ses propriétés rhéologiques moyennes et reste meilleure que les matières premières et la formule sans gluten étudiées.

Les propriétés rhéologiques de la farine de féverole semblent légèrement meilleures que celles du riz seul. Une amélioration globale des propriétés rhéologiques (G, P/L et W) du riz par l'ajout de féverole au niveau de la formule est notée. Ce comportement à l'alvéographe Chopin reste cependant en dessous des recommandations des normes algériennes (J.O.R.A.1991) et françaises de panification (GUINET et GODON, 1994). Donc, les ingrédients exempts en gluten (FR, FF) ainsi que la formule (FRF) étudiée demeurent inaptes à la panification.

III. FORMULATION ET FABRICATION DES PAINS SANS GLUTEN

Dans le cadre de notre travail, les essais de panification sans gluten ont été réalisés selon un plan d'expérience central composite. Les résultats ont été comparés avec les caractéristiques du pain témoin à base de la farine de blé tendre.

Pour atteindre l'objectif principal de notre étude, qui est la fabrication d'un pain sans gluten (PSG) à base de la formule riz- féverole (FRF) améliorée par la combinaison de deux hydrocolloïdes : l'HPMC et la gomme de Xanthane, dont les caractéristiques finales se rapprocheraient le plus de celles de pain témoin à base de farine de blé tendre, nous avons adopté la Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR), qui a largement été utilisée pour l'optimisation de pains sans gluten (COLLAR *et al.*, 1999 ; SANCHEZ, OSELLA et DE LA TORRE, 2002 ; KOBYLAŃSKI, PÉREZ et PILOSOFF, 2004 ; McCARTHY *et al.*, 2005 ; BENATALLAH, 2009 ; GUERAIRIA, 2011 ; HAGER et K. ARENDT, 2013).

Cette approche a été faite par la réalisation d'un plan d'expérience central composite à deux variables : la teneur en HPMC (X_1) et la teneur en Xanthane (X_2) et à cinq niveaux. La réponse étudiée (Y) est le volume spécifique des pains.

III.1. Validation du plan d'expérience

Avant de passer à l'exploitation des résultats du plan central composite à deux facteurs et à cinq niveaux, nous devons d'abord tester sa validité.

Le tableau 13 donne un résumé de l'analyse des variances pour notre réponse : V_{sp} . Ce test statistique montre que la variance d'ajustement est négligeable devant la variance de l'erreur expérimentale pour cette réponse étudiée, ce qui vérifie le bon ajustement de notre modèle.

Tableau 13 : Test d'analyse de la variance de paramètre de traçage des surfaces de réponse des pâtes de la formule Riz-Fèverole

<i>Origine de variation</i>	<i>Carrés moyens des écarts</i>
	$V_{sp} \text{ (cm}^3\text{/g)}$
<i>Manque d'ajustement</i>	0,058
<i>Erreur pure</i>	0,088
<i>F</i>	7,25*

F: variance de Fisher-Snedecor, **NS*** : différence non significative ($p > 0.05$), **NS**** : différence non significative ($p > 0,01$)

III.2. Volumes spécifiques des pains sans gluten selon le plan d'expérience utilisé

Selon HAGER et K. ARENDT (2013), le volume spécifique est l'une des caractéristiques visuelles la plus importante de pain, influençant fortement le choix du consommateur. Par conséquent, c'est un paramètre clé pour évaluer sa qualité.

Les volumes spécifiques des pains sans gluten pour les 13 points du plan d'expérience central composite sont résumés dans le tableau 14.

Tableau 14. Volumes spécifiques des pains sans gluten des 13 points du plan central composite à deux facteurs et à cinq niveaux

Essai	Taux d' HPMC (g/100g FRF)	Taux de Xanthane (g/100g FRF)	Volume spécifique (cm ³ /g) mesuré	Volume spécifique (cm ³ /g) prédit
1	0,66	0,14	1,68 ± 0,04	1,73
2	3,84	0,14	2,30 ± 0,06	2,27
3	0,66	0,85	1,61 ± 0,02	1,54
4	3,84	0,85	2,22 ± 0,01	2,20
5	0	0,5	1,40 ± 0,02	1,39
6	4,5	0,5	2,25 ± 0,08	2,24
7	2,25	0	2,19 ± 0,03	2,14
8	2,25	1	1,83 ± 0,04	1,96
9	2,25	0,5	2,07 ± 0,03	2,07
10	2,25	0,5	2,07 ± 0,03	2,07
11	2,25	0,5	2,07 ± 0,03	2,07
12	2,25	0,5	2,07 ± 0,03	2,07
13	2,25	0,5	2,07 ± 0,03	2,07

Ces résultats peuvent être traduits en surfaces de réponse indiquant les volumes spécifiques de pains sans gluten de la FRF en fonction des couples (*HPMC, Xanthane*).

Selon GOUPY et CREIGHTON (2006), à chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée *surface de réponse*.

III.3. Surface de réponse du volume spécifique des pains sans gluten de la FRF en fonction des taux (*HPMC-Xanthane*)

Le suivi de l'évolution des volumes spécifiques (V_{sp}) de nos pains sans gluten de la FRF en fonction des taux d'HPMC et de Xanthane est reporté dans la figure 21.

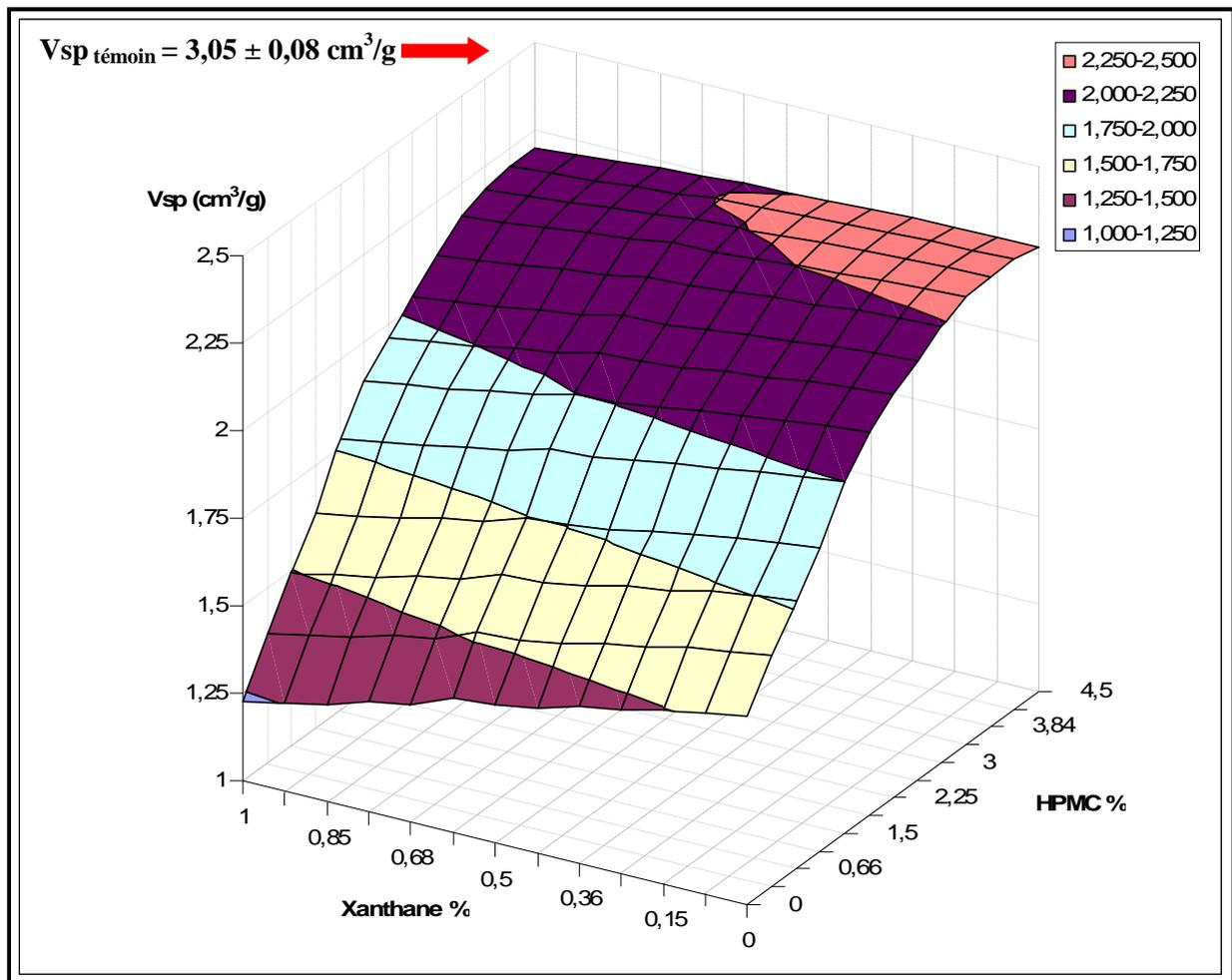


Figure 21. Surface de réponse du volume spécifique (V_{sp}) des pains sans gluten de la FRF en fonction des taux *HPMC-Xanthane*

La surface de réponse tracée sur la figure 26 montre que le volume spécifique de nos pains sans gluten en fonction des couples (*HPMC,Xanthane*) varie entre 1 et 2,5 cm^3/g . Une zone optimale est notée entre 2,25 et 2,5 cm^3/g , vers les teneurs les plus élevées en HPMC (>3%) et les faibles taux de Xanthane (<0,5%) et ce, pour un taux d'hydratation de notre pâte sans gluten de 115ml.

D'autre part, quelque soit le taux de Xanthane, l'augmentation de la concentration en HPMC se traduit par un accroissement du volume spécifique du pain sans gluten. De façon globale, les volumes spécifiques élevés sont notés pour les zones (*HPMC,Xanthane*) suivantes :

- HPMC : [1,5 - 4,5]% et Xanthane : [0 - 0,5]%
- HPMC : [1,5 - 2,75]% et Xanthane : [0,5 - 1]%

L'effet de l'HPMC sur la qualité des pains sans gluten, a été étudié par différents auteurs. Comparativement à nos travaux, BENATALLA (2009) (figure 22), a montré une réponse de V_{sp} allant de 1 à 3 cm^3/g ce qui reste supérieure à nos valeurs prédites (1 à 2,5 cm^3/g). Cet auteur a montré une zone optimale *Hydratation-HPMC* respectivement de : [92 - 93,75]% et [2 - 4]%. Ces résultats concordent avec ceux obtenus dans notre étude, et ceux rapportés par GALLAGHER *et al.*, 2003 ; SIVARAMAKRISHNAN *et al.*, 2004 ; McCARTHY *et al.*, 2005. En effet, ces chercheurs ont trouvé que, l'incorporation d'HPMC à des teneurs comprises entre (3 - 4)% à la farine du riz permettait d'avoir des expansions optimales des pains sans gluten, une amélioration de leurs qualités sensorielles et leurs durées de conservation.

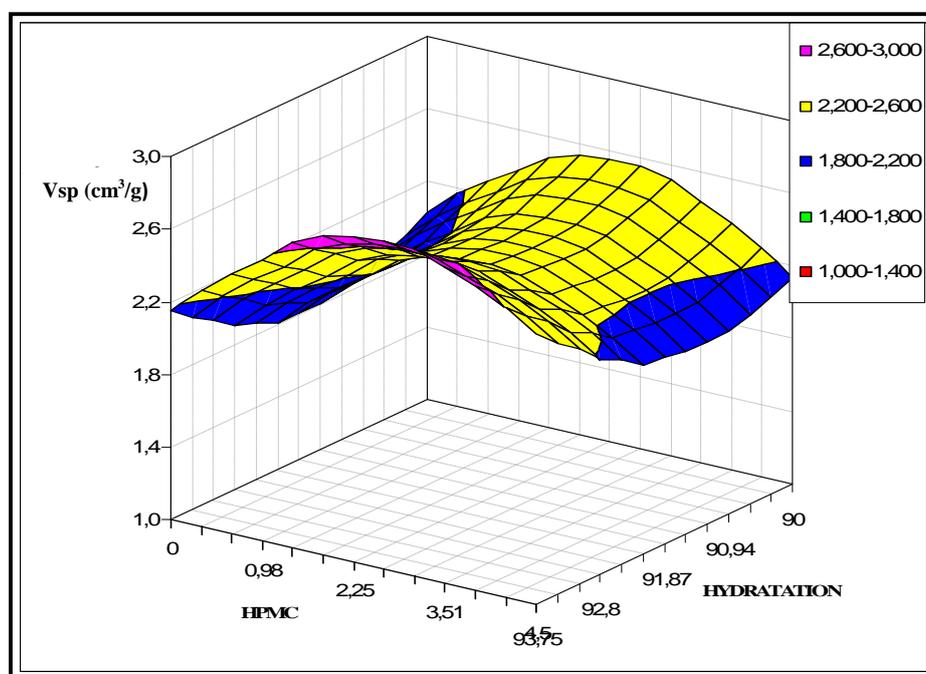


Figure 22. Surface de réponse du volume spécifique (V_{sp}) des pains sans gluten de la FRF en fonction des taux *Hydratation-HPMC* (BENATALLAH, 2009)

L'effet de Xanthane sur la qualité des pains sans gluten, fait l'objet de nombreux travaux. GHERAIRIA (2011) (figure 23), a montré une réponse de V_{sp} allant de 2,6 à 2,95 cm^3/g ce qui reste supérieure à nos valeurs prédites (1 à 2,5 cm^3/g). Cet auteur a montré une zone optimale *Hydratation-Xanthane* respectivement de : [92,43 - 95]% et [0 - 0,2]%. Les résultats que nous avons obtenus sont en accord avec ces résultats rapportés par GHERAIRIA(2011), et ceux de LAZARIDOU *et al.*, 2007 ; SHITTU *et al.*, 2009 ; PERESSINI et SENSIDONI, 2009 ; SCIARINI *et al.*, 2010 ; CROCKETT *et al.*, 2011;

SABANIS et TZIA, 2011 et PERESSINI *et al.*, 2011. Ces auteurs ont montré que seulement les niveaux faibles de Xanthane (<0,5%) permet d'améliorer les Vsp des pains sans gluten, alors que les niveaux élevés contribuent à une forte consistance et résistance de la pâte, avec une expansion limitée des cellules gazeuses pendant la fermentation, provoquant ainsi une diminution du volume final de pain.

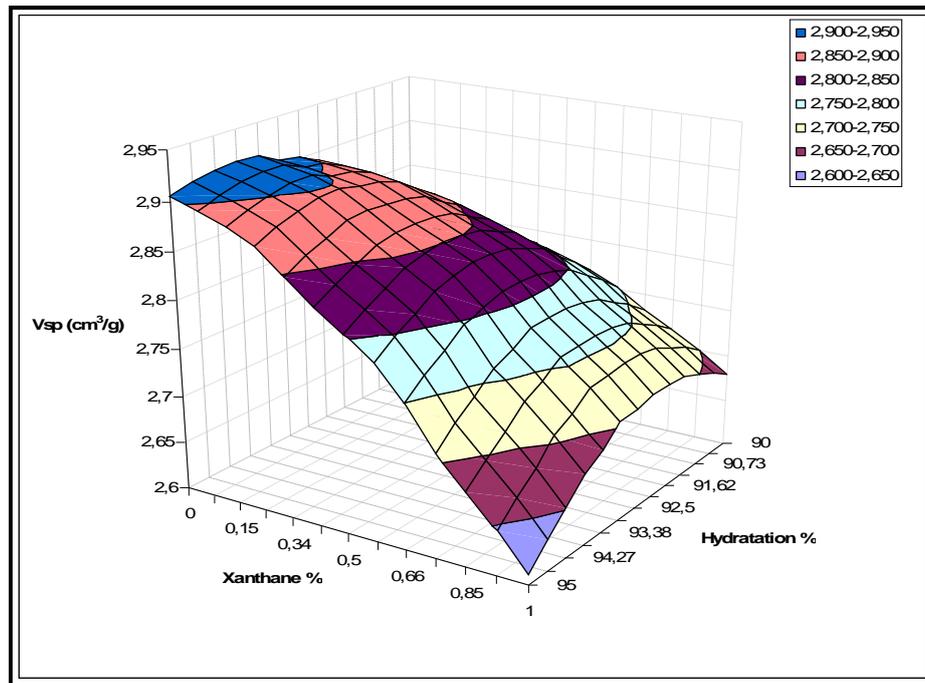


Figure 23. Surface de réponse du volume spécifique (Vsp) des pains sans gluten de la FRF en fonction des taux *Hydratation-Xanthane* (GHERAIRIA, 2011)

L'effet de la combinaison de l'HPMC et de Xanthane sur la qualité des pains sans gluten, a été étudié en 2013 par HAGER et K. ARENDT (figure 24). Ils ont montré une surface de Vsp allant de 1,16 à 1,88 cm³/g qui reste inférieure aux nôtres (1 à 2,5 cm³/g). La zone optimale de cette surface de réponse donnant les meilleurs Vsp, inclut les taux les plus élevés en HPMC (>1,5%) et les faibles taux de Xanthane (<0,5%). Donc, nos résultats concordent avec ceux rapportés par ces auteurs, qui confirment que ces deux hydrocolloïdes (HPMC et Xanthane) en combinaison sont des ingrédients potentiels en formulation du pain sans gluten mais avec une considération précise de leurs teneurs utilisées (teneurs élevées en HPMC et faibles taux de Xanthane).

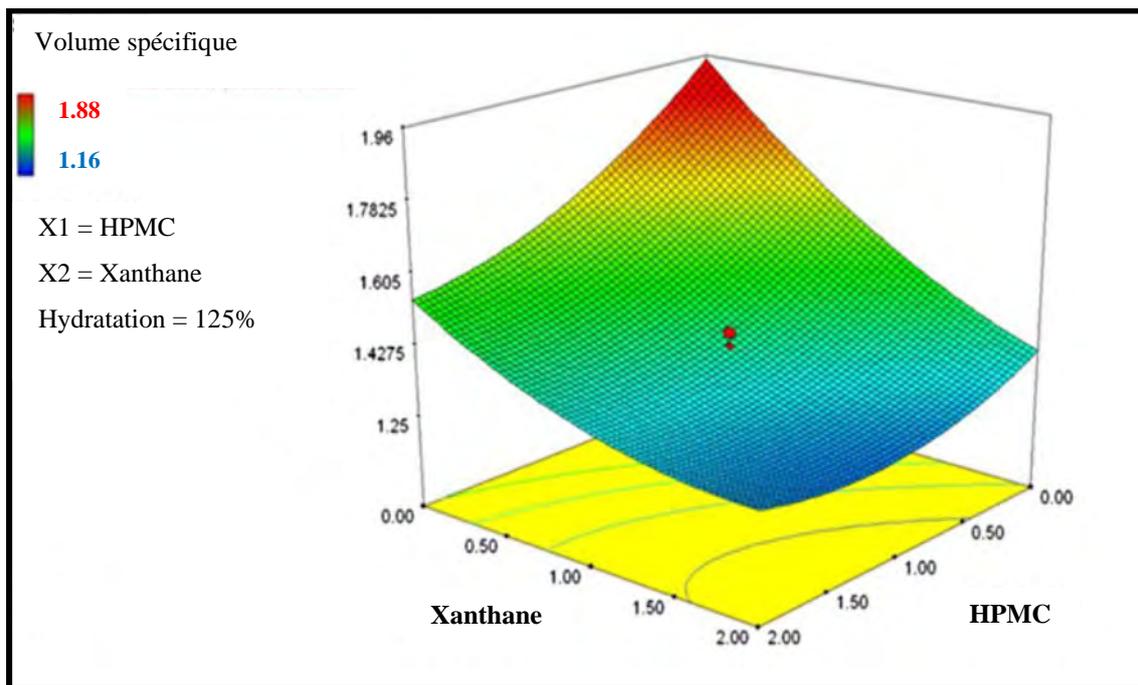


Figure 24. Surface de réponse du volume spécifique (Vsp) des pains sans gluten en fonction des taux *HPMC-Xanthane* (HAGER et K. ARENDT, 2013)

III.4. Optimisation des pains sans gluten

Dans le cadre de notre travail, l'optimisation consiste à délimiter les domaines optima pour la réponse étudiée (Vsp) puis à vérifier la validité de ces domaines. Pour cela, nous avons représenté la courbe de niveau des Vsp des pains sans gluten en fonction des taux *HPMC* et de *Xanthane* afin de délimiter cette zone (figure 25).

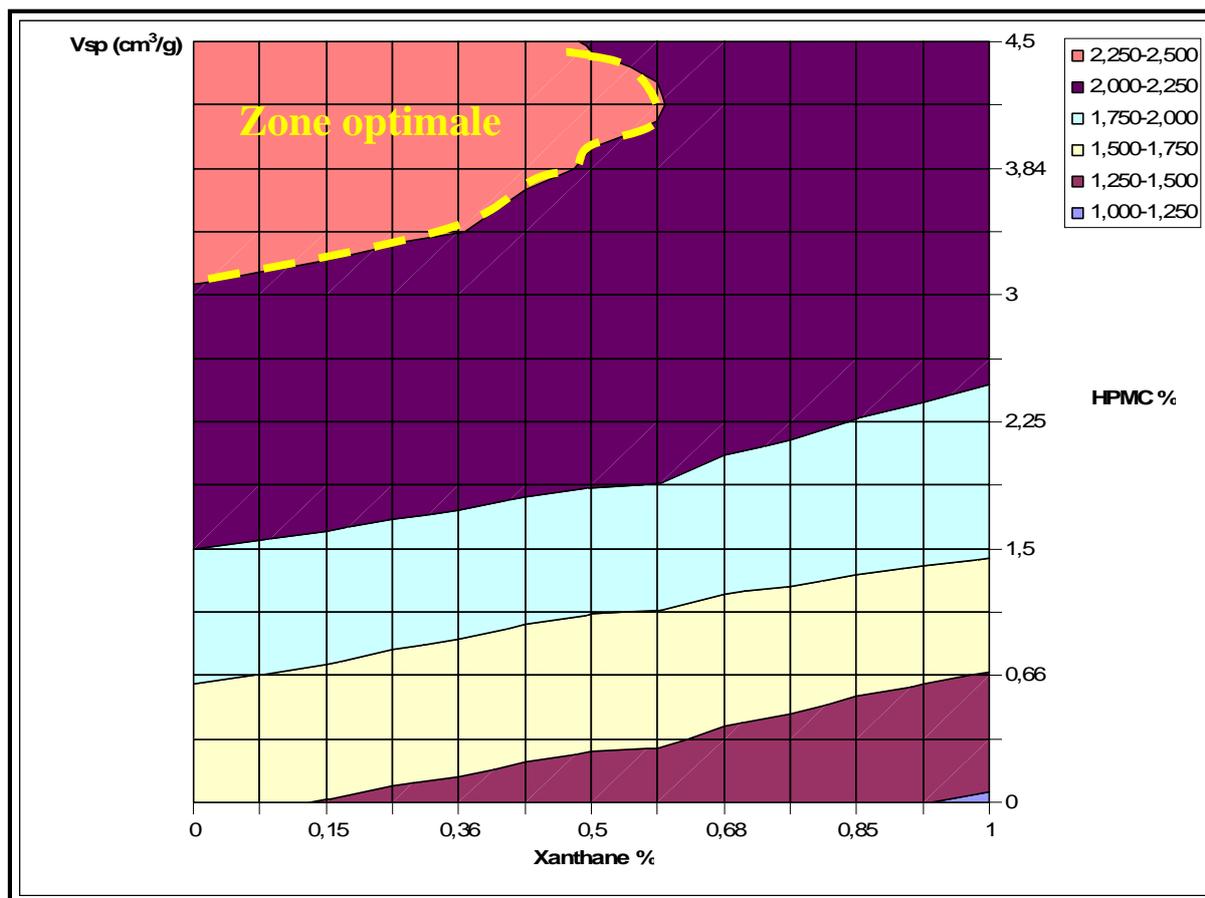


Figure 25. Courbe de niveau des V_{sp} de nos pains sans gluten de la FRF en fonction des taux *HPMC-Xanthane*

A partir de cette courbe, nous remarquons que les V_{sp} les plus proches du témoin à base de farine de blé tendre ($V_{sp} = 3,05 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$) que nous avons obtenu, se situent dans la zone optimale incluant les teneurs élevées en HPMC [3 - 4,5]% et les faibles taux de Xanthane [0 - 0,55]%. Cette zone encadre même les échantillons de pain à 0% Xanthane mais avec une concentration suffisamment élevée en HPMC (au minimum 1,5%).

Conclusion

Les meilleurs V_{sp} sont obtenus pour des taux d'HPMC élevés (>3%) et des faibles teneurs de Xanthane (<0,5%).

Les V_{sp} de nos pains sans gluten de la FRF les plus proches du témoin de blé tendre ($V_{sp} = 3,05 \text{ cm}^3/\text{g}$) sont notés dans la zone optimale incluant les teneurs élevées en HPMC [3 - 4,5]% et les faibles taux de Xanthane [0 - 0,55]%.

III.5. Confirmation des résultats de l'optimisation

En vue de confirmer les résultats d'optimisation obtenus par la Méthodologie de Surface de Réponse (MSR), nous avons sélectionné dans un premier temps des couples (*HPMC, Xanthane*) à l'intérieur et en dehors de la zone optimale délimitée (Tableau 15) puis nous avons vérifié leurs volumes spécifiques par le test de panification. En complément à ceci, les pains obtenus ont été caractérisés par l'étude des propriétés texturales des mies par analyse d'image et classification par ACP et enfin, par une caractérisation sensorielle.

Tableau 15. Couples (*HPMC, Xanthane*) de vérification après optimisation par MSR de pains sans gluten de la FRF

Couples (<i>HPMC, Xanthane</i>)	
<i>Dans la zone optimale</i>	A [3,84 - 0,14]%
HPMC [3 - 4,5]%, Xanthane [0 - 0,55]	B [4,50 - 0,50]%
<i>Hors de la zone optimale</i>	C [0,66 - 0,85]%
	D [0 - 0,50]%

III.5.1. Test de panification

Selon FEILLET (2000), le test de panification reste le principal outil d'appréciation de l'aptitude d'une farine à sa transformation en pain de bonne qualité.

Dans notre cas, les tests de panification sans gluten des couples (*HPMC, Xanthane*) à l'intérieur et en dehors de la zone optimale ont donné des pains avec des structures alvéolaires de la mie et des volumes spécifiques différents à ceux de pain témoin à base de farine du blé tendre (figure 26).

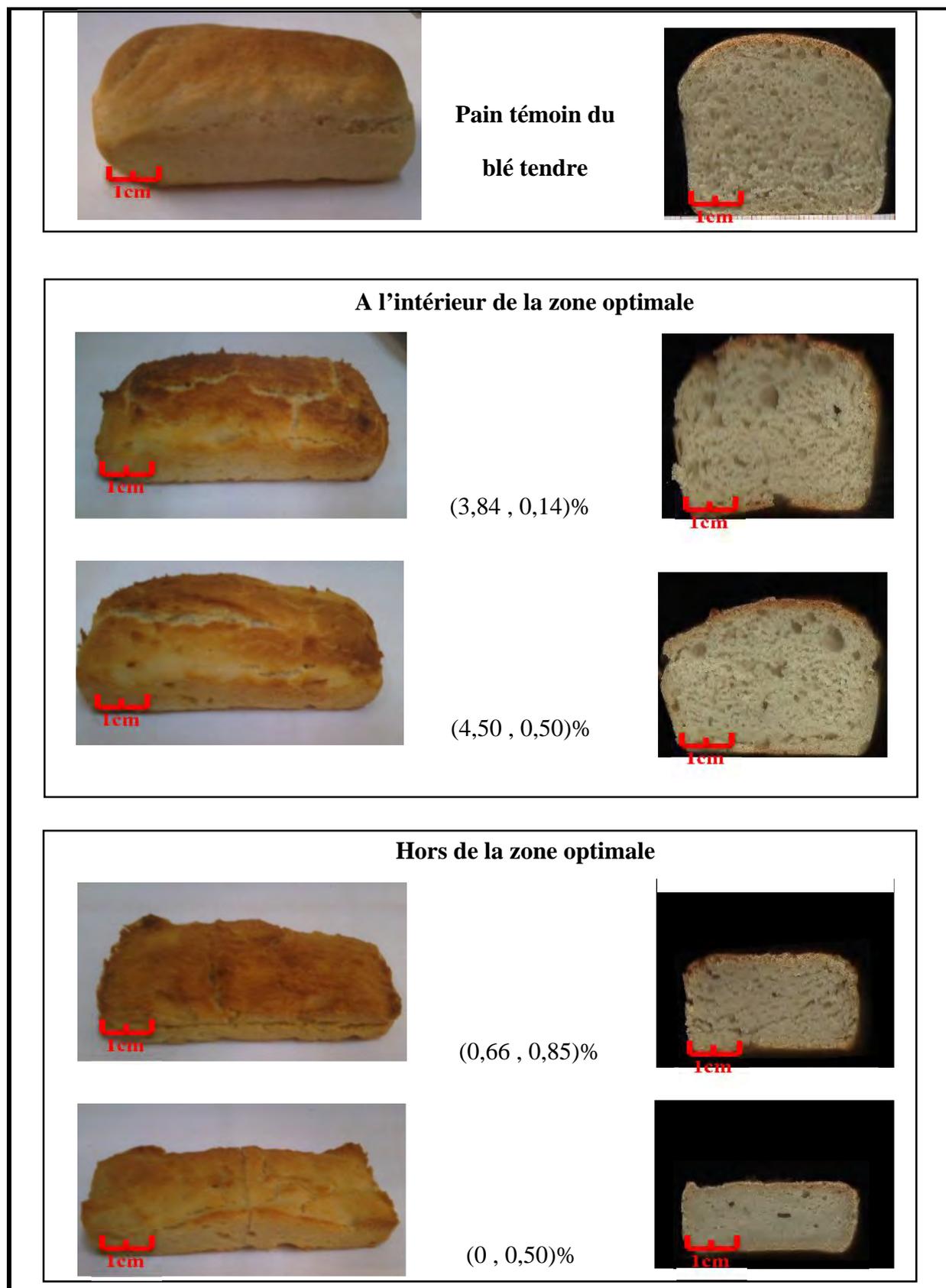


Figure 26. Photos des pains sans gluten des couples (*HPMC, Xanthane*) à l'intérieur et en dehors de la zone optimale délimitée et le témoin blé

La figure 26 montre que, les pains sans gluten à l'intérieur de la zone optimale correspondant à des taux élevés en HPMC et des faibles teneurs de Xanthane présentent une mie bien développée et une structure alvéolaire incluant une majorité d'alvéoles de petite taille avec quelques unes plus grosses, comparativement au témoin du blé tendre, qui présente une répartition alvéolaire homogène de petite taille. D'autre part, les pains en dehors de la zone optimale correspondant aux taux en Xanthane élevés avec des teneurs en HPMC faibles ou nulles, se caractérisent par une mie moins développée et une structure alvéolaire compacte et sont moins volumineux.

III.5.2. Volumes spécifiques des pains sans gluten des points de vérification

De façon globale, tous les pains correspondants aux couples (*HPMC, Xanthane*) à l'intérieur et en dehors de la zone optimale (figure 27), présentent des V_{sp} plus faibles que celui du pain témoin à base du blé tendre ($V_{sp} = 3,05 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$).

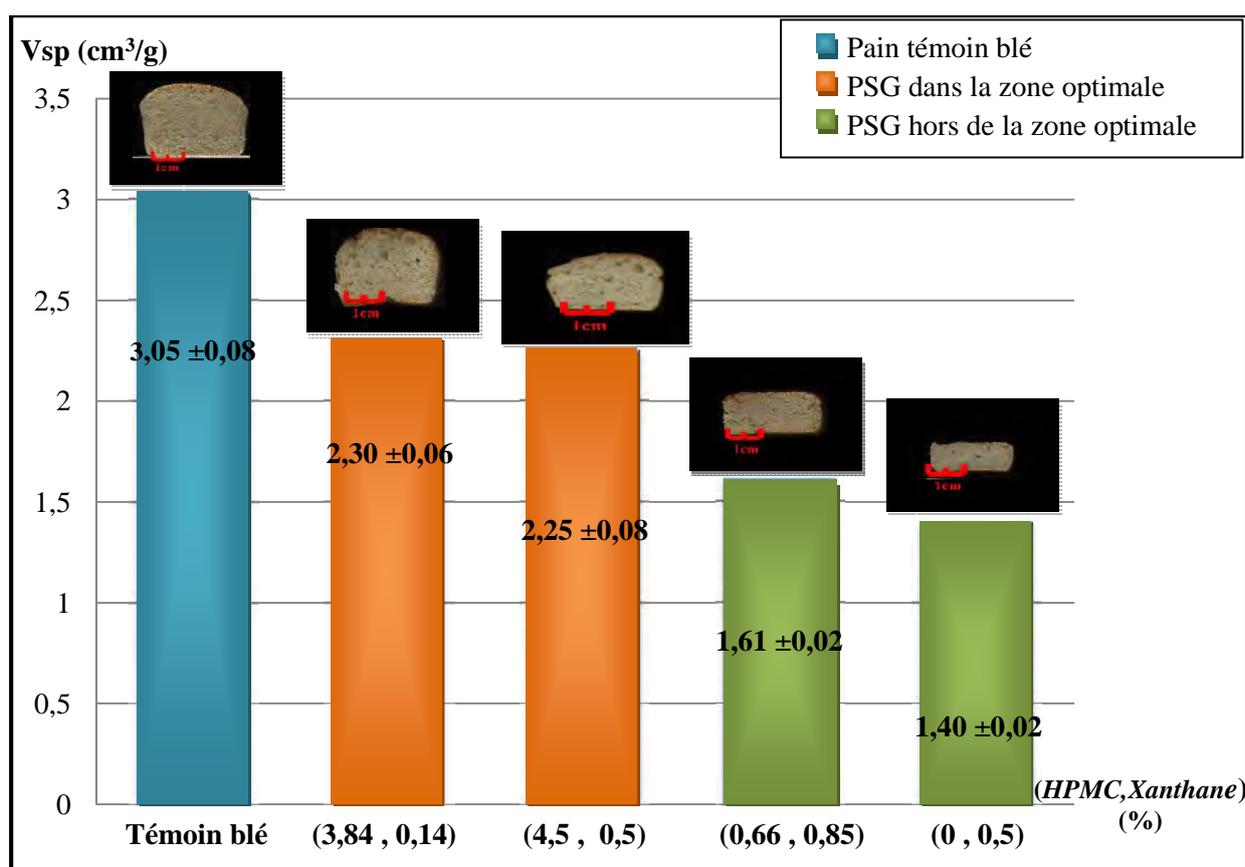


Figure 27. Représentation des Volumes spécifiques (V_{sp}) et du grain de mie des pains sans gluten des points de vérification et du témoin blé

Pour les points hors de la zone optimale, les V_{sp} relevés sont relativement faibles, allant de $1,61 \pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour le couple (HPMC,Xanthane)(0,66 , 0,85)% et de $1,40 \pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour le couple (0 , 0,50)%, témoignant d'une part, de la forte résistance de la pâte à l'expansion gazeuse résultante de la teneur élevée de Xanthane et d'autre part du faible taux en HPMC ou son absence ce qui conduit à des pains sans gluten avec des faibles V_{sp} .

Pour les points à l'intérieur de la zone optimale, les taux élevés en HPMC et les faibles teneurs de Xanthane permettent l'obtention des pains sans gluten avec des V_{sp} élevés, tel que montré pour le couple (3,84 , 0,14)% avec un V_{sp} de $2,3 \pm 0,06 \text{ cm}^3/\text{g}$ et pour le couple (4,50 , 0,50)% avec un $V_{sp} = 2,25 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$.

A l'intérieur de la zone optimale que nous avons délimitée, l'échantillon du pain sans gluten qui a donné le V_{sp} le plus proche à celui du pain témoin du blé tendre ($V_{sp} = 3,05 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$) correspond au couple (HPMC,Xanthane) (3,84 , 0,14)% avec un V_{sp} de $2,3 \pm 0,06 \text{ cm}^3/\text{g}$ suivi de couple (4,50 , 0,50)% avec un V_{sp} de $2,25 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$. Nous avons noté au niveau de ces deux points que, malgré l'augmentation de la teneur en HPMC de 3,84% à 4,50% il ya une diminution de V_{sp} , qui est passé de 2,30 à $2,25 \text{ cm}^3/\text{g}$. Cela pourrait être expliqué par l'élévation au même temps de la concentration en Xanthane de 0,14% à 0,50%, ce qui aurait un effet négatif sur l'expansion gazeuse. Pour avoir donc un effet positif sur le V_{sp} en combinaison à l'HPMC, la gomme de Xanthane ne doit pas dépasser le seuil de <0,5%.

Conclusion

Les tests de panification ont donné des pains avec des structures alvéolaires de la mie et des volumes spécifiques différents. Le grain de mie des PSG de la FRF à l'intérieur de la zone optimale correspondant à des taux élevés en HPMC et des faibles teneurs en Xanthane est bien développé et reste, par ailleurs, légèrement plus grossier que celui du témoin de blé tendre. Les PSG en dehors de la zone optimale se caractérisent par une mie moins développée et une structure alvéolaire compacte et sont moins volumineux.

Les V_{sp} des PSG de la FRF dans la zone optimale sont significativement proportionnels aux taux d'HPMC et de Xanthane ($r = 0,94$) tout en restant, inférieurs à celui du témoin ($p < 0,0001$). L'échantillon de PSG qui a donné le V_{sp} le plus proche du témoin de blé tendre ($3,05 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$) correspond au couple (HPMC,Xanthane) (3,84 , 0,14)% avec $2,30 \pm 0,06 \text{ cm}^3/\text{g}$ suivi du couple (4,50 , 0,50)% avec $2,25 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$.

III.5.3. Propriétés texturales des mies par Analyse d'Image et classification des pains par Analyse en Composante Principale (ACP)

a) Propriétés texturales des mies par Analyse d'Image

Les propriétés texturales de la mie des pains sans gluten de la FRF correspondant aux points à l'intérieur et en dehors de la zone optimale délimitée en comparaison avec un témoin de blé tendre sont étudiées. Le traitement des images scannées s'est fait selon une méthode d'analyse de texture d'images basée sur la morphologie mathématique.

L'étude des variations de la somme des niveaux de gris (g_i) lors d'érosions successives donne des informations de type granulométrique sur les parois des alvéoles. L'opération duale, la dilatation, permet l'obtention de courbes de granulométrie en niveaux de gris des alvéoles qui complètent celles des parois. Afin de comparer les variations de ces courbes, il est nécessaire de procéder à leur normalisation par rapport à la taille des tranches de pain et de leurs intensités lumineuse.

Les courbes granulométriques en niveaux de gris des couples (*HPMC, Xanthane*) des pains sans gluten à l'intérieur et en dehors de la zone optimale délimitée comparés au témoin de blé tendre sont représentés sur la figure 28.

La partie droite (étape d'érosion) de cette figure (28) décrit les variations de la taille des parois des alvéoles et la partie gauche (étape de dilatation) la taille des alvéoles. Après chaque étape d'érosion les parois ayant des tailles inférieures à celle de l'élément structurant disparaissent, et la somme des niveaux de gris diminue. La dilatation cause la disparition des alvéoles ayant des tailles inférieures à l'élément structurant et la somme des niveaux de gris augmente.

Conformément aux résultats de LASSOUED *et al.* (2007) ; BENATALLAH (2009) et de BOUREKOUA (2013), nous avons observé la disparition des parois et des alvéoles après 25 étapes respectives d'érosion et de dilatation.

La forme en pic des courbes, renseigne sur les principales modifications sur les images causées par les premières étapes d'érosion et de dilatation, reflétant une texture fine (avec un nombre important d'alvéoles de petites tailles). Les plus fortes variations sont observées pour les 2 premières étapes d'érosion et de dilatation, correspondant à la disparition de « formes ».

Les échantillons se situant aux extrémités correspondent aux mies du pain témoin du blé tendre avec la plus fine texture, et du pain sans gluten de la FRF de couple (*HPMC, Xanthane*) à (0, 0,50)%, la plus grossière.

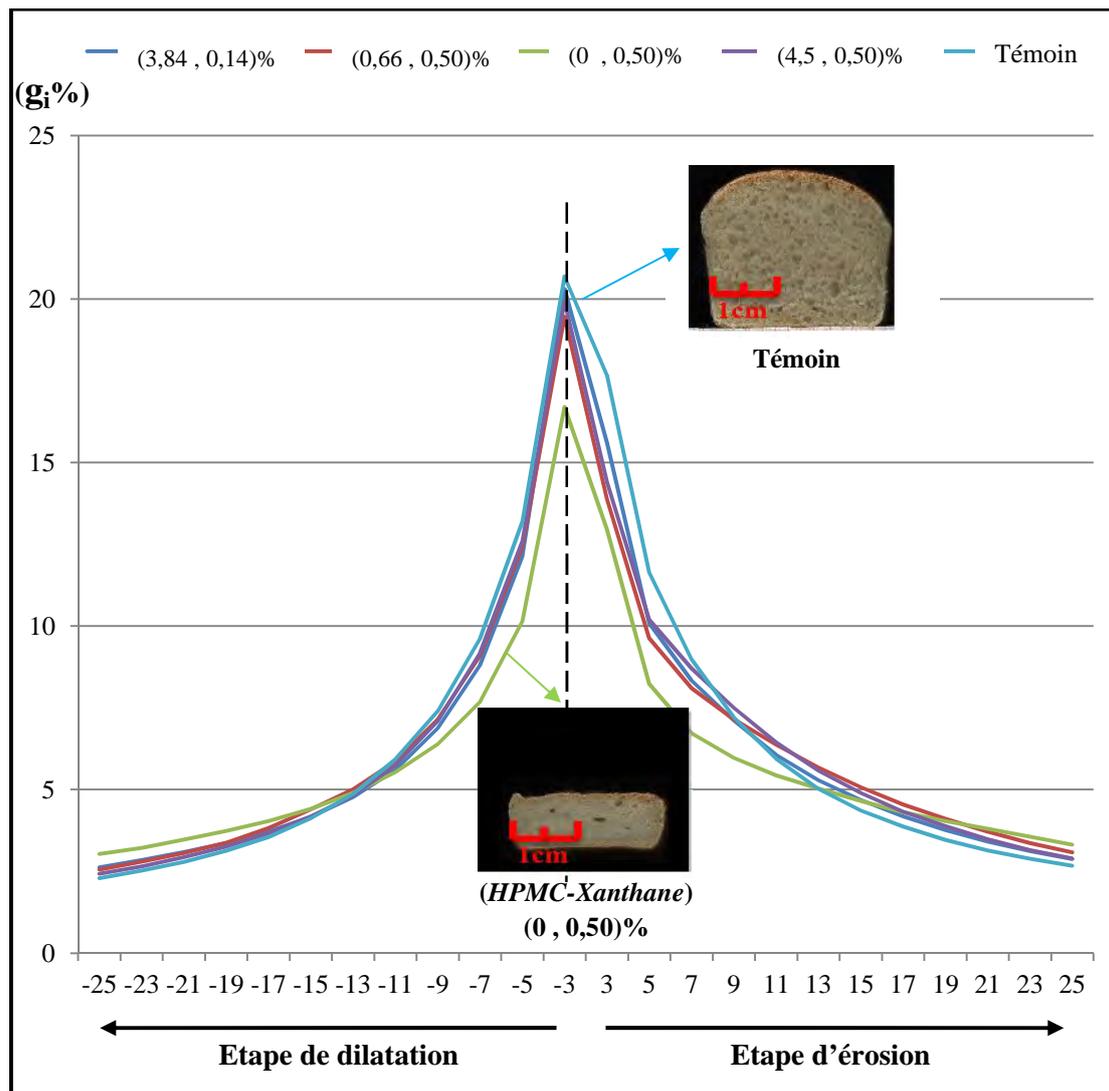


Figure 28. Courbes granulométriques en niveaux de gris des points de vérification et de témoin de blé tendre

b. Classification des pains par Analyse en Composantes Principales (ACP)

Après avoir tracé les courbes granulométriques en niveau du gris pour les images des mies traitées, une Analyse en Composantes Principales (ACP) permet de les classer (figure 29).

Nous avons choisi de travailler avec les deux composantes principales (CP1 et CP2), car elles expliquent plus de 87,36 % de la variance totale (CP1 : 62,28% et CP2 : 25,08%).

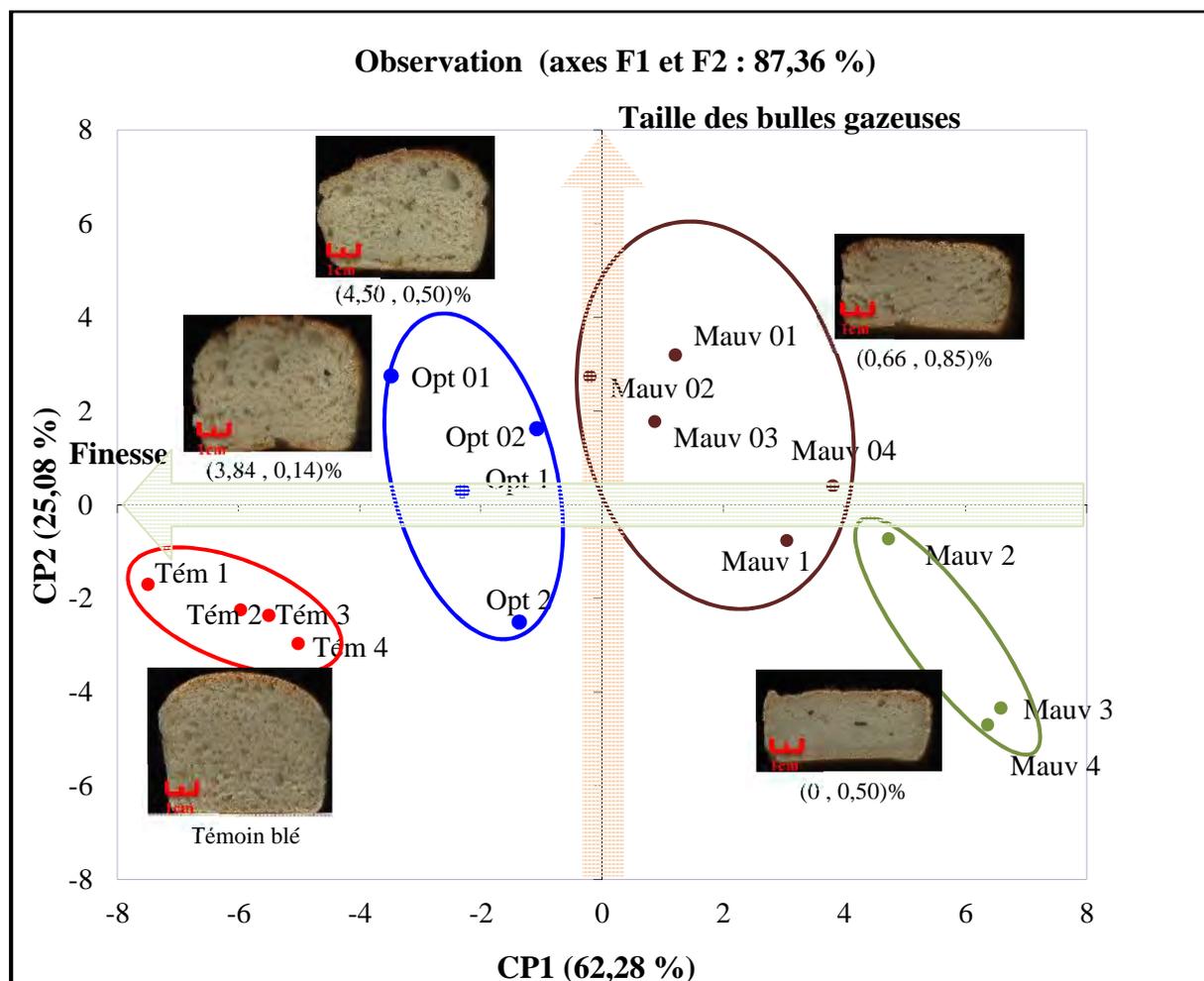


Figure 29. Carte de ressemblance issue de l'analyse en composantes principales (ACP) sur les courbes de texture granulométriques des images des pains sans gluten des points de vérification et de témoin de blé tendre

La première composante principale (CP1) permet de classer les pains en fonction de leurs V_{sp} . Cet axe sépare distinctement les pains ayant les meilleurs V_{sp} : témoin du blé tendre et les couples ($HPMC, Xanthane$) à l'intérieur de la zone optimale : ((3,84 , 0,14)% et (4,50 , 0,50)%) qui sont à gauche de la carte de ressemblance, de ceux des mauvais V_{sp} à droite de celle-ci : les couples ($HPMC, Xanthane$) en dehors de la zone optimale : (0,66 , 0,85)%, et (0 , 0,50)%.

La seconde composante principale (CP2) oppose les mies comportant des alvéoles de petite taille avec une distribution homogène (cas du témoin de blé tendre) à celles comportant une distribution alvéolaire bimodale. C'est le cas des PSG de la FRF à l'intérieur et en dehors de la zone optimale délimitée, correspondant respectivement aux: (3,84 , 0,14)% , (4,50 ,

0,50)%, (0,66 , 0,85)% et (0 , 0,50)%, qui se caractérisent par un mélange d'alvéoles de grande et de petite taille.

Nous remarquons d'après notre carte de ressemblance, que la direction de l'intensité de finesse que nous avons obtenue évolue de la droite vers la gauche contrairement à celle obtenue par LASSOUED (2005) et par BENATALLAH (2009). Ceci pourrait être du à l'effet de la combinaison de l'HPMC et de Xanthane.

Conclusion

La classification faite sur la base des opérations morphologique mathématique des PSG de la FRF à l'intérieur et en dehors de la zone optimale délimitée a permis la discrimination de ces pains en fonction de leurs Vsp et grain de mie. La première composante principale (CP1) semble classer ces pains en fonction de leurs Vsp avec les pains ayant les meilleurs Vsp à gauche de la carte de ressemblance (Témoin, couples (HPMC,Xanthane) (3,84 , 0,14)% et (4,50 , 0,50)%). La deuxième composante principale (CP2) classe les mies du plus homogènes avec une distribution similaire des cellules gazeuses (Témoin du blé tendre) à celles avec une distribution bimodale ayant un mélange d'alvéoles de grande et de petite taille, faisant ressortir les points (HPMC-Xanthane) du domaine optimum et hors domaine optimum. La direction de l'intensité de finesse que nous avons obtenue évolue de la droite vers la gauche contrairement à celle obtenue par LASSOUED (2005) et BENATALLAH (2009).

IV. CARACTERISTIQUES SENSORIELLES DES PAINS

La caractérisation sensorielle a concerné le témoin de blé tendre, l'optimum sans gluten : (3,84, 0,14)% et un point hors domaine optimum : (0,66 ,0,14)% (figure 30). Le test de classification par rang a permis de classer ces pains selon des descripteurs de couleur, d'aspect, de texture, d'arôme et de goût. Une échelle de 1 à 9 est donnée pour faire ressortir l'intensité de chaque attribut.

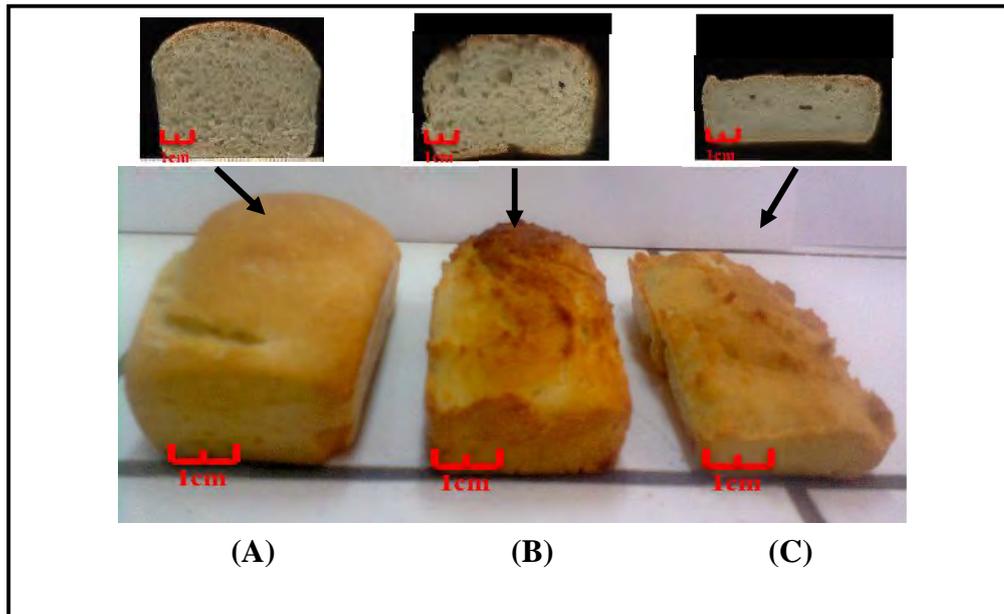


Figure 30. Echantillons des pains destinés à la caractérisation sensorielle

(A : Pain témoin du blé tendre ; B : PSG de la FRF optimum ; C : PSG de la FRF hors domaine optimum)

Ce test de classification permet de mettre en évidence les différences existant entre les échantillons et aussi de définir le profil sensoriel.

Le calcul de la statistique F de *Friedman* pour chaque descripteur montre une différence significative entre les pains témoin de blé tendre (échantillons A) et le pain sans gluten de la FRF hors domaine optimum (échantillon C) d'une part, et d'autre part, entre les pains sans gluten dans le domaine optimum (échantillon B) et hors domaine optimum (échantillon C).

Le tableau 16, montre les résultats de l'ANOVA à un facteur pour chacun des attributs étudiés.

Tableau 16. Test ANOVA pour les notes des attributs des échantillons de pains

Attributs	Pains témoin du blé tendre	Pains sans gluten de la FRF dans le domaine optimum	Pains sans gluten de la FRF hors domaine optimum
- <u>La couleur</u>			
Brunissement de la croûte	5,11 ^a	6,67 ^b	7,11 ^b
Couleur de la mie	5 ^a	4,67 ^a	4,67 ^a
- <u>L'aspect des pains</u>			
Epaisseur de la croûte	3,67 ^a	4,56 ^a	4,11 ^a
Régularité des alvéoles	6,89 ^b	6,44 ^b	3,44 ^a
- <u>La texture</u>			
Texture croustillante	4,44 ^a	5,44 ^a	6,78 ^b
Texture moelleuse	6,67 ^b	5,56 ^b	3,11 ^a
Elasticité	6,44 ^b	4,56 ^b	3,22 ^a
- <u>L'arôme</u>			
Arôme de pain de blé	7,22 ^b	4,44 ^a	3,67 ^a
Arôme de torréfaction	2,67 ^a	3,22 ^a	3,89 ^a
- <u>Le goût</u>			
Goût sucré	1,67 ^a	1,67 ^a	1,56 ^a
Goût salé	5 ^a	4,22 ^a	4,11 ^a
Goût amer	0,89 ^a	2,44 ^a	2,11 ^a
Goût acide	0,89 ^a	0,89 ^a	0,89 ^a

Les valeurs de la même ligne notées avec les mêmes descriptifs **a** ou **b** ne présentent pas de différences significatives au seuil de 5%.

A travers les notes attribuées aux différents descripteurs, nous avons tracé le profil sensoriel des trois échantillons de pains fabriqués pour la vérification de notre optimisation (figure 31).

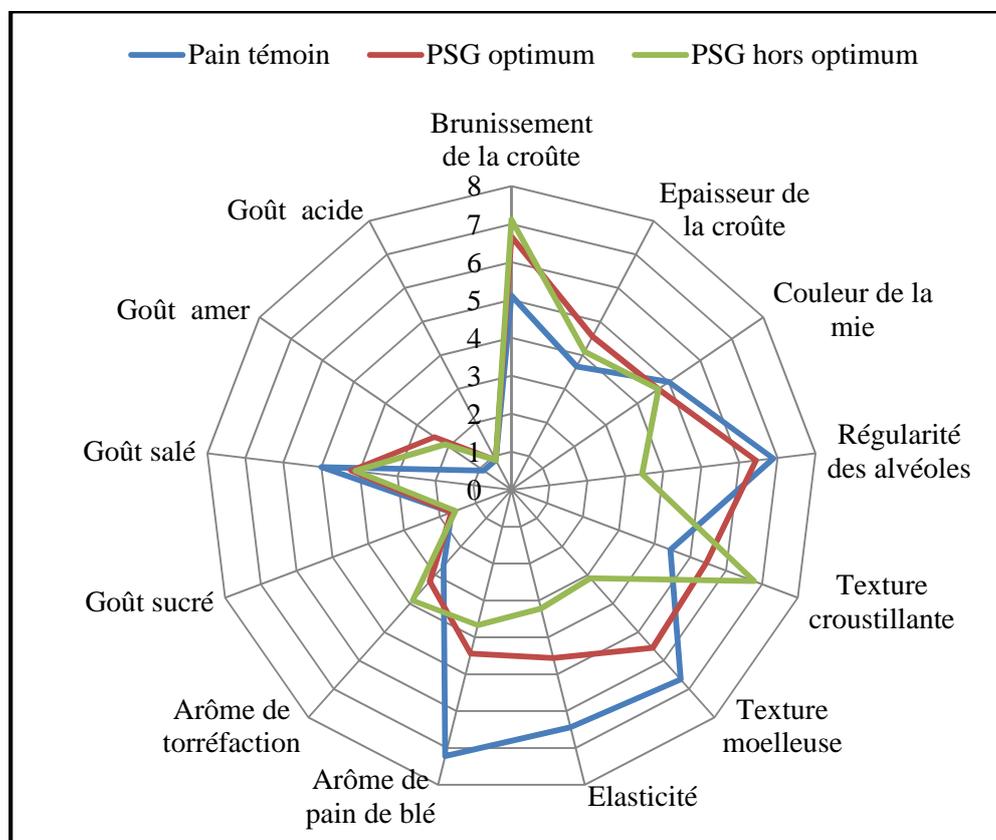


Figure 31. Profil sensoriel des pains fabriqués

La couleur

Les pains sans gluten, sont significativement plus foncés que le témoin blé. Aucune différence significative n'est observée entre la couleur des mies des trois pains étudiés.

L'aspect des pains

Aucune différence significative n'est observée entre l'épaisseur de la croûte des trois pains testés. Pour la régularité des alvéoles, le témoin et le pain sans gluten dans le domaine optimum se caractérisent par une structure alvéolaire régulière et significativement différente que celle du pain sans gluten hors domaine optimum.

La texture

Aucune différence significative n'est notée entre la texture (croustillante, moelleuse et élastique) de notre pain sans gluten dans le domaine optimum et le témoin blé.

L'arôme

L'attribut « Arôme de pain de blé » est significativement moins intense pour les pains sans gluten dans le domaine et hors domaine optimum que le témoin blé. Toute fois, aucune différence significative n'est observée entre l'arôme de torréfaction des trois échantillons des pains étudiés.

Le goût

Aucune différence significative n'est notée entre les goûts : sucré, salé, amer et acide des trois échantillons des pains étudiés.

Nos dégustateurs ont exprimés leurs préférences pour nos pains sans gluten de la FRF résultant des conditions optimales correspond au couple (HPMC,Xanthane) (3,84 , 0,14)%, le répertoriant en première position après le témoin de blé tendre.

Conclusion

Le test de classification par rang de Friedman et le questionnement des membres de jury a permis de classer les pains sans gluten de la FRF issue de domaine optimum correspond au couple (HPMC,Xanthane) (3,84 , 0,14)%, en première position après le témoin de blé tendre.

Nos pains sans gluten dans le domaine optimum sont plus foncés et présentent 'un arôme de pain de blé'' moins intense que le témoin blé. Toute fois, ils montrent la même régularité des alvéoles que le témoin blé.

Conclusions et
perspectives

Le principal objectif de ce travail est la formulation d'un pain sans gluten à base de la Formule Riz-Féverole (FRF), amélioré par la combinaison de deux hydrocolloïdes *l'HPMC* et *le Xanthane*, destiné à l'alimentation des malades cœliaques algériens.

La granulométrie de nos trois farines répondent aux exigences de la panification. Le calcul basé sur le rapport massique 2/3 riz 1/3 féverole utilisé pour la supplémentation de la formule montre une majoration de l'apport protéique ($12,58 \pm 0,33$)% en rapport avec la présence de la féverole dans celles-ci.

Les farines sans gluten (farine du riz, farine de féverole et la formule étudiée) présentent des caractéristiques alvéographiques inférieures à celles de témoin à base de farine de blé tendre.

La Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR) a permis de faire ressortir un domaine optimum [HPMC-Xanthane] correspond respectivement à [3 - 4,5]% d'HPMC et [0 - 0,55]% de Xanthane. A l'intérieur de ce domaine, les points ayant les V_{sp} les plus proches de celui du témoin de blé tendre ($V_{sp} = 3,05 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$) correspond aux couples (HPMC,Xanthane) : (3,84 , 0,14)% avec un V_{sp} de $2,30 \pm 0,06 \text{ cm}^3/\text{g}$ suivi de (4,5 , 0,5)% avec un V_{sp} de $2,25 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$. Les points hors ce domaine optimum : (0,66 , 0,85)% et (0 - 0,5)% présentent respectivement les valeurs des V_{sp} les plus faibles avec : $1,61 \pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{g}$ et $1,40 \pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{g}$. Les meilleures V_{sp} sont obtenus par des faibles taux de Xanthane (<0,5%) et des niveaux élevés en HPMC (>3%).

La première composante principale (CP1) a permis une classification des pains selon leurs V_{sp} et la deuxième composante principale (CP2) selon leurs grains de mie. La direction de l'intensité de finesse que nous avons obtenue évolue de la droite vers la gauche contrairement à celle obtenue par LASSOUED (2005) et par BENATALLAH (2009).

Le test de classification par rang de Friedman a permis de classer nos pains sans gluten de la Formule Riz- Féverole issue de domaine optimum en première position après le témoin de blé tendre. Notre pain optimum est plus foncé et présente « un arôme de pain blé » moins intense que le témoin blé. Mais, il montre la même régularité des alvéoles que ce témoin blé.

Cette étude montre la bonne faisabilité technologique de la formule sans gluten envisagée. Cependant il reste à chercher d'améliorer le grain de mie et les propriétés organoleptiques des pains sans gluten fabriqués. Pour cela, il serait intéressant de :

- Tester d'autres hydrocolloïdes simultanément ;
- Favoriser l'utilisation des plans d'expérience pour la recherche d'ingrédients pouvant avoir des effets sur la qualité des pains sans gluten ;
- Tester d'autres formules sans gluten ;
- Tester d'autres proportions céréales-légumes secs.

Références

Bibliographiques

« A »

AFNOR. 1991. Recueil de normes- contrôle de la qualité des produits alimentaires céréales et produits céréaliers. AFNOR/DGCCRF. 3ème édition. Paris. 360 p.

ADRIAN J., POTUS J. et FRANGUE R. , 1995. La science alimentaire de A à Z. Edit TEC et DOC, Lavoisier, France, 447p.

AHLBORN G.J., PIKE O.A., HENDRIX S.B., HESS W.M. et HUBER C.S. 2005. Sensory, mechanical and microscopic evaluation of staling in low-protein and gluten free breads. *Cereal chemistry*, (82), pp 328-335.

AKONO A., TALLA N.T., TONYE E., NYOUNGUI A.N. et DIPANDA A. 2006. High Order Textural Classification of two SAR ERS images on Mount Cameroon". *Geocarto International*, Vol 21, No 3.

ALAIS C. et LINDEN G. 1997. Biochimie alimentaire. ABREGES. 2ème édition, Masson, 254 p.

ALAIS C. LINDEN G. et MILLO L. 2008. Biochimie alimentaire. Edit Dunod, Paris, 42 p.

ALISTAIR M.S. 2010. Food polysaccharids and theirs applications. Vol 160 de Food science and technology. Edit CRC Press, 146p.

ARENDE E. et DAL BELLO F. 2011. Gluten-Free Cereal Products and Beverages. Food Science and Technology. Edit Academic Press, 299p.

ARSAN A. 2011. Alimentation de l'enfant, de la naissance à 3 ans. 5^{ème} édition, Wolters Kluwer France, 89p.

Association Américaine des chimistes de céréales (AACC). 2000. 10ème Edition, St.Paul.Mn, 2p.

ATWELL W. A. 2001. Wheat flour. Eagan press, Minnesota, USA, 123 p.

« B »

BAARDSETH P., KVAAL K., LEA P., ELLEKJAER M. R. et FAERGESTAD E.M. 2000. The effects of bread making process and wheat quality on French baguettes. *Journal of Cereal Science*, 32, 73-87.

BADOUD R., BAUER W.J., LOLIGER J. et ETOURNAUD A. 2010. Science et technologie des aliments : principe de chimie des constituants et de technologie des procédés. Edit PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES, pp 718-720.

- BAR, 1995.** In : **BENATALLAH Le. 2009.** Couscous et pain sans gluten pour malades cœliaques : Aptitude technologique de formules à base de riz et de légumes secs. Thèse de Doctorat, Option Sciences Alimentaires, *INATAA, Université Mentouri de Constantine* : 42 p.
- BÀRCENAS M. E. et ROSELL C. M. 2005.** Different approaches for improving the quality and extending the shelf life of the partially baked bread : low temperatures and HPMC addition. *Journal of Food Engineering*, **27** : 92-99.
- BELL D.A. 1990.** Methylcellulose as a structure enhancer in bread baking. *Cereal Food World*, **35** : 1001-1006.
- BEMILLER J.N. 2008.** Effects of cellulose derivatives and carrageenans on the pasting, paste, and gel properties of rice starches. *Carbohydrate Polymers*, **73**, 417-426.
- BENATALLAH Le. 2009.** Couscous et pain sans gluten pour malades cœliaques : Aptitude technologique de formules à base de riz et de légumes secs. Thèse de Doctorat, Option Sciences Alimentaires, *INATAA, Université Mentouri de Constantine* : 173 p.
- BENATALLAH Le., ZIDOUNE M.N et 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 (I.RE.CH.E.), Vol. 4, N. 5. ISSN 2035-1755(474-481)*
- BERREBI W. 2005.** Diagnostics et thérapeutique : guide pratique du symptôme à la prescription. Boeck Secundair, France : 277 p.
- BERTRAND D., LE GUERNEVE C., MARION D., DEVAUX M.F et ROBERT P. 1992.** Description of the textural appearance of bread crumb by video image analysis. *Cereal Chemistry*, **69**, 257-261.
- BLANCHARD C. 2007.** Morphologie floue et transformée en ondelettes sur des images de Codes à bulles. Prooftag SAS 20, Place Prax-Paris. F-82 000 MONTAUBAN – FRANCE, ENSICAEN, 13p.
- BLANCO C.A., RONDA F., PEREZ B. ET PANDO V. 2011.** Improving gluten-free bread quality by enrichment with acidic food additives. *Food Chemistry, ELSEVIER* (127)1204–1209.
- BLOCH I. 2003.** Fusion d'informations en traitement du signal et des images. Edit *Hermes Science Publications ISB*, 95p.
- BLOKSMA A.H. 1990.** Dough structure, dough rheology, and baking quality. *Cereal foods world*, (35), pp 237-244.
- BORN K., LANGENDORFF V. et BOULENGUER P. 2002.** Xanthan In A Steinbüchel, VANDAMME E. J. & DE BAETS S. (Eds), *Biopolymers. Weinheim: Weley-VCH*.

BOUASLA A. 2011. Prévalence de la maladie coeliaque à Constantine (1996-2008) et diététique associée auprès des patients de l'EHS Sidi Mabrouk de Constantine (2009). Mémoire de Magister en science alimentaire. Option : Nutrition Humaine. INATAA. Université Mentouri-Constantine. 80 p.

BOUDRAA G., BESSAHRAOUI M., BOUZIANE NEDJADI K., NIAR S., NACEUR M., BOUCHETARA A., BENMANSOUR A. et TOUHAMI M. 2008. Evolution de l'incidence de la maladie coeliaque chez l'enfant de l'ouest algérien (1975-2007). SFP 013: 949.

BOUDREAU A. et MENARD G. 1992. Le blé : éléments fondamentaux et transformation. *Donini Johnson, Canada, ISBN*, pp 135-141.

BOUREKOUA H. 2013. Mise au point d'une technique pour le suivi des cinétiques de fermentation de pâtes boulangères avec et sans gluten. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister. *INATAA. Université Constantine 1- Algérie*, 70 p.

BOUTIN J.P et DRONNE Y. 2008. La filière protéagineuse: Quels défis ? *Editions Quae*, 147 p.

BOUTROUX L. 2010. Le pain et la panification : chimie et technologie de la boulangerie et de la meunerie. *Librairie J.B. BAILLIER E.et fils*, pp 57-60.

BRADLEY JR. 1998. Moisture and Total Solids Analysis. In *Food Analysis*. Ed. NIELSEN S.S. 2nd Edition. Aspen Publishers, pp. 119-140.

BRANGER A., RICHER M.M. et ROUSTEL S. 2007. Microchimie et alimentation. *Edit Educagri, Paris*, pp 173-180.

BRANGER A., RICHER M.M. et ROUSTEL S. 2009. Alimentation, processus technologique et contrôles. *Edit Educagri, Paris*, pp 77-90.

BRIANI C., SAMAROO D., ALAEDINI A. 2008. Celiac disease: From gluten to autoimmunity, *Autoimmunity Reviews*, 7 : 644–650.

BROWN E. 2011. Gluten-Free Christmas Cookies. *Simon and Schuster ISBN*, 98 p.

BROWN E. 2012. Gluten-Free Holiday Baking. *Simon and Schuster ISBN*, 112 p.

« C »

CALVEL R. 1980. La boulangerie moderne. EYROLLES, 9^{ème} Edition, Paris, 459 p.

CALVEL R. 1984. La boulangerie moderne. EYROLLES, 10^{ème} Edition Paris, 460 p.

CAMARA C., GASTONC. et GAMEZ S. 2008. Sciences de la vie et de la Terre : Physique-Chimie. *Edit Bréal*. 77p.

CARIP C. 2009. Mise en œuvre des techniques culinaires. *Edit Tec et Doc, Lavoisier, Paris*, 256p.

CATO L., RAFAEL L.G.B., GAN J. et SMALL D.M. 2002. The use of rice flour and hydrocolloid gums for gluten free bread. *In: Proceeding of 51th Australian Cereal Chemistry Conference*, pp 304-308.

CHARGELEGUE A., GUINET R., NEYRENEUF O., ONNO B. et POITRENAUD B. 1994. La fermentation, *In: "La panification française"*. GUINET R. et GODON B. *Edit Tec et Doc, Lavoisier, Paris*, pp 283-325, 468 p.

CHEFTEL J.C et CHEFTEL H. 1992. Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, Vol 1. *Edit Tec et Doc, Lavoisier, Paris*, 381p.

CHEGRANI-CONAN C. 2007. Manger équilibré, c'est facile! Edit Eyrolles, 114p.

CHENE A. 2001. La farine. *Journal de l'ADRIANOR*, 26, 3-8.

CHTIOUI Y., BERTRAND D., DATTEE Y. et DEVAUX M.F. 1996. Identification of seeds by colour imaging - comparison of discriminant analysis and artificial neural network. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 71, 433-441

Codex Alimentarius, 2007. Normes Codex pour les céréales, légumes secs, légumineuses, produits dérivés et protéines végétales. Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires. 1^{ère} édition, *FAO/OMS, Rome*, 202 p.

COLAS A. 1991. Définition de la qualité des farines pour différentes utilisations. *In : "Les industries de première transformation des céréales"*. GODON B. et WILIM C. *Tec et Doc, Lavoisier*, 679 p.

COLAS A. et THARRAULT J. F. 1997. Granulométrie des particules. *In "Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales"*. Ed. GODON B. & LOISEL W. Lavoisier. Tec et Doc. Paris : 42-49. 819 p.

COLLAR C., ANDREU P., MARTÍNEZ J. C. et ARMERO E. 1999. Optimization of hydrocolloid addition to improve wheat bread dough functionality : a response surface methodology study. *Food Hydrocolloids*, **13** : 467-475.

COME D. et CORBINEAU F. 2006. Dictionnaire de la biologie des semences et des plantes, *Edit TEC ET DOC, Lavoisier, Paris*, 233 p.

COSTER M. et CHERMANT J. L. 1985. Précis d'analyse d'image. *Edit CNRS, France*, 521 p.

CROCKETT R., IE P. et VODOVOTZ Y. 2011. How do xanthan and hydroxypropyl methylcellulose individually affect the physicochemical properties in a model gluten-free dough? *Journal of Food Science*, 76(3), E274 - E282.

CUQ J. L. et LEYNAUD-ROUAUD C. 1992. Les graines de légumineuses, *In* : DUPIN H., CUQ J. L., MALEWIAK M. L., LEYNAUD-ROUAUD C. et BERTHIER A. M. Alimentation et nutrition humaines. *ESF éditeurs, Paris*, pp 941-961.

« D »

DANZART M. 1998. Statistique. *In*: Evaluation sensorielle - Manuel méthodologique, Vol.524., *DEPLEDT F. Edit. Tec et Doc, Lavoisier, Paris*, pp 219-317, 390 p.

DE REYNAL B. 2009. Additifs et auxiliaires de fabrication dans les industries agroalimentaires. 4^{ème} édition, *Lavoisier*, 417p.

DELACHARLERIE S. , DE BIOURGE S. , CHENE C. , SINDIC M. et DEROANNE C. 2008. HACCP, organoleptiques. Guide pratique. *Edit LES PRESSES AGRONOMIQUES, Belgique*, 155p.

DELFRATE R. et STEPHAN C. , 2005. Mieux connaître la farine. Les nouvelles de la boulangerie et pâtisserie. Spécial analyses. *Edit SOTAL*, pp 16-25.

DEMIRKESEN I., MERT B., SUMNU G. et SAHIN S. 2010. Rheological properties of gluten-free bread formulation. *Journal of Food Engineering*, (96), 295-303.

DEVAUX M.F., SIRE A. et PAPINEAU P. 2009. Macrovision et analyse granulométrique en niveaux de gris pour l'analyse histologique de tissus végétaux. *INRA*, pp 93-100.

DEVAUX, M. F., REGUERRE, A. L., CHIRON, H. et LASSOUED, N. 2005. Caractérisation par analyse d'image de produits céréaliers alvéolaires selon leur texture visuelle. *Cah. Tech. I.N.R.A.*, **56** : 17-32.

DOUMANDJI A. , DOUMANDJI S. , DOUMANDJI B. et MITICHE, 2003. Cours de technologie des céréales .Office des publications universitaires, pp : 52-59

DROOGENBROECK V. 1994. Traitement d'images numériques au moyen d'algorithmes utilisant la morphologie mathématique et la notion d'objet : application au codage. *Thèse de Doctorat, université catholique de Louvain, Ecole nationale supérieur des mines de Paris, France*, 239 p.

DUPIN H., CUQ J.L., MALEWIAK M.I., LEYNAUD-ROUAUD C. et BERTHIER A.M.1992. Alimentation et nutrition humaine. *Edit ESF*, pp 925-931, 1340 p.

DZIEZAK, J. D. 1991. Afocus on gums. *Food Technology*, **45** : 115 -132.

« E »

ELIASSON A.C et LARSON K. 1993. Cereal in breadmaking: a molecular colloidal approach. *Food science and technology, New York*, 376 p

« F »

- FAO. 1982.** Les graines de légumineuses dans l'alimentation humaine « étude FAO Alimentation et Nutrition (20) ». Rome. 152 p.
- FAO. 1990.** Utilisation des aliments tropicaux6Céréales, FAO, Rome, 76 p.
- F.A.O. 1996.** Codex Alimentarius : Céréales, légumes secs, légumineuses, produits dérivés et protéines végétales. *FAO. Vol 7. 2^{ème} édition. Rome.* 164 p.
- FAO et l'OMS. 2007.** Norme codex pour le riz - Codex Stan 198-1995. *In Céréales, légumes secs, légumineuses et matière protéique végétale. 1^{ière} édition.* FAO /OMS. Rome, 115 p.
- F.A.O. 2009.** Perspectives des récoltes et situation alimentaire- N.01 : 44 p.
- FEILLET P. 2000.** Le grain de blé, composition et utilisation. *Edit INRA, Paris,* pp 279-290.
- FONTAN C. 2008.** Développer les filières vivrières en Afrique de l'Ouest: l'exemple du riz en Guinée. *Edit L'Harmattan,* pp142-148.
- FOUCART T. 1982.** Analyse factorielle. Programmation sur micro-ordinateur. *Edit MASSON, Paris,* 243p.
- FOULD-SPRINGER. 1996.** Levure et panification. Memento des technologies agroalimentaires ; *Lesaffre/techno Nathan, Paris,* 75p.
- FRANÇOIS C. 2009.** Le régal végétal : plantes sauvages comestibles. Encyclopédie des plantes sauvages. *Edit SANG DE LA TERRE,* 526 P.
- FREDOT E. 2005.** Connaissance des aliments, bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique. *Edit Tec et Doc, Lavoisier, Paris,* 165- 266.
- FRIESEN J. 2013.** The Everything Guide to Living Gluten-Free: The Ultimate Cooking, Diet, and Lifestyle Guide for Gluten-Free Families! *Edit Adams Media,* 215 p.

« G »

- GALLAGHER E., GORMLEY T. R., et ARENDT E. K. 2003.** Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *J. Food Eng,* **56** : 153-161.
- GALLAGHER E., GORMLEY T. R., et ARENDT E. K. 2004.** Recent advances in the formulation of gluten-free cereal based products. *Trends in Food Science and Technology* (15), 144-152.
- GALLAGHER E, 2009.** Gluten-Free Food Science and Technology. *Edit John Wiley & Sons,* 113 p.

- GAN Z., ELLIST P.R. et SCHOFIELD D. 1995.** Mini review- Gas cell stabilization and gas retention in wheat bread dough. *Journal of Cereal Science* (21), 215-230.
- GHERAIRIA N. 2011.** Pain sans gluten pour malades cœliaques : aptitudes technologique d'une formule riz-fèverole. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister. *INATAA. Université Constantine 1- Algérie*, 102 p
- GLICKSMAN M. 1982.** Functional properties of hydrocolloids. In: Glicksman M. (ed): *Food Hydrocolloids*. CRS Press, Boca Raton, Florida. (V.1), pp 47-99, 270 p.
- GODON B. 1991.** Les constituants des céréales: nature, propriétés et teneur. In «la biotransformation des produits céréaliers». *Edit Tec & Doc, Lavoisier, Paris*. France, 221p.
- GODON B. et WILLM C. 1991.** Les industries de 1ère transformation des céréales. *Tec et Doc, Lavoisier, Paris*, 140 p.
- GODON B. et LOISEL W., 1997.** Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. *Edit TEC et DOC, Lavoisier*, pp 317-589.
- GOESAERT H., BRIJS K., BLANCOC A. et ROSELL C.M. 2007.** Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow larger cakes. *Food Hydrocolloids*, 22p.
- GOUPY J. 2000.** Modélisation par les plans d'expériences. Edit *TECHNIQUES DE L'INGENIEUR*, pp 1-23.
- GOUPY J. & CREIGNTON L. 2006.** Introduction aux plans d'expériences. *Edit Donud*. 336 P.
- GRANDVOINNET P. et PRATX B. 1994.** Farines et mixes *.In :''la panification française''*. Edit *Lavoisier-Apria, Tec et Doc, Paris*, 534 p.
- GUARDA A., ROSELL C.M., BENEDITO C. et GALOTTO M.J., 2004.** Different hydrocolloids as bread improvers and antistaling agents. *Food Hydrocolloids* 18, 241e247.
- GUEGUEN N. et Duc L. 2008.** La filière protéagineuse: Quels défis ? *Editions Quae*, 150 p.
- GUICHARD E. et VOILLEY A. 2012.** Texture et flaveur des aliments: Vers une conception maîtrisée. *Educagri Editions*, 176 p.
- GUIMARÃES P.E. 2009.** Rice Breeding. In *Cereals – Handbook of Plants Breeding*. Vol. 3. Edit *CARENA J.M. Springer Science and Business Media*, pp 99-126
- GUINET R. et GODON B. 1994.** La panification française. *Edit Lavoisier-Apria, Tec et Doc, Paris*, 534 p.

GUJRAL H.S., GUARDIOLA I., CARBONELL J.V. et ROSELL C.M. 2003. Effect of cyclodextrin glycosyl transferase on dough rheology and bread quality from rice flour. *J. agricole. Food Chem* (51), 3814-3818.

« H »

HAGER A.S., WOLTER A., CZERNY M., BEZ J., ZANNINI E. et ARENDT, E.K. 2012. Investigation of product quality, sensory profile and ultra-structure of breads made from a range of commercial gluten free flours compared to their wheat counterparts. *European Food Research and Technology*, 235(2), 333-344.

HAGER A.S. et K. ARENDT. 2013. Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids, ELSEVIER*, (32) 195-203.

HAQUE A., RICHARDSON R.K., MORRIS E.R., GIDLEY M.J. and CASWELL D.C. 1993. Thermogelation of methylcellulose. Part II : Effect of hydroxypropyl substituent. *Carbohydrate Polymers*, **22** : 175-186.

HARBERS. 1998. Ash analysis. In *Food analysis*. Ed. NIELSEN S.S. *2nd Edition*. Aspen publishers, pp. 141-150, 258 p.

HONG W. et KINAM P. 2011. Oral Controlled Release Formulation Design and Drug Delivery: Theory to Practice. *Edit John Wiley & Sons*, 78 p

HUI Y.H. 2008. Bakery Products: Science and Technology. *Edit John Wiley & Sons*, 266 p

« J »

JEANGUYOT M. et AHMEDI N. 2002. Grain de riz, grain de vie. *Edit Quae*, pp 89-95.

JEANTET R., CROGUENNEC T., SCHUCK P. et BRULE G. 2007. Sciences des aliments, vol 2. *Edit TEC et DOC, Lavoisier, paris*, pp 133-160.

J.O.R.A. 1991. Décret executif N° 91/572 du 31 décembre relatif à la farine de panification au pain.

JULIANO B.O. 1985. Rice: chemistry and technology. St Paul, MN, Am. Assoc. Cereal Chem, 2nd edition, USA, 774p.

JULIANO B.O. 1994. Le riz dans l'alimentation humaine. Collection FAO. Alimentation et nutrition. N° 26. Rome, pp 39-114, 289 p.

«K»

KAMMAN P.W. 1970. Factors affecting the grain and texture of white bread. *The Bakers Digest*, 44, 34-38.

KALOGIANNIS S., IAKOVIDOU G., LIAKOPOULOU-KYRIAKIDES M.,

KOBYLAŇSKI J.R., PÉREZ O.E. et PILOSOFF A.M.R. 2004. Thermal transitions of gluten-free dough's as affected by water egg with and hydroxyl propyl methyl cellulose. *Thermochimica Acta* (411), 81-89.

KYRIAKIDIS D.A. et SKARACIS G.N. 2010. Optimization of xanthan gum production by *Xanthomonas campestris* grown in molasses. *Process Biochemistr.* (39), 249-256.

« L »

LAFAY O. 2010. Méthodes de nutrition ; Gérer l'équilibre. *Edit Amphora*, 298 p.

LAIGNELET B. 1997. Appréciation de la qualité technologique du riz. *In : GODON B. et LOISEL W.* Guide pratique d'analyse dans les industries des céréales. *Edit Tec et Doc, Lavoisier, Paris*, pp 728-743.

LANZMANN-PETITHORY D. 2002. La diététique de la longévité. *Edit Odile Jacob*, 116p.

LAPASIN R. et PRICL S. 1995. Rheology of Industrial Polysaccharides: Theory and Applications. *Edit Springer*, 428P.

LARSSON H. et ELIASSON A.C. 1997. Influence of the starch granule surface on the rheological behaviour of wheat flour dough. *Journal of Texture Studies*, **28** : 487-501.

LASSOUED N. 2005. Structure alvéolaire des produits céréaliers de cuisson en lien avec les propriétés rhéologiques et thermiques de la pâte : Effet de la composition. *Thèse de doctorat.* ENSIA, France ,163 p.

LASSOUED N., BABIN P., DELLA VALLE G., DEVAUX M.F., REGUERRE A.L. 2007. Granulometry of bread crumb grain: Contributions of 2D and 3D image analysis at different scale. *Food Research International.* ELSEVIER, France, 40, 1087–1097.

LAZARIDOU A., DUTA D., PAPAGEORGIU M., BELC N. et BILIADERIS C.G. 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulation. *Journal of Food Engineering*, (79) 1033-1047.

LE BLANC A. , 2008. Alimentation humaine. Condensé de cours, *ENSMIC*, 5p.

LECOMTE C. 2005. L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype – milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Thèse de doctorat, *INRA*, p 6.

LERNER A. 2010. New therapeutic strategies for celiac disease. *Autoimmunity Reviews*, 9 : 144-147.

LEUREUX G. 1999. 9 céréales à votre table. *Edit Vivez Soleil*, pp 111-117.

LEVAVASSEUR L. 2007. Suivi simultané de la consommation d'oxygène et de la consistance des pâtes de farine de blé à l'aide d'un pétrin instrumenté (le sitoxygraphe) : tentative d'explication biochimique et rhéologique. Application à l'ajout de laccases. *Thèse de doctorat*. Agro. Paris Tech, France, 415 p.

LIU Y.C., SHEPHER K.W. and HOSENEY R.C. 1996. Improvement of durum wheat postamaking and bread making qualities. *Cereal Chemistry*, 73, pp. 155-166.

«M»

MAGDIC D. 1999. Digital Image Analysis in: The Digital Image Analysis Algorithm of Bread Medium Part, Master thesis, FFT Zagreb, pp 65-68, 190 p.

MARCO C., ROSELL C., 2008. Breadmaking performance of protein enriched, gluten-free breads. *European Food Research and Technology* 227, 1205-1213

MARTÍNEZ-ANAYA, M. A. and JIMÉNEZ, T. 1997. Functionality of enzymes that hydrolyse starch and non-starch polysaccharide in breadmaking. *Zeitschrift fur lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 205 : 209 – 214.

MASSAUX M. et SINDIC M. 2006. Valorisation de l'amidon de blé: Incidences des modalités de culture sur les propriétés techno-fonctionnelles. *Edit Presses Agronomiques de Gembloux*, 56 p.

MC CARTHY, D. F., GALLAGHER, E., GORMLEY, T. R., SCHOBBER, T. J., and ARENDT, E. K. 2005. Application of Response Surface Methodology. *Cereal Chem*, 82 : 609-615.

MCARDLE W., KATCH F.I. et KATCH V.L. 2004. Nutrition et performances sportives. *Edit Boeck supérieur*, 340 p.

MELCION J.P. 2000. La granulométrie de l'aliment : principe, mesure et obtention. *INRA Prod. Anim, Paris. Vol 13, n° 2*, pp 81-89.

METTELER, E. and SEIBEL, W. 1995. Optimizing of rye bread recipes containing monodiglyceride, guar gum, and carboxymethyl cellulose using a maturographe and an oven rise recorder. *Cereal Chemistry*, 72 : 109-115.

MEZIANI S. , 2011. Influence du procédé de congélation sur les levures et les propriétés techno-fonctionnelles des pâtes sucrées (type Kougelhopf). Thèse présenté en vue de

l'obtention du diplôme de doctorat en procédés biotechnologiques et alimentaires, *INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, Université NANCY*, p 17.

MI Y. K., HYUN M. S. et HAE C.C. 1997a. Varietal variation in gelatinisation and adaptability to rice bread processing and their interrelation, *Korean Journal of Crop Science*, **42**, 344-351.

MI Y. K., YEONG H. C. et HAE C. C. 1997b. Interrelation between physicochemical properties of milled rice and retrogradation of rice bread during cold storage, *Journal of the Korean Society of Food science and Nutrition*, 1997 (b), **26**, 886-891.

MI Y. K., YEONG H. C. et HAE C. C. 1997c. Effects of gums, fats and glutes adding on the processing quality of milled rice bread, *Journal of the Korean Society of Food science and Nutrition*, 1997 (c), **29**, 700-704.

MOLINIER A. 2007. Molinier pathologie médicale et pratique infirmière : Tome 2. *Edit Wolters, France*, 138 p.

MONTEL M.C., BERANGER C. et BONNEMAIRE J. 2005. Les fermentations au service des produits de terroir. *Edit INRA*, pp 151 – 154, 320 p.

MOORE M. M., SCHOBERT T. J., DOCKERY P. and ARENDT E. K. 2004. Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters, and breads. *Cereal. Chem.*, **81** : 567-575.

MORRIS E. R. 1995. Rheology of hydrocolloids. In Phillips G.O., Wedlock D. J., and Williams P. A. (eds). *Gums and Stabilisers for the food Industry*. Pergamon Press, Oxford. (V, 2), pp. 57-78.

« N »

NAITO S., ISHIDA N., TAKANO H., KOIZUMI M. et KANO H. 2003. Routine evaluation of the grain structures of baked breads by MRI. *Food Science and Technology Research*, **9**, 155-161.

NAMOUS H. 2013. Formulation d'une farine-biscuit de sevrage sans gluten à base de Riz, Maïs et Pois Chiche. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister. *INATAA. Université Constantine 1- Algérie*, 80 p.

NIEWINSKY M.M. 2008. Advances in celiac disease and gluten-free diet. *J Am Diet. Assoc.* **108** (4) 661-672.

NOUT R., HOUNHOUGAN J.D. et BOEKET T. 2003. Les aliments : transformation, conservation et qualité. *Back Luys Publishers, ISBN, Germany*, pp 217-223.

« O »

OLIVIER H. 2010. Analyse d'image : caractérisation de textures d'images de gels lactés. Institut national de recherche agronomique (INRA).UMR génie et microbiologie des procédés alimentaires, avenue Lucien Brétigères, France, pp 3-11.

« P »

PACAUT P. 2005. Les bons sucres pour maigrir. *Edit Alpen, s.a.m.*, 95 p.

PERESSINI D. et SENSIDONI A. 2009. Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs. *Journal of Cereal Science*, 49, 190-201.

PERESSINI D., PIN M. et SENSIDONI A. 2011. Rheology and breadmaking performance of rice-buckwheat batters supplemented with hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*,(25), 340-349.

PEREZ J. 2001. Matériaux non cristallins et sciences du désordre 2ème cycle. *PPUR Presses polytechniques, ISNB*, 557 p.

PESSON P. et LOUVEAUX J. 1994. Pollinisation et production végétales. *Edit Quae*, 293p.

PHIMOLSIRIPOL Y., MUKPRASIRT A. et SCHOENLECHNER R. 2012. Quality improvement of rice-based gluten-free bread using different dietary fibre fractions of rice bran. *Journal of Cereal Scienc, Elsevier* (56), 389-395.

PREEDY V.R., WATSON R.S. et MARTIN C.R. 2011. Handbook of Behavior, Food and Nutrition. *Edit Springer*, 1089p.

PROLEA, 2007. La féverole de la plante à ses utilisations, Filière Française des huiles et protéines végétales, Paris, 6p.

PRUSKA-KEDZIOR A., KEDZIOR Z. & KLOCKIEWICZ-KAMINSKA E., 2008. Comparison of viscoelastic properties of gluten from spelt and common wheat. *Eur. Food Res. Technol.*, 227, 199-207.

« Q »

QA International Collectif, 1996. L'Encyclopédie visuelle des aliments. Québec Amérique, 340 p.

« R »

REGINA V. et TELIS N. 2012. Biopolymer Engineering in Food Processing. *CRC Press*, 367p.

RINAUDO M. 1994. Relation between the molecular structure of some polysaccharides and original properties in sol and gel states. *Food Hydrocolloids*, 15, 433 - 440.

RIVAL A. 2005. Le pain chez soi. France agricole, 129 p.

ROMANO A., CAVELLA S., TORALDO G. et MASI P., 2013. 2D structural imaging study of bubble evolution during leavening. *Food Research International*. ELSEVIER. Italy, 50, 324-329.

ROSALAM S. and ENGLAND R. 2006. Review of xanthan gum production from unmodified starches by *Xanthomonas Comprestris* sp. *Enzyme and Microbial Technology*, (39), pp. 197-207.

ROSELL C.M., ROJAS J.A. and DE BARBER C.B. 2001. Combined effect of different antistaling agents on the pasting properties of wheat flour. *European Food Research and Technology*, 212, 473-476.

ROSELL M.C., COLLAR C. & HAROS M. 2007 . Assessment of hydrocolloid effects on the thermo-mechanical properties of wheat using the Mixolab. *Food Hydrocolloids*, 21, 452-462.

ROUDAUT H. et LEFRANCQ E. 2005. Alimentation théorique. Edit DOIN, France, 303 p.

ROUILLE J., DELLA VALLE G., DEVAUX M.F., MARION D. and DUBREIL L. 2005. French bread loaf volume variations and digital image analysis of crumb grain changes induced by the minor components of wheat flour. *Cereal Chemistry*, 82, 20-27.

ROUQUETTE C. 2002. Médecine, chirurgie et soins infirmiers. Wolters Kluwer, France, 165 p.

ROUSSEL P. et CHIRON H. 2002. Les pains français : évolution, qualité, production. collection science et technologie des métiers de bouche, MAT/ ERTI, 1ère édition, France, 200p.

ROUSSEL P. et CHIRON H. 2003. Les pains français, évolution, qualité et production. Edit MAE-ERTI, France, 293 p.

ROUX D. et CATIER O. 2007. Botanique, pharmacognosie, phytothérapie. 3ème édition, Wolters Kluwer, France, 60 p.

« S »

SABANIS D., TZIA C., 2011. Selected structural characteristics of HPMC-containing gluten free bread: a response surface methodology study for optimizing quality. *International Journal of Food Properties* 14, 417-431.

SABLANI S.S., MARCOTTE M., BAIK O.D. et CASTAIGNE F. (1998): Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process. *Lebensmittel-Wissenschaft and technology*, (31), pp. 201-209.

SAIDAL. 2010. Santé. Dossier: la maladie cœliaque. Science et santé. Publication Trimestrielle éditée par le groupe SAIDAL. 3^{ème} Trimestre, 2010, Numéro 8. 84 p.

SAKR N et HAJJ MOUSSA E. 2007. Comparaison de la qualité des blés libanais à celle des variétés importées de l'étranger et destinées à la préparation du pain libanais. *Lebanese Science Journal*, 8, 87-103.

SÁNCHEZ H.D., OSELLA C.A., DE LA TORRE M.A. 2002. Optimisation du pain sans gluten préparé à partir de fécule de maïs, farine de riz et l'amidon de manioc. *Journal of Food Science* **67** (1) : 416-419.

SAPIRSTEIN H.D., ROLLER R. et BUSHUK W. 1994. Instrumental measurement of bread crumb grain by digital image analysis. *Cereal Chemistry*, 71, 383-391.

SARKAR N. and WALKER L.C. 1995. Hydration-deshydration properties of methylcellulose. *Carbohydrate Polymers*, **27** : 177-185.

SCANLON M.G. et ZGHAL M.C. 2001. Bread properties and crumb structure. *Food Research International*, 34, 841-864.

SCHMITZ J. et GARNIER-LENGLINE H. 2008. Diagnostic de la maladie cœliaque en 2008. *Archives de pédiatrie*, 15 : 456-461.

SCHWARTZ D. 1993. Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. *Flammarion Médecine Science*, Paris, 306 p.

SCIARINI S. L., RIBOTTA D. P., LEON E.A. & PEREZ, T. G. 2008. Influence of gluten-free flours and their mixtures on batter properties and bread quality. *Food and Bioprocess Technology* 2, 328-339.

SCIARINI L.S., RIBOTTA P.D., LEON A.E., PEREZ G.T., 2010. Influence of gluten-free flours and their mixtures on batter properties and bread quality. *Food and Bioprocess Technology* 3, 577-585.

SHAPTER J. 2007. Le grand livre des machines à pain: les meilleures recettes. Editions de Borée, 287p.

SHARADANANT, R. and KHAN, K. 2003. Effect of hydrophilic gums on the quality of frozen dough : II. Bread characteristics. *Cereal Chemistry*, **80**, : 733-780.

SIMON L. 2001. Gomme xanthane. Agent viscosant et stabilisant. *Techniques de l'ingénieur*, Paris. Vol.6. J6670, pp.1-8.

SIMON L. and CERLES B. 2000. Gomme xanthane. *Techniques de l'ingénieur*, Paris. Vol.6. J6670, pp.1-10.

SINHA N. 2007. Handbook of Food Products Manufacturing, 2 Volume Set. *Edit John Wiley and Sons*, 1028 p.

SIVARAMAKRISHNAN, H. P., SENGE, B. and CHATTOPADHYAY, P. K. 2004. Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of food engineering*, **62** : 37 -45.

SMOLARZ A., VAN HECKE E. and BOUVIER J.M. 1989. Computerized image analysis and texture of extruded biscuits. *Journal of Texture Studies*, **20**, 223-234.

SOILLE P. 2003. Morphological Image Analysis : Principles and Applications, Berlin ; Springer-Verlag, 391p.

SPILLER G.A. et SPILLER M. 2007. Tout savoir sur les fibres. Les Éditions le mieux-être, 245 p.

ŠRAMKOVA Z., GREGOVA E., STURDIK E. 2009. Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta chimica slovacica*, vol.2, No.1, 115-138.

STRIGLER F. 2011. L'alimentation des Laotiens: cuisine, recettes et traditions au Laos et en France. KARTHALA Editions, pp 298-302p.

SUITTU T.A., AMINU R.A. et ABULUDE E.O. 2009. Functional effect of xanthan gum on composite cassava-wheat dough and bread. *Food Hydrocolloids*(23),2254-2260.

« T »

TAUPIER-LETAGE B. 2005. La qualité des blés panifiables en agriculture Biologique. N° : 71. *Edit Alter Agri*, pp 10-14.

TORBICA A., HADNADEV M. and DAPCEVIC T. 2010. Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *Food hydrocolloids*, *ELSEVIER*. **24**, 626-632.

TOUFEILI, I., LAMBERT, I. A. and KOKINI, J.L. 1994. Effect of glass transition and crosslinking on rheological properties of gluten: development of a preliminary state diagram. *Cereal Chemistry*, **79** : 138-142.

« V »

VAN VLIET T., JANSSEN A.M., BLOKSMA A.H. and WALSTRA P. 1992. Strain hardening of dough as a requirement for gas retention. *Journal of Texture Studies*, **23**, 439-460.

VANCE G. et LACALAMITA T. 2011. Bread Machines For Dummies. *Edit John Wiley & Sons*, 134p.

VANDERGOOT A.J., PEIGHAMBARDOUST S.H., FALLAH E. et HAMER R.J. 2010. Aeration of bread dough influenced by different way of processing. *Journal of Cereal Science*. Edit ELSEVEIR, pp 89-95.

VIERLING E. et FRENOT M. 2001. Biochimie des aliments diététiques du sujet bien portants, Wolters Kluwer, France, 267 p.

VIERLING E. 2003. Aliments et boissons, filières et produits. Edit DOIN, France, pp160-169.

VIERLING E. 2008. Aliments et boissons, technologies et aspects réglementaires. Wolters Kluwer, France, 290 p.

«W»

WARD F. M. and ANDON S. A. 2002. Hydrocolloids as film formers, adhesives, and gelling agents for fakery and cereal products. *Cereal Food World*, **47** : 52-55.

WATTS B.M., YLIMAK G.L., JEFFERY L.E. & ELIAS L.G. 1991. Méthode de base pour l'évaluation sensorielle des aliments. Centre de recherche pour le développement, Canada. 159 p.

WENNIGER M.A. 2005. Best-Ever Wheat-and Gluten-Free Baking Book. *Edit Fair Winds*, 189 p.

WRIGLEY C. 2004. Cereals. In *Encyclopedia of Grain Science*. Editors: WRIGLEY, C., CORKE, H., WALKER, E.C. Edition: Elsevier, vol I. pp 187-273, 320 p.

«Y»

YLIMAKI, G., HAWRYSH, Z.J., HARDIN, R.T. and THOMSON, A.B.R. 1991. Application of response surface methodology to the development of flour yeast breads objective measurements. *Journal of Food Science*, **53** : 1800-1805.

YOSHIDA T. et TANNER R.D. 1993. Bioproducts and bioprocess, Vol.2. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, Germany.

«Z»

ZAYAS I.Y. 1993. Digital image texture analysis for bread crumb grain evaluation. *Cereal Foods World*, **38**, 760-766.

ZGHAL M.C., SCANLON M.G. et SAPIRSTEIN H.D. 1999. Prediction of bread crumb density by digital image analysis. *Cereal Chemistry*, **76**, 734-742.

Annexes

Annexe 1 : Fiche de test Hédonique

NOM :

PRENOM :

DATE :

- Veuillez examiner et goûter chaque échantillon des pains A, B et C, puis donnez une note de 1 à 9 selon l'intensité du caractère.

		A	B	C
Couleur	{ Brunissement de la croûte			
	{ Couleur de la mie			
Aspect des pains	{ Epaisseur de la croûte			
	{ Régularité des alvéoles			
Texture	{ Texture croustillante			
	{ Texture moelleuse			
	{ Elasticité			
Arôme	{ Arôme de pain de blé			
	{ Arôme de torréfaction			
Goût	{ Goût sucré			
	{ Goût salé			
	{ Goût amer			
	{ Goût acide			

Classez les trois échantillons par ordre de préférence (du plus préféré au moins préféré) :

Annexe 2 : Illustration du matériel utilisé pour la caractérisation physico-chimique des farines (I.N.A.T.A-A, 2014)



Tamiseuse de laboratoire



Four à moufle



a : Minéralisateur



b : Distillateur



c : Burette de titration

Appareillage destiné à la méthode de KJELDAHL



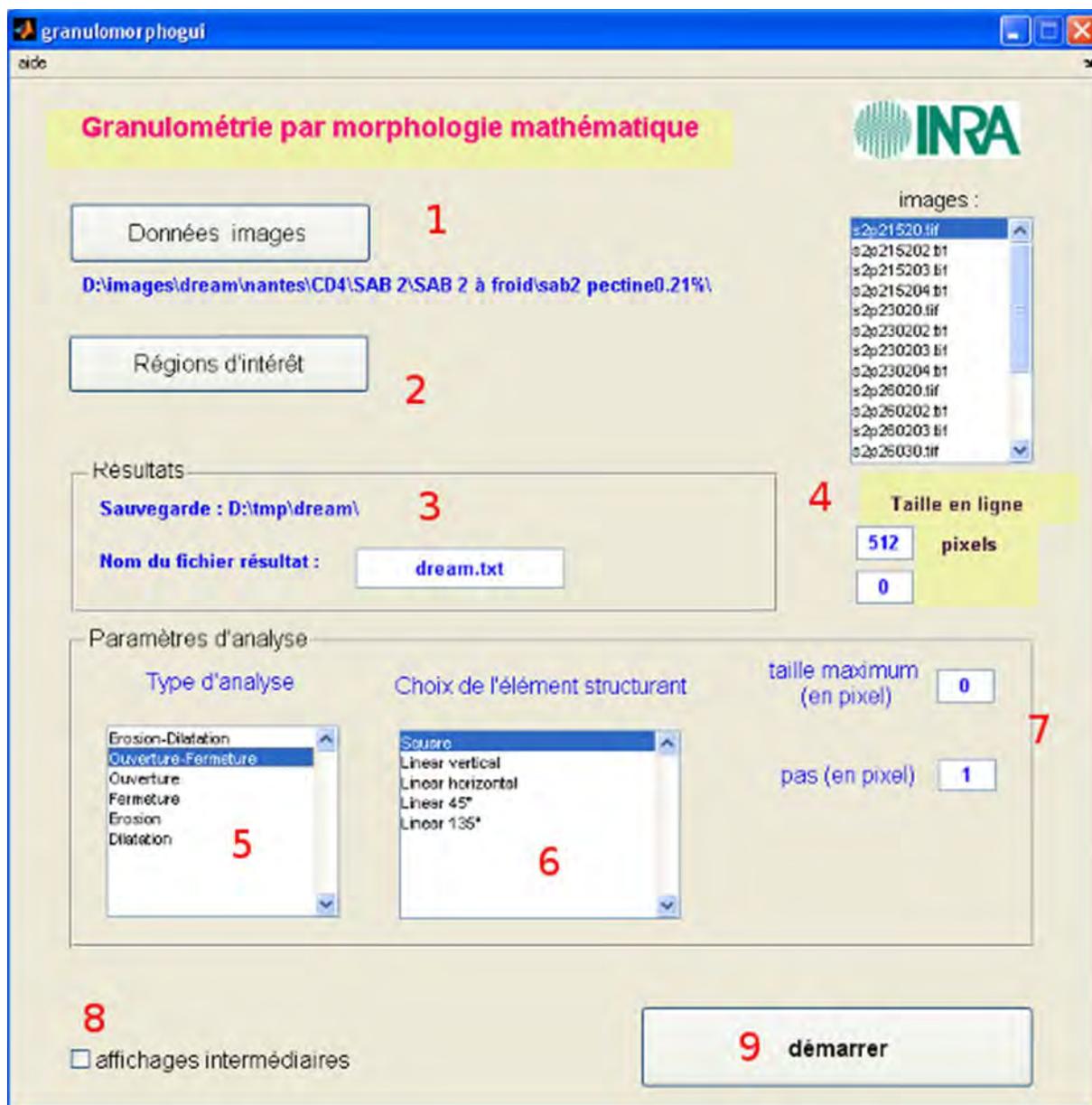
Unité d'extraction 1043



Module thermostat 1044 (bain d'huile)

Appareil SOXTEC HT

Annexe 3 : Exemple du programme granulomorphogui en cours d'utilisation



Résumé

L'objectif de cette étude consiste à formuler un pain sans gluten à base de Riz et de Féverole, amélioré par la combinaison de deux hydrocolloïdes (*HPMC-Xanthane*) destiné à l'alimentation des malades cœliaques algériens.

Une caractérisation physico-chimique et rhéologique par l'Alvéographe Chopin des matières premières est réalisée. La Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR) est utilisée pour l'optimisation de la panification sans gluten. Ceci a nécessité l'emploi d'un plan d'expérience central composite à deux facteurs (*HPMC-Xanthane*) et à cinq niveaux. La réponse choisie est le volume spécifique (V_{sp}). Les intervalles des taux *HPMC-Xanthane* utilisés sont respectivement [0 - 4,5] % et [0 - 1] %. Les effets de la combinaison de ces deux hydrocolloïdes (*HPMC-Xanthane*) sur la qualité boulangère du pain sans gluten ont été étudiés. Les points de vérification sont caractérisés par analyse d'image et analyse sensorielle.

Les tests de panification ont donné des pains avec des structures alvéolaires et des volumes spécifiques différents. Les pains sans gluten ayant donné les V_{sp} les plus proches de celui du témoin de blé tendre ($V_{sp} = 3,05 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$) sont inclus dans la zone optimale avec les teneurs les plus élevées en HPMC [3 - 4,5]% et les faibles taux de Xanthane [0 - 0,55] %.

L'Analyse en Composante Principale (ACP) a permis d'obtenir un classement des structures des pains fabriqués selon leurs volumes spécifiques et leurs niveaux d'hétérogénéités.

Le test de classification par rang de *Friedman* a permis de classer nos pains sans gluten de la Formule Riz- Féverole issue du domaine optimum en première position après le témoin de blé tendre. Notre pain optimum est de couleur plus foncée et présente « un arôme de pain de blé » moins intense que le témoin blé. Mais, il montre la même régularité des alvéoles que celui-ci.

Mots clés: Pain sans gluten, formule Riz-Féverole, HPMC-Xanthane, Méthodologie des Surfaces de Réponses, volume spécifique, analyse morphologique mathématique.

Abstract

The aim of this study is the formulation of a gluten-free bread based on Rice and Field Bean flours, improved by the combination of two hydrocolloids (***HPMC-Xanthane***) intended for the food of the Algerian coeliacs patients.

A physico-chemical and rheological characterization by the Chopin Alveograph of raw materials is realized. The Response Surface Methodology is used for the optimization of gluten-free breads. This required the use of a Central Composite Design (CCD) with two factors (HPMC-Xanthane) and five levels. The chosen response is specific volume (Vsp). The intervals of ***the rate HPMC-Xanthane*** used are respectively [0 - 4,5] % and [0 - 1] %. The effects of the combination of these two hydrocolloids (***HPMC-Xanthane***) on baker quality of the gluten-free bread were studied. The points of checking are characterized by image analysis and sensory analysis.

The baking tests of the (HPMC, Xanthane) couples gave breads with various specific volumes and crumb alveolation. The gluten-free breads given the Vsp closest to the common wheat witness ($V_{sp} = 3,05 \pm 0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$) are included in the optimal region with the highest contents of HPMC [3 - 4,5]% and the weak rates of Xanthane [0 - 0,55]%. Best Vsp are obtained by weak rates of Xanthane (< 0,5%) and levels raised in HPMC (> 3%).

Principal Component Analysis (PCA) made it possible to obtain a classification of the breads structures according to their specific volumes and their heterogeneities.

The test of classification per row of *Friedman* made it possible to classify our gluten-free breads optimum of the Formula Rice-Field Bean in first position after the common wheat witness. Our optimum bread is darker and present "a bread corn flavor" less intense than the witness corn. But, it shows the same regularity of the cells as this witness corn.

Key words: gluten-free bread, Rice-Field Bean Formula, HPMC-Xanthane, Response Surface Methodology, specific volume, Analysis Morphological Mathematics.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو صياغة خبز خالي من الغلوتين باستعمال فرينة الأرز والفول مضاف إليه محسنين هما (HPMC- كزانتان) موجه إلى تغذية المرضى الجزائريين الذين يعانون من الحساسية اتجاه الغلوتين.

في البداية تم تحليل المواد الأولية من الناحية الفيزيوكيميائية والريولوجية باستعمال جهاز الفيوغراف شويان. منهجية الاستجابة السطحية استعملت من اجل تحسين صناعة الخبز الخالي من الغلوتين. وذلك باستعمال خطة تجارب مركبة ومركزة ذات عاملين (HPMC- كزانتان) وخمسة مستويات. الجواب المختار هو الحجم الكتلي (Vsp). المجالات المستعملة من (HPMC - كزانتان) هي على التوالي [0 - 4.5] % و [0 - 1] %. ولقد تمت دراسة الآثار المترتبة على الجمع بين هذين المحسنين على جودة الخبز الخالي من الغلوتين . نقاط الفحص درست عن طريق التحاليل الحسية وتحاليل الصور .

أعطت تجارب صناعة الخبز للأزواج (HPMC- كزانتان) أحجام كتلية وحجيرات هوائية مختلفة وتقع عينات الخبز الخالي من الغلوتين التي أعطت أحجام كتلية اقرب للشاهد (0.08 ± 3.05) cm^3/g في المنطقة التي تتضمن المستويات الأعلى من HPMC [3- 4.5] % والأضعف من كزانتان [0 - 0.5] %. الأحجام الكتلية الأفضل حصلنا عليها عن طريق مستويات ضعيفة من كزانتان (> 0.5 %) وعالية من HPMC (< 3 %).

تحليل المركب الرئيسي (ACP) سمح لنا بتصنيف الخبز المصنوع على حسب أحجامة الكتلية والتغير في هيكله الخليا.

التحاليل الحسية باستعمال الترتيب بالصف الفريدمان سمحت لنا بتصنيف خبزنا الأمثل الخالي من الغلوتين في المرتبة الأولى بعد الشاهد المصنوع من القمح اللين. خبزنا الأمثل تميز بالقتامة في حين "نكهة خبز القمح" كانت اقل شدة من الشاهد في حين لهما نفس انتظام الخلايا الهوائية.

الكلمات المفتاحية: خبز خالي من الغلوتين, الصيغة أرز- فول, (HPMC- كزانتان), منهجية الاستجابة السطحية, الحجم الكتلي, التحليل المورفولوجي الرياضي.