

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mentouri-Constantine

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

N° d'ordre :

N° de série :

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

DE MAGISTER EN SCIENCES ALIMENTAIRES

Option : Technologies Alimentaires

**Pain sans gluten pour malades cœliaques :
aptitude technologique d'une formule riz-fèverole**

par : Nesrine GHERAIRIA

Soutenue le 27/06/2011 devant le jury composé de :

Président	: A. AGLI	Professeur	(I.N.A.T.A.A.Univ. M. Constantine)
Rapporteur	: M. N. ZIDOUNE	Professeur	(I.N.A.T.A.A.Univ. M. Constantine)
Examineurs	: D. KHELIFI	Professeur	(Fac. S.N.V. Univ. M. Constantine)
	R. MERGHEM	Professeur	(Fac. S.N.V. Univ. M. Constantine)

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu le tout Puissant, le Clément, pour nous avoir donné la santé, la patience, la volonté et le courage.

Sincères remerciements

À notre Maître et directeur de mémoire, Monsieur M. N. ZIDOUNE, Professeur à l'université de Constantine et Chef de l'équipe Transformation et Elaboration des Produits Agro-alimentaires (T.E.P.A.) du Laboratoire de Recherche en Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.)

Vous avez dirigé avec toute la rigueur scientifique la réalisation de ce travail, votre amour pour le travail bien fait, vos qualités intellectuelles, votre sens de la responsabilité associés à vos immenses qualités humaines font de vous un modèle à suivre.

Soyez assuré Monsieur, de notre profonde gratitude, de nos sincères remerciements et de notre estime pour toujours.

Hommage respectueux

À notre maître et président du jury, Monsieur A. N. AGLI, Professeur et Chef du L.N.T.A. Nous vous remercions de l'honneur que vous nous accordez en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Sincères remerciements

À Monsieur D. KHELIFI, Professeur au département de Biochimie et de Microbiologie à l'Université de Constantine, pour avoir accepté d'évaluer mon travail et de m'honorer par sa participation au jury de ce mémoire.

Vifs remerciements

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

Admiration et profonde gratitude

À notre enseignante, Docteur Le. BENATTALH, Maître de conférences à l'I.N.A.T.A.A. pour l'énorme contribution que vous nous avez apportée afin de mener à bien ce travail, pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Chaleureux remerciements vont également

À notre Maîtresse Z. KABOUCHE, Professeur à l'université de Constantine et directrice du Laboratoire d'Obtention de Substances Thérapeutiques (LOST) pour son aide constante, ses encouragements et ses précieux conseils.

L'exprime ma gratitude à tous les membres du corps enseignant de l'I.N.A.T.A.A. en particulier Messieurs : D. TRAD KHOUDJA, A. KABOUCHE, F. ZERDOUM, A. MERAZKA, pour leur dévouement lors de notre formation, et leurs conseils et suggestions.

Mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire et à tous les amis, collègues, magisters, ainsi que les personnels administratif et technique de l'I.N.A.T.A.A. pour leurs encouragements et leur amitié.

Le dédicace mémoire

À ma très chère mère :

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi.

Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

À mon très cher père :

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

À mon frère Mouhamed Amine et ma sœur Leila.

Pour toute l'ambiance dont ils m'ont entouré, pour toute leur spontanéité et leur élan. Que Dieu leur garde et leur montre le droit chemin.

Je réserve une mention très spéciale à mon futur époux

Pour son aide précieuse et sa patience, ainsi qu'à mes beaux-parents pour leur soutien constant. Puisse ce travail témoigner de ma profonde affection et de ma sincère estime.

À mes Oncles et Tantes.

À mes Cousins et Cousines.

À mes chères amies Meriem, Sara, Khedidja, Amina, Loubna, Lalla, Wissem, Feiza, Hadjer, Keltoum, Feiza, Sabrina, Choubeila, Hanen, Sana, Selma, pour les moments inoubliables qu'elles m'ont permis de partager avec elles.

Sommaire

Page

Liste des Tableaux.....	i
Liste des Figures.....	ii
Liste des Abréviations	iv
<i>Introduction</i>	1
<i>Partie bibliographique</i>	3
CHAPITRE 1. COMPOSITION DES PRODUITS DE PANIFICATION.....	3
1. LES CEREALES.....	3
1.1.Farine de blé tendre	3
1.1.1. Caractéristiques de la farine de blé.....	3
1.1.2. Composition de la farine de blé.....	4
1.1.3. Rôle des constituants de la farine de blé en panification	8
1.2. Le riz.....	10
1.1.4. Classification du riz.....	10
1.1.5. Composition biochimique du riz	11
2. LES LEGUMES SECS	13
2.1.Propriétés nutritionnelles de la fève.....	13
2.2.Les facteurs antinutritionnels des légumineuses	15
3. SUPPLEMENTATION CEREALES-LEGUMES SECS.....	16

CHAPITRE 2. PROCESSUS DE PANIFICATION	16
1. LE PETRISSAGE.....	17
2. LA FERMENTATION.....	18
2.1. Mécanismes de la fermentation	19
2.2. Résultats de la fermentation.....	19
3. LA CUISSON.....	20
3.1.Mécanismes de l'expansion au four	20
3.2. La transition pâte-mie.....	22
CHAPITRE 3. PANIFICATION SANS GLUTEN	25
1. EFFET DES HYDROCOLLOÏDES SUR LA QUALITE DU PAIN SANS GLUTEN	25
2. LA GOMME DE XANTHANE : PROPRIETES ET APPLICATIONS ALIMENTAIRES ..	26
<i>Partie expérimentale</i>	28
A. Matériel et méthodes	28
CHAPITRE 1. APTITUDE A LA PANIFICATION DE LA FORMULE RIZ- FEVEROLE	28
1. MATIERES PREMIERES.....	28
1.1. La farine de blé tendre	28
1.2. Les ingrédients exempts de gluten.....	28
2. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES FARINES	29
2.1. Composition globale des matières premières.....	29
2.1.1. Teneur en eau	29
2.1.2. Cendres totales	29

2.1.3. Protéines totales	30
2.1.4. Matières grasses totales.....	31
2.1.5. Glucides totaux	32
2.2. Distribution granulométrique des farines	33
3. FORMULE DE L'ETUDE	34
4. PLAN D'EXPERIENCE.....	34
4.1. Modèle mathématique	35
4.2. Niveaux des variables	35
4.3. Détermination des variables réelles	37
4.3.1.Xanthane	37
4.3.2.Hydratation	37
5. OBTENTION DES PATES ET PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	38
6. CARACTERISATION RHEOLOGIQUE DES PATES PAR L'ALVEOGRAPHIE CHOPIN.....	40
6.1. Principe.....	40
6.2. Choix des pâtes à tester	40
6.3. Détermination de la teneur en eau à ajouter.....	41
6.4. Mode opératoire.....	42
6.5. Expression des résultats.....	43
7. TEST DE PANIFICATION.....	45
7.1. Matières impliquées.....	45
7.2. Matériel	46

7.3. Préparation des échantillons de pain	47
7.4. Caractérisation des pains	48
8. ANALYSES STATISTIQUES.....	49
B. Résultats et discussion	50
CHAPITRE 1. APTITUDE A LA PANIFICATION DE LA FORMULE RIZ- FEVEROLE	50
1. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES FARINES	50
1.1.Composition globale des matières premières et de la formule de l'étude.....	50
1.1.1. Teneur en eau	51
1.1.2.Teneur en cendres	51
1.1.3. Teneur en protéines.....	52
1.1.4. Teneur en lipides.....	53
1.2. Distribution granulométrique des farines.....	54
1.3. Conclusion	55
2. CARACTERISTIQUES ALVEOGRAPHIQUES DES MATIERES PREMIERES ET DE LA FORMULE DE L'ETUDE SANS AJOUT DE XANTHANE	56
2.1.Indice de gonflement	57
2.2.Rapport de configuration	57
2.3.Travail de déformation	58
2.4.Conclusion	59
3. ESSAI DE PANIFICATION DES MATIERES PREMIERES ET DE LA FORMULE DE L'ETUDE SANS AJOUT DE XANTHANE	60

3.1. Caractérisation de la couleur et de la texture des pains.....	60
3.2. Volume spécifique des pains	62
3.3. Conclusion	64
4. EXPLOITATION DU PLAN D'EXPERIENCE	65
4.1. Surfaces de réponse des propriétés alvéoraphiques des pâtes de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	65
4.2. Surface de réponse de l'indice de gonflement « G »	65
4.3. Surface de réponse du rapport de configuration « P/L »	68
4.4. Surface de réponse du travail de déformation « W »	71
4.5. Surface de réponse du volume spécifique des pains de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>).	73
4.6. Conclusion	76
5. Optimisation de pains sans gluten	77
5.1. Validation des résultats de l'optimisation.....	80
5.1.1. Tests de panification des points de vérification	80
5.1.1.1. <i>Caractérisation de la couleur et de la texture des points de vérification....</i>	80
5.1.1.2. <i>Volumes spécifiques des pains des points de vérification</i>	82
5.1.2. Conclusion	84
 <i>Conclusion générale et perspectives</i>	85
 <i>Références bibliographiques</i>	87
 <i>Annexes</i>	102

Liste des Tableaux

Tableau N°	Intitulé	Page
Tableau 1.	Différents types de farine de blé en fonction du taux de cendres et du taux moyen d'extraction.....	4
Tableau 2.	Composition biochimique en (g) pour 100 g de farine de blé tendre.....	4
Tableau 3.	Classification du riz selon sa longueur et le rapport longueur/largeur.....	10
Tableau 4.	Classification du riz selon sa forme	11
Tableau 5.	Principaux constituants biochimiques du riz blanchi et de la farine du riz en g pour 100 g de matière sèche	11
Tableau 6.	Principaux composants biochimiques de la farine de fève, en g pour 100 g de matière sèche	13
Tableau 7.	Quelques exemples d'applications de la gomme de xanthane dans les produits alimentaires	27
Tableau 8.	Matrice d'expérience du plan composite orthogonal centré à deux variables	37
Tableau 9.	Valeurs calculées des variables codées correspondant aux niveaux attribués	38
Tableau 10.	Pâtes préparées pour l'appréciation des propriétés boulangères à l'Alvéographe Chopin (g pour 100 g de farine ou de formule)	42
Tableau 11.	Recette des pains témoins et pains sans gluten	47
Tableau 12.	Composition chimique des ingrédients de base, et de la formule riz-fève.....	50
Tableau 13.	Caractéristiques alvéographiques des matières premières et de la formule de l'étude sans ajout de xanthane	56
Tableau 14.	Couples <i>Xanthane-Hydratation</i> de vérification après optimisation par MSR des pains sans gluten de la FRF	80

Liste des Figures

Figure N°	Intitulé	Page
Figure 1.	Classifications des protéines de la farine de blé tendre.....	5
Figure 2.	Structure de l'amylose et de l'amylopectine.....	6
Figure 3.	Composition moyenne en lipides d'une farine de blé de type 55.....	8
Figure 4.	Représentations schématiques de l'observation d'une pâte à pain aux échelles (a) macroscopique, (b) microscopique et macromoléculaire	18
Figure 5.	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	20
Figure 6.	Représentation schématique des mécanismes de diffusion du CO ₂ ; diffusion de l'eau liquide ; évapo-condensation et expansion des gaz	21
Figure 7.	Participation de l'expansion thermique, de l'évaporation de l'eau et du CO ₂ à l'expansion totale d'une pâte au four	22
Figure 8.	Comportement général des amidons à la cuisson et au refroidissement.....	23
Figure 9.	La structure de la gomme de xanthane.....	26
Figure 10.	Représentation graphique du plan expérimental à deux facteurs (X ₁ , X ₂) et trois niveaux (-1, 0 et +1).....	36
Figure 11.	Diagramme montrant les différentes voies de la méthodologie adoptée	39
Figure 12.	Alvéogramme type de différents types de farines de blé tendre.....	43
Figure 13.	Granulométrie des farines destinées à la panification.....	54
Figure 14.	Photos des pains de blé tendre et des ingrédients exempts de gluten	65
Figure 15.	Volumes spécifiques et coupes transversales des pains.....	63
Figure 16.	Surface de réponse de l'indice de gonflement « G » des pâtes de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	66
Figure 17.	Courbe de niveau de l'indice de gonflement « G » des pâtes de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	67
Figure 18.	Surface de réponse du rapport de configuration « P/L » des pâtes de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	69

Figure 19.	Courbe de niveau du rapport de configuration (P/L) des pâtes de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	70
Figure 20.	Surface de réponse du travail de déformation « W » des pâtes de la FRF en fonction des niveaux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	71
Figure 21.	Courbe de niveau du travail de déformation « W » des pâtes de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	72
Figure 22.	Surface de réponse du volume spécifique (Vsp) des pains de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	74
Figure 23.	Courbe de niveau de réponse du volume spécifique des pains de la FRF en fonction des taux (<i>Xanthane-Hydratation</i>)	75
Figure 24.	Superposition des courbes de niveau de réponse du rapport de configuration (P/L) et du volume spécifique (Vsp)	78
Figure 25.	Délimitation du domaine optimum <i>Xanthane-Eau</i> des PSG de la FRF.....	79
Figure 26.	Photos des pains des couples <i>Xanthane -Hydratation</i> à l'intérieur et en dehors du domaine optimum.....	81
Figure 27.	Représentation des volumes spécifiques (Vsp) des pains des couples <i>Xanthane -Hydratation</i> à l'intérieur et en dehors du domaine optimum	83

Liste des Abréviations

ANOVA	Analyse de la variance
C	Taux de cendres totales
DG	Distribution granulométrique
FAO	Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
FBT	Farine de blé tendre
FF	Farine de féverole
FR	Farine de Riz
FRF	Formule Riz-Fèverole
G	Indice de Gonflement
GT	Teneur en glucides totaux
H	Teneur en eau de la farine.
HPMC	Hydroxy Propyl Méthyl Cellulose
Ie	Indice d'Elasticité de la courbe
K	Coefficient de conversion
L	Extensibilité de la pâte
MEaj	Masse d'eau à ajouter
MEtot	Masse totale d'eau
MG	Teneur en matière grasse totale
MPtot	Masse totale de la pâte préparée
MS	Matière Sèche
MSR	Méthodologie des Surfaces de Réponses
N	Teneur en azote total
P	Ténacité de la pâte
P	Teneur en protéines
P/L	Rapport de configuration de la courbe
PSG	Pains Sans Gluten
r	Coefficient de corrélation.
SG-FPM	Sous unité Gluténique de Faible Poids Moléculaire
SG-HPM	Sous unité Gluténique de Haut Poids Moléculaire
Vsp	Volume spécifique
W	Travail de déformation



Introduction

Introduction

La maladie cœliaque est une entéropathie inflammatoire chronique auto-immune induite par l'ingestion de gluten chez des sujets génétiquement prédisposés (LAMIREAU et CLOUZEAU, 2008). Elle entraîne la production d'anticorps et de cytokines qui vont provoquer des lésions de la muqueuse intestinale et par conséquent des symptômes de malabsorption, dont la répercussion clinique peut être très variable (FEIGHERY, 1999).

Les études épidémiologiques récentes ont montré que 10‰ de cas dans le monde entier souffre de la maladie cœliaque. Un tel taux établit la maladie cœliaque comme l'une des intolérances alimentaires les plus communes (BRIANI *et al.*, 2008 ; LERNER, 2010).

Actuellement, le seul traitement scientifiquement prouvé pour la maladie cœliaque est l'adhérence perpétuelle stricte à un régime reposant sur l'exclusion des prolamines contenues dans certaines céréales toxiques telles que : le blé, le seigle, l'orge et probablement l'avoine (NIEWINSKY, 2008). Par ailleurs, le gluten présent dans de nombreuses préparations alimentaires algériennes, rend le suivi du régime sans gluten difficile et peut favoriser la marginalisation de ces malades dans la société (BENATALLAH, 2009).

Le riz est l'une des céréales la plus appropriée pour la préparation des produits sans gluten grâce à ses propriétés hypoallergéniques, sa forte digestibilité et son pouvoir énergétique élevé (GUJRAL *et al.*, 2003). Cependant, les protéines du riz ont des propriétés fonctionnelles relativement faibles, incapables de former un réseau viscoélastique nécessaire pour retenir le CO₂ produit au cours de la fermentation, menant à un produit avec un bas volume spécifique et une mie compacte ne ressemblant pas à la structure fine et ouverte du pain commun du blé (HE et HOSENEY, 1991). De ce fait plusieurs ingrédients tels que : l'amidon, les protéines laitières et les hydrocolloïdes ont été additionnés à la farine de riz à fin d'imiter les propriétés viscoélastiques du gluten (LOPEZ *et al.*, 2004 ; GALLAGHER *et al.*, 2004 ; LAZARIDOU *et al.*, 2007).

En raison de leurs propriétés fonctionnelles qui permettent de les utiliser comme agents épaississants, stabilisants, améliorants de la capacité de rétention d'eau et des propriétés texturales, divers hydrocolloïdes, tels que les gommés arabiques, le guar, le xanthane, les carraguénanes et l'HPMC ont été exploités dans des formulations de pain sans

gluten (CATO et *al.*, 2002; AHLBORN et *al.*, 2005; PRUSKA-KEDZIOR et *al.*, 2008; SCHOBER et *al.*, 2005).

Par ailleurs, compte tenu du déficit alimentaire engendré par la malabsorption intestinale dans le cas de cette maladie, de nombreuses études ont été menées sur la combinaison de différents ingrédients nutritifs dans des formulations de pain sans gluten afin de pallier ce déficit. L'incorporation des grains entiers de sarrasin, de millet, de sorgho et de fèveole dans des formulations de pain sans gluten a montré leurs capacités d'augmenter la valeur nutritive de ces produits, particulièrement en termes de fibres alimentaires, de protéines et de minéraux (ALVAREZ-JUBETE et *al.*, 2009; REPO-CARRASCO- VALENCIA et *al.*, 2009; BENATALLAH, 2009).

Dans le souci de présenter un aliment diététique qui répond au besoin des consommateurs cœliaques, l'équipe « Transformation et Elaboration des Produits Agro-alimentaires » (T.E.P.A.) du laboratoire (LNTA) a choisi le riz comme un ingrédient de base pour la formulation proposée. Une supplémentation à l'aide de fèveole est envisagée en vue de rehausser la valeur nutritionnelle de l'aliment proposé. Un meilleur équilibre en acides aminés est visé pour une meilleure utilisation, par l'organisme, de l'apport protéique proposé. L'enrichissement en protéines de la formule laisse espérer une amélioration des propriétés rhéologiques des pâtes sans gluten résultantes. L'amélioration attendue doit être vérifiée et l'aptitude technologique de la formule envisagée devient par conséquent l'objet principal de l'étude.

Ce travail s'insère dans les programmes de recherche développés par l'équipe (T.E.P.A.) et vise à améliorer la situation alimentaire des malades cœliaques algériens. Dans le but de poursuivre ce programme, nos objectifs dans la présente recherche sont :

1. L'étude de l'effet de l'addition de la farine de fèveole sur les propriétés physico-chimiques, technologiques et rhéologiques de la farine de riz de base;
2. Tester l'aptitude à la panification d'une formule Riz-Fèveole améliorée par du xanthane en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (MSR).



Partie bibliographique



Partie bibliographique

CHAPITRE 1. COMPOSITION DES PRODUITS DE PANIFICATION

1. LES CEREALES

En botanique, les céréales appartiennent à la famille des graminées (blé, orge, avoine, seigle, riz, maïs, sorgho...). Le blé, avec le maïs et l'orge, est une des céréales les plus employées. Il est du genre *triticum*. Les botanistes distinguent le *triticum durum* ou blé dur, utilisé pour les semoules et pâtes alimentaires, du *triticum aestivum* ou blé tendre, utilisé pour la panification.

1.1. Farine de blé tendre

La farine de blé est l'ingrédient de base des produits de panification. Outre l'abondance de cette céréale, 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).

1.1.1. Caractéristiques de la farine de blé

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

- **Le taux d'extraction** est exprimé par le rapport "poids de farine extraite sur 100 kg de blé mis en œuvre". Il représente donc la quantité de farine retirée de 100 kg de blé. Plus il est élevé, plus il y a de risques que la farine contienne du son. La farine de faible taux d'extraction présente de meilleures caractéristiques organoleptiques (aspect plus blanc) et fonctionnelles (pâte boulangère) (CHEFTEL et CHEFTEL, 1992).
- **Le taux de blutage** représente la quantité de sons et remoulages recueillis au cours de la mouture de 100 kg de blé (MASYLATTARD, 1989).
- **Le taux de cendres** exprime la pureté des farines et correspond à la quantité de minéraux, principalement contenus dans le son, et encore mélangés à la farine (MASYLATTARD, 1989). Il définit le type d'une farine (Tableau 1) et il dépend du taux d'extraction de celle-ci. En effet, les farines dont le taux de cendres est élevé sont plus riches en sons. Actuellement, le type le plus couramment utilisé en panification est le type 55 (taux de cendres compris entre 0,5 et 0,6 % par rapport à la matière sèche) (CALVEL, 1984).

Tableau 1. Différents types de farine de blé en fonction du taux de cendres et du taux moyen d'extraction (CALVEL, 1984)

Types	Taux de cendre (% massique)	Taux moyen d'extraction	Utilisation
45	< 0,50	67	Pâtisserie
55	0,50 à 0,60	75	Pain ordinaire
65	0,62 à 0,75	78	Pains spéciaux
80	0,75 à 0,90	80-85	Pains spéciaux
110	1,00 à 1,20	85-90	Pain bis
150	>1,40	90-98	Pain complet

1.1.2. Composition de la farine de blé

La farine est un composé complexe (Tableau 2) comportant différents constituants (protéines, lipides, sucres...) qui jouent un rôle direct ou indirect dans la structuration et l'aération de la pâte.

Tableau 2. Composition biochimique en (g) pour 100 g de farine de blé tendre (D'après ATWELL, 2001)

Constituants	% matière sèche de la farine
Eau	14
Protéines	7-15
Amidon	63-72
Polysaccharides non amylacés	4,5-5
Lipides	1-2

1.1.2.1. Les protéines

La teneur en protéines des farines de blé varie de 7 à 15 %. Elle est fonction de la teneur en protéines des blés mis en mouture, de la répartition de celles-ci dans le grain et du taux d'extraction de la farine par rapport au grain (GRANDVOINNET et PRATX, 1994). On distingue deux types de protéines : les protéines de structure (albumines et globulines) et les protéines de réserve (gliadines et gluténines réunies sous l'appellation prolamines).

La classification d'OSBORNE (1907) a été adoptée pour différencier les protéines. Elle est basée sur leur solubilité relative (Figure 1) :

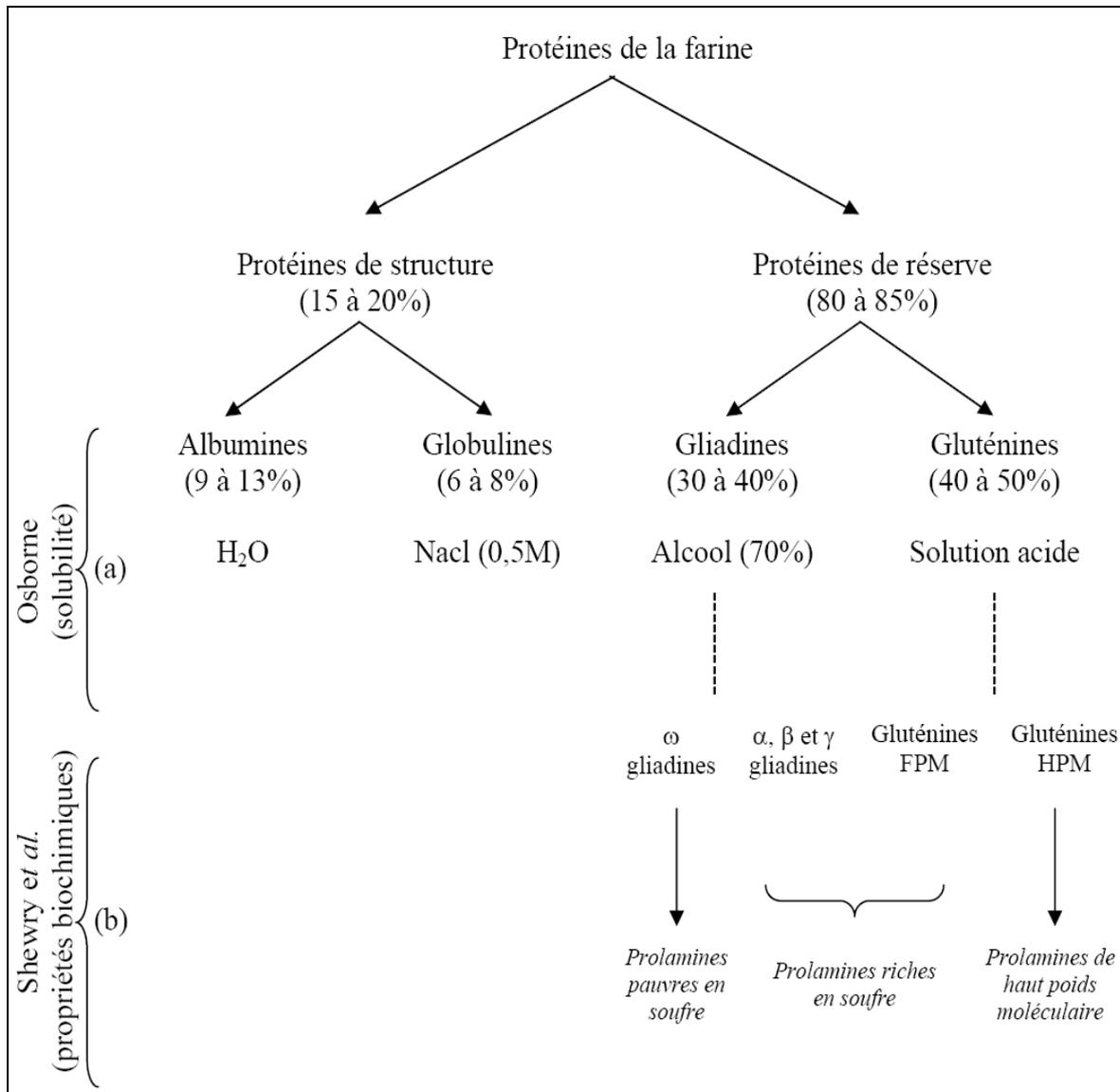


Figure 1. Classifications des protéines de la farine proposées par (a) OSBORNE (1907) et (b) SHEWRY *et al.* (1986).

- **Les albumines et globulines** 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** (ou prolamines) sont de protéines monomériques, riches en résidus glutamines et prolines. Elles représentent environ 40 % des protéines de la farine et sont divisées en deux groupes en fonction de leurs propriétés biologiques, biochimiques et de leurs origines génétiques: les gliadines pauvres en soufre (ω -gliadines) et les gliadines riches en soufre (β , α et γ -gliadines) (SHEWRY *et al.*, 1986).

• **Les gluténines** (environ 50 % des protéines de la farine) sont des protéines polymérisées et agrégées résultant de la polymérisation des sous unités gluténiques de haut poids moléculaire (SG-HPM) et des sous unités gluténiques de faible poids moléculaire (SG-FPM). Elles sont partiellement solubles dans les acides et les bases diluées, dans les solutions d'urée ou les détergents (DARDE, 2001).

1.1.2.2. L'amidon

Les grains d'amidon de blé sont constitués à 98 % de la fraction glucidique, les 2% restants comportent un certain nombre de constituants mineurs (protéines, lipides, minéraux). La fraction glucidique est constituée de 2 types de chaînes polyosidiques formées d'unités α - D-glucose (BANKS et GREENWOOD, 1975) :

- ✓ **l'amylose** (26 % de la fraction glucidique) est un homopolymère linéaire de 500 à 6000 unités D-glucosyl liés par des liaisons α -(1, 4) (Figure 2) et quelques très rares liaisons α -(1,6). Sa masse moléculaire est comprise entre 100 et 1000 kDa (FEILLET, 2000).
- ✓ **l'amylopectine** est le principal constituant glucidique de l'amidon de blé avec une fraction de 74%. Il s'agit d'une molécule ramifiée pour laquelle des liaisons α -(1, 4) relient les unités D-glucose formant la chaîne principale et des liaisons α -(1, 6) assurent les liaisons avec les ramifications (Figure 2) (BORNET *et al.*, 1991). L'amylopectine est un des polyosides les plus volumineux avec une masse moléculaire moyenne de 10^5 kDa (FEILLET, 2000).

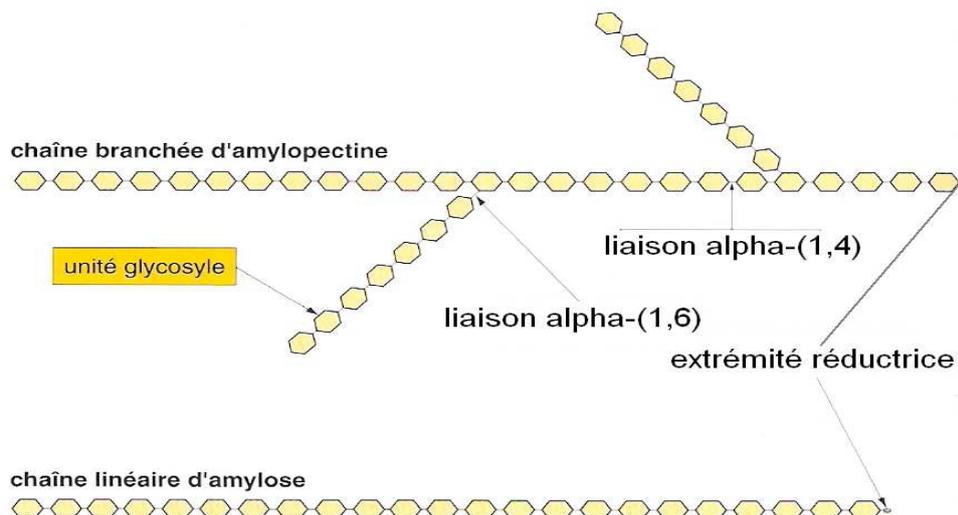


Figure 2. Structure de l'amylose et de l'amylopectine (d'après FEILLET, 2000)

1.1.2.3. Les polysaccharides non amylicés

Les pentosanes (ou hémicelluloses) représentent la majeure partie des polysaccharides non amyliques (67%). Les 33% restants sont constitués de β -glucanes. Selon leurs solubilités dans l'eau, les pentosanes sont partagés en deux catégories : les pentosanes solubles et les pentosanes insolubles. Ils sont constitués de polysaccharides non amyliques, formés d'unités d'anhydropentoses, dont 70% sont des arabinoxylanes (1/3 insolubles et 2/3 solubles) et les 30% restants par des arabinogalactanes (solubles) (ROUAU, 1993). ROUAU *et al.*, (1994) ont montré que les pentosanes insolubles ont une forte capacité d'adsorption de l'eau (10 fois leur poids) et que les pentosanes solubles peuvent former des solutions de haute viscosité.

1.1.2.4. Lipides

Les lipides représentent 1,4 à 2% de la matière sèche de la farine de blé. Conventionnellement, ils sont classés selon leur extractibilité dans différents solvants (Figure 3). On distingue (MAC RITCHIE et GRAS, 1973 ; CHUNG *et al.*, 1978) :

- ✓ **Les lipides libres (70%)** : c'est la fraction lipidique qui peut être extraite directement par les solvants apolaires (éther de pétrole, hexane...). Cette fraction est constituée majoritairement de lipides apolaires qui sont les lipides de réserve du grain de blé. Ils sont constitués de triacylglycérol, de faibles quantités de diacylglycérol, de monoacylglycérol et d'acides gras libres.
- ✓ **Les lipides liés (30%)** : correspondant à la fraction extractible avec les solvants polaires. Cette fraction interagit avec les autres constituants de la farine par des liaisons hydrophobes. Elle est constituée majoritairement de lipides polaires qui sont les lipides de structure du grain de blé. Ils comprennent essentiellement des glycolipides et des phospholipides.

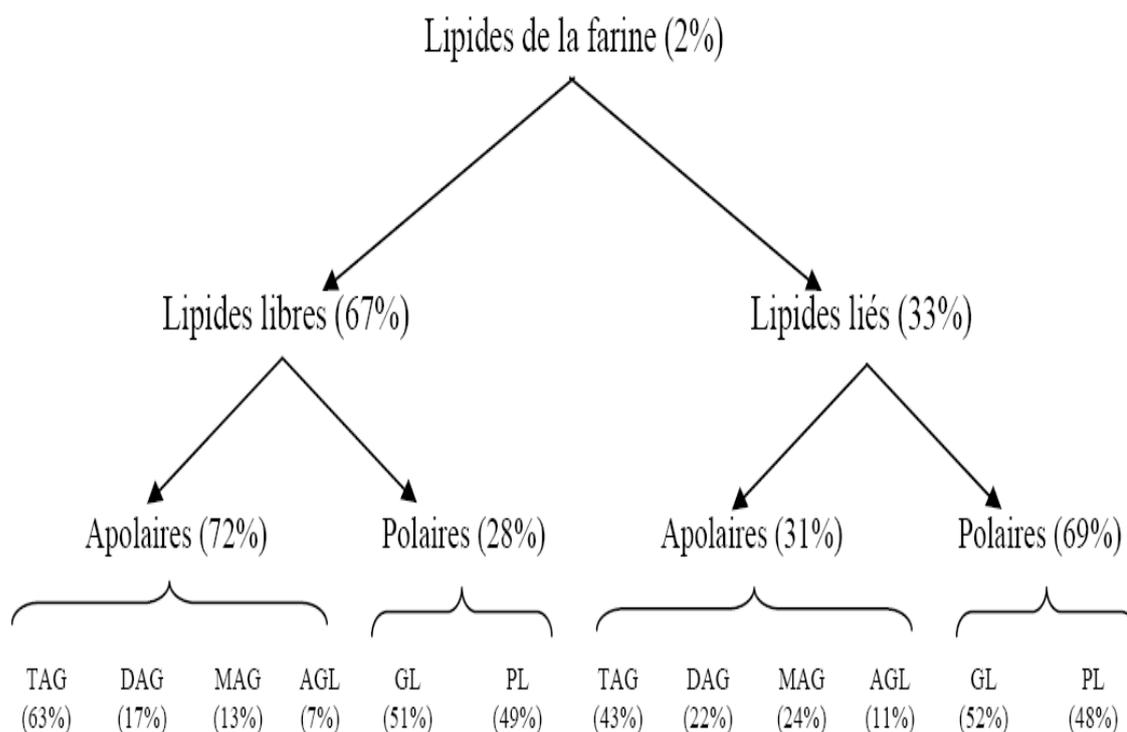


Figure 3. Composition moyenne en lipides d'une farine de blé de type 55
(D'après BERGER, 1983).

1.1.3. Rôle des constituants de la farine de blé en panification

1.1.3.1. Rôle des protéines

- Les globulines : Elles ont un faible rôle dans le processus de panification. Elles sont utilisées en partie par la levure comme nutriment. En combinaison avec les sucres, elles participent à la réaction de Maillard qui donne une partie de sa coloration à la croûte du pain.
- Les gliadines et les gluténines forment le réseau de gluten dont le comportement affecte considérablement les propriétés rhéologiques des pâtes (BLOKSMA, 1990b). Très extensibles quand elles sont hydratées, les gliadines (qui posséderaient des propriétés plastifiantes) confèrent à la pâte son extensibilité, sa viscosité et sa plasticité. La ténacité et l'élasticité de la pâte s'expliquent par les propriétés très particulières des gluténines (FEILLET, 2000).

Ces propriétés fonctionnelles du gluten lui permettent au cours de la panification, de former un réseau tridimensionnel imperméable, capable de retenir le gaz carbonique et de

s'étirer sous sa pression pour former la structure et la texture alvéolaire du pain (FOULDS-SPRINGER et BELLAMY, 1996). La quantité de gluten et la qualité de ses protéines font la valeur boulangère de la farine.

1.1.3.2. Rôle des glucides et polysides

- ❖ L'amidon intervient de différentes manières au cours de la fabrication du pain :
 - C'est une source inépuisable de sucres fermentescibles assurant la multiplication et la croissance des levures (FEILLET, 2000).
 - C'est également un fixateur d'eau. On admet que l'amidon absorbe environ 45% de l'eau ajoutée à la farine. Par son pouvoir fixateur d'eau, variable selon le degré d'endommagement des granules et sa capacité à former des liaisons non covalentes avec les protéines, l'amidon contribue de manière active à la formation de la pâte (FEILLET, 2000).

- ❖ Les pentosanes jouent un rôle important dans l'établissement des propriétés rhéologiques des pâtes, d'une part en participant à la compétition vis-à-vis de l'eau avec les protéines du gluten et l'amidon endommagé et d'autre part en modifiant la viscosité de la phase aqueuse de la pâte lors de réaction de gélification oxydative (IZYDORCZYK *et al.*, 1991).

Dans la pâte, la forte capacité d'adsorption d'eau des pentosanes influence la répartition de celle-ci. A faible dose, les arabinoxylanes solubles favorisent la répartition homogène de l'eau et l'établissement de liaisons hydrogène avec l'amidon et les protéines. Par ailleurs, l'effet de la fraction insoluble des arabinoxylanes est plutôt négatif en panification en provoquant une baisse de la machinabilité de la pâte (ROUAU *et al.*, 1994). De plus, la forte capacité d'adsorption d'eau des pentosanes insolubles modifie le développement du gluten en entrant en compétition avec ce dernier pour la fixation de l'eau (WANG *et al.*, 2003). Pour remédier à cela, ces auteurs proposent d'allonger le temps de pétrissage et/ou d'ajouter du NaCl.

1.1.3.3. Rôle des lipides

Bien que leur teneur dans les farines ne dépasse pas 2 à 3%, les lipides jouent un rôle important en panification, du moins ceux qui ne sont pas liés à l'amidon. FEILLET, (2000)

attribue leur mode d'action au cours du pétrissage à deux phénomènes physico-chimiques distincts :

- L'oxydation des acides gras polyinsaturés, catalysée par la lipoxygénase, qui provoque un réarrangement des liaisons disulfures au sein du réseau protéique.
- Des interactions entre les lipides et les protéines à l'interface de l'eau et de l'air.

Le premier des phénomènes agit sur les propriétés rhéologiques de la pâte, le second sur la formation et la stabilité des alvéoles de gaz dans la pâte.

1.2. Le riz

Le riz est la culture céréalière la plus importante dans le monde en développement et il constitue la denrée alimentaire de base de plus de la moitié de la population du globe. Le grain de riz diffère peu des grains de diverses céréales par sa structure anatomique, mais il en diffère notablement par sa composition chimique. Il est plus pauvre en matière azotée et beaucoup plus riche en amidon (BOUTROUX, 1897).

1.2.1. Classification du riz

L'Institut International de Recherche sur le Riz (IRRI) a proposé deux classifications du riz. La première selon la *taille* du grain et la deuxième en fonction de la *forme* de celui-ci (Tableau 3 et 4) (JULIANO, 1994). Examinant le projet de norme pour le riz, le comité de la Commission du Codex Alimentarius, (2007) a proposé une classification du riz sur la base du *rapport entre la longueur et la largeur* du grain.

Tableau 3. Classification du riz selon sa longueur et le rapport longueur/largeur

	Longueur du grain (mm) (JULIANO, 1994)	Rapport longueur/largeur (CODEX ALIMENTARIUS, 2007)
Extra long	> 7,5	-
Long] 6,61-7,50]	≥ 3,1
Moyen] 5,51 -6,61]	[2,1 – 3]
Court	< 5,50	≤ 2

Tableau 4. Classification du riz selon sa forme (JULIANO, 1994)

	Rapport longueur/largeur
Mince	> 3,0
Moyen] 2,1-3,0]
Large] 1,1 -2,0]
Rond	< 1,0

Selon les *traitements* effectués sur les enveloppes des grains de riz, on distingue (JULIANO, 1994 ; LE GOFF, 1997) :

- *Le riz paddy* : C'est un riz qui n'a subi aucune opération technologique après sa récolte.
- *Le riz cargo* : C'est un riz *paddy* débarrassé de ses balles plus ou moins adhérentes.
- *Le riz blanchi* : Le riz *cargo* est transformé en riz blanchi après l'enlèvement de la pellicule jaune-brun qui adhère fortement au grain. Il est aussi appelé riz *usiné*.

1.2.2. Composition biochimique du riz

Le riz est l'un des principaux aliments de nourriture (Tableau 5). Il est pauvre en sodium, en protéines, en matière grasse, en fibre et il constitue une bonne source d'hydrates de carbone digestibles (SIVARAMAKRISHNAN et *al.*, 2004).

Tableau 5. Principaux constituants biochimiques du riz blanchi et de la farine du riz en g pour 100 g de matière sèche.

Nutriments (g)	Riz blanchi (JULIANO, 1994)	Farine du riz blanchi (ARENDETT et DAL BELLO, 2008)
Hydrate de carbone	77-89	80.1
Protéines	6.3-7.1	5.9
Lipides	0.3-0.5	2.4
Fibres	0.9-2.8	1.4
Minéraux	0.3-0.8	0.6

1.2.2.1. L'amidon

L'amidon est la principale composante du riz, représentant environ 90 pour cent de l'extrait sec. C'est un mélange de molécules ramifiées et linéaires ayant respectivement un DP de 1100 à 1700 et de 700 à 900 (JULIANO, 1994). Il est plus facile à digérer par les intestins fragiles que celui du blé, de pomme de terre ou de maïs (KIGER et KIGER, 1967 ; HO and YIP, 2001 ; TAVAREZ *et al.* 1991). Il est recommandé aux malades présentant une fragilité intestinale (KIGER et KIGER, 1967 ; GODON et WILLM, 1991).

L'amidon détermine les propriétés physiques et fonctionnelles des grains de riz, et ces propriétés dépendent considérablement du rapport amylose /amylopectine (ARENDRT et DAL BELLO, 2008).

1.2.2.2. Les protéines

Les protéines sont présentées sous forme de corps protéiques sphériques de 0,5 à 4 μm dans l'albumen (BECHTEL et POMERANZ, 1978). En ayant recours à l'extraction séquentielle des protéines, HUEBNER *et al.*, 1990, ont obtenu la répartition moyenne suivante sur 33 échantillons : 9 pour cent de prolamines, 7 pour cent d'albumine plus globuline et 84% de glutéline. De toutes les céréales, c'est le riz qui a la plus faible teneur en protéines. Néanmoins, la teneur en lysine des protéines du riz varie de 3,5 à 4%, soit l'une des plus élevées parmi les protéines céréalières (IRRI, 1991 ; JULIANO, 1985).

1.2.2.3. Les lipides

Le riz contient de 0,5 à 1,7 pour cent de lipides, principalement sous forme de lipides non amylicés (JULIANO et GODDARD, 1986; TANAKA *et al.*, 1978). Les corps protéiques, en particulier le noyau, sont riches en lipides (CHOUDHURY et JULIANO, 1980; TANAKA *et al.*, 1978). Les principaux acides gras de ces lipides sont les acides linoléiques, oléiques et palmitiques (HEMAVATHY et PRABHAKER, 1987; TAIRA *et al.*, 1988).

1.2.2.4. Polyosides non amylacés

Les polyosides non amylacés se composent de polyosides hydrosolubles et de fibres alimentaires insolubles (JULIANO, 1985). Ils peuvent s'associer à l'amidon, et il se peut qu'ils aient un effet hypocholestérolémique (NORMAND, ORY et MOD, 1981; NORMAND et *al.*, 1984). L'albumen a une plus faible teneur en fibres alimentaires que les autres constituants du riz.

2. LES LEGUMES SECS

Les graines de légumineuses appartiennent à une famille botanique très importante du point de vue économique et nutritionnel. La sous famille des Papilionacées représente une source très importante d'aliments pour l'homme. C'est dans les genres *Viciae*, *Phaseoleae*, *Lupineae*, *Glycineae*, *Diocleae* qu'on rencontre les plantes qualifiées de protéagineuses, dont les grains sont les plus riches en protéines (DUPIN et *al.*, 1992). Parmi ces grains on peut citer *la fève* (*Vicia faba L.*), une légumineuse appartenant à la variété *minor* dite aussi *equina*. Le moyen Orient (surtout l'Égypte) et le Maghreb en sont de gros consommateurs (BOYELDIEU, 1991). Les grains de fève sont caractérisés par une forte teneur en protéines, en fibres et en amidon et un faible taux de lipides.

2.1. Propriétés nutritionnelles de la fève

Le tableau suivant présente la composition biochimique moyenne de la fève.

Tableau 6. Principaux composants biochimiques de la farine de fève, en g pour 100 g de matière sèche (FAO, 1982 ; CUQ et LEYNAUD-ROUAUD, 1992)

Nutriments (g)	Teneur en g pour 100 g de matière sèche
Protéines	27-33
Lipides	1,5 -2
Glucides	48,9-56,9
Fibres	10
Minéraux	4-5

2.1.1. Les protéines

Les légumes secs présentent une source de protéines végétales de bonne valeur biologique. Ces protéines peuvent être distinguées en deux groupes : les protéines de réserve et les protéines ayant un rôle métabolique de défense. D'après CUQ et LEYNAUD-ROUAUD, 1992, elles peuvent être classées en *albumines* (grains d'aleurone : 20% des protéines totales), en *globulines* contenant à leur tour les légumineuses et les vicilines (60 à 90% des protéines totales) et en *glutélines* (0% et 15% en fonction de l'espèce).

L'analyse quantitative en acides aminés montre, par rapport au profil type en AAE proposé en 1989 par l'OMS (VIERLING, 2008):

- Une insuffisance en acides aminés soufrés qui sont les facteurs limitant primaires de la plupart des légumes secs. Cette déficience est plus marquée dans le cas du pois et de la fève;
- Une insuffisance relative en tryptophane qui est le facteur limitant primaire des lentilles, des haricots;
- Une grande richesse en lysine qui en fait un complément efficace des céréales.

La dénaturation des protéines, par chauffage ou par modification de pH de la solution, augmente le CUD qui peut ainsi atteindre 80%.

2.1.2. L'amidon

L'amidon des légumes secs a un faible index glycémique (glucides complexes et présence d'anti-amylase). Ceci leur confère un intérêt non négligeable dans le contrôle du poids et chez les diabétiques (diabète II) pour le contrôle de la glycémie (VENN and MANN 2004 ; NESTEL *et al.*, 2004).

2.1.3. Les polysaccharides non amylicés

Par leur richesse en fibres, les légumes secs favorisent le transit intestinal et l'évacuation des composés carcinogènes. Les fibres forment avec les sels biliaires des complexes mal absorbés, induisant une diminution de l'absorption des graisses et du cholestérol (propriété hypocholestérolémiantes).

Les fibres des légumineuses se composent essentiellement de cellulose, de lignine et de pentosanes (CERNING *et al.*, 1975). Ce sont des fibres dures et insolubles. Elles font partie des composés pariétaux et se caractérisent par un fort pouvoir hygroscopique pouvant aller de

20 à 50 fois leur poids d'eau. (GLADE, 1999 ; MARTINS *et al.*, 2004 ; MICHELS *et al.*, 2006).

2.1.4. Les lipides

Les légumes secs sont des aliments pauvres en lipides avec pour la plus part une teneur inférieure à 3% (SHEWRY, 1995) excepté le pois chiche (5,6%) (ZULET *et al.*, 1999).

2.1.5. Les vitamines et les minéraux

Les légumes secs contiennent également de nombreuses vitamines, en particulier des vitamines du groupe B, indispensables pour la transformation des aliments en énergie. Les teneurs en vitamines B des légumes secs sont en moyenne de : 0,5 mg pour 100 g pour B₁, 0,25 mg pour B₂, 2,5 mg pour PP, 0,3 mg pour B₆ (VIERLING, 2008).

Les légumes secs apportent des quantités intéressantes de minéraux, magnésium, potassium (intéressant pour la prévention de l'hypertension artérielle) et de fer en particulier. Ce dernier est moins absorbé que celui des produits animaux (DUPIN *et al.*, 1992).

2.2. Les facteurs antinutritionnels des légumineuses

Toutes les graines de légumineuses contiennent des facteurs antinutritionnels ou toxiques. Cependant leur concentration est souvent faible et ils sont généralement détruits par traitement thermique ou extraits par l'eau de cuisson. Par ailleurs, ces facteurs sont, pour la plupart d'entre eux, éliminés au cours de la germination et/ou après fermentation (ROUDAUT et LEFRANCQ, 2005 ; DUPIN *et al.*, 1992).

Parmi les plus importants facteurs antinutritionnels rencontrés chez les légumineuses, on peut citer : Les inhibiteurs de protéases, les phyto-hémagglutinines ou lectines, les thioglycosides, l'acide phytique et les glycosides isoflavoniques (DUPIN *et al.*, 1992).

3. SUPPLEMENTATION CEREALES-LEGUMES SECS

Les légumineuses constituent, après les céréales, les plantes les plus cultivées dans le monde. Associées et consommées ensemble, les protéines des légumes secs et des céréales se complètent et fournissent à l'organisme des protéines contenant tous les acides aminés essentiels (A.A.E.). Pour une complémentarité optimale, il faudrait consommer approximativement 65% de céréales et 35% de légumineuses (HULSE, 1977 ; SIEGEL et FAWCETT, 1978 ; FAO, 1982).

Chaque civilisation a mis au point sa propre combinaison de protéines complémentaires ; ainsi on trouve : riz et lentilles en Inde ; pâtes et haricots en Italie ; blé et pois chiche dans le couscous au Maghreb ; blé, orge, seigle ou avoine et haricots secs, lentilles, fèves ou pois cassés en Europe (FAO, 1990). Les grains de légumineuses complètent les céréales non seulement sur le plan protéique mais aussi sur le plan vitaminique (vitamines de groupe B) et minéral et ils ajoutent aux céréales toute une gamme de saveur et de texture (FAO, 1982).

CHAPITRE 2. PROCESSUS DE PANIFICATION

Le pain est le produit résultant de la cuisson d'une pâte, préparée avec un mélange de farine panifiable, d'eau potable et de sel, etensemencée avec un agent de fermentation (levure et/ou levain). Ce mélange peut éventuellement comprendre certains adjuvants et/ou additifs autorisés. Ils sont principalement destinés à améliorer les propriétés rhéologiques (ténacité, extensibilité, élasticité), structurales (microalvéolage) et fermentaires des pâtes (CNERNA, 1977 et DANDOY, 1996).

Le processus de fabrication des produits de panification comprend trois étapes essentielles : le pétrissage, la fermentation et la cuisson. La première étape assure l'hydratation des ingrédients, le développement de la structure de la pâte ainsi que l'introduction de la phase gazeuse (BLOKSMA, 1990b). La fermentation permet l'expansion gazeuse. Au cours de la cuisson, il y a passage de la pâte de l'état liquide à l'état solide caoutchoutique (DAVIES, 1986).

1. LE PETRISSAGE

En tant que première étape de la fabrication du pain, l'importance du pétrissage est cruciale pour la qualité du produit fini. En effet, pendant celui-ci, un ensemble de transformations biochimiques et physiques complexes ont lieu (LEVAVASSEUR, 2007).

L'étape de pétrissage assure trois fonctions concomitantes et intimement liées qui sont essentielles pour l'obtention d'une pâte bien aérée :

- **L'homogénéisation** : le pétrissage permet de répartir d'une manière homogène les constituants de la pâte, favorisant ainsi leur contact avec l'eau et donc leur hydratation. Le diagramme de pétrissage conventionnel en panification française avec une vitesse lente de 40 tr/min sur une durée de 12 à 15 min permet d'obtenir une masse macroscopiquement homogène à une échelle d'environ 1 mm (ROUSSEL et CHIRON, 2002 ; BLOKSMA, 1990b).
- **L'aération de la pâte** : le mouvement des bras du pétrin entraîne, simultanément à l'homogénéisation, l'incorporation d'air dans la pâte sous forme de micro-nucléi sphériques (10 à 100 μm) (JUNGE et HOSENEY, 1981).
- **Structuration du réseau protéique** : au cours du pétrissage, l'oxydation des acides aminés soufrés des protéines entraîne la création des ponts disulfures (liaisons covalentes) intra et inter moléculaires qui associent les constituants de la pâte (MEREDITH, 1964).

Ces trois actions simultanées aboutissent en fin de pétrissage à un *mélange cohésif* aux propriétés *viscoélastiques* (BLOKSMA, 1990a). Ce mélange macroscopiquement *homogène* à l'oeil nu, apparaît à une plus faible résolution comme une *dispersion de bulles* gazeuses dans une *matrice continue* d'amidon et de protéines gonflées (Figure 4) où chacun des constituants participe à la structuration de la pâte (BLOKSMA, 1990b).

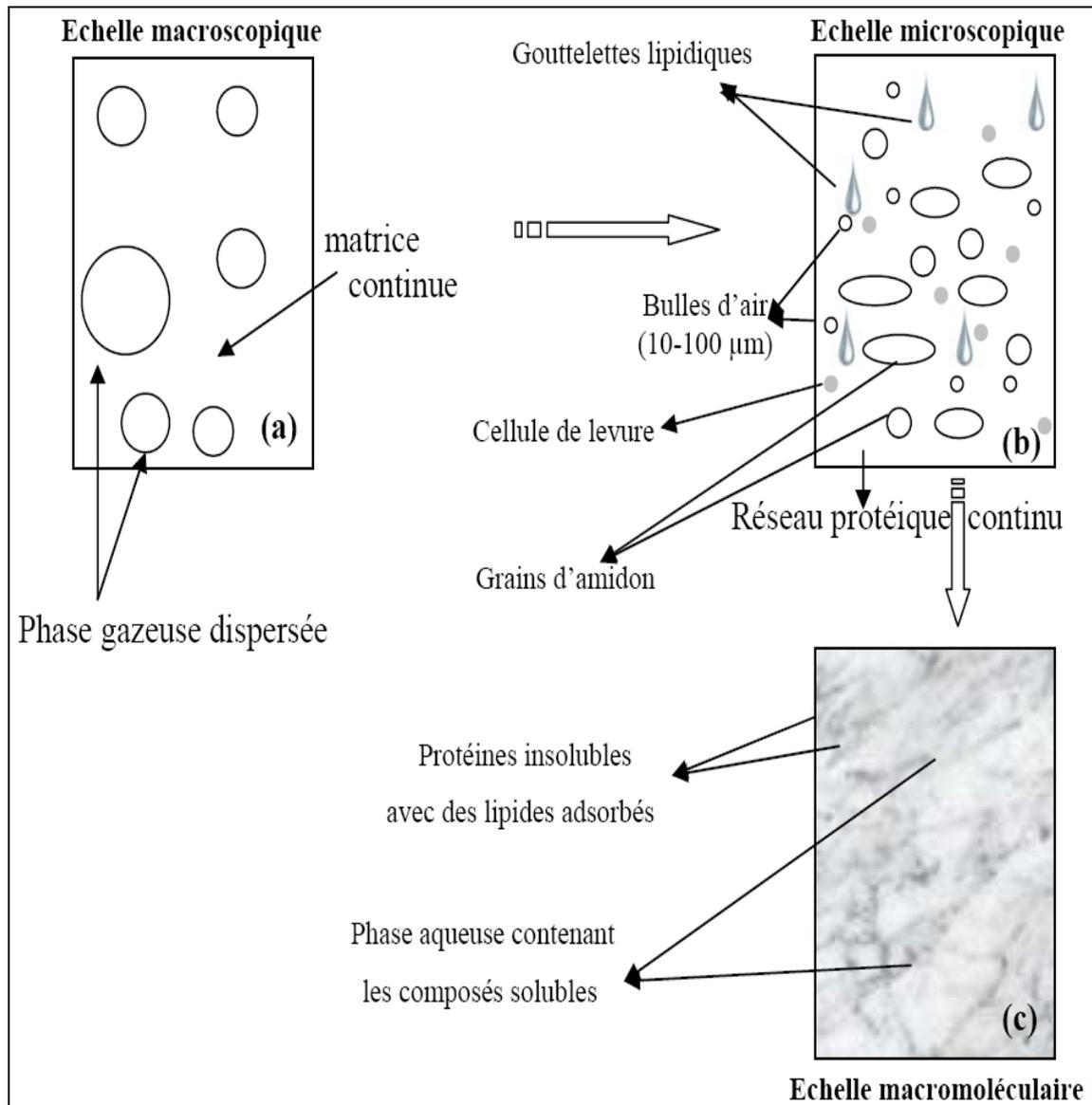


Figure 4. Représentations schématiques de l'observation d'une pâte à pain aux échelles (a) macroscopique, (b) microscopique et macromoléculaire (BLOKSMA, 1990b et de ELIASSON et LARSSON, 1993).

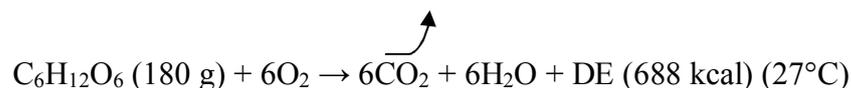
2. LA FERMENTATION

La fermentation est une étape spécifique au processus de panification. Elle assure deux fonctions principales : *la levée* de la pâte sous l'effet de la formation de gaz carbonique et la *synthèse d'acides organiques et de molécules volatiles* qui vont participer à l'élaboration du goût et de l'arôme du pain ; elle contribue également à l'achèvement du développement du réseau protéique qui s'est formé au cours du pétrissage (FEILLET, 2000).

2.1. Mécanismes de la fermentation

Dès la phase de pétrissage, la fermentation débute sous l'action des levures. A partir des glucides libres ou libérés par les amylases de la farine, les levures produisent du CO₂, de l'éthanol et des acides organiques (ROUSSEL et CHIRON, 2002) :

- ❖ L'oxygène introduit au cours du pétrissage permet à la levure boulangère d'établir un métabolisme de type respiratoire :



- ❖ Peu de temps après la fin du pétrissage, tout l'oxygène introduit est consommé par la levure dont le métabolisme s'oriente alors vers la fermentation alcoolique :



2.2. Résultats de la fermentation

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 (parallèlement à la surface des cellules) dans deux directions et compressée radialement (perpendiculairement à la surface des cellules). Une telle déformation est dite «*extension 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 5) (VAN VLIET *et al.*, 1992).

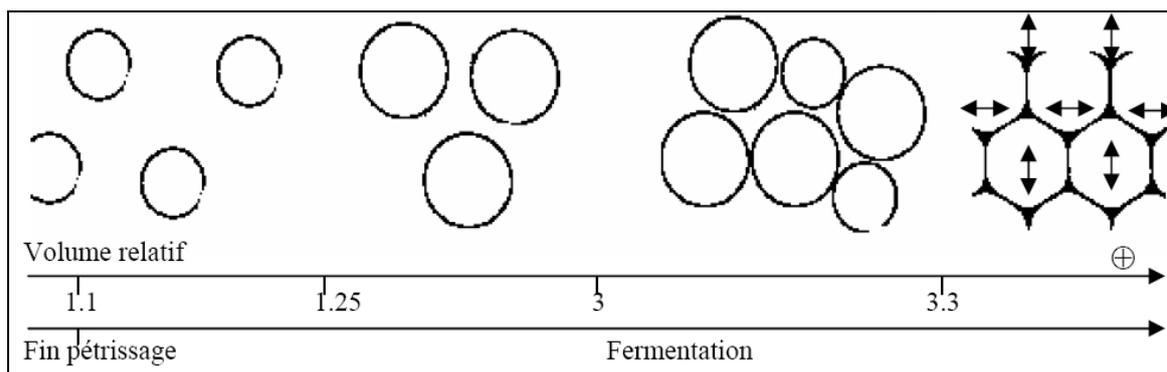


Figure 5. Représentation schématique de l'évolution de la taille et de la forme (de sphérique à polyédrique) des cellules gazeuses dans une pâte en cours de fermentation (BLOKSMA, 1990b et de VAN VLIET *et al.*, 1992).

3. LA CUISSON

La cuisson, dernière étape du processus de fabrication du pain au cours de laquelle a lieu une série de transformations physiques, chimiques et biochimiques concomitantes telles que l'expansion du produit, la perte d'eau par évaporation, la formation d'une structure alvéolaire plus ou moins développée, la dénaturation des protéines, la gélatinisation de l'amidon, la formation d'une croûte et la réaction de Maillard (SABLANI *et al.*, 1998).

3.1. Mécanismes de l'expansion au four

L'expansion au four est un phénomène multifactoriel dans lequel interviennent non seulement les transferts thermiques et de matière (essentiellement de l'eau) mais aussi les propriétés rhéologiques de la pâte. Toutefois, les mécanismes d'expansion nécessitent un élément transporteur essentiel : les bulles gazeuses. Leur présence ainsi que leur stabilité joue d'ailleurs un rôle « caché » mais primordial dans l'expansion. Leur stabilité en cours de cuisson est conditionnée notamment par la stabilité du film interfacial (LASSOUED, 2005).

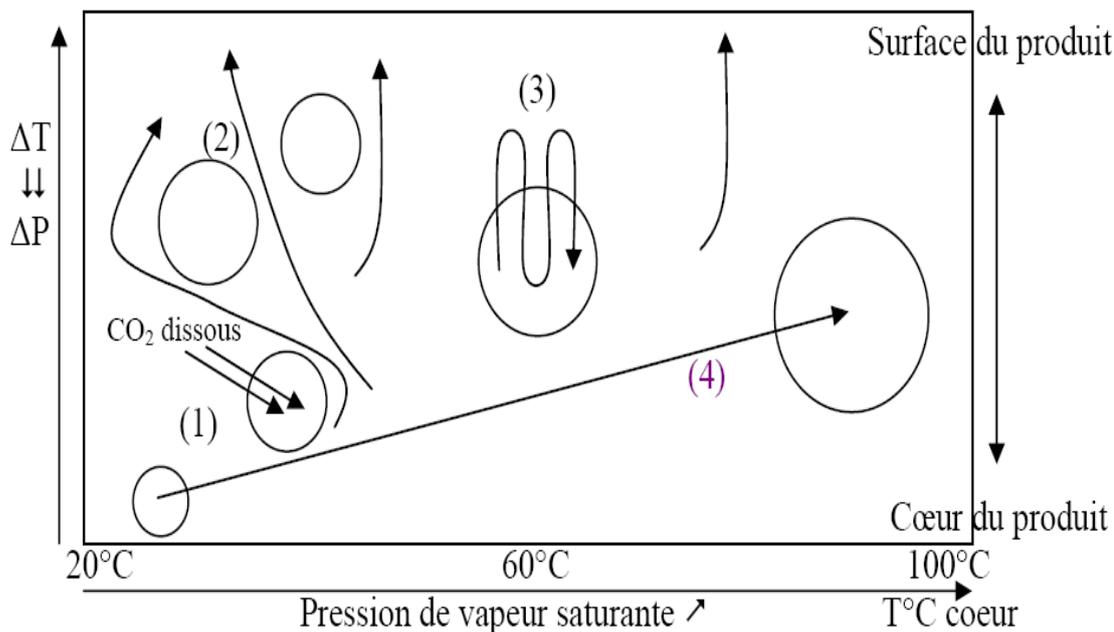


Figure 6. Représentation schématique des mécanismes de (1) diffusion du CO_2 ; (2) diffusion de l'eau liquide ; (3) évapo-condensation et (4) expansion des gaz (LASSOUED, 2005).

Les mécanismes d'expansion gazeuse au cours de la cuisson se résument en quatre principales étapes :

- ❖ Au début de la cuisson, la levure continue à produire du CO_2 jusqu'à sa température de désactivation aux alentours de 50°C. Le CO_2 et l'éthanol produits et dissous dans la pâte s'évaporent et enrichissent la phase gazeuse (étape 1 de la Figure 6).
- ❖ Les conditions hydriques du milieu environnant (air plus ou moins sec) peuvent impliquer un gradient de concentration en eau qui serait à l'origine de la diffusion d'eau dans la pâte sous forme liquide (étape 2 de la Figure 6). Cette diffusion de l'eau se fait en contournant les bulles gazeuses.
- ❖ A partir de 60°C, l'eau se diffuse vers les cellules gazeuses et s'évapore. Cette vapeur d'eau diffuse sous l'effet d'un gradient de pression partielle de vapeur d'eau. D'un côté, l'augmentation continue de la température de la pâte entraîne un accroissement de la pression de vapeur saturante dans la pâte même. De plus, la différence de température entre la surface et le cœur du produit (Figure 6) est à l'origine d'une pression partielle de vapeur d'eau plus importante en surface. La vapeur d'eau diffuse alors au travers du CO_2 contenu dans la bulle, rencontre un film de pâte à une température plus faible, se condense et diffuse sous forme liquide au travers du même film. Ce film de pâte séparant deux bulles proches, l'eau peut s'évaporer à nouveau

dans la bulle à plus faible température : C'est le phénomène d'évapo-condensation (étape 3 de la Figure 6).

- ❖ Simultanément, sous l'effet de l'augmentation de la température et conformément à la loi de Gay-Lussac, les gaz inclus dans les cellules s'expandent (étape 4 de la Figure 6).

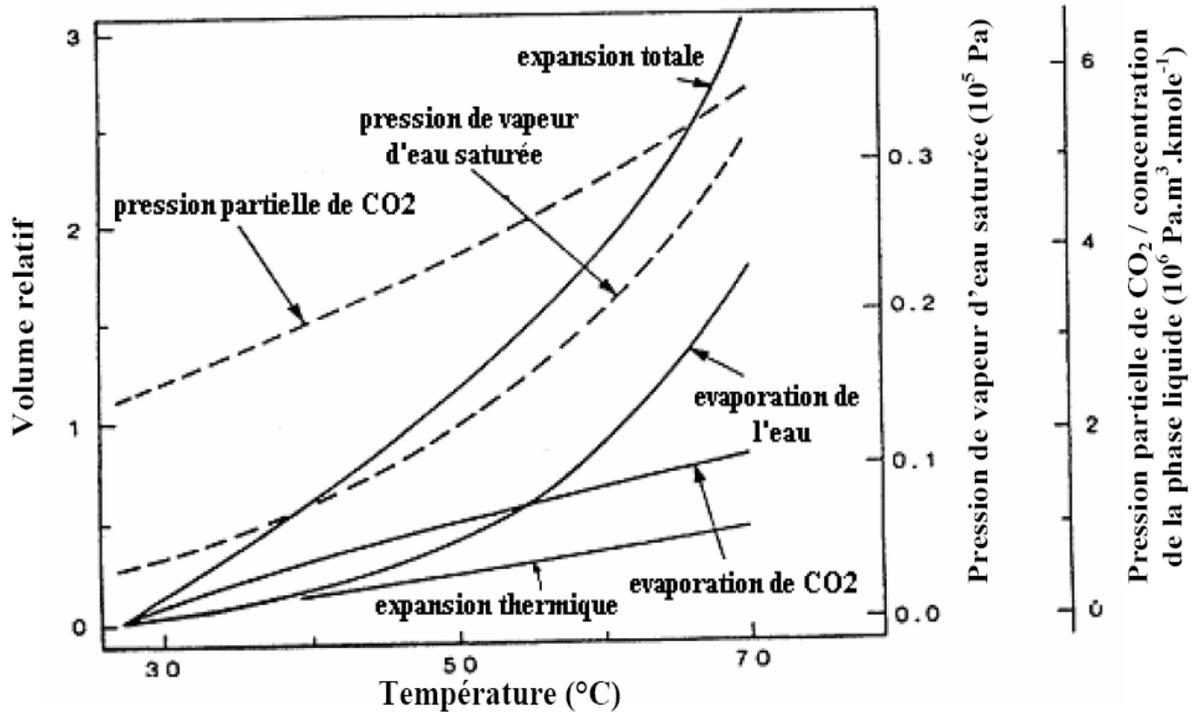


Figure 7. Participation de l'expansion thermique, de l'évaporation de l'eau et du CO_2 à l'expansion totale d'une pâte au four (d'après BLOKSMA, 1986).

Comme le montre la figure 7, l'expansion thermique est le facteur qui participe le moins à cette expansion. Aux basses températures, c'est l'évaporation du dioxyde de carbone qui apporte la plus large contribution, et aux températures plus élevées ($> 60^\circ\text{C}$), c'est plutôt l'évaporation de l'eau (BLOKSMA, 1986). L'arrêt de cette expansion se situerait vers 70°C (BLOKSMA, 1990a). MOORE and HOSENEY (1985) la situaient à une température plus élevée vers 80°C mais en négligeant la participation de la vapeur d'eau.

3.2. La transition pâte-mie

Au cours de la cuisson, il y a transformation d'une pâte liquide en un produit solide. L'augmentation de la température du produit et la présence d'eau en quantité suffisante sont à l'origine des transformations hydro-thermiques subies par l'amidon et les protéines du réseau

de gluten, transformations aboutissant à la formation d'un réseau continu présentant les propriétés d'un solide viscoélastique (BLOKSMA, 1986).

3.2.1. Transformation hydro-thermique de l'amidon : la gélatinisation

Le chauffage d'une suspension aqueuse d'amidon, à une température supérieure à 60 °C, induit un gonflement irréversible des granules et conduit à leur solubilisation (Figure 8).

À une température donnée dite **température de gélatinisation**, le granule perd sa structure semi-cristalline et gonfle très rapidement sur une plage de température limitée de 1 à 1,5 °C ; le gonflement de tous les granules est obtenu sur une plage de température de 10 à 15 °C (BOURSIER, 2005).

Au cours du gonflement des granules, l'amylose amorphe se solubilise dans le milieu. L'empois d'amidon obtenu est composé de grains gonflés qui constituent la phase dispersée et, dans certains cas, de macromolécules solubilisées (principalement amylose) qui épaississent la phase continue (BOURSIER, 2005).

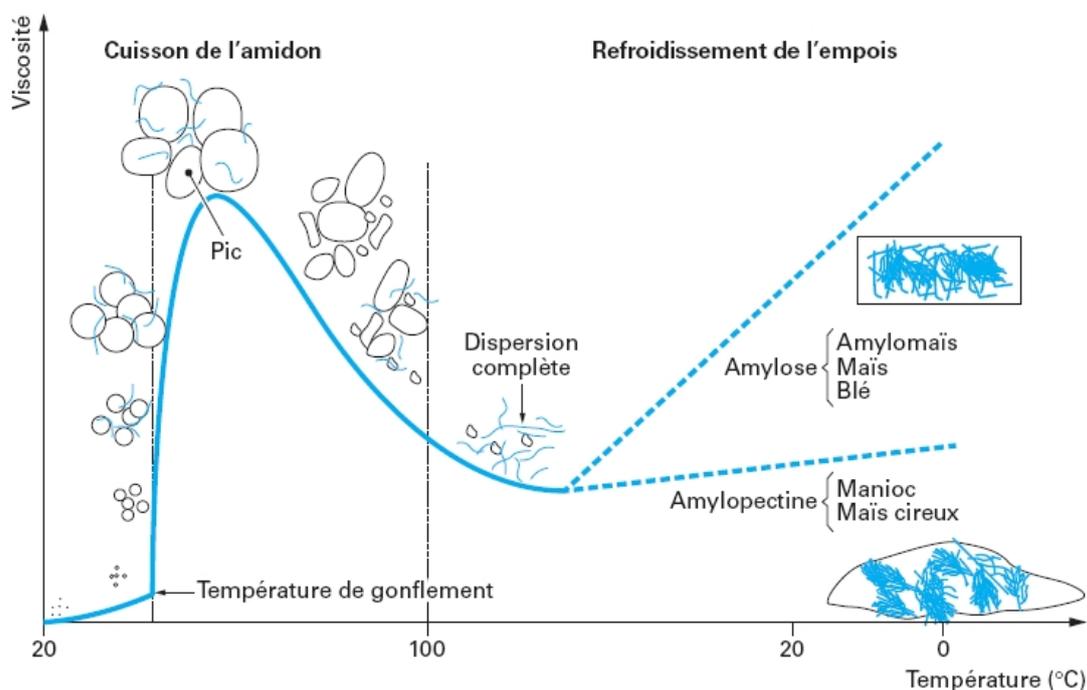


Figure 8. Comportement général des amidons à la cuisson et au refroidissement (BOURSIER, 2005).

Le gonflement des grains suivi de la solubilisation de l'amylose modifie aussi la consistance du milieu provoquant une augmentation rapide de la viscosité de la phase continue pour atteindre un pic (MORRIS, 1990). L'évolution de la viscosité et la température du pic dépendent de l'espèce botanique et du type cristallin de l'amidon natif.

L'abaissement de température obtenu lors du refroidissement de l'empois provoque une insolubilisation des macromolécules et une séparation de phases liées à l'incompatibilité des deux polymères amylose et amylopectine, puis leur recristallisation : c'est la **rétrogradation** (BOURSIER, 2005).

3.2.2. Transformation hydro-thermique des protéines

Les deux familles de protéines, de structure (albumines et globulines) et de réserve (gluten), ne subissent pas les mêmes modifications lors des traitements thermiques :

- Les protéines de structure subissent deux modifications successives : une trans-conformation réversible des molécules puis une association irréversible de celles-ci par des interactions de type hydrophobe ou à travers l'oxydation de groupements thiol, c'est la thermo-coagulation (MULVIHILL and DONOVAN, 1987).
- Les protéines du réseau de gluten réagissent différemment aux traitements thermiques puisqu'elles ne subissent pas la première étape de trans-conformation réversible : il y a polymérisation directe et irréversible. Le gluten peut être assimilé à une macromolécule amorphe caractérisée par une température de transition vitreuse qui est fonction de la teneur en eau. Elle est de l'ordre de 110°C pour une teneur de 2% en eau (masse totale) et chute à 25°C pour une teneur de 15% (TOUFEILI *et al.*, 2002). Des températures de pâte supérieures à cette température de transition favorisent la réactivité chimique et donc la formation du réseau tridimensionnel du gluten. Cette formation induit le passage de la pâte d'un état liquide visqueux à un état solide élastique. On aboutit à un réseau de protéines thermoformées par création de ponts disulfure : il s'agit de la réticulation des protéines ou encore agrégation. Ces changements structuraux induisent des modifications mécaniques et rhéologiques des constituants du gluten. Tandis que les films de gliadines présentent une baisse d'extensibilité et un accroissement de la rigidité (SCHOFIELD *et al.*, 1984), les gluténines de HPM forment un réseau plus élastique et plus rigide (SHEWRY *et al.*, 1986). Le résultat global de ces changements est une baisse de l'extensibilité et un gain en fermeté et en élasticité du réseau de gluten.

CHAPITRE 3. PANIFICATION SANS GLUTEN

Le gluten est souvent nommé la « protéine structurale pour la fabrication du pain ». Les propriétés du gluten deviennent évidentes quand la farine est hydratée, donnant une pâte extensible, avec de bonnes propriétés de rétention de gaz, et une bonne structure de mie (GALLAGHER *et al.*, 2004). Cependant, le gluten doit être éliminé du régime des patients cœliaques (SCIARINI *et al.*, 2008). De nombreuses études ont été menées sur la substitution du gluten par des ingrédients capables d'imiter ses propriétés fonctionnelles (GARCIA, ZARITZKY, & CALIFANO, 2005; SCIARINI *et al.*, 2008).

1. EFFET DES HYDROCOLLOÏDES SUR LA QUALITE DU PAIN SANS GLUTEN

De divers hydrocolloïdes, tels que les gommés arabiques, de guar, de xanthanes, et de caroubiers, les carraguénanes, les alginates, les pectines et l'HPMC ont été exploités dans des formulations de pain sans gluten, en raison de leurs propriétés fonctionnelles qui permettent de les utiliser comme agents épaississants, stabilisants d'émulsions, améliorants de la capacité de rétention d'eau et des propriétés texturales, pour la formation de films et de gels, pour contrôler la mobilité de l'eau, et en général pour augmenter la durée de conservation des pains en retardant le rassissement et en les gardant frais le plus longtemps possible (DZIEZAK, 1991 ; AHLBORN *et al.*, 2005; CATO *et al.*, 2002; McCARTHY *et al.*, 2005; MOORE *et al.*, 2004; PRUSKA-KEDZIOR *et al.*, 2008; SCHOBER *et al.*, 2005; SCHWARZLAFF *et al.*, 1996).

MI, HYUN et HAE (1997a, 1997b et 1997c), montrent que certains hydrocolloïdes ajoutés à différents taux aux farines exemptes de 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.

D'autre part, une amélioration de la stabilité des pâtes est notée au cours de l'étape de fermentation avec les alginates, les carraguénanes, les gommés de xanthanes et les Hydroxypropylméthylcelluloses (HPMC) (ROSELL *et al.*, 2001).

La gomme de xanthane a été employée comme substituant de gluten pour la fabrication du pain sans gluten (LAZARIDOU *et al.*, 2007). L'addition du xanthane a des effets significatifs sur la ténacité et l'extensibilité de la pâte et sur l'acceptabilité sensorielle du pain composé frais (SHITTU *et al.*, 2009).

LAZARIDOU et *al.*, (2007) ont étudié l'effet des hydrocolloïdes sur les paramètres rhéologiques de la pâte et la qualité du pain. Ils ont prouvé que le xanthane a eu l'effet le plus prononcé sur les propriétés viscoélastiques donnant des pâtes consistantes.

2. LA GOMME DE XANTHANE : PROPRIETES ET APPLICATIONS ALIMENTAIRES

La gomme xanthane est un hétéro-polysaccharide extracellulaire, qui est produit par la fermentation aérobie de *Xanthomonas campestris* (YOSHIDA et TANNER, 1993). Elle est constituée d'une unité penta-saccharidique, contenant de D-glucose, D-mannose, et d'acide D-glucuronique, dans les proportions molaires de 2, 2, 1, partiellement acétylé et pyruvylé (Figure 9) (SIMON et CERLES, 2000). Sa masse moléculaire est estimée entre $1,5 \times 10^3$ et 5×10^3 kDa. et sa formule brute approximative est la suivante : $(C_{67}H_{102}O_{56})_n$ ($n = 830$ à $2\ 800$) (SIMON, 2001).

Ce polymère est commercialisé essentiellement sous forme d'une poudre obtenue par précipitation du polysaccharide contenu dans le moût de fermentation à l'aide d'un solvant organique polaire (SIMON et CERLES, 2000).

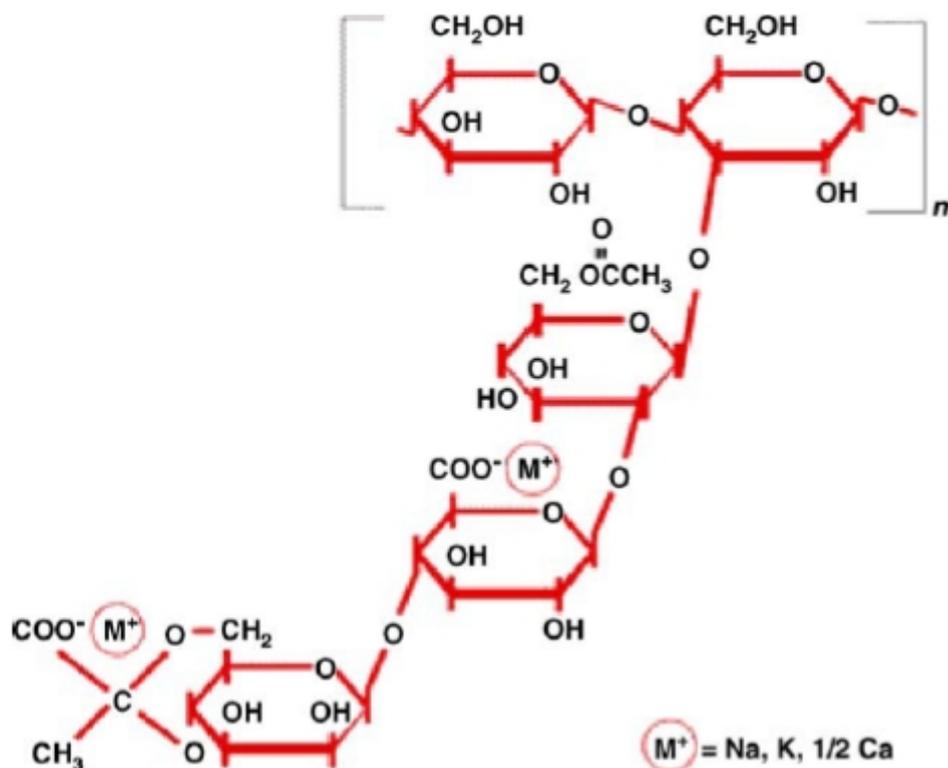


Figure 9. La structure de la gomme de xanthane (YOSHIDA et TANNER, 1993).

- **Application de la gomme de xanthane**

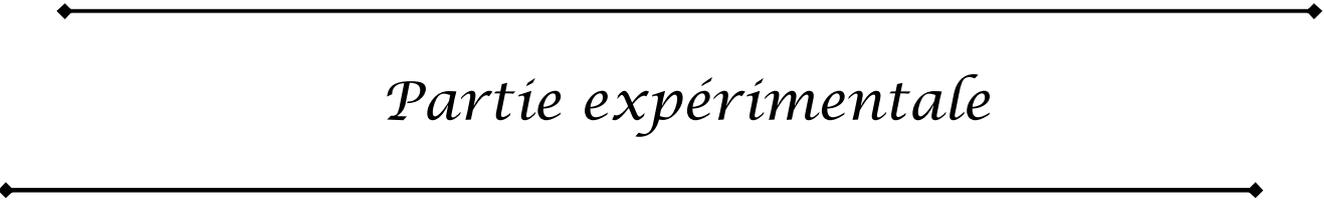
Bien que son prix soit relativement élevé, la gomme de xanthane trouve des applications industrielles nombreuses et variées, grâce à ses propriétés rhéologiques exceptionnelles (SIMON et CERLES, 2000). Mais elle est principalement employée dans l'industrie alimentaire en tant qu'agent épaississant, émulsifiant et stabilisant (YOSHIDA et TANNER, 1993). Suivant les pays, la gomme de xanthane est autorisée à des doses allant généralement de 0,1 à 1 % (en masse) (SIMON, 2001).

La gomme de xanthane a des propriétés pseudo-plastiques particulières, un comportement non newtonien, une viscosité élevée même à faible concentration (600–2000 ppm), une stabilité élevée sur une large gamme de concentration en sel (jusqu'à 150 g/l de NaCl), de températures (jusqu'à 90°C) et pH (2-11), une haute solubilité même à froid, aussi bien qu'une compatibilité avec beaucoup de sel, d'ingrédients alimentaires et d'autres polysaccharides utilisés en tant qu'agents épaississants. Ces caractéristiques contribuent à l'utilisation du xanthane dans de plusieurs produits alimentaires (KALOGIANNIS et *al.*, 2003).

Comme peut être vu dans le tableau 7, la concentration de la gomme de xanthane utilisée dans des produits alimentaires est très petite pour lui permettre de conférer les propriétés requises sans affecter le goût des produits finis.

Tableau 7. Quelques exemples d'applications de la gomme de xanthane dans les produits alimentaires. (ROSALAM et ENGLAND, 2006).

Application	Avantages	%
Boissons reconstituées	Fournit le corps et améliore la qualité	0,05-0,15
Potages instantanés	Fournit de grande viscosité au pH acide et neutre	0,30-0,50
Vinaigrette	Agit comme un stabilisateur idéal	0,15-0,50
En panification	Contribue à l'incorporation et la rétention de l'air	0,05-0,25
Sauces	Fournit de grande viscosité aux sauces et aux jus de viande	0,10-0,30



Partie expérimentale

Partie expérimentale

A. Matériel et méthodes

CHAPITRE 1. APTITUDE A LA PANIFICATION DE LA FORMULE RIZ-FEVEROLE

1. MATIERES PREMIERES

1.1. La farine de blé tendre

La farine de blé (*Triticum aestivum*) est l'ingrédient de base des produits de panification. Elle est considérée comme le témoin auquel sont comparées les autres matières premières. La farine de blé tendre utilisée provenait d'un lot de mélange commercial. Elle est produite par SMIDE Constantine sous la marque *KENZA* (annexe 1a).

1.2. Les ingrédients exempts de gluten

1.2.1. Farine du riz

La farine du riz long blanchi (*Oryza sativa japonica*) d'origine Thaïlandaise de variété *Basmati*, ensaché dans des sacs de 400 g a été utilisée (annexe 1b).

1.2.2. La fèveole

La fèveole (*Vicia faba minor*) appartenant à la variété *Sidi Aïch* utilisée nous est fournie par la chambre d'agriculture de Constantine (Algérie) (annexe 1c).

La fèveole est préalablement décortiquée et dégermée manuellement. Les graines sont réduites en farine à l'aide d'un broyeur à meules en pierres de marque ENGKSO d'origine Danoise jusqu'à l'obtention d'une granulométrie répondant aux exigences de la panification.

2. CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DES FARINES

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées au niveau de laboratoire Central du Groupe ERIAD de Constantine afin de caractériser les matières premières utilisées.

2.1. Composition globale des matières premières

2.1.1. Teneur en eau

La teneur en eau est déterminée selon la méthode de GODON et LOISEL (1984). Une prise d'essai de $10 \pm 0,001$ g est séchée sous un courant d'air pulsé dans une étuve Brabender à 130°C pendant 90 min. La teneur en eau du produit (H) est lue directement sur le cadran de l'étuve exprimée en grammes d'eau pour 100 g de produit humide.

$$H = 100 \frac{P_0 - P}{P_0}$$

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

P : Masse du résidu après séchage (g) ;

2.1.2. Cendres totales

Les cendres totales sont déterminées selon la norme AFNOR N.F. V03-760 de décembre 1984 (AFNOR, 1991). Une prise d'essai de $3 \pm 0,001$ g placée dans une nacelle est incinérée dans un four à moufle (marque BUHLER MLI 11000) à une température de 550°C jusqu'à la combustion totale de la matière organique et l'obtention d'un résidu minéral ayant un poids constant.

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

$$C = 100 \frac{P_1}{P_0} \times \frac{100}{(100 - H)}$$

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

P_1 : Masse de la prise d'essai après incinération (g);

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

2.1.3. Protéines totales

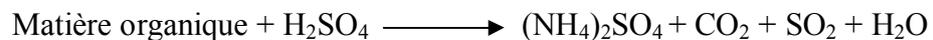
La teneur en azote total est déterminée selon la norme AFNOR N.F. V03-050 de septembre 1970 (AFNOR 1991) à l'aide d'un appareil de KJELDAHL de marque GREHRADJ KI26. L'azote est ensuite converti en protéines en appliquant le coefficient de conversion qui est de 5,70 pour les farines de blé tendre (JONES, 1941 ; PELLETT and YOUNG, 1980), de 5,95 pour le riz (JULIANO, 1994), et de 6,25 pour les légumes secs (JONES, 1941 ; AYKROYD et DOUDHTY, 1982).

L'azote peut se trouver sous forme minérale et organique; pour le doser dans sa totalité, il faut détruire les composés organiques de manière à obtenir tout l'azote sous une même forme minérale. On effectue pour cela une minéralisation. L'azote minéralisé est ensuite déplacé par la lessive de soude ; L'ammoniac produit est distillé puis piégé dans de l'acide sulfurique qui est titré avec une solution étalonnée de base forte (NaOH).

La méthode comporte essentiellement trois étapes :

2.1.3.1. Minéralisation

La minéralisation est effectuée à l'aide d'un excès d'acide sulfurique (96 %, d = 1,84) concentré et chaud, en présence d'un mélange de catalyseurs (K_2SO_4 et $CuSO_4$) et elle se poursuit jusqu'à la décoloration complète du contenu des matras. L'azote total est donc obtenu sous la forme minérale NH_4 :



2.1.3.2. Distillation

Pour transformer les ions ammonium (NH_4^+) du minéralisat en ammoniac (NH_3), on doit alcaliniser le minéralisat ; pour cela on utilise un large excès de base forte : la lessive de soude. Ainsi, le minéralisat est tout d'abord neutralisé puis alcalinisé. On a alors :



La lessive de soude étant en excès, tous les ions ammonium sont transformés en ammoniac et donc tout l'azote se retrouve sous forme de NH_3 .

Par distillation du minéralisât alcalinisé, le NH_3 se dégage sous forme de vapeurs que l'on condense et que l'on recueille dans un volume connu d'acide sulfurique (0,1 N) en excès. Il se forme alors du sulfate d'ammonium.



2.1.3.3. Titration

L'excès d'acide est dosé à l'aide d'une solution étalonnée de base forte (NaOH) (0.1 N), en présence d'un indicateur coloré rouge de méthyle.

La teneur en azote total (N) exprimée en grammes pour 100 g de matière sèche est égale à:

$$N = \frac{V \times 0,0014 \times 100}{P_0} \times \frac{100}{(100 - H)}$$

Où V : Volume de la soude N/10 utilisé pour la titration (ml) ;

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

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

Pour obtenir la teneur en protéines (P) en grammes pour 100 g de matière sèche, la valeur trouvée est multipliée par un coefficient de conversion approprié (K):

$$P = N \times K$$

2.1.4. Matières grasses totales

La teneur en matière grasse totale est déterminée selon la norme AFNOR N.F. V03-713 février 1984 (AFNOR, 1991). La mesure se fait en trois étapes :

(1)-**hydrolyse** d'un échantillon de $8 \pm 0,001$ g par une solution d'acide chlorhydrique (37,5 %) en présence d'éthanol et d'acide formique (80 %, $d = 1,18$). Les lipides liés aux protéines et aux glucides sont ainsi libérés. Le formate d'éthyle qui se forme est lui même solvant des lipides,

(2)-**extraction** de la matière grasse libérée à l'aide d'un solvant organique (hexane), en présence d'éthanol,

(3)- **élimination** de l'hexane sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif type ROTAVAPOR RV 05-ST et séchage du résidu à 60°C jusqu'à poids constant.

La teneur en matière grasse totale (**MG**) est exprimée en % de la de matière sèche:

$$MG = 100 \frac{P_1}{P_0} \times \frac{100}{(100 - H)}$$

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

P_1 : Masse du résidu lipidique (g);

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

2.1.5. Glucides totaux

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

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

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

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

MG : Teneur en matière grasse totale (% de MS).

2.2. Distribution granulométrique des farines

La granulométrie est l'étude de la distribution de la taille des particules d'une farine. C'est une caractéristique fondamentale, en relation directe avec toutes les opérations unitaires de 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).

Le tamisage manuel, bien que décrit dans la norme AFNOR NF X 11-507 de septembre 1989 est l'une des plus anciennes méthodes d'analyse granulométrique, et aussi l'une des plus largement utilisées car il est peu coûteux. Son principe de base consiste à diviser un matériau pulvérulent en le faisant passer à travers un (ou plusieurs) tamis dont les caractéristiques sont connues.

Un échantillon de 100 g de farine est déposé au sommet d'un empilement de 5 tamis placés en ordre décroissant d'ouverture de mailles (200, 150, 125, 100 et 75 μm) et auquel on applique un mouvement vibratoire manuel. Les particules dont des dimensions inférieures aux dimensions des ouvertures traversent le tamis lorsqu'il est mis en vibration (le passant), alors que les particules les plus grosses sont retenues (le refus). Les particules se répartissent de manière inégale sur chacun des tamis. Les fractions retenues sur chacun des tamis sont ensuite pesées et rapportées sur la quantité d'échantillon totale pour déterminer la distribution granulométrique.

La distribution granulométrique des particules des farines (**DG**) est exprimée en % de produit brut :

$$DG = 100 \frac{P_1}{P_0}$$

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

P_1 : Masse de la fraction retenue sur chacun des tamis (g);

3. FORMULE DE L'ETUDE

Pour la préparation des pains sans gluten, une des formules en cours d'étude au niveau de l'équipe TEPA a été proposée. Il s'agit de la formule à base de riz et de fève (FRF) dont le mélange des farines de riz et de fève s'opère respectivement selon un rapport massique de 2/1. D'un point de vue nutritionnel, la formule proposée est basée sur les avantages connus de la supplémentation céréales-légumes secs. 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 fève à la formule l'enrichirait en protéines et laisserait espérer de meilleures propriétés rhéologiques des pâtes sans gluten résultantes en vue d'une panification.

La formule riz- fève proposée est étudiée en comparaison avec la farine témoin de blé tendre.

4. PLAN D'EXPERIENCES

A travers cette étude les réponses donnant les caractéristiques rhéologiques de pâtes issues de la FRF qui se rapprocheraient le plus de celles des pâtes témoins étaient recherchées.

Un plan d'expériences central composite à deux variables, teneurs en xanthane (X_1) et en eau des pâtes (X_2), a été choisi afin d'obtenir une gamme de consistance de pâtes plus ou moins importante.

Le modèle étudié étant un modèle à deux facteurs, il permet d'estimer les valeurs des coefficients de modèles du second degré traduisant la relation de cause à effet entre les facteurs retenus et la réponse étudiée. Ce plan nécessite la réalisation de huit expériences 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.

4.1. Modèle mathématique

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

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1 X_1 + b_{22} X_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2$$

Où : b_0 est une constante ;

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

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

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

4.2. Niveaux des variables

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

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

Pour que le plan soit orthogonal, la valeur de α a été fixée à 1,414. Cette valeur qui n'est que le rayon r du cercle sur lequel sont représentés les points expérimentaux (Figure 10) permettra le calcul des régresseurs ($b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$) des modèles mathématiques indépendamment les uns des autres.

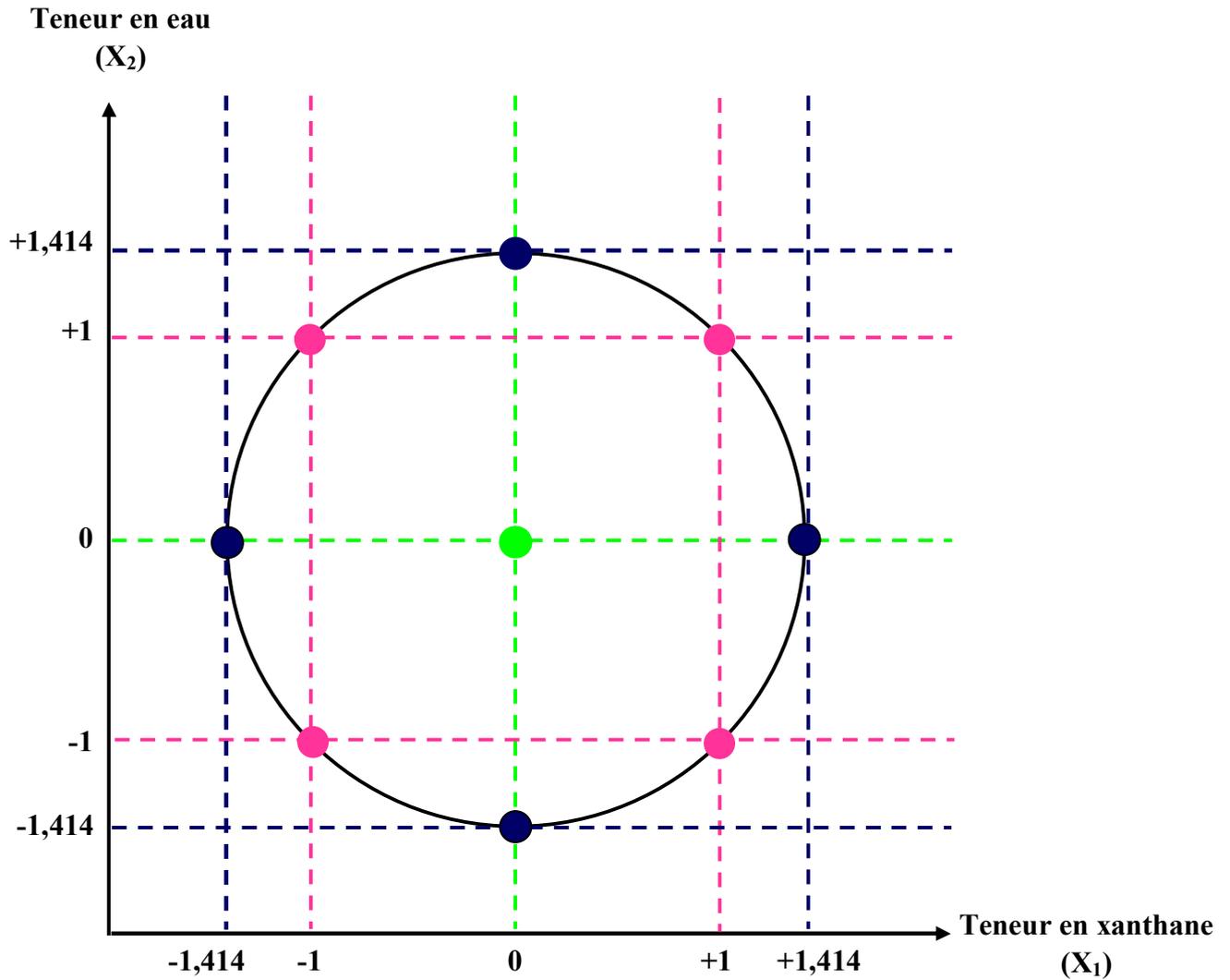


Figure 10. Représentation graphique du plan expérimental à deux facteurs (X_1 , X_2) et trois niveaux (-1, 0 et +1). Les $\pm 1,414$ représentent les valeurs extrêmes (max, min).

La matrice d'expériences du plan composite orthogonal centré à deux variables est donnée dans le tableau 8.

Tableau 8. Matrice d'expérience du plan composite orthogonal centré à deux variables

ESSAIS	Matrice	
	X ₁ (Xanthane)	X ₂ (Hydratation)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1.414	0
6	+1.414	0
7	0	-1.414
8	0	+1.414
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

La représentation graphique des 13 points expérimentaux se fait à travers le cercle avec un tracé bidirectionnel (Figure 10).

4.3. Détermination des variables réelles

4.3.1. Xanthane

D'après la littérature les concentrations de xanthane les plus couramment utilisés sont faibles (inférieures à 2 %) (SHITTU et *al.*, 2009 ; DEMIRKESEN et *al.*, 2010). Les bornes de l'intervalle concernant cette variable ont été choisies égales à 0 et à 1 % (Tableau 9).

4.3.2. Hydratation

Le choix des taux d'hydratation des pâtes de la formule Riz-Fèverole a été déterminé sur la base d'essais préliminaires (Tableau 9).

Tableau 9. Valeurs calculées des variables codées correspondant aux niveaux attribués

Variables	Niveaux				
	-1.414	-1	0	+1	+1.414
X₁ : Xantane (g pour 100 g de FRF brute)	0	0.15	0.50	0.85	1
X₂ : Hydratation (g pour 100 g de FRF brute)	90	90.73	92.50	94.27	95

FRF : Formule Riz-Féverole

5. OBTENTION DES PÂTES ET PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Sur le diagramme (Figure 11), sont décrites en fonction du type de pâte (avec ou sans levure), les différentes voies parcourues par les échantillons jusqu'à la réalisation des mesures prévues :

- *Pâtes sans levures* destinées à l'étude des propriétés boulangères (W, G et P/L) à l'Alvéographe (Chopin, France) (Voie 1),
- *Pâtes avec levures* destinées à la caractérisation des pains en sortie de cuisson (couleur, texture et volume spécifique) (Voie 2).

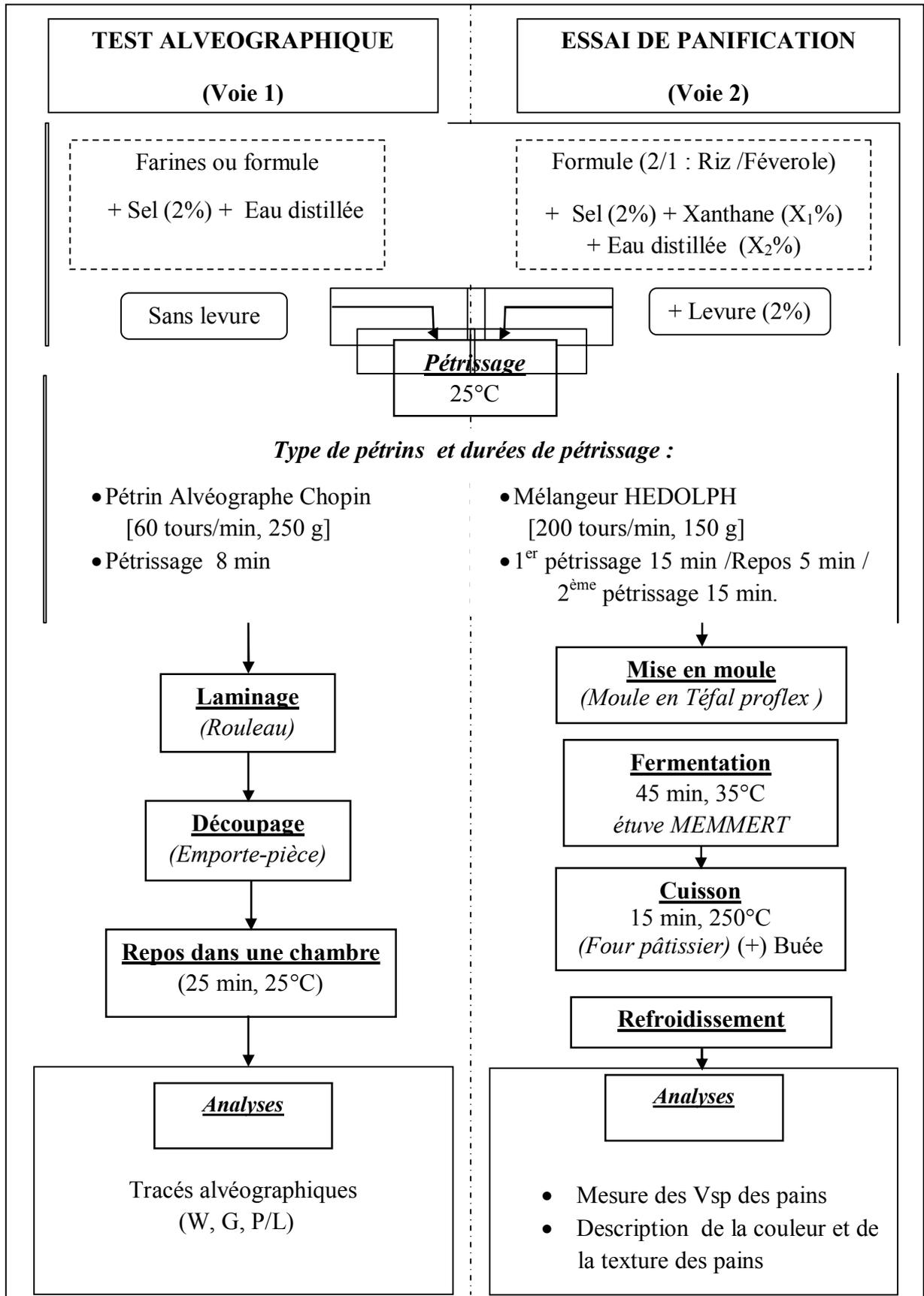


Figure 11. Diagramme montrant les différentes voies de la méthodologie adoptée.

6. CARACTERISATION RHEOLOGIQUE DES PATES PAR L'ALVEOGRAPHIE CHOPIN

Les tests alvéographiques ont été effectués au niveau du laboratoire physico-chimique de la minoterie de SIDI ARGHIS d'Oum El-Bouaghi afin d'apprécier la valeur boulangère de différents types de farines.

6.1. Principe

L'alvéographe Chopin (annexe 2) est l'appareil le plus utilisé pour l'appréciation de la valeur boulangère des pâtes destinées à la panification (DELFRATE et STEPHANE, 2005). 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". L'intérêt de cette mesure réside dans la similitude des déformations observées avec celles qui s'exercent au cours de la formation et de l'expansion des alvéoles de gaz au sein de la pâte pendant la fermentation, sous la pression de gaz carbonique et la cuisson (FEILLET, 2000).

6.2. Choix des pâtes à tester

L'appréciation des propriétés boulangères s'est faite sur trois types de pâtes :

1. La pâte du témoin de blé tendre, cette dernière est considérée comme la référence qui présentant les meilleures caractéristiques alvéographiques (G, W et P/L) auxquelles seront comparées celles des pâtes sans gluten testées ;
2. Les matières premières exemptes de gluten (riz, fève, féverole) et la FRF sans améliorant en vue de les caractériser ;
3. Les 13 couples (*Xanthane-Hydratation*) du plan d'expérience en vue de faire ressortir les meilleures recettes qui seront caractérisées par des tests de panification en comparaison aux mauvaises recettes et au témoin.

6.3. Détermination de la quantité d'eau à ajouter

La quantité d'eau à ajouter pour la préparation de la pâte est imposée par la norme NF ISO 5530-4 et doit correspondre à 50 g d'eau pour 100 g de farine dont l'humidité est de 15 % (soit 125 g d'eau ajoutés à 250 g de farine de blé tendre).

La recherche des propriétés boulangères de pâtes à base de la blé tendre de matières premières exemptes de gluten n'a pas permis l'application stricte de la norme NF ISO 5530-4 concernant les niveaux d'hydratation. Nous avons donc travaillé comme suit :

1. Pour la farine témoin de blé tendre, la quantité d'eau ajoutée (MEaj) pour la préparation de la pâte témoin est calculée en vue d'obtenir une teneur en eau finale (MEF) de 45 g pour 100 g de pâte. Cette teneur en eau correspondrait à une consistance de 500 UB au farinographe. La masse d'eau à ajouter (MEaj) est calculée selon les formules suivantes :

$$MEF = 100 \times \frac{(ME_{tot})}{(MP_{tot})} = 45\%$$

Où : $ME_{tot} = MF \frac{H}{100} + ME_{aj}$

$$MP_{tot} = MF + M_{sel} + ME_{aj}$$

Or : ME_{tot} : la masse totale d'eau (g) ; MP_{tot} : la masse totale de la pâte préparée (g) ; ME_{aj} : la masse d'eau à ajouter (g) ; MF : la masse de la farine ou de la formule (g) ; M_{sel} : la masse du sel (g) ; H : teneur en eau de la farine.

2. Pour les farines de matières premières exemptes de gluten (riz et fèvevole) ainsi que la FRF, les taux d'hydratation ont été fixés sur la base des essais préliminaires à l'Alvéographe Chopin ayant donné les alvéogrammes les plus acceptables.
3. Pour les 13 couples (*Xanthane-Hydratation*) les niveaux d'hydratation ont été imposés par le plan d'expérience.

Les quantités d'eau retenues pour les essais à l'Alvéographe Chopin sont résumées dans le Tableau 10.

Tableau 10. Pâtes préparées pour l'appréciation des propriétés boulangères à l'Alvéographe Chopin (g pour 100 g de farine ou de formule)

Farines ou formules	Xanthane (g)	MEaj (g)
<i>Témoin :</i>		
Farine de blé tendre (<i>Kanza</i>)	0	57,08
<i>Ingrédients sans gluten :</i>		
Riz	0	90
Fèverole	0	65
<i>Formule sans améliorant:</i>		
F.R.F	0	86,66
<i>Couples (Xanthane- Hydratation)</i>		
<i>Couple 1</i>	0,15	90,73
<i>Couple 2</i>	0,85	90,73
<i>Couple 3</i>	0,15	94,27
<i>Couple 4</i>	0,85	94,27
<i>Couple 5</i>	0	92,5
<i>Couple 6</i>	1	92,5
<i>Couple 7</i>	0,5	90
<i>Couple 8</i>	0,5	95
<i>Couple 9</i>	0,5	92,5
<i>Couple 10</i>	0,5	92,5
<i>Couple 11</i>	0,5	92,5
<i>Couple 12</i>	0,5	92,5
<i>Couple 13</i>	0,5	92,5

6.4. Mode opératoire

Les pâtes destinées aux mesures à l'Alvéographe Chopin ont été préparées sans ajout de levure (voie 1, figure 11). La pâte est pétrie dans le pétrin de l'alvéographe Chopin 8 min, 60 tours/min. Après son extraction, celle-ci est laminée 7 fois à l'aide d'un rouleau par des mouvements de « va et vient », sur un plateau rectangulaire dont le fond est en verre. La pâte

est ensuite lubrifiée avec de l'huile de paraffine. A l'aide d'un emporte-pièce, les 5 pâtons sont ensuite découpés ($r=23\text{mm}$, $h=6\text{mm}$) et laissés relaxer (20 min, 25°C) dans la chambre de repos de l'Alvéographe Chopin.

Chaque éprouvette de pâte est soumise à la déformation. L'essai consiste à former une bulle de pâte en insufflant de l'air à un débit constant sous l'éprouvette de pâte et à mesurer en fonction du temps l'évolution de la pression d'air P résultante jusqu'à rupture de la bulle. Le temps d'expansion et de résistance à la rupture de cette dernière varie d'un échantillon à un autre. La pression à l'intérieur de la bulle de pâte est enregistrée comme une courbe sur un support en papier. Une courbe moyenne est tracée à partir des enregistrements des 5 pâtons (Figure 12).

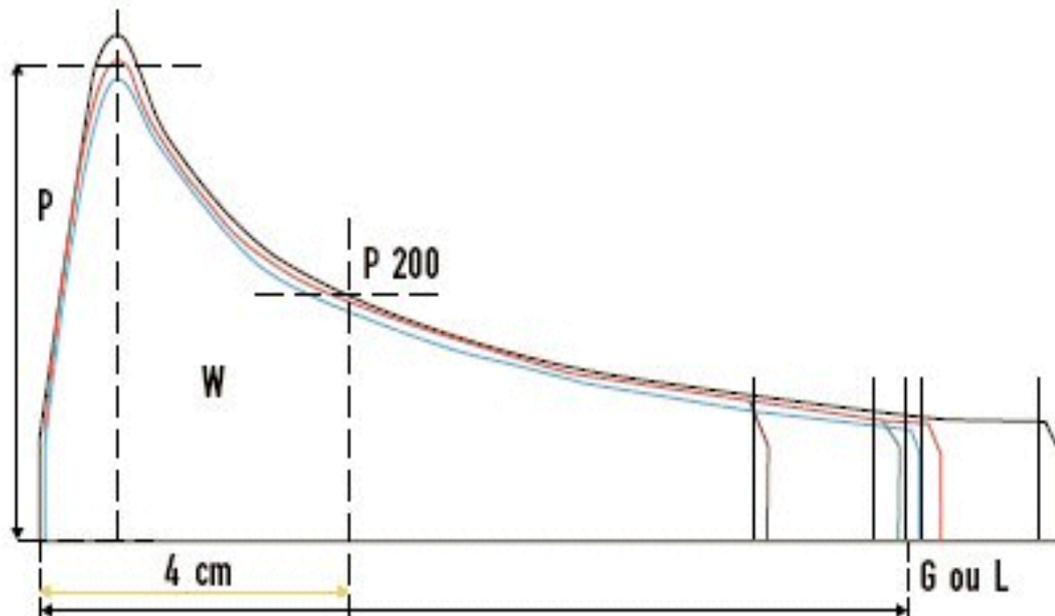


Figure 12. Alvéogramme type de différents types de farines de blé tendre

(DELFRATE et STEPHANE, 2005)

6.5. Expression des résultats

La lecture d'un alvéogramme (Figure 12) se fait à travers les paramètres suivants (SAKR et HAJJ MOUSSA, 2007) :

- **"W"** : Il vient du mot anglais "Work et exprime la force boulangère de la pâte. Il désigne le travail de déformation mécanique pour 1 g de pâte, mesuré en joules et proportionnel à la surface du diagramme moyen. Sa valeur est selon l'équation suivante :

$$W(\text{joules}) = 6,54 \cdot S$$

Où : **S** : la surface du diagramme moyen

6.54 : Coefficient relatif aux farines des céréales.

- **"P"** : Correspond à la pression maximale d'air insufflée nécessaire à la déformation et donc à l'obtention de la bulle de pâte. Il exprime la ténacité, la fermeté ou la résistance à la déformation de la pâte et la capacité d'absorption d'eau de la farine. Il est donné 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 l'affaissement de la pâte. Il est donné en mm sur l'axe des abscisses de l'alvéogramme.
- **"G"** : Se rapporte au gonflement qui est la quantité d'air insufflée à la pâte qui évolue en fonction de l'extensibilité et la rétention gazeuse. Il est exprimé en cm³ et est donné par l'équation suivante.

$$G (\text{cm}^3) = 2.226 \times \sqrt{L}$$

- **"P/L"** : Ce rapport appelé "rapport de configuration de la courbe" ou "rapport de ténacité à l'allongement", associé à un équilibre dans les caractéristiques physiques des pâtes.
- **"Ie"** : Correspond à l'Indice d'Elasticité de la courbe. Il est donné par l'équation suivante :

$$Ie = \frac{P_{200}}{P} \times 100$$

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

7. TEST DE PANIFICATION

Les essais de panification ont été réalisés au niveau des laboratoires de l'I.N.A.T.A.A.

7.1. Matières impliquées

7.1.1. L'eau d'hydratation

L'eau qui a été utilisée pour les tests de panification est une eau distillée obtenue à partir du distillateur SCOTSMAN d'un pH de $5,9 \pm 0,16$.

7.1.2. La levure boulangère

Il s'agit de la levure *Saccharomyces cerevisiae* de marque "S. I. Lesaffre France". Elle se présente sous forme lyophilisée en paquet de 250 g. Celle-ci est introduite à raison de 2 % par rapport à la masse de farine et elle est mélangée directement avec elle avant hydratation.

7.1.3. Le xanthane

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

7.1.4. Le sel

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

7.2. Matériel

7.2.1. Les balances

Deux balances ont été utilisées, l'une technique de marque SARTORIUS basic type BA610 (annexe 5a₁), d'une portée de 3100 g avec une précision de lecture de 10⁻² et l'autre ; une balance analytique de marque SARTORIUS type BP110s, d'une portée de 110 g avec une précision de lecture de 10⁻⁴.

7.2.2. Le pétrin

Un Mélangeur à hélice de marque HEIDOLPH type RZR 2020 (Allemagne) a été utilisé avec une vitesse de 200 tours/min pour la préparation des pâtes pour les tests de panification (annexe 5b₁).

7.2.3. Le moule

Le moule utilisé pour les essais de panification est en Téfal Proflex, souple, de dimensions (10,5×5,3×4 cm³) et sans couvercle; soit une capacité de 222,6 cm³ (annexe 5b₂).

7.2.4. L'étuve

L'étuve qui a été utilisée pour la fermentation est de marque MEMMERT (fabriquée en Allemagne). Sa température maximale est de 225°C (annexe 5a₂).

7.2.5. Le four

La cuisson a été réalisée dans un four pâtissier thermostaté de dimension (0,60×0,90×0,18 m³) doté de deux résistances placées respectivement au niveau de la partie supérieure et inférieure du four permettent le chauffage d'une manière homogène de la chambre de cuisson (annexe 5a₃).

7.3. Préparation des échantillons de pain

Des pains témoins (100% farine de blé tendre) et des pains exemptes de gluten (100% farine du riz, 100% farine de fève, FRF avec et sans xanthane), ont été préparés selon un diagramme de la panification française (Tableau 11).

Tableau 11. Recette des pains témoins et pains sans gluten

Ingrédients	<i>Pains</i>				
	Blé tendre	Riz	Fève	FRF	FRF + Xanthane (X ₁ %)
Farines (g)	100	100	100	100	100
Sel (%)	2	2	2	2	2
Levure (%)	2	2	2	2	2
Eau (%)	57,08	90	65	86.66	Variable (X ₂ %)

FRF : Formule (2/1 : Riz/fève)

L'eau, la farine et les autres ingrédients sont mélangés et pétris dans un mélangeur de marque HEIDOLPH, avec une vitesse de 80 tours/mn pendant 15 min, après un temps de repos de 5 min, la pâte est remise au deuxième pétrissage qui dure aussi 15 min. En sortie de pétrissage, 150 g de pâte sont prélevés, fractionnés et façonnés en 3 pâtons de 50 g et déposés dans le moule sans couvercle. Les moules sont ensuite placés dans une étuve de fermentation réglée à 35°C pendant 45 min en présence de buée. Les tests de cuisson des échantillons sont après réalisés dans un four pâtissier à 250°C en présence de buée. Elle s'achève au bout de 15 min, après l'obtention d'une croûte colorée. Des essais préliminaires ont permis de montrer que la cuisson en absence de vapeur d'eau entraînait la fissuration de la surface des pâtons. Ces gerçures, qui se forment apparemment en début de l'opération, engendrent un affaissement marqué des pains sans gluten même levés au cours de la fermentation. En fin de cuisson, les pains sont démoulés placés sur une grille et laissés se refroidir à la température ambiante, puis caractérisés.

7.4. Caractérisation des pains

La caractérisation des produits de cuisson s'articule autour de trois points suivants:

1. Description de la couleur et de la texture des pains;
2. Mesure des volumes spécifiques des pains en cm^3/g .

7.4.1. Description de la couleur et de la texture des pains

Les deux paramètres sont appréciés à l'œil nu. La couleur et la texture des différents pains sont comparées entre elles et par rapport au pain témoin.

7.4.2. Mesure des volumes spécifiques des pains

7.4.2.1. Principe

Le volume spécifique des pains (cm^3/g) est mesuré indirectement par déplacement de petites particules solides sphériques de volume spécifique connu dans un récipient où le pain final est placé.

7.4.2.2. Mode opératoire

Prendre un récipient de volume plus grand que celui des pains et le remplir à ras avec des grains solides sphériques de volume spécifique connu ($0,72 \text{ cm}^3/\text{g}$). Pour la mesure en elle-même, vider à moitié le récipient de son contenu en grains sphériques, et placer le pain et couvrir l'échantillon avec le reste des grains jusqu'à ras du récipient. Après arasement de la surface du récipient de mesure, récupérer les grains sphériques en excès. Leur volume correspond à celui des pains.

7.4.2.3. Expression des résultats

Le volume spécifique des pains (V_{sp}) exprimé (cm^3/g) est le quotient du volume du pain (V) par sa masse (M) :

8. ANALYSES STATISTIQUES
$$V_{sp} (\text{cm}^3/\text{g}) = \frac{V (\text{cm}^3)}{M (\text{g})}$$

Toutes les mesures sont effectuées en triple. La saisie et le traitement statistique des données ont été réalisés à l'aide des logiciels Excel (version 2003 et version 2007), StatView version 5.0 (Berkeley, USA) et STATISTICA version 9 (Stat Soft, France). Les résultats sont exprimés en tant que moyenne \pm écart type. La comparaison entre plusieurs moyennes est effectuée par l'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur et le niveau de significativité est fixé à 0,05.

B. Résultats et discussion

CHAPITRE 1. APTITUDE A LA PANIFICATION D'UNE FORMULE FEVEROLE

RIZ-

3. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CIMIQUES DES FARINES

1.1. Composition globale des matières premières et de la formule de l'étude

L'ensemble des résultats des analyses chimiques (Tableau 12) nous a permis de situer les niveaux des constituants majeurs de chaque ingrédient destiné à la fabrication du pain, ainsi que la déduction de la composition des formules.

Tableau 12. Composition chimique¹ des ingrédients de base et de la formule riz-fèverole

Farines	Humidité (%)	Cendres		Protéines ²		Lipides		Glucides totaux ³		Totaux
		(%) MF	(%) MS	(%) MF	(%) MS	(%) MF	(%) MS	(%) MF	(%) MS	
FBT	14,51± 0,12	0,40± 0,01	0,46± 0,02	8,34± 0,12	9,75± 0,14	0,85± 0,15	0,99± 0,16	75,90	88,80	100
FR	10,81± 0,12	0,31± 0,03	0,35± 0,04	6,46± 0,30	7,24± 0,34	0,44± 0,08	0,5± 0,13	81,98	91,91	100
FF	11,28± 0,30	2,70± 0,02	3,04± 0,02	28,70± 0,12	32,35± 0,14	1,17± 0,15	1,33± 0,17	56,15	63,28	100
FRF⁴	10,97	1,11	1,25	13,87	15,61	0,68	0,77	73,37	82,36	100

¹ Moyenne ± écart type de trois déterminations,

² Protéines obtenus en multipliant la teneur en azote par 5,7 pour FBT, 5,95 pour FR et de 6,25 pour FF,

³ Glucides totaux déterminés par soustraction,

⁴ Valeurs obtenues par calcul sur la base de 2/3 (p/p) riz et 1/3 (p/p) Fèverole,

FBT : Farine de blé tendre ; FR : Farine de riz ; FF : Farine de fèverole ; FRF : Formule Riz-Fèverole.

1.1.1. Teneur en eau

La détermination de la teneur en eau est importante, puisque elle conditionne d'une part la précision des divers résultats analytiques rapportés à la matière sèche et d'autre part celle de la mise en œuvre des tests technologiques, tel l'essai à l'Alvéographe et celui de la panification CALVEL (1984).

La teneur en eau des farines est un paramètre important qui doit se situer entre 10 et 16 % pour que la farine se conserve convenablement (CHENE, 2001). La teneur en eau de nos farines qui varie entre 10,81 et 14,51% permet donc une bonne conservation de ces farines.

L'humidité de la farine de blé tendre ($14,51 \pm 0,19\%$) se situe bien dans l'intervalle donné par CALVEL (1984) et GRANDVOINNET ET PRATX (1994), limité entre 13 et 15,5% pour les farines boulangères.

Les teneurs en eau enregistrées pour les ingrédients sans gluten vont de $10,81 \pm 0,19\%$ pour la farine de riz et $11,28 \pm 0,31\%$ pour la farine de fève. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par BENATALLAH, (2009) pour la farine fève, par contre la teneur en eau de la farine de riz est plus faible. Ceci est dû probablement à l'évaporation de l'eau au cours de stockage.

1.1.2. Teneur en cendres

Le taux de cendres est le moyen officiel utilisé pour caractériser la pureté des farines (ABECASSIS, 1993). Selon GODON et LOISEL, (1984), la détermination des cendres offre la possibilité de connaître la teneur en matière minérale globale des céréales et des légumineuses et de leurs produits dérivés.

Le taux de cendres de la farine de blé tendre de $0,46 \pm 0,02\%$ de MS se situe dans l'intervalle donné par BOUDREAU et MENARD, (1992), qui préconisent des teneurs en cendre allant de 0.40 à 0.60% de MS pour les farines panifiables.

La farine de riz présente la teneur en cendres la plus faible comparativement aux autres farines avec $0,35 \pm 0,04\%$ de MS. Cette valeur se situe dans l'intervalle établie par JULIANO, (1994) qui varie de 0,3 à 0,8 % de MS et elle est proche de celle obtenue par BENATALLAH, (2009) qui est de 0,33 % de MS. La faible teneur en cendre notée pour la farine de riz pourrait être expliquée par le fait que le riz utilisé, est un riz décortiqué et blanchi, ce qui accuse relativement sa pauvreté en sons donc en cendres.

La teneur en cendres de la farine de fève de $3,04 \pm 0,02\%$ de MS est supérieure à celle trouvée par BENATALLAH, (2009) qui est de 2,75 %. La forte teneur en cendre observée pour la farine de fève est due probablement à la richesse de leur graine en minéraux (CUQ et LEYNAUD-ROUAUD, 1992).

Comme résultat de la supplémentation, l'addition de la farine de fève à celle de riz montre une hausse de 3,57 fois de l'apport minéral de la FRF.

1.1.3. Teneur en protéines

La teneur en protéines des farines exerce une influence considérable sur les propriétés viscoélastiques des pâtes et sur la qualité du pain (FEILLET, 2000). C'est aussi un paramètre important sur le plan nutritionnel, en particulier, parce que les céréales rentrent pour une part importante dans la ration alimentaire de la population. Elle varie en fonction de la variété, des conditions de culture et le stade de maturité des grains (SELSELET, 1991).

La teneur en protéines de la farine de blé tendre de $9,75 \pm 0,14\%$ de MS se situe au dessus du seuil minimal 7% de MS où la panification devient impossible (COLAS, 1991). De même, l'intervalle donné par CALVEL, (1984) est de 8 à 13% de MS pour les panifiables.

La farine de riz qui est à la base de la formule proposée présente la plus faible teneur en protéines ($7,24 \pm 0,34\%$ de MS). Cette valeur est proche à la fourchette établie par JULIANO, (1994) qui varie de 6,3 à 7.1 % de MS, mais elle est relativement faible comparée à celle rapportée par BENATALLAH, (2009) qui est de 7,6 % de MS.

La valeur la plus élevée des protéines est observée pour la farine de fève avec $32,35 \pm 0,14\%$ de MS. Ce qui explique leur utilisation comme un adjuvant en boulangerie afin d'améliorer la qualité alimentaire et technologique des pains (GUINET et GODON, 1994).

Le résultat obtenu par calcul sur la base de 2/3 riz et 1/3 fève montre une amélioration du niveau de protéines de la formule en rapport avec la présence de fève dans celle-ci. La teneur en protéines dans la FRF serait augmentée à plus de 2 fois à celle du riz de base pour passer de 7,24 à 15,61 % MS.

1.1.4. Teneur en lipides

Sachant que la majorité de la matière grasse des céréales et des légumineuses est contenue dans le germe du grain, l'élimination de ce dernier justifierait le faible niveau lipidique des farines.

Les résultats obtenus après dosage des trois farines, révèlent des teneurs en lipide par rapport à la MS qui vont de $0,99 \pm 0,161\%$ pour la farine de blé, de $0,5 \pm 0,13\%$ pour la farine de riz et de $1,33 \pm 0,167\%$ pour la farine de fève. Ces résultats concordent avec ceux établis par ATWELL (2001), JULIANO (1994) et la FAO (1982) qui sont respectivement de 1 à 2 % pour la farine de blé, de 0,3 à 0,5% pour la farine de riz et de 1,5 à 2% pour la farine de fève. Ces faibles valeurs lipidiques des farines favorisent leur stockage sans qu'il y ait un risque de rancissement.

La supplémentation du riz par la fève, plus riche en matière grasse, montre dans le cas de notre formule une élévation de la teneur en lipides à 0,77 % MS, soit 1,54 fois que celle du riz.

1.2. Distribution granulométrique des matières premières et de la formule de l'étude

La granulométrie d'une farine permet de caractériser la répartition en taille et en nombre des particules dont elle est composée, le comportement des farines au cours de leur transformation, notamment la quantité d'eau absorbée ainsi que la vitesse d'hydratation, en dépend (FEILLET, 2000).

Les résultats obtenus après tamisage manuel des matières premières et de la formule de l'étude (Figure 13), montrent que la farine de riz est celle qui présente davantage de fraction fine (81,26%) représentée par la fraction ($\leq 75 \mu\text{m}$), suivie de celle de FRF (75,45%) puis de fèverole (61,82%) alors que la farine de blé tendre présente (42,12%) de cette fraction. Par ailleurs, c'est la farine de blé tendre qui offre la quantité la plus conséquente (38,43%) de la fraction $]75-125 \mu\text{m}]$ suivie respectivement par la farine de riz (14,97%) et de la FRF (14,69%).

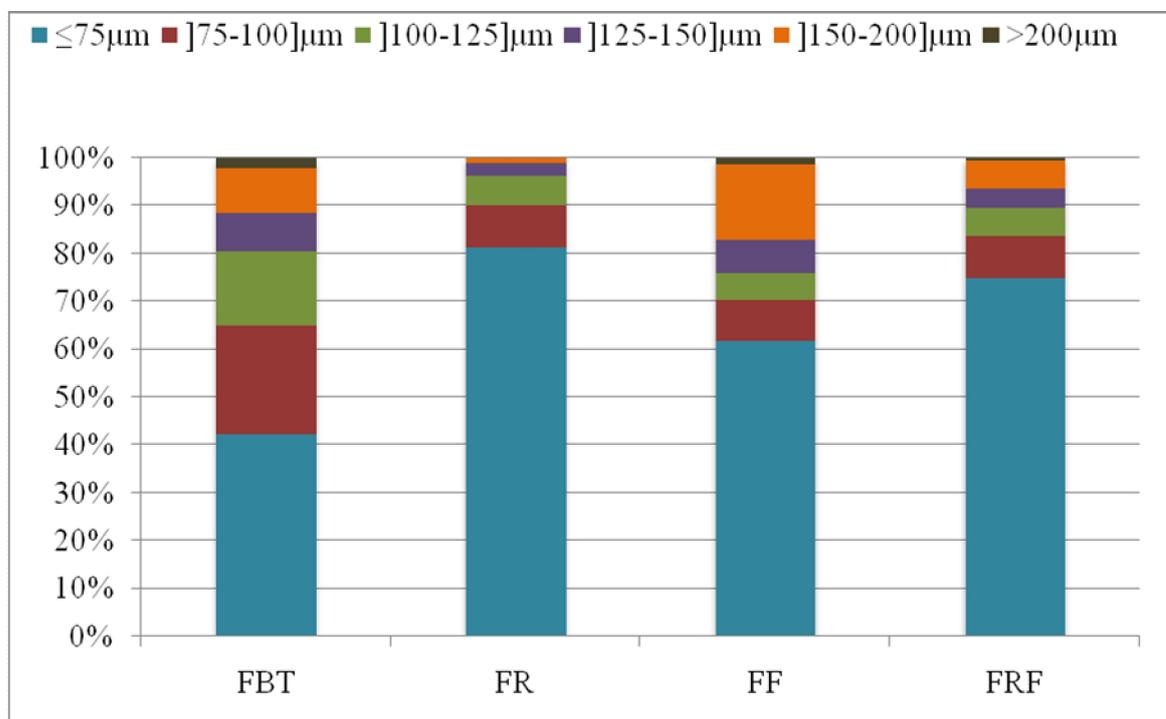


Figure 13. Granulométrie des farines destinées à la panification

FBT: farine de blé tendre ; FR : Farine du riz ; FF : Farine de fèverole ; FRF : Formule Riz-Fèverole.

Il ressort que toutes les farines analysées présentent 98% ou plus des particules de dimensions ($\leq 200 \mu\text{m}$). Ces résultats concordent avec la norme Codex pour la farine de blé établie par CODEX ALIMENTARIUS (1995).

La différence de répartition de dimension des particules de nos farines pourrait être due à la différence de composition, de texture et d'humidité de ces ingrédients ainsi qu'à la performance des broyeurs utilisés (MELCION, 2000).

1.3. Conclusion

La farine de riz qui est à la base de la formule proposée présente des niveaux nettement faibles de protéines et de minéraux comparativement à la farine de fève. Le calcul basé sur le rapport massique 2/1 utilisé pour la supplémentation de la formule montre une majoration de l'apport protéique et minéral en rapport avec la présence de la fève dans celle-ci, donc la FRF semble adéquate dans l'optique de satisfaire les apports recommandés en protéines. A ces avantages de la supplémentation s'ajouteraient l'amélioration espérée des propriétés rhéologiques et panifiables des pâtes sans gluten résultantes. Ceci est l'objet des deux parties suivantes.

D'après les résultats de tamisage des matières premières et de la formule de l'étude, on peut conclure que toutes nos farines présentant une granulométrie répondant aux exigences de la panification.

2. CARACTERISTIQUES ALVEOGRAPHIQUES DES MATIERES PREMIERES ET DE LA FORMULE DE L'ETUDE SANS AJOUT DE XANTHANE

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 et expansion par l'Alvéographe Chopin (DELFRATE et STEPHANE, 2005).

Les caractéristiques alvéographiques moyennes des farines témoin de blé tendre, de matières premières exemptes de gluten et de la formule sans améliorant (FRF) sont regroupées dans le tableau 13.

Tableau 13. Caractéristiques alvéographiques des matières premières et de la formule de l'étude sans ajout de xanthane.

Farines	MEaj (g)	G (cm ³)	P/L	W (10 ⁻⁴) J
Témoin :				
Blé tendre (Kanza)	57,08	17,75±1,56	0,80±0,17	130,80±1,76
Ingrédients sans gluten :				
Riz	90	4,97±1,55	2,97±0,40	2,74±2,12
Fèverole	65	7,38±1,00	3,55±0,60	19,03±2,05
Formule sans améliorant:				
F.R.F	86,66	5,45±0,70	2,25±0,22	3,59±0,92

Normes algériennes de panification	-	>20	[0,45 à 0,65]	[130 à 180]
Normes françaises de panification	-	[20 à 24]	[0,5 à 0,7]	[200 à 220]

Moyenne ± écart type, n = 3

MEaj : la masse d'eau ajoutée (g pour 100g de farine); G : Gonflement (cm³) ; P/L : Rapport de configuration ; W (10⁻⁴) : Travail de déformation (J).

2.1. Indice de gonflement « G »

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

La valeur de gonflement de la farine témoin de blé tendre de $17,75 \pm 1,56 \text{ cm}^3$ est inférieure 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 de 20 à 24 cm^3 .

Les valeurs de gonflement des ingrédients sans gluten qui vont de $4,97 \pm 1,55 \text{ cm}^3$ pour la farine du riz, de $7,38 \pm 1 \text{ cm}^3$ pour la farine fèvevole sont comparables à celles obtenus par BENATALLAH, (2009) qui sont respectivement de $4 \pm 0,01 \text{ cm}^3$ et $6 \pm 0,01 \text{ cm}^3$. En revanche, ces résultats sont nettement plus faibles comparés à ceux du 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 fèvevole au niveau de la formule, une amélioration sensible de l'indice de gonflement a été notée par rapport à la farine de riz de base. Cette évolution est semblable à celle observée par BENATALLAH, (2009).

Une corrélation positive et significative ($r = 0,97$) a été trouvée entre l'indice de gonflement « G » et la teneur en protéines des ingrédients sans gluten. Ce résultat confirme celui de ABECASSIS et CHAURAND, 1996 et montre que l'augmentation de « G » est associée généralement à une teneur élevée en protéines.

2.2. 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 est de $0,8 \pm 0,17$. D'après LIU *et al* (1996), notre farine témoin peut être orientée à la panification car son rapport de configuration se situe dans l'intervalle de [0,8 à 2]. Cependant, elle reste supérieure 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].

Les rapports de configuration des ingrédients sans gluten qui vont de $2,97 \pm 0,40$ pour la farine de riz, de $3,55 \pm 0,60$ pour la farine de fève et de $2,25 \pm 0,22$ pour la FRF sont trop élevés comparativement à ceux du témoin blé tendre et des 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 qui ont un « P/L » élevé (supérieur à 1) donneront des pâtes trop tenaces, peu tolérantes au pétrissage et montrant une tendance à absorber beaucoup d'eau, ainsi qu'un faible gonflement. Alors que pour « P/L » faible (inférieur à 0,3) les pâtes seront trop extensibles et difficiles à manier.

2.3. Travail de déformation « W »

Selon ADRIAN *et al.* (1995), le paramètre « W » constitue la mesure la plus intéressante pour estimer la qualité 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.

Le travail de déformation (W) de la farine de blé de $(130,8 \pm 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ J})$ se situe à la limite inférieure de l'intervalle des normes algériennes (1991), à savoir 130 à $180 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ pour les farines panifiables. Le travail enregistré pour notre farine témoin s'avère encore plus insuffisant par rapport à l'intervalle recommandé par GUINET et GODON (1994), soulignant qu'une bonne valeur boulangère s'établit lorsque le « W » est compris entre 200 et $220 \cdot 10^{-4} \text{ J}$.

Les ingrédients sans gluten présentent des valeurs du travail de déformation (W), qui vont de $(2,74 \pm 2,12 \cdot 10^{-4} \text{ J})$ pour la farine de riz et de $(19,03 \pm 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ J})$ pour la farine de

fèverole. Des résultats similaires ont été rapportés par BENATALLAH, (2009). Toutefois, ces résultats sont nettement faibles, loin des valeurs du témoin de blé tendre et des normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et françaises de panification (GUINET et GODON, 1994).

2.4. Conclusion

D'après les résultats alvéographiques, on peut déduire que la farine de blé tendre "kenza" se prête suffisamment à la panification malgré ses propriétés rhéologiques moyennes. Elle se montre nettement meilleure que les matières premières et la formule sans gluten étudiées.

Les propriétés rhéologiques de la farine de fèverole semblent légèrement meilleures que celles du riz seul. Une amélioration globale des paramètres rhéologiques (W, P/L et G) du riz par l'ajout de fèverole au niveau de la formule est notée. Ce comportement à l'alvéographe reste cependant en dessous des recommandations des normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et françaises de panification (GUINET et GODON, 1994).

3. ESSAIS DE PANIFICATION DES MATIERES PREMIERES ET DE LA FORMULE DE L'ETUDE SANS AJOUT DE XANTHANE

Les tests de panification restent le principal outil d'appréciation de l'aptitude d'une farine à sa transformation en pain de bonne qualité (FEILLET, 2000). Un beau pain se caractérise par sa couleur, son volume important, son goût et son comportement à la mastication (NAMOUNE 1989).

Les tests de panification ont donné des pains avec différentes couleurs, alvéolations de mie et volumes spécifiques.

3.1. Caractérisation de la couleur et de la texture des pains

La couleur et la texture du pain sont les premiers aspects qui attirent l'attention du consommateur. Elles ont été appréciées à l'œil nu de l'extérieur et sur des coupes longitudinales.

Le pain témoin de blé tendre obtenu, lors de l'essai de panification, offre une très grande satisfaction (Figure 14a). Il présente une croûte de couleur crème à section convexe, une mie bien développée, de couleur blanche crème, couleur la plus appréciée par le consommateur (CALVEL, 1984) et une structure alvéolaire fine, moins volumineuse et dense avec une distribution homogène.

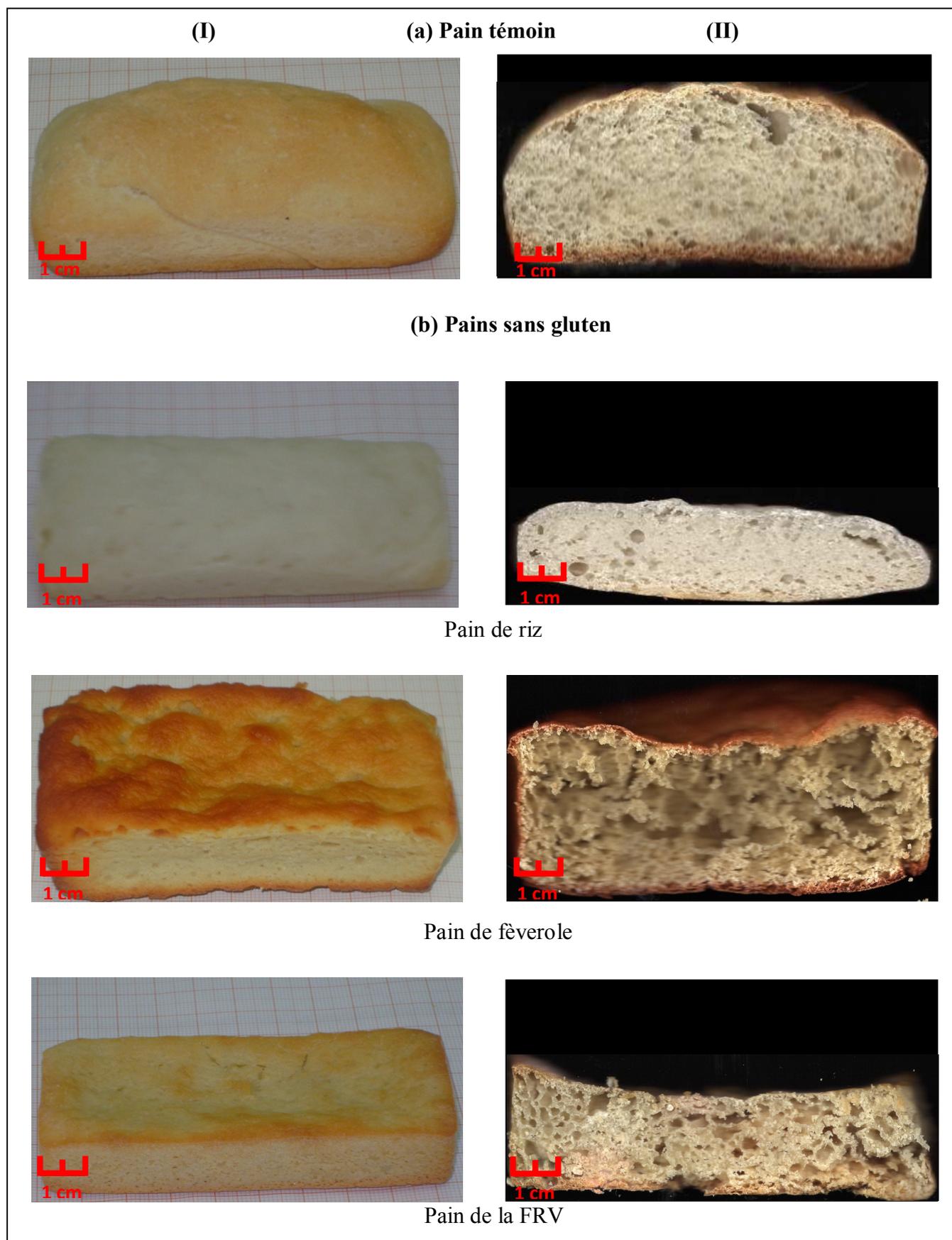


Figure 14. Photos des pains de blé tendre et des ingrédients exempts de gluten

(I) : Pains complets ; (II) : Coupes longitudinales

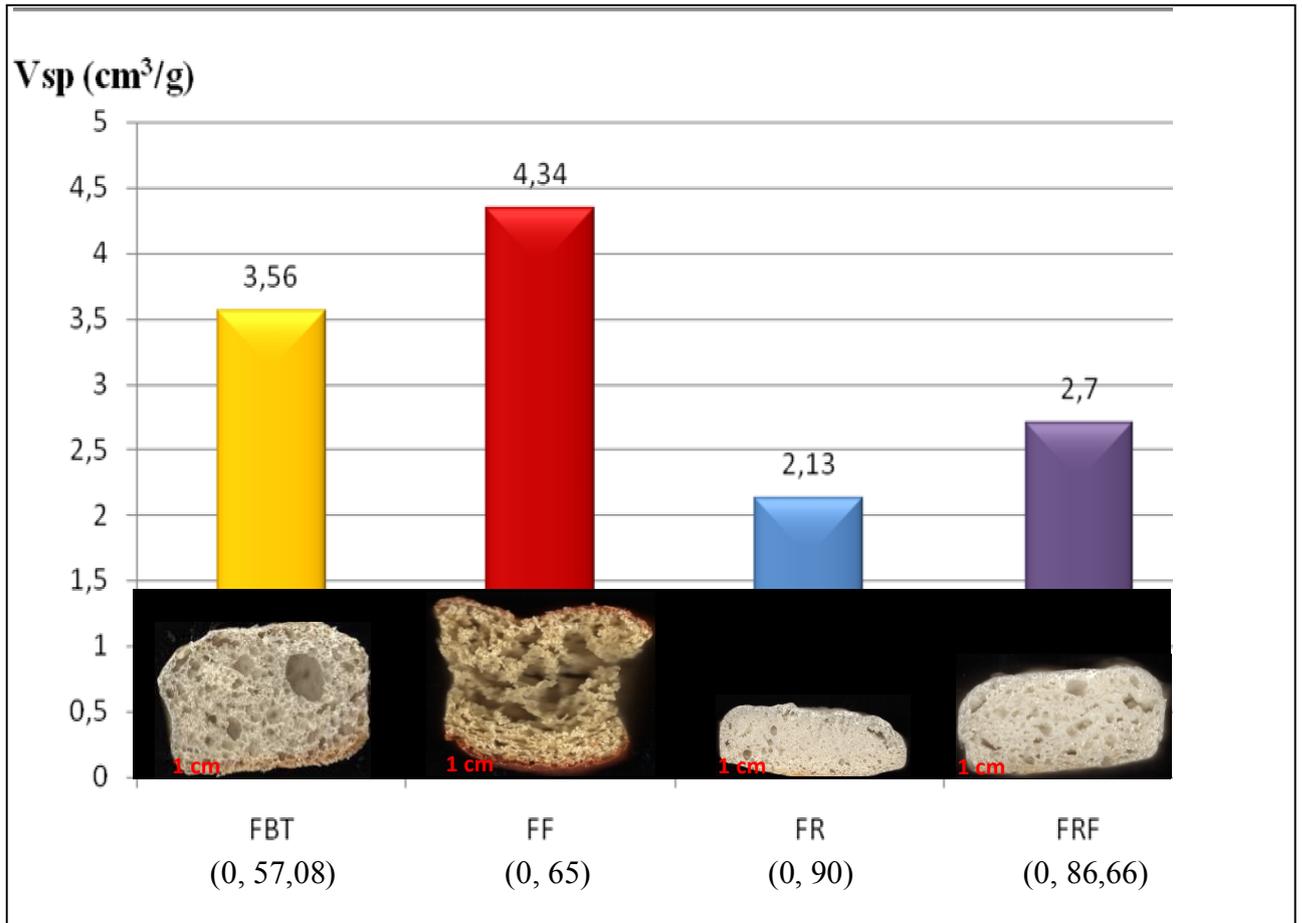
Concernant les pains obtenus à partir des ingrédients sans gluten (Figure 14b), c'est le pain de fèveole qui présente l'aspect extérieur le plus apprécié avec une croûte bien cuite et de belle coloration brillante, tandis que le pain de riz présente une croûte à section plate et de couleur blanchâtre apparaissant insuffisamment cuit, alors que le pain de la FRF présente une couleur intermédiaire. Quant à l'aspect interne des pains, la mie des pains de fèveole présente une couleur crème et une structure hétérogène avec de grosses cellules gazeuses mal dispersées. Celle des pains de riz a une couleur très blanche et une texture serrée avec de petites alvéoles rondes, tandis que la mie des pains de la FRF présente une couleur blanche crème semblable à celle du témoin et des alvéoles plus au moins volumineuses avec une distribution hétérogène.

3.2. Volume spécifique des pains

Le volume du pain est un attribut crucial qui influence son acceptabilité par le consommateur. Il est fortement influencé par la quantité de gaz retenu par la pâte. Plus la capacité de rétention de gaz de la pâte est élevée, plus est important le volume des pains (BALLA *et al*, 1999).

Les indications de la figure 15 montrent que la valeur du volume spécifique du pain de fèveole est clairement plus élevée ($V_{sp} = 4,34 \text{ cm}^3/\text{g}$) comparativement à tous les autres pains. Le pain témoin de blé tendre présente un volume spécifique suffisamment élevé de $3.56 \text{ cm}^3/\text{g}$, suivi de celui de la FRF ($2,7 \text{ cm}^3/\text{g}$) puis du riz ($2,13 \text{ cm}^3/\text{g}$).

Une corrélation positive et significative a été trouvée entre la teneur en protéines des ingrédients sans gluten et les V_{sp} des pains ($r = 0,99$), ce résultat indique que la teneur en protéines totales exerce une influence considérable sur le développement des pains (FEILLET, 2000).



Figures 15. Volumes spécifiques et coupes transversales des pains sans ajout de xanthane.

FBT: Farine de Blé Tendre ; FF : Farine de Fèverole FR : Farine de Riz ;
FRF : Formule Riz-Fèverole.

La forte valeur de V_{sp} notée dans le cas des pains de fèverole pourrait être expliquée par la richesse de leur farine en protéines ; de plus par la présence des lipoxygénases qui faciliteraient la fixation de l'oxygène de l'air lors du pétrissage conduisant à l'oxydation des acides gras libres et à la formation de peroxydes et hydroperoxydes, qui oxydent, à leur tour, les caroténoïdes apportant ainsi une quantité d'énergie mécanique plus grande à la pâte boulangère au moment du pétrissage, ce qui contribuerait à l'augmentation du volume du pain (GUINET et GODON, 1994).

Dans le cas de pain témoin de blé tendre, c'est la quantité et la qualité de gluten qui contribuent à l'augmentation de leur volume spécifique et à l'obtention d'une structure alvéolaire homogène. Au cours de la panification, ses protéines forment un réseau tridimensionnel imperméable, capable de retenir le gaz carbonique au moment de la

fermentation de la pâte et de former une structure alvéolaire fine et régulière après l'expansion des gaz au moment de la cuisson (FOULD-SPRINGER et BELLAMY, 1996).

La faible quantité et qualité des protéines de la farine de riz seraient responsables de la faible rétention gazeuse de ses pâtes conduisant à l'obtention d'un pain de bas volume spécifique et une mie de structure compacte (HE et HOSENEY, 1991).

3.3. Conclusion

D'après les résultats de l'essai de panification, on peut conclure que le pain obtenu à partir de la farine témoin de blé tendre offre une très grande satisfaction, il présente un Vsp suffisamment élevé, une mie bien développée et une structure alvéolaire fine et régulière.

En raison de sa composition biochimique particulière, la farine de féverole donne un pain avec un Vsp plus élevé que celui du témoin, une mie plus expansée et une structure alvéolaire hétérogène. Alors que le pain de riz présente le Vsp le plus faible et une mie de structure compacte, exprimeraient la perméabilité élevée de ses pâtes vis à vis du CO₂ dégagé au cours de la fermentation. L'addition de la farine de fêverole au niveau de la formule favorise le développement du pain et la coloration de la croûte.

4. EXPLOITATION DU PLAN D'EXPERIENCE

4.1. Surfaces de réponse des propriétés alvéographiques des pâtes de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*)

Les réponses de la FRF aux tests alvéographiques sont exprimées par les surfaces de réponse de l'indice de gonflement « G », du rapport de configuration « P/L » et du travail de déformation « W », en fonction des taux de xanthane et d'hydratation.

4.1.1. Surface de réponse de l'indice de gonflement « G »

L'évolution de l'indice de gonflement « G » en fonction des taux de xanthane et d'hydratation impliqués est présentée dans la figure 16.

La surface de réponse expérimentale de l'indice de gonflement « G » indique que quelque soient les niveaux de xanthane et d'hydratation utilisés pour la FRF, l'indice de gonflement [0 à 8,73] est nettement inférieur à celui du témoin de blé tendre ($G=20 \text{ cm}^3$).

La réponse de l'indice de gonflement permet de distinguer deux zones. La zone I incluant l'intervalle [0 - 0,75%] de xanthane, pour laquelle G augmente avec l'augmentation du taux de xanthane et la diminution du taux d'hydratation et la zone II où un déclin se manifeste en allant vers des valeurs plus élevées de xanthane (>0,75%). Ce résultat indique qu'il existe un seuil de teneur en xanthane, au dessus duquel le gonflement de la pâte devient difficile.

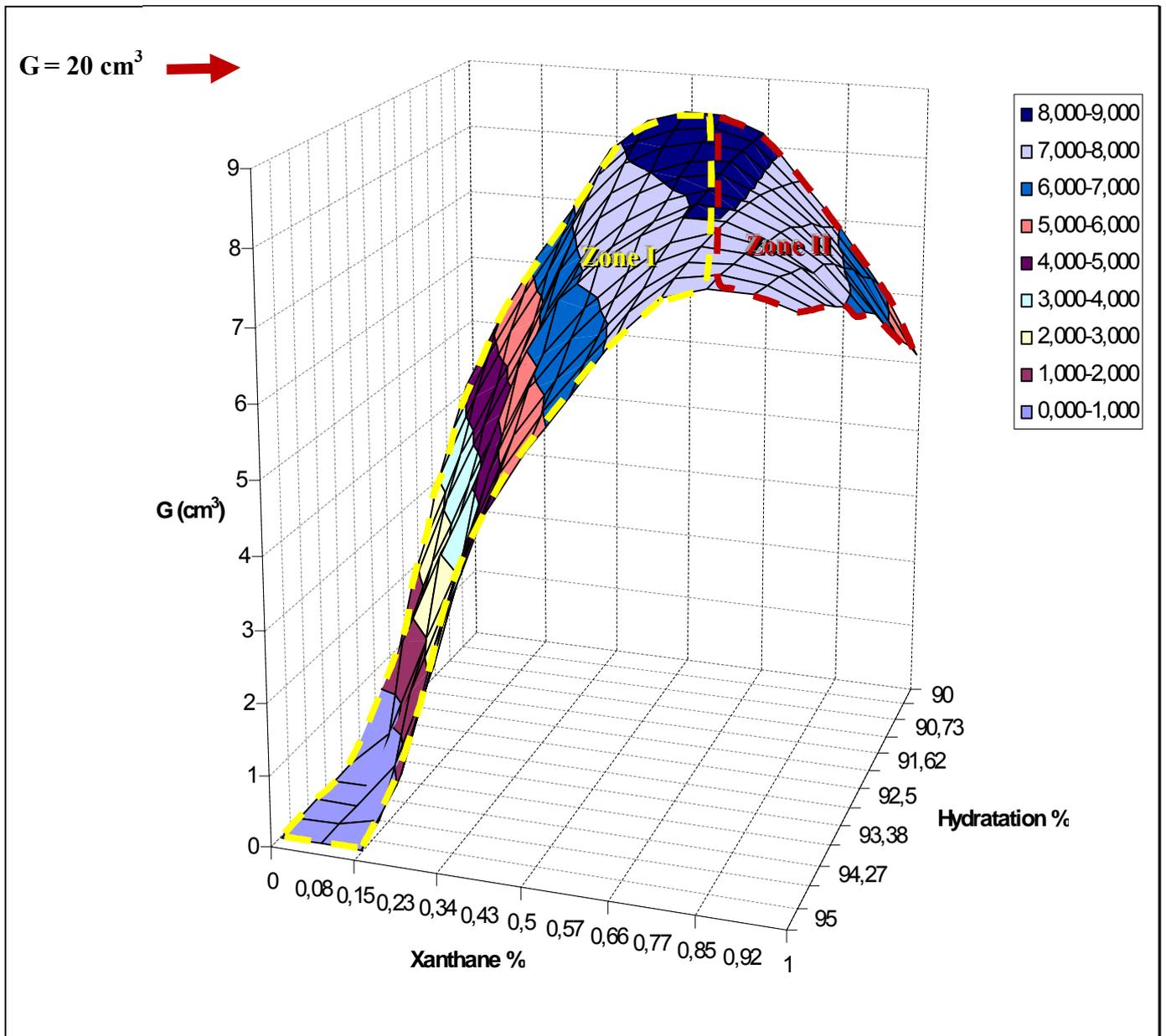


Figure 16. Surface de réponse de l'indice de gonflement « G » des pâtes de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*).

$G=20 \text{ cm}^3$: Niveau du témoin

Suivant les indications de la courbe de niveau de « G » (Figure 17), les plus faibles niveaux de gonflement [0 à 2 cm³] sont trouvés dans la zone des faibles taux de xanthane [0-0,26%] et des fortes taux d'hydratation [91 – 95%], tandis que les meilleurs gonflements de la pâte [8 à 10 cm³] sont trouvés dans la zone enfermant le couple d'intervalles [0,37 - 0,75%] de xanthane et [90 – 92,94%] d'eau.

L'addition de la gomme de xanthane au niveau de la FRF montre une élévation de plus de 5 fois de l'indice de gonflement par rapport à FRF sans amélioré. Cette amélioration reste cependant en dessous des valeurs du témoin de blé tendre ($G=20$ cm³) et des normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et françaises de panification (GUINET et GODON, 1994) (20 à 24 cm³).

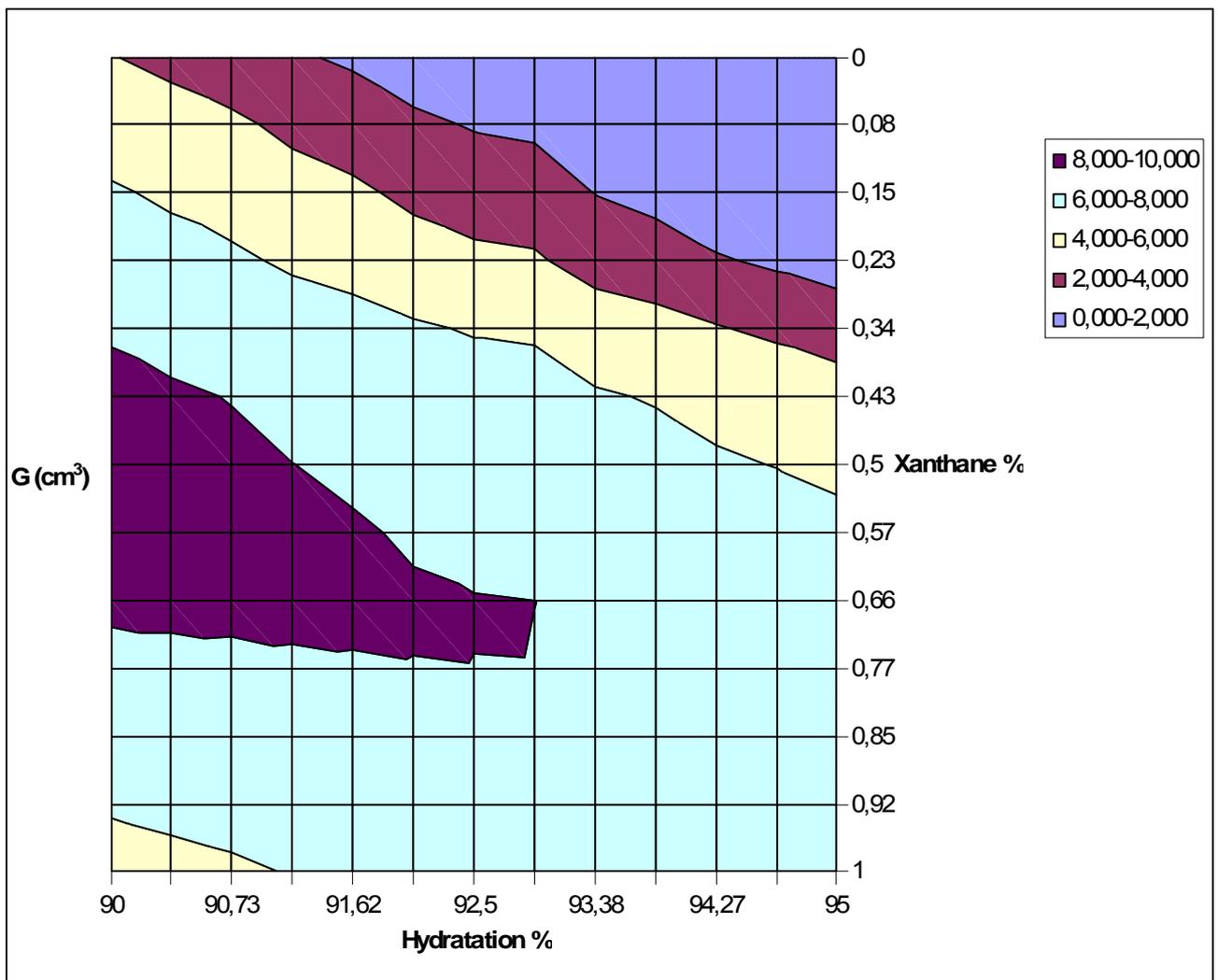


Figure 17. Courbe de niveau de l'indice de gonflement « G » des pâtes de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*).

4.1.2. Surface de réponse du rapport de configuration « P/L »

Le rapport de configuration « P/L » est exprimé par une surface de réponse (Figure 18) dont les niveaux [0 - 4,5] encadrent le témoin qui présente un rapport de configuration (P/L= 0,8). Quelque soit le taux d'hydratation, ce paramètre semble augmenter avec l'augmentation du taux de xanthane. Le rapprochement du témoin, cependant, ne semble assuré, que lorsque le taux de xanthane est suffisamment faible inférieur à 0,57%.

Des résultats similaires ont été rapportés par SHUEY *et al.*, (2009) qui ont observé une augmentation du rapport de configuration « P/L » d'une pâte à base de manioc-blé avec l'augmentation du niveau de xanthane.

Il semble que l'addition du xanthane à des concentrations élevées (>0,57%) provoque un déséquilibre entre la ténacité et l'extensibilité de la pâte ce qui conduit à l'obtention de valeurs élevées de P/L.

L'intersection de la surface de réponse de P/L avec le niveau du même paramètre caractérisant le témoin et les normes algérienne et française de panification permet de délimiter une zone optimale (Figure 18) à l'intérieur du quelle nous pouvons déduire tous les couples *Xanthane-Hydratation* garantissant un rapport de configuration convenable, identique à celui donné par la farine de blé tendre (P/L= 0,8).

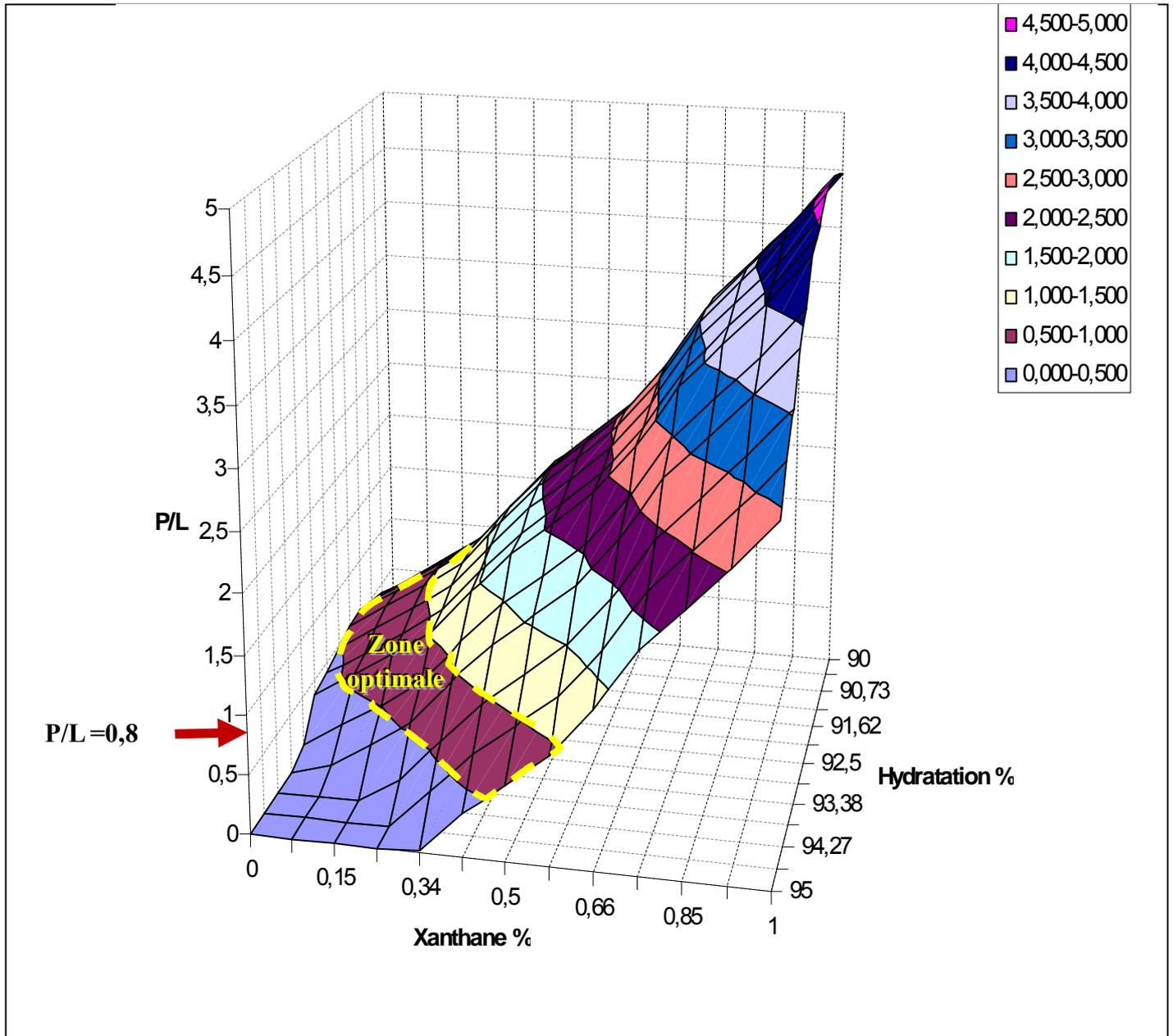


Figure 18. Surface de réponse du rapport de configuration « P/L » des pâtes de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*).

P/L = 0,8: Niveau du témoin.

La courbe de niveau du rapport de configuration « P/L » (Figure 19) permet de distinguer trois zones. La zone I incluant le couple d'intervalles [0 - 0,44%] de xanthane et [93,20-95%] d'hydratation, où le xanthane n'a pas d'effet améliorant sur le rapport de configuration (P/L inférieur à 0,4). La zone II ou la zone optimale dans laquelle les niveaux de P/L de [0,40 à 0,8] se situent à l'intérieur de la gamme des valeurs des normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et françaises de panification (GUINET et GODON, 1994). La zone III d'intervalle [0,57 à 1 %] de xanthane où les niveaux de P/L sont trop élevés, supérieurs à celui du témoin de blé tendre.

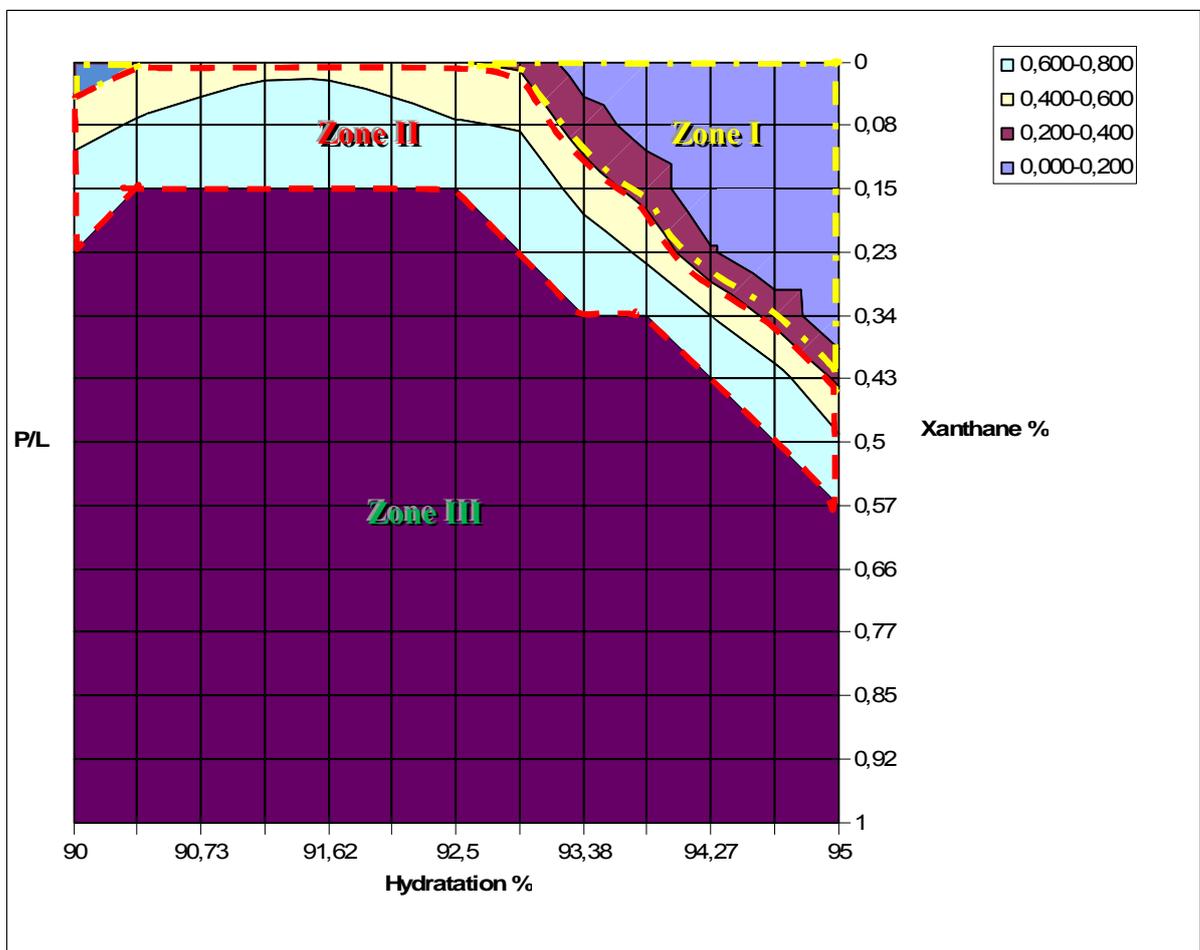


Figure 19. Courbe de niveau du rapport de configuration (P/L) des pâtes de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*).

4.1.3. Surface de réponse du travail de déformation « W »

La surface de réponse montrant l'évolution du travail de déformation « W » (Figure 20), indique que quelque soient les taux de xanthane et d'hydratation utilisés pour la FRF, le travail de déformation dont les niveaux [0 - 30 10^{-4} J] est nettement faible, loin des valeurs du témoin de blé tendre ($W=130,8\pm 1,76 \cdot 10^{-4}$ J) et des normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et françaises de panification (GUINET et GODON, 1994).

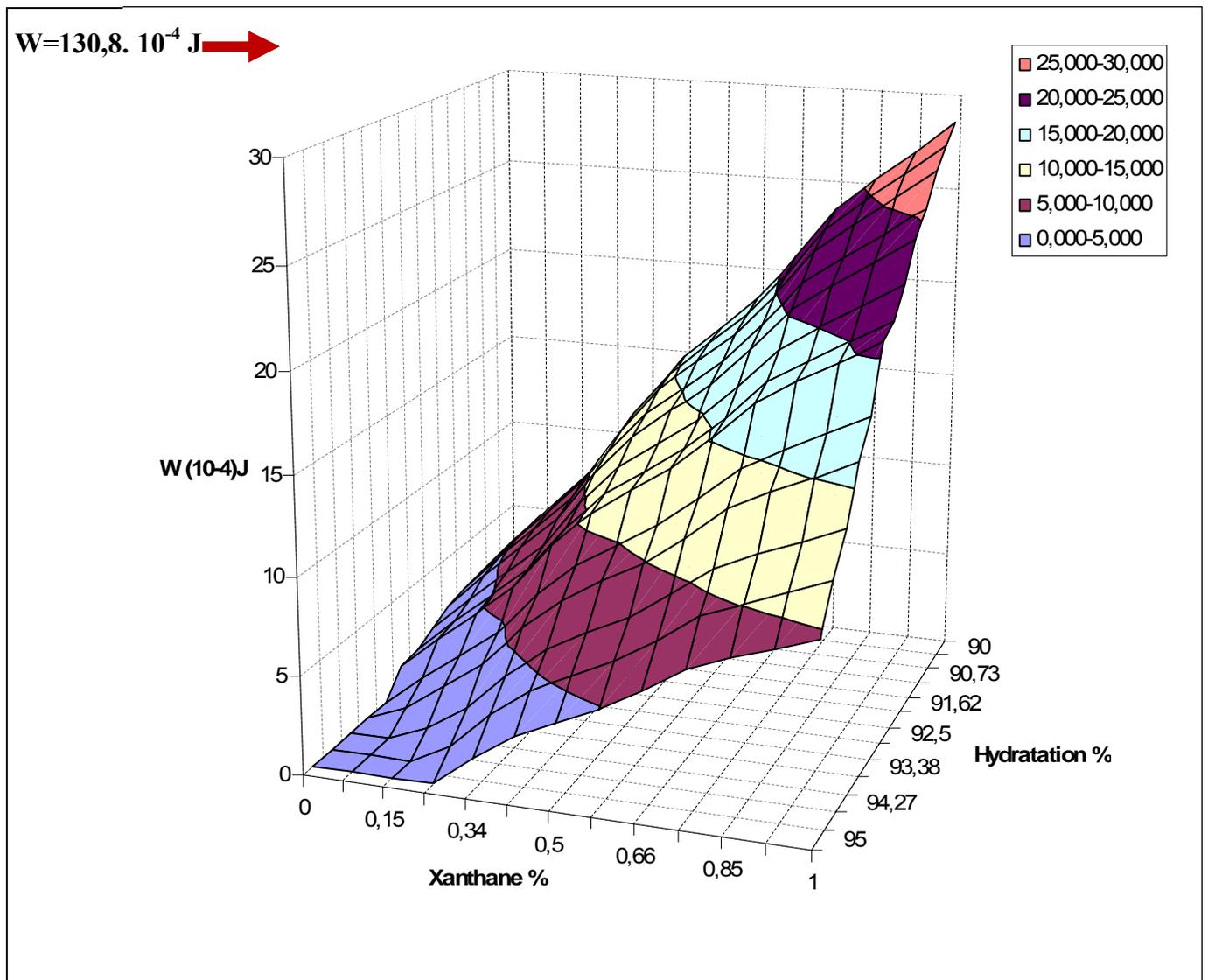


Figure 20. Surface de réponse du travail de déformation « W » des pâtes de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*).

$W=130,8 \cdot 10^{-4}$ J: Niveau du témoin.

La courbe de niveau du travail de déformation « W » (Figure 21), montre une augmentation du W avec l'augmentation du taux de xanthane et la diminution du taux d'hydratation. Les meilleures forces boulangères de la pâte [$22,6$ à $32,6 \cdot 10^{-4}$ J] sont trouvées dans la zone d'intervalles [0,73 - 1%] de xanthane et [90 – 92%] eau.

L'augmentation du taux d'incorporation de xanthane de 0 à 1% entraîne une élévation du travail de déformation « W » de $2,6$ à $32,6 \cdot 10^{-4}$ J, soit 12,5 fois que celui de la FRF sans améliorant.

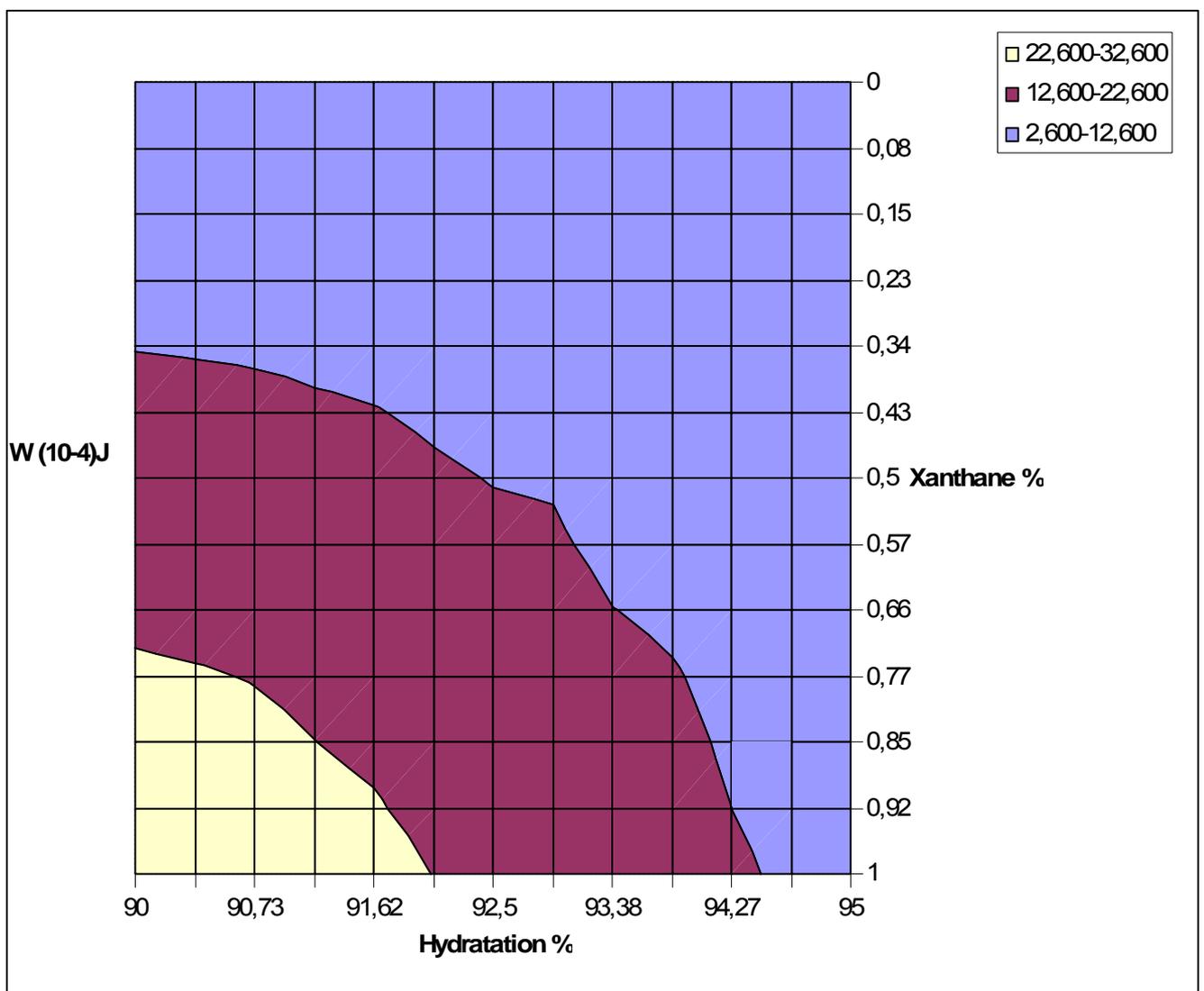


Figure 21. Courbe de niveau du travail de déformation « W » des pâtes de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*).

4.2. Surface de réponse du volume spécifique des pains de la FRF en fonction des taux (Xanthane-Hydratation).

Le suivi de l'évolution des volumes spécifiques des pains (V_{sp}) de la FRF en fonction des taux de xanthane et d'hydratation est reporté dans la figure 22.

Suivant les indications de la figure 22, le V_{sp} des pains semble évoluer selon une allure en forme de cloche montrant un optimum ($V_{sp} = 3,00 \text{ cm}^3/\text{g}$) vers les plus faibles taux de xanthane ($\leq 0,20 \%$). A partir de cette limite, un déclin se manifeste en allant vers les valeurs élevées de xanthane. De plus, pour un même taux de xanthane, l'augmentation du niveau d'hydratation se traduit par un accroissement du V_{sp} des pains, tel que montré pour les couples *Xanthane-Hydratation* (0,5 , 90) et (0,5 , 92,5) avec des V_{sp} respectifs de $2,7 \pm 0,11$ et $2,85 \pm 0,01 \text{ cm}^3/\text{g}$. Des résultats similaires ont été rapportés par McCARTY *et al.*, (2005) ; LAZARIDOU *et al.*, (2007) et PERESSINI and SENSIDONI, (2010).

Il semble que l'addition du xanthane à des concentrations élevées, produit une pâte très résistante et de consistance élevée, ce qui limite l'expansion de bulle de gaz pendant la fermentation (LAZARIDOU *et al.*, 2007). Probablement, l'addition d'une quantité élevée d'eau d'hydratation et une quantité limitée de xanthane favoriserait la diminution de la viscosité et de l'élasticité de pâte qui, à un certain niveau, permet d'engendrer une large augmentation du volume spécifique des pains (McCARTHY *et al.*, 2005 et SCHOBBER *et al.*, 2005).

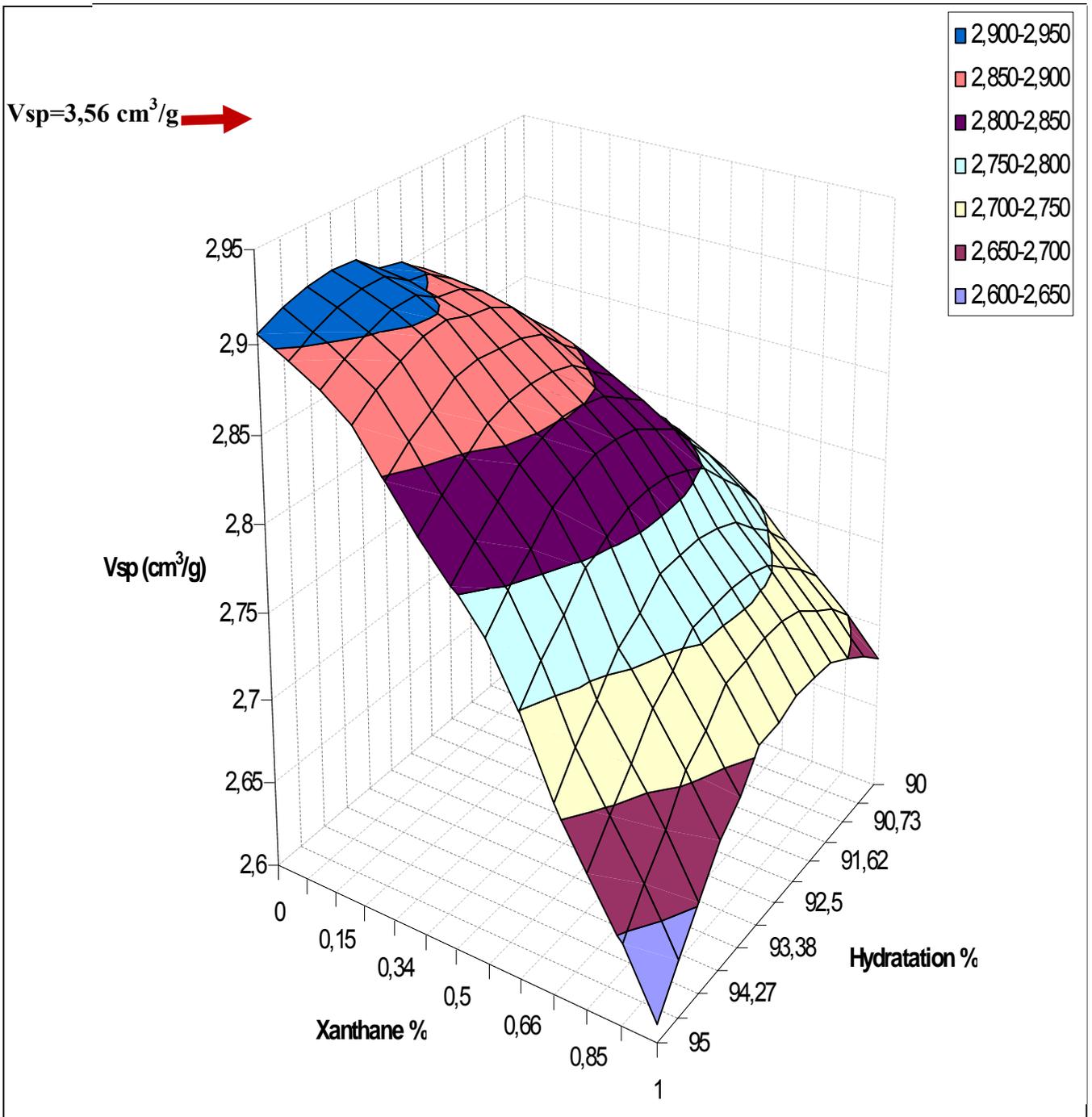


Figure 22. Surface de réponse du volume spécifique (V_{sp}) des pains de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*).

$V_{sp} = 3,56 \text{ cm}^3/\text{g}$: Niveau du témoin.

La courbe de niveau des V_{sp} (Figure 23) montre que les échantillons de pain sans gluten qui ont donné des V_{sp} les plus proches de celui du témoin de blé tendre ($3,56 \pm 0,22 \text{ cm}^3/\text{g}$) se situent dans la zone optimale incluant les plus faibles taux de xanthane [0 - 0,20 %] et les plus fortes taux d'hydratation [92,43-95%]. Cette zone encadre même les échantillons de pain à 0% de xanthane mais qui sont suffisamment hydratés. Cependant, les plus faibles V_{sp} sont notés dans la zone enfermant les taux de xanthane les plus élevés (>0,20 %) quelque soit les taux d'hydratation impliqués.

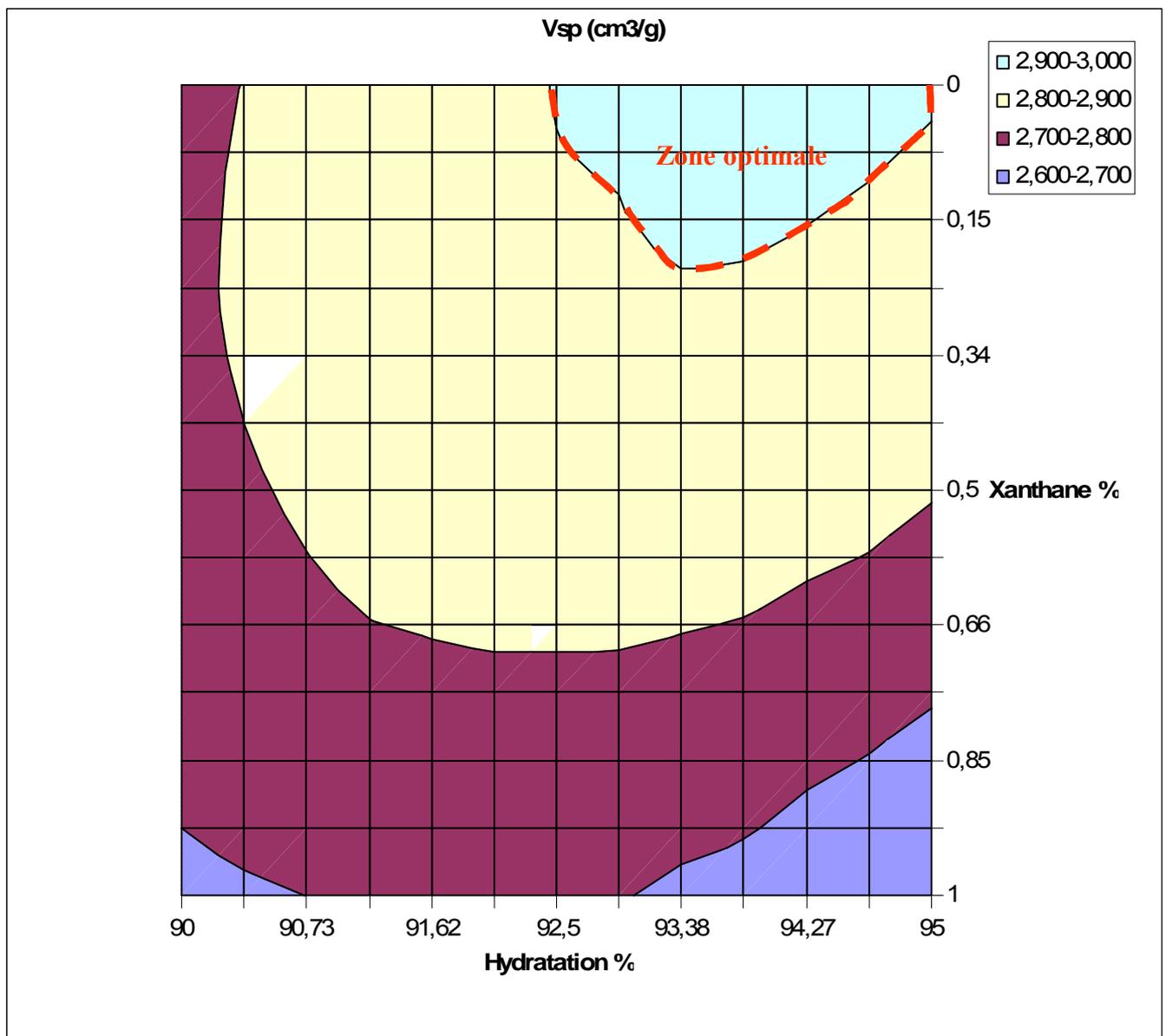


Figure 23. Courbe de niveau de réponse du volume spécifique des pains de la FRF en fonction des taux (*Xanthane-Hydratation*).

4.3. Conclusion

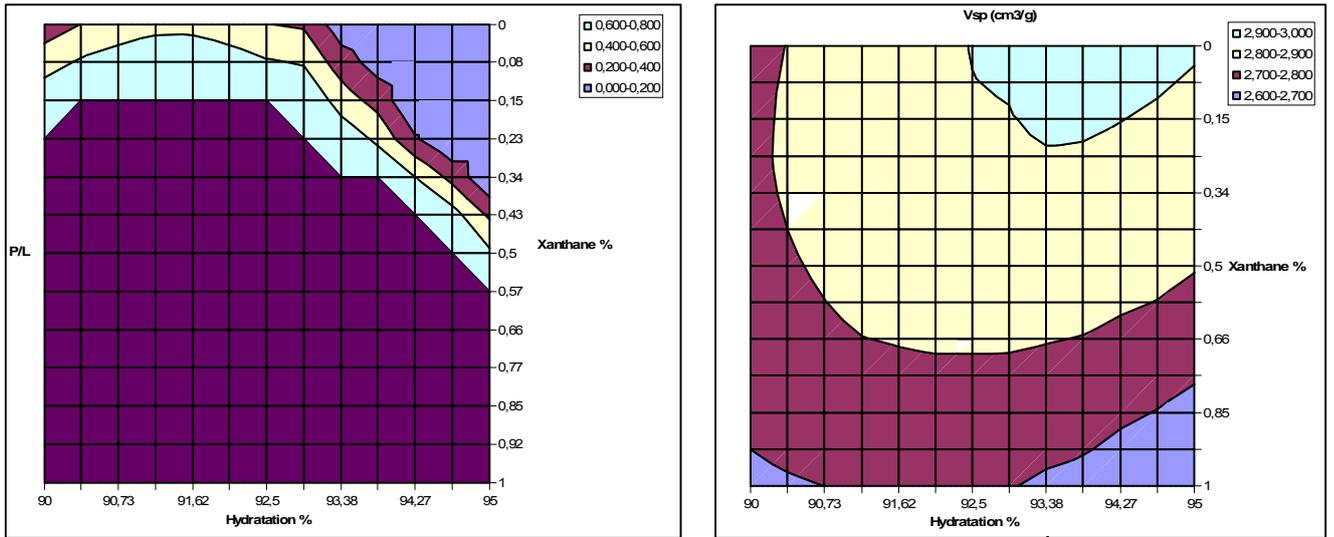
Les résultats des tests alvéographiques et de panification des couples (*Xanthane-Hydratation*) de la FRF, montrent une amélioration globale des propriétés boulangères par rapport à la FRF sans améliorant. Cependant, quel que soient les niveaux de xanthane et d'hydratation utilisés dans cette étude, aucun rapprochement n'est trouvé entre les surfaces de réponse de l'indice de gonflement « G » [$0 - 8,73 \text{ cm}^3$] et de travail de déformation « W » [$0 - 30 \cdot 10^{-4} \text{ J}$] de notre formule avec les niveaux du témoin ($G=20 \text{ cm}^3$, $W=130,8 \pm 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ J}$). Le seul rapprochement au témoin semble, toutefois, assuré par les surfaces de réponse de P/L et du Vsp, permettant de déduire tous les couples (*Xanthane-Hydratation*) garantissant des propriétés boulangères proche à celles données par la farine de blé tendre.

Les réponses de la FRF aux tests alvéographiques et de panification nous a permis de sélectionner des zones d'intervalles de xanthane et d'hydratation assurant les meilleures propriétés boulangères. Ainsi, les meilleurs gonflements de la pâte [$8 \text{ à } 10 \text{ cm}^3$] sont trouvés dans la zone enfermant le couple d'intervalles [$0,37 - 0,75\%$] de xanthane et [$90 - 92,94\%$] eau. Alors que, les meilleurs rapports de configuration sont notés dans la zone d'intervalle [$0 - 0,57\%$] de xanthane où les niveaux de P/L de [$0,4 \text{ à } 0,8$] se situent à l'intérieur de la gamme des valeurs des normes algériennes et françaises de panification. Cependant, les meilleures forces boulangères des pâtes [$22,6 \text{ à } 32,6 \cdot 10^{-4} \text{ J}$] sont trouvées dans la zone d'intervalles [$0,73 - 1\%$] de xanthane et [$90 - 92\%$] d'hydratation. Tandis que, les Vsp les plus proches de celui du témoin de blé tendre ($3,56 \pm 0,22 \text{ cm}^3/\text{g}$) sont notés dans la zone optimale incluant les couples d'intervalles [$0 - 0,20 \%$] de xanthane et [$92,43-95\%$] d'hydratation.

5. Optimisation de pains sans gluten

La Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR) a largement été utilisée pour l'optimisation des pains sans gluten (COLLAR *et al.*, 1999 ; SANCHEZ *et al.*, 2002 ; KOBYLAŃSKI *et al.*, 2004; McCARTHY *et al.*, 2005). Par ailleurs, YLIMAKI *et al.*, (1988) ; METTLER and SEIBEL, (1993) ont utilisé la MSR avec superposition des surfaces de réponses afin d'optimiser la combinaison de gommes et d'eau qui a remplacé avec succès le gluten dans la fabrication des pains sans gluten.

Dans ce travail nous considérons le domaine de composition *Xanthane-Eau* permettant l'obtention des propriétés rhéologiques les plus proches de celles de pâtes de blé tendre comme "optimum". Le domaine optimum *Xanthane-Eau* des pains sans gluten de la FRF est obtenu par la superposition des courbes de niveau des réponses du rapport de configuration (P/L) (Figure 24a) et du volume spécifique (Vsp) (Figure 24b) obtenues après coupure de chaque surface de réponse à son niveau du témoin correspondant. Les surfaces de réponse de l'indice de gonflement « G » et du travail de déformation « W » ont été exclues car elles étaient bas situées par rapport à celles des valeurs du témoin de blé tendre correspondantes.



(a)

(b)

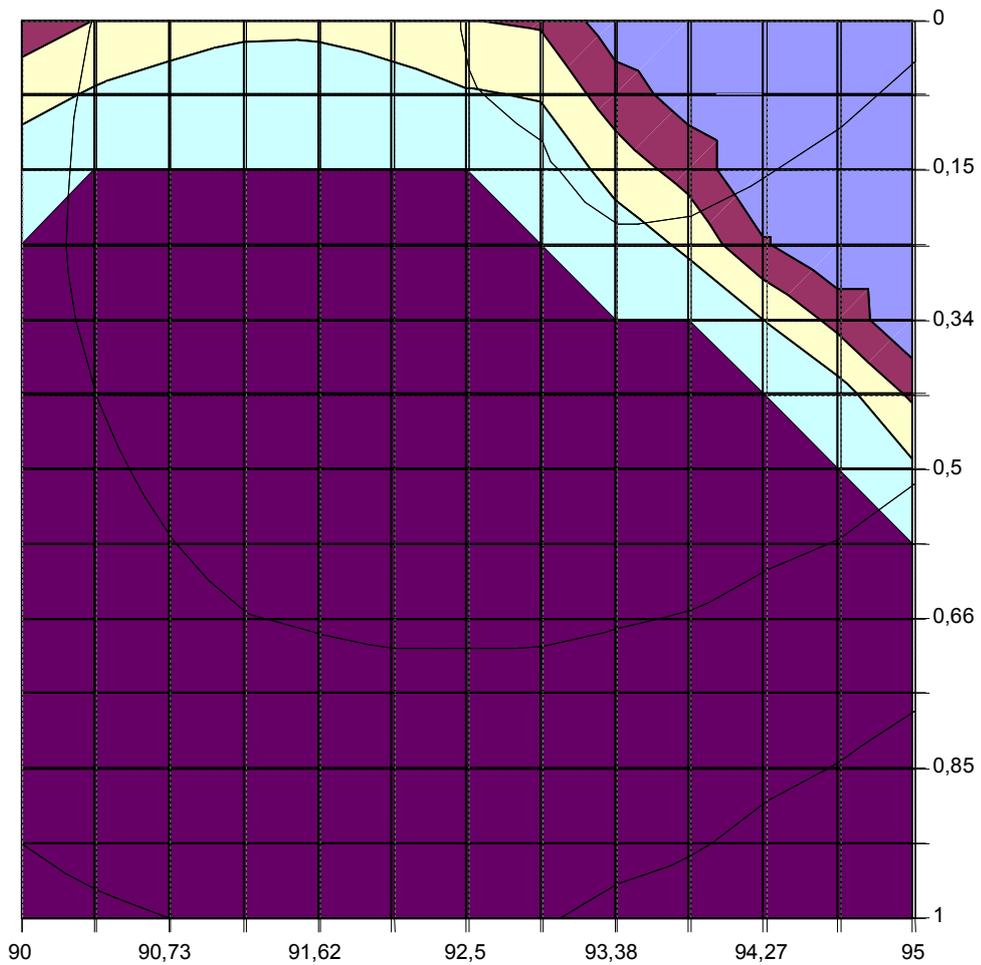
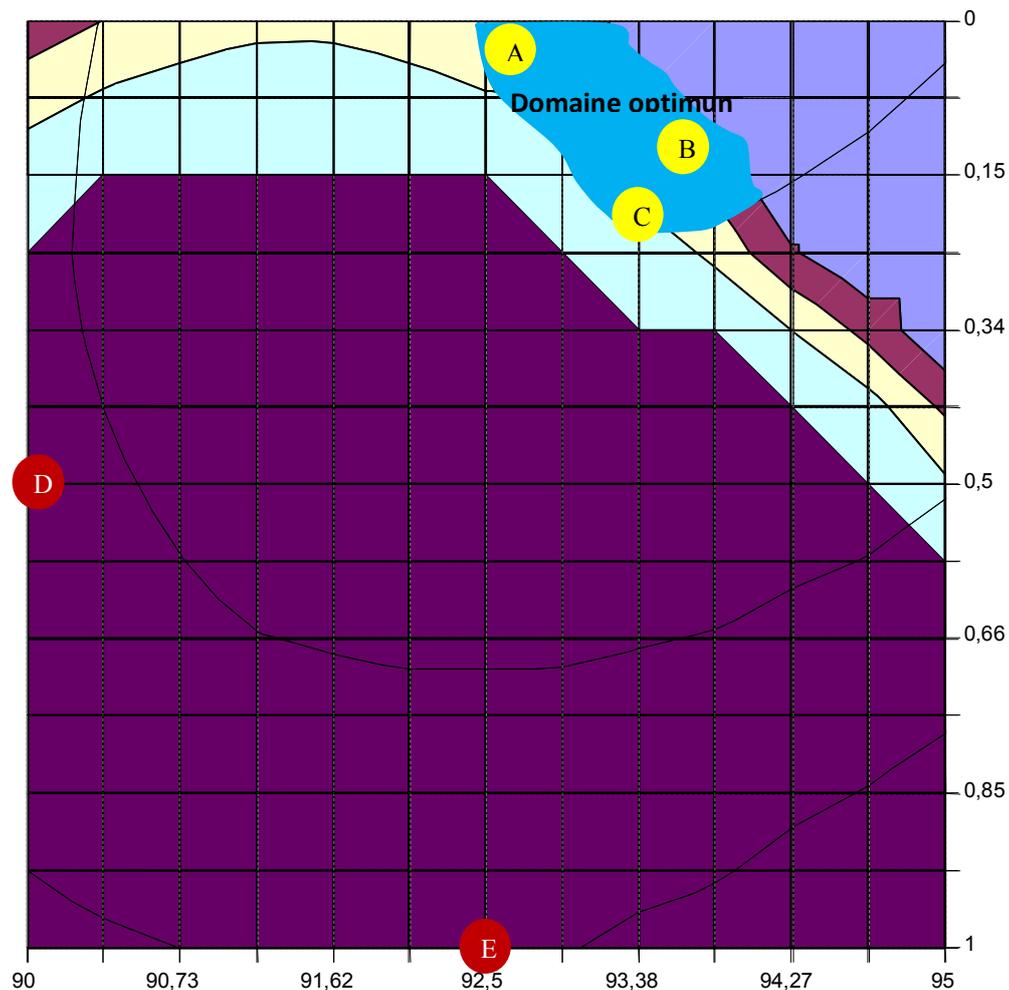


Figure 24. Superposition des courbes de niveau des réponses du rapport de configuration (P/L) et du volume spécifique (Vsp).

La superposition des courbes de niveau des réponses du rapport de configuration (P/L) et du volume spécifique (Vsp) a permis de délimiter un domaine optimum des niveaux *Xanthane-Eau* ($[0 - 0,20]$ Xanthane et $[92,4-94,12]$ Eau) (Figure 25). Tous les points à l'intérieur de ce domaine sont supposés assurer des caractéristiques rhéologiques et des volumes spécifiques identiques ou proches à ceux du témoin.



Légende :

- Couples *Xanthane-Eau* à l'intérieur du domaine optimum : A (0,04 , 92,57), B (0,12 , 93,73), C (0,19 , 93,38).
- Couples de vérification hors domaine optimum : D (0,5 , 90), E(1 , 92,5).

B

5.1. Validation des résultats de l'optimisation

En vue de valider l'ensemble des résultats d'optimisation obtenus par MSR, nous avons sélectionné dans un premier temps des couples *Xanthane-Hydratation* à l'intérieur et en dehors du domaine optimum (Tableau 14) puis nous avons vérifié leurs volumes spécifiques et leur structure alvéolaire par le test de panification. Ces points sont représentés dans la figure 25.

Tableau 14. Couples *Xanthane-Hydratation* de vérification après optimisation par MSR des pains sans gluten de la FRF

	Couples <i>Xanthane –Hydratation</i>
<i>Dans le domaine optimum</i>	A (0,04 , 92,57) B (0,12 , 93,73) C (0,19 , 93,38)
<i>Hors du domaine optimum</i>	D (0,50 , 90,00) E (1,00 , 92,50)

5.1.1. Tests de panification des points de vérification

Les tests de panification restent le principal outil de vérification de la qualité finale du pain en général et des résultats d'optimisation d'ajout de xanthane à la FRF approchée par MSR dans le cadre de cette étude. Ces tests vont permettre notamment de vérifier les V_{sp} des PSG mais également la texture de leurs mies par l'examen de près de leur grain.

5.1.1.1. Caractérisation de la couleur et de la texture des points de vérification

Les tests de panification des couples *Xanthane-Eau* (Figure 26) à l'intérieur et en dehors du domaine optimum ont donné des pains de couleur semblable à celle du témoin avec des grains de mie variables.

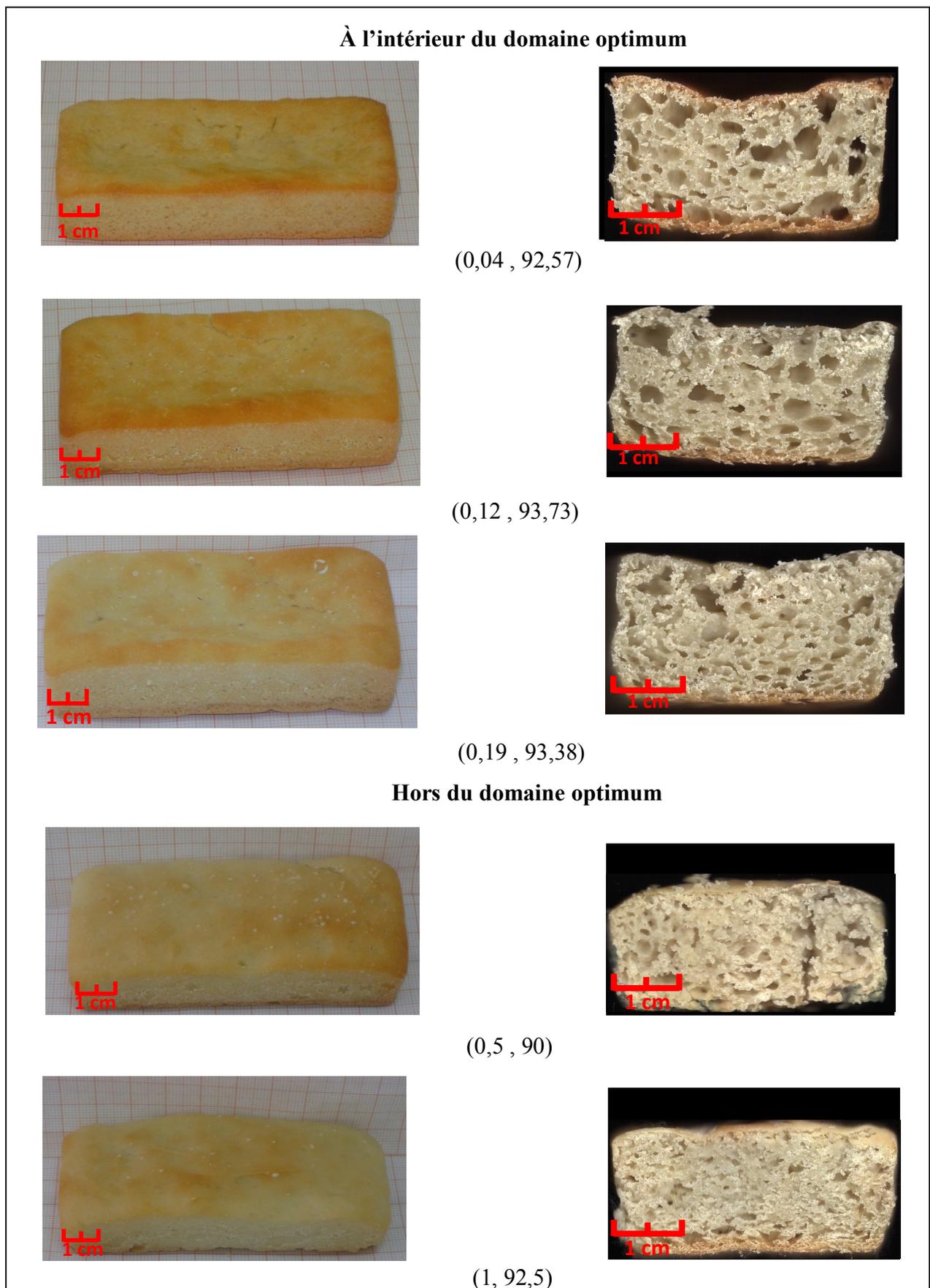


Figure 26. Photos des pains des couples *Xanthane –Hydratation* à l'intérieur et en dehors du domaine optimum.

Les pains à l'intérieur du domaine optimum présentant une mie bien développée, et une structure alvéolaire hétérogène avec de grosses cellules gazeuses mal dispersées, tandis que, les pains hors domaine optimum correspondant à des taux trop élevés de xanthane présentant une mie moins développée, et une structure alvéolaire fine, moins volumineuse et dense avec une distribution plus homogène, l'alvéolation de mie reste, par ailleurs, légèrement plus grossière que celle du pain témoin.

L'augmentation de la concentration de xanthane provoquerait un déséquilibre au niveau des propriétés viscoélastiques des pâtes rendant difficiles l'incorporation d'air ainsi que l'expansion gazeuse au cours de la fermentation et la cuisson, d'où, peu ou pas de rupture des parois entre les bulles gazeuses et donc l'obtention de petits alvéoles de forme similaire.

5.1.1.2. Volumes spécifiques des pains des points de vérification

De façon globale, tous les pains correspondant aux couples *Xanthane-Hydratation* (Hors ou dans le domaine optimum) (Figure 27), présentent des V_{sp} plus faibles que celui du témoin de blé tendre ($V_{sp} = 3,56 \text{ cm}^3/\text{g}$).

Pour les points hors domaine optimum, correspondant à des niveaux trop élevés de xanthane, les V_{sp} relevés sont relativement faibles, plus basse que celui du pain de FRF sans améliorant ($V_{sp} = 2,7 \pm 0,20 \text{ cm}^3/\text{g}$), allant de $2,64 \pm 0,31 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour le couple (0,5 , 90) et de $2,54 \pm 0,06 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour le couple (1 , 92,5), témoignant de la forte résistance de leurs pâtes à l'expansion gazeuse au cours de la cuisson.

Pour les points à l'intérieur du domaine optimum, l'augmentation du niveau de xanthane se traduit par un accroissement des V_{sp} des pains tel que montré pour les couples *Xanthne-Hydratation* (0,12 , 93,73) et (0,19 , 93,38) avec des V_{sp} respectifs de $2,97 \pm 0,03$ et $3,06 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$.

Ces résultats sont en phase avec les observations effectuées par BENATALLAH, (2009) qui a trouvé que les V_{sp} des PGS de la FRF améliorée par HPMC dans les domaines optima sont significativement proportionnels aux taux d'incorporation d'HPMC.

A l'intérieur du domaine optimum qui nous avons délimité, l'échantillon de PSG qui a donné le VSP le plus proche du témoin de blé tendre ($3,56 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$) correspond au couple *Xanthane-Hydratation* (0,19 , 93,38) avec $3,06 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$ suivi de (0,12 , 93,73) avec $2,97 \pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Figure 27). Les Vsp obtenues dans cette étude sont relativement élevés comparativement à ceux rapportés par BENATALLAH, (2009) pour des PSG de la FRF améliorés par L'HPMC où le Vsp maximal ($V_{sp} = 2,89 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$) a été assuré par le couple *HPMC-Hydratation* (2,78 , 93,18), de ce fait on peut conclure que même à faible concentration, le xanthane a un effet plus prononcé sur les Vsp des pains.

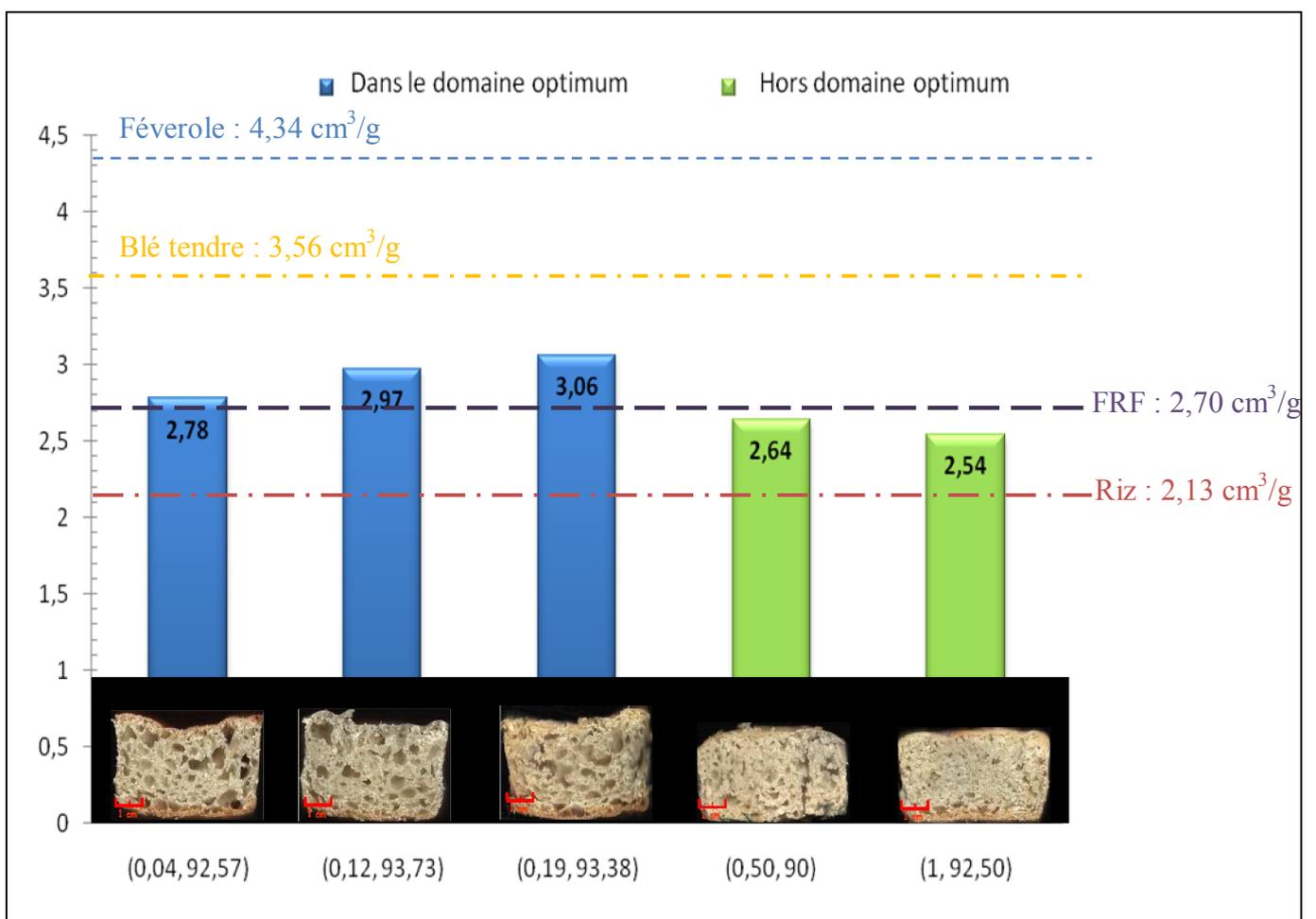


Figure 27. Représentation des Volumes spécifiques (Vsp) des pains des couples *Xanthane -Hydratation* à l'intérieur et en dehors du domaine optimum.

5.1.2. Conclusion

Les tests de panification ont donné des pains avec différentes alvéolations de mie et différents V_{sp} . Aux faibles taux de xanthane, de grosses cellules gazeuses avec une distribution hétérogène est notée contre une distribution plus homogène avec plus de petites cellules gazeuses vers les taux élevés de xanthane allant vers des textures plus fines.

Les V_{sp} des pains sans gluten de la FRF dans le domaine optimum sont significativement proportionnels aux taux de xanthane ($r = 0,97$) tout en restant, inférieurs à celui du témoin ($p < 0,05$). L'échantillon de PSG qui a donné le V_{sp} le plus proche du témoin de blé tendre ($3,56 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$) correspond au couple *Xanthane-Hydratation* (0,19 , 93,38) avec $3,06 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$ suivi du couple (0,12 , 93,73) avec $2,97 \pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{g}$.

Conclusion générale et perspectives

Le premier objectif de ce travail était d'étudier l'effet de l'addition de la farine de fèveole sur les propriétés physico-chimiques, rhéologiques et technologiques de la farine de riz de base. L'incorporation de la farine de fèveole dans la formulation de PSG a montré une amélioration de la valeur nutritionnelle, en particulier, en termes de protéines et de minéraux, de même une amélioration globale des propriétés rhéologiques (W, P/L et G) et des paramètres de qualité du pain (Vsp et la coloration de la croûte) ont été notés en rapport avec l'ajout de la fèveole au niveau de la formule, tout en restant inférieures aux valeurs du témoin de blé tendre.

Le deuxième objectif était de tester l'aptitude à la panification des couples de *Xanthane-Hydratation* de la FRF à travers l'utilisation de la méthodologie des surfaces de réponse (MSR). Ces tests nous ont permis de constater que l'addition de la gomme de xanthane au niveau de la FRF a montré une amélioration des propriétés rhéologiques par rapport à la FRF sans améliorant. Cependant, quels soient les niveaux de xanthane et d'hydratation utilisés dans cette étude, il y a un éloignement important de G [$0 - 8,73 \text{ cm}^3$] et de W [$0 - 30 \cdot 10^{-4} \text{ J}$] par rapport au témoin ($G=20 \text{ cm}^3$, $W=130,8 \pm 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ J}$). Le seul rapprochement au témoin semble, toutefois, assuré par le P/L qui varie entre 0 à 4,5. De plus, les meilleurs Vsp des PSG de la FRF ont été obtenus dans la zone incluant les faibles niveaux de xanthane [0- 0,20%] et les forts taux d'hydratation [92,43-95%].

Le troisième objectif était la détermination du domaine de composition *Xanthane-Eau* optimum donnant les résultats les plus proches à un témoin de blé tendre. Cette approche s'est faite par superposition des courbes de niveau des réponses du rapport de configuration (P/L) et du volume spécifique. Les Vsp des points de vérification issus du domaine optimum sont significativement proportionnels aux taux de xanthane ($r = 0,97$) tout en restant, inférieurs à celui du témoin. L'échantillon du PSG qui a donné le Vsp le plus proche du témoin de blé tendre ($3,56 \pm 0,22 \text{ cm}^3/\text{g}$) correspond au couple *Xanthane-Hydratation* (0,19, 93,38) avec $3,06 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$. Son grain de mie reste, par ailleurs, plus grossier que celui du témoin de blé tendre.

En terme de perspectives, ce travail mériterait d'être complété par :

- L'étude de la formule riz-légumes secs à différents taux d'incorporation en vue d'améliorer sa faisabilité technologique en panification;
- La reprise des analyses alvéographiques des farines après une détermination préalable des caractéristiques farinographiques ;
- La réalisation d'essais de panification sur d'autres formules riz-légumes secs et les comparer à celles de la FRF et du témoin de blé tendre en gardant la supplémentation 2/1 céréales/légumes secs ;
- Le contact d'industriel en vue de l'industrialisation des produits sans gluten fabriqués et participer ainsi réellement à la diversification de l'alimentation des malades cœliaques algériens.



Références bibliographiques



Références Bibliographiques

« A »

1. ABECASSIS J. (1993). Nouvelles possibilités d'apprécier la valeur meunière et la valeur semoulière des blés. *Industries des céréales*, (81), pp. 25-37.
2. ABECASSIS J. et CHAURAND M. (1996). Appréciation de la valeur d'utilisation du blé dur en semoulerie et plastification. In : "Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales" ; GODON, B. et LOISEL W. *Lavoisier*, Paris, 686 p.
3. ADRIAN J., POTUS J. et FRANGNE R. (1995). La science alimentaire de A à Z. *Tec et doc. Lavoisier*, 2^{ème} édition, 477 p.
4. AFNOR. (1991). Contrôle de la qualité des produits alimentaires. Céréales et produits céréaliers. *ISBN*, 3^{ème} édition, Paris, 360 p.
5. AHLBORN, G.J., PIKE, O.A., HENDRIX, S.B., HESS, W.M., HUBER, C.S. (2005). Sensory, mechanical, and microscopic evaluation of staling in low-protein and gluten free breads. *Cereal Chemistry*, (82), pp. 328-335.
6. ALVAREZ-JUBETE L., ARENDT E. K. and GALLAGHER E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 60(1) (Suppl. 4), pp. 240-257.
7. ARENDT E.K., and DAL BELLO F. (2008). Gluten-free Cereal Products and Beverages. *Elsevier*, pp. 289-319.
8. ATWELL W. A. (2001). Wheat flour. *Eagan press, Minnesota, USA*, 123 p.
9. AYKROYD W.R., et DOUGHTY J. (1982). Les graines de légumineuses dans l'alimentation humaine. Etude FAO Alimentation et Nutrition, *FAO*, 2^{ème} édition, Rome, 152 p.

« B »

10. BALLA A., BLECKER C., OUMAROU M., PAQUOT M. et DEROANNE C. (1999). Mise au point de pains composites à base de mélanges de farines de sorgho-blé et analyse texturale. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 3 (2), pp. 69-77.
11. BANKS W. and GREENWOOD C. T. (1975). Starch and its components. *Edinburgh University Press*, Grande Bretagne. 45 p.
12. BECHTEL D.B. and POMERANZ Y. (1978). Ultrastructure of the mature ungerminated rice (*Oryza saliva*) caryopsis. The starchy endosperm. *Am. J. Bot.*, (65), pp. 684-691.
13. 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 d'état en science. Spécialité : Sciences Alimentaires. INATAA. Université Mentouri-Constantine.
14. BERGER M. (1983). Les lipides du blé tendre : composition lipidique des farines de moutures d'essai de huit variétés Françaises de blé tendre. *Science des Aliments*, (3), pp. 181-217.
15. BLOKSMA A.H. (1986). Rheological Aspects of Structural Changes during Baking. In: Chemistry and Physics of Baking. Materials, processes and products. BLANSHARD J.M.V., FRAZIER P.J. and GALLIARD T. *Royal Society of Chemistry*, Londres, pp. 170-178.
16. BLOKSMA A.H. (1990a). Rheology of the breadmaking process. *Cereal Foods World*, (35), pp. 228- 236.
17. BLOKSMA A.H. (1990b). Dough structure, dough rheology, and baking quality. *Cereal Foods World*, (35), pp. 237-244.
18. BORNET F., CLOAREC D., GOUILLOUD S., CHAMP M., COLONNA P., BARRY J. L. et GALMICHE J. P. (1991). Amidons indigestibles : Digestibilité in vitro et aspects nutritionnels chez l'homme sain. *Gastroentérol. Clin. Biol.*, (14), pp. 90-103.

19. BOUDREAU A. et MENARD G. (1992). Le blé éléments fondamentaux et transformation. *Donini Johnson*, Canada, 443 p.
20. BOURSIER B. (2005). Amidons natifs et amidons modifiés alimentaires. *Techniques de l'ingénieur*, Paris, n° F 4 690, pp. 1- 22.
21. BOUTROUX L. (1897). Le pain et la panification: Chimie et technologie de la boulangerie et de La Meunerie. *Librairie J.B. BAILLIÈRE et fils*, Paris, 358 p.
22. BOYDELDIEU J. (1991). Produire des grains oléagineux et protéagineux. *Lavoisier, Tec et Doc*, Paris, 234 p.
23. BRIANI C., SAMAROO D. and ALAEDINI A. (2008). Celiac disease: From gluten to autoimmunity. *Autoimmunity Reviews*, (7), pp. 644-650.

« C »

24. CALVEL R. (1980). La Boulangerie moderne. *EYROLLES*, 9^{ème} Édition, Paris, 459 p.
25. CALVEL R. (1984). La boulangerie moderne. *EYROLLES*, 10^{ème} Édition, Paris, 460 p.
26. CATO L., RAFAEL L.G.B., GAN J., and SMALL D.M. (2002). The use of rice flour and hydrocolloid gums for gluten free breads. *In: Proceedings of the 51th Australian Cereal Chemistry Conference*, pp. 304-308.
27. CERNING J., SAPOSNIK A. and GUILBOT A. (1975). Carbohydrate composition of horse beans (*Vicia faba*) of different origins. *Cereal Chemistry*, (52), pp. 125-138.
28. CHEFTEL J.C., CHEFTEL H. (1992). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Vol. 1, *Tec & Doc, Lavoisier*. Paris, 381 p.
29. CHENE, 2001. La farine. *Journal de l'ADRIANOR*. (26), pp. C.3-C.8.
30. CHOUDHURY N.H. & JULIANO B.O. (1980). Effect of amylose content on the lipids of mature rice grain. *Phytochemistry*, (19), pp. 1 385- 1 389.

31. CHUNG O. K., POMERANZ Y. and FINNEY K. F. (1978). Wheat flour lipids in bread baking. *Cereal Chemistry*, (55), pp. 598-618.
32. CNERNA (1977). Suivis du recueil des usages concernant les pains de France. *CNRS*, Paris. 314 p.
33. CODEX ALIMENTARIUS. (1995). Céréales, légumes secs, légumineuse, produits dérivés et protéines végétales, Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires, 2^{ème} édition, *FAO/OMS*, Vol. 7, Rome.
34. CODEX ALIMENTARIUS. (2007). Céréales, légumes secs, légumineuses et matières protéiques végétales. Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires. 1^{ère} édition, *FAO/OMS*, Rome.
35. COLAS A. (1991). Définition de la qualité des farines pour différentes utilisations. *In* : Les industries de première transformation des céréales. GODON B. et WILLM C. *Tec & Doc, Lavoisier*, 679 p.
36. COLLAR C., ANDREU P., MARTINEZ J. C., & ARMERO E. (1999). Optimization of hydrocolloid addition to improve wheat bread dough functionality: a response surface methodology study. *Food Hydrocolloids*, (13), pp. 467-475.
37. CUQ J. L. et LEYNAUD-ROUAUD C. (1992). Les graines de légumineuses *In* : Alimentation et nutrition humaines. DUPIN H., CUQ J. L., MALEWIAK M. L., LEYNAUD-ROUAUD C. et BERTHIER A. M. *ESF*, Paris, pp. 941-961.

« D »

38. DANDOY S. (1996). Le rayon boulangerie en libre service du supermarché Match. Rapport d'étude, *DESS QUALIMAPA*, Lille, 29 p.
39. DARDE O. (2001). Influences de la quantité, de la masse moléculaire et de la conformation des macropolymères gluténiques sur la qualité technologique des farines panifiables de blé tendre (*triticum aestivum*). Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 172 p.

40. DAVIES A. P. (1986). Protein Functionality in Bakery Products. *In: Chemistry and Physics of Baking. Materials, processes and products.* BLANSHARD J.M.V., FRAZIER P.J. and GALLIARD T. *Royal Society of Chemistry*, Londres, pp. 89-104.
41. DELFRATE R. et STEPHAN C. (2005). Mieux connaître la farine, spécial analyses. *SOTAL*, 12 p.
42. DEMIRKESEN I., MERT B., SUMNU G. & SAHIN S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, (96), pp. 295-303.
43. DUPIN H., CUQ J. L., MALEWIAK M. I., LEYNAUDROUAUD C. et BERTHIER A. M. (1992). Nutrition et Alimentation humaines. *ESF*, Paris, 1553 p.
44. DZIEZAK J.D. (1991). A focus on gums. *Food technology*, (45), pp.116-132.

« E »

45. ELIASSON A .C. and LARSSON K. (1993). Cereals in breadmaking: a molecular colloidal approach. *Food science and technology*, New York, 376 p.

« F »

46. FAO. (1982). Les graines de légumineuses dans l'alimentation humaine. Etude *FAO* : Alimentation et nutrition, 2^{ème} édition, Rome, 152 p.
47. FAO. (1990). Utilisation des aliments tropicaux- Céréales. *FAO*, Rome, 120 p.
48. FEIGHERY C. F. (1999). Celiac disease. *British Medical Journal*, (319), pp.236-239.
49. FEILLET P. (2000). Le grain de blé, composition et utilisation. *INRA*, Paris, 308 p.
50. FOULD-SPRINGER et BELLAMY M. (1996). Levure et panification. Memento des Technologies Agro-Alimentaires, *Lesaffre / Techno Nathan*, Paris, 75 p.

« G »

51. GALLAGHER E., GORMLEY T.R., ARENDT E.K. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, (15), pp.143-152.

52. GAN Z., ELLIST P.R. and SCHOFIELD D. (1995). Mini review- Gas cell stabilisation and gas retention in wheat bread dough. *Journal of Cereal Science*, (21), pp. 215-230.
53. GARCÍA E. M., ZARITZKY E. N., & CALIFANO N. A. (2005). Effect of composition on rheological properties of gluten-free dough disks for “empanadas”. In: Proceedings of the 2nd mercosur congress on chemical engineering, 4th mercosur congress on process systems engineering (14th -18th August). *Club Med*. Rio de Janeiro, Argentina.
54. GLADE M. J. (1999). Food, nutrition, and the prevention of cancer: a global perspective. *American Institute for Cancer Research/World Cancer Research Fund*, (6), pp. 523-526.
55. GODON B. et LOISEL W. (1984). Guide pratique d’analyses dans les industries des céréales. 1^{ème} édition, *Tec & Doc, Lavoisier*, Paris, 686 p.
56. GODON B. et WILLM C. (1991). Les industries de première transformation des céréales. *Lavoisier, Tec & Doc*, Paris : 679 p.
57. GRANDVOINET P. et PRATX B. (1994). Farines et mixes. In: La panification française, GUINET R. et GODON B., *Lavoisier-Apiaria, Tec et Doc*, Paris, Vol. 528, pp. 100-131.
58. GUINET R. et GODON B. (1994). La panification française. Science et Techniques Agro-Alimentaires. *Lavoisier, Tech. & Doc*, Paris, 534 p.
59. GUJRAL H. S., GUARDIOLA I., CARBONELL J. V., and ROSELL C. M. (2003). Effect of cyclodextrin glycosyl transferase on dough rheology and bread quality from rice flour. *J. Agric. Food Chem.* (51), pp. 3814-3818.

« H »

60. HE H. and HOSENEY R. C. (1991). Gas retention of different cereal flours. *Cereal Chem.*, (68), pp. 334-336.
61. HEMAVATHY J. & PRABHAKAR J.V. 1987. Lipid composition of rice (*Oryza sativa L.*) bran. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, (64), pp. 1016-1019.

62. HO T. F. and YIP W.C. (2001). Oral rehydration solution. Rice water is cheap and effective. *BMJ*, 3, 323 (7320), 1068 p.
63. HUEBNER F. R., BIETZ J. A., WEBB B. D. and JULIANO B. O. (1991). Rice cultivar identification by high-performance liquid chromatography of endosperm proteins. *Cereal. Chem.* (67), pp. 129-135.
64. HULSE J. H. (1977). Problems of nutritional pigeon pea chick pea and prospects of research, *In: Nutritional Standards and Methods of Evaluation for Food Legume Breeders*. Prepared by the International Working Group on Nutritional Standards and Methods of Evaluation for Food Legume Breeders. HULSE J. H., RACHIE K; O. and BILLINGLEY L. W, pp. 88-100.

« I »

65. IRRI. (1991). Program report for 1990. Manille, *IRRI*, 320 p.
66. IZYDORCZYK M.S., BILIADERIS C.G. and BUSHUK W. (1991). Physical properties of water soluble pentosans from different wheat varieties. *Cereal Chem.* (68), pp. 145-150.

« J »

67. J.O.R.A. (1991). Décret exécutif N° 91/572 du 31 décembre relatif à la farine de panification et au pain.
68. JONES D. B. (1941). Factors for converting percentages of nitrogen in foods and feeds into percentages of protein. *US Department of Agriculture - circ.* 83 p.
69. JULIANO B. O. (1994). Le riz dans la nutrition humaine. Collection FAO : Alimentation et nutrition, 26, *IRRI-FAO*, Rome, 180 p.
70. JULIANO B.O. & GODDARD M.S. (1986). Cause of varietal difference in insulin and glucose responses to ingested rice. *Qual. Plant. Foods Hum. Nutr.*, (36), pp. 35-41.
71. JULIANO B.O. (1985). Rice: chemistry and technology. *St Paul, MN, Am. Assoc. Cereal Chem*, 2nd edition, USA, 774 p.

72. JUNGE R.C. and HOSENEY R.C. (1981). A mechanism by which shortening and certain surfactants improve loaf volume in bread. *Cereal Chemistry*, (58), pp. 408-412.

« K »

73. KALOGIANNIS S., IAKOVIDOU G., LIAKOPOULOU-KYRIAKIDES M., KYRIAKIDIS D. A. and SKARACIS G. N. (2003). Optimization of xanthan gum production by *Xanthomonas campestris* grown in molasses. *Process Biochemistry*. (39), pp. 249-256
74. KIGER J. L. and KIGER J. G. (1967). Techniques modernes de la pâtisserie-boulangerie industrielles et artisanales et des produits de régime. Tome 1. *DUNOD*, Paris, 676 p.
75. KOBYLAŃSKI JR., PEREZ OE. and PILOSOF AMR. (2004). Thermal transitions of gluten-free dough's as affected by water egg white and hydroxyl propyl methyl cellulose. *Thermochimica Acta*, (411), pp. 81-89.

« L »

76. LAMIREAU T. et CLOUZEAU H. (2008). Comment confirmer le diagnostic de maladie cœliaque ?. *Elsevier Masson SAS*, (15), pp.504-505.
77. 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. *ENSI*A, France, 163 p.
78. LAZARIDOU A., DUTA D., PAPAGEORGIOU M., BELC N. & BILIADERIS C. G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, (79), pp. 1033-1047.
79. LE GOFF L. (1997). Connaître ce que l'on mange. In: Encyclopédie de l'alimentation biologique et de l'équilibre nutritionnel. *ROGER JOLLIOS*, Paris, 675 p.
80. LERNER A. (2010). New therapeutic strategies for celiac disease. *Autoimmunity Reviews*, (9), pp. 144-147.

81. 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.
 82. LIU Y. C., SHEPHERD K. W. and HOSENEY R. C. (1996). Improvement of durum wheat pastamaking and breadmaking qualities. *Cereal Chemistry*, (73), pp. 155-166.
 83. LOPEZ A. C. B., PEREIRA A. J. G. and JUNQUEIRA R. G. (2004). Flour mixture of rice flour, corn and cassava starch in the production of gluten free white bread. *Brazilian Arch. Biol. Technol.* (47), pp. 63-70.
- « M »
84. MAC RITCHIE F. and GRAS P.W. (1973). The role of flour lipids in baking. *Cereal Chemistry*, (50), pp. 292-302.
 85. MARTINS J.M., RIOTTOT M., DE ABREU M. C., LANÇA M. J., VIEGASCRESPO A. M., ALMEIDA J. A., FREIRE J. B. and BENTO O. P. (2004). Dietary raw peas (*Pisum sativum L.*) reduce plasma total and LDL cholesterol and hepatic esterified cholesterol in intact and ileorectal anastomosed pigs fed cholesterol-rich diets. *J. Nutr.*, (134), pp. 3305-3312.
 86. MASY LATTARD I. (1989). Le pain : aspects biochimiques et nutritionnels. Thèse : Pharmacie, Lille, 123 p.
 87. McCARTHY D.F., GALLAGHER E., GORMLEY T.R., SCHOBER T.J. and ARENDT E.K. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. *Cereal Chemistry*, (82), pp. 609-615.
 88. MELCION J.P. (2000). La granulométrie de l'aliment : principe, mesure et obtention. *INRA Prod. Anim.* Paris. vol. 13, n° 2. pp. 81-89.
 89. MEREDITH P. (1964). A theory of gluten structure. *Cereal Science Today*, 9, 34, 54.

90. METTLER E. and SEIBEL W. (1993). Effects of emulsifiers and hydrocolloids on whole wheat bread quality: a response surface methodology study. *Cereal Chemistry*, 70(3), pp. 373-376.
91. MI Y. K., HYUN M. S., & HAE C. C. (1997a). Varietal variation in gelatinisation and adaptability to rice bread processing and their interrelation. *Korean Journal of Crop Science*, 42(3), pp. 344-351.
92. MI Y. K., YEONG H. C. and HAE C. C. (1997c). Effects of gums, fats and glutes adding on the processing and quality of milled rice bread. *Journal of the Korean Society of Food science and Nutrition*, 29(4), pp. 700-704.
93. MI Y. K., YEONG H. C., & 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*, 26 (5), pp. 886-891.
94. MICHELS K.B., GIOVANNUCCI E., CHAN A. T., SINGHANIA R., FUCHS C. S. and WILLETT W. C. (2006). Fruit and vegetable consumption and colorectal adenomas in the Nurses' Health Study. *Cancer Res.*, 1, 66 (7), pp. 3942-3953.
95. MOORE M. M., SCHOBER T. J., DOCKERY P. and ARENDT E. K. (2004). Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters, and breads. *Cereal Chemistry*, (81), pp. 567-575.
96. MOORE W.R. and HOSENEY R.C. (1985). The leavening of bread dough. *Cereal Foods World*, (30), pp.791-792.
97. MORRIS V.J. (1990). Starch gelation and retrogradation. *Trends in Food Science and Technology*, (7), pp. 2-6.
98. MULVIHILL D.M. and DONOVAN M. (1987). Whey proteins and their thermal denaturation – a review. *Irish Journal of Food Science and Technology*, (11), pp. 43-75.

99. NAMOUNE H. (1989). Détermination des aptitudes technologiques des principales variétés de blé tendre cultivées en Algérie. Thèse de magister INATAA. Option génie Industriel Alimentaire, Université Mentouri-Constantine, 109 p.

« N »

100. NESTEL P., CEHUN M. and CHRONOPOULOS A. (2004). Effects of long-term consumption and single meals of chickpeas on plasma glucose, insulin, and triacylglycerol concentrations. *Am J Clin Nutr*, 79 (3), pp. 390-395.
101. NORMAND F.L., ORY R.L., MOD R.R., SAUNDERS R.M. & GUMBMANN M.R. (1984). Influence of rice hemicellulose and α -cellulose on lipid and water content of rice faeces and on blood lipids. *J. Cereal Sci.*, (2), pp. 37-42.
102. NORMAND F.L., ORY, R.L. & MOD R.R. (1981). Interactions of several bile acids with hemicelluloses from several varieties of rice. *J. Food Sci.*, (46), pp. 1159-1161.
103. NIEWINSKY M. M. (2008). Advances in celiac disease and gluten-free diet. *J Am. Diet. Assoc.* 108 (4), pp: 661-672.

« O »

104. OSBORNE T.B. (1907). The proteins of wheat kernel. *Carnegie Inst.*, Washington DC, (84), pp.1-119.

« P »

105. PELLETT P. L. and YOUNG V. R. (1980). Nutritional evaluation of protein foods. *United Nations University / World Hunger Programme Food and Nutrition Bulletin Supplement*, 4(6), pp. 76-89.
106. PERESSINI D., PIN M. and SENSIDONI A. (2010). Rheology and breadmaking performance of rice-buckwheat batters supplemented with hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, xxx, pp. 1-10.

107. PROLEA. 2007. La fève, de la plante à ses utilisations. Filière Française des huiles et protéines végétales. BR Fev 06/07, Paris: 6 p.
108. PRUSKA-KEDZIOR A., KEDZIOR Z., GORACY M., PIETROWSKA K., PRZYBYLSKA A., SPYCHALSKA, K. (2008). Comparison of rheological, fermentative and baking properties of gluten-free dough formulations. *European Food Research and Technology*, (227), pp.1523-1536.
- « R »
109. REPO-CARRASCO-VALENCIA R., PEN A. J., KALLIO H. and SALMINEN S., (2009). Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude and extruded kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science* (49), pp. 219-224.
110. ROSALAM S. and ENGLAND R. (2006). Review of xanthan gum production from unmodified starches by *Xanthomonas compestris* sp. *Enzyme and Microbial Technology*, (39), pp. 197-207.
111. ROSELL C. M., ROJAS J. A., & BENEDITO C. (2001a). Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*, (15), pp. 75-81.
112. ROUAU X. (1993). Investigations into the effects of an enzyme preparation for baking on wheat dough pentosans. *Journal of Cereal Science*, (18), pp. 145-272.
113. ROUAU X., EL-HAYEK M.L. and MOREAU D. (1994). Effect of an enzyme preparation containing pentosanases on the bread making quality of flours in relation to changes in pentosane properties. *J. Cereal Sci.* (19), pp. 259-272.
114. ROUDAUT H. et LEFRANCQ E. (2005). Alimentation théorique. Série Sciences des Aliments, *CRDP-Aquitaine et Doin*, 305 p.
115. ROUSSEL, P. and CHIRON, H. (2002). Les pains français: Evolution, qualité, production. Collection Science et technologie des métiers de bouche, *MAE/ERTI*, 1^{ère} édition, France, 200 p.

« S »

116. SABLANI S.S., MARCOTTE M., BAIK O.D. and CASTAIGNE F. (1998). Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technology*, (31), pp. 201-209.
117. 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*, Vol. 8, N° 2, pp. 87-103.
118. SANCHEZ H. D., OSELLA C. A. and DE LA TORRE. (2002). Optimisation of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour and cassava starch. *Journal of Food Science*, (67), pp. 416-419.
119. SCHOBER T.J., MESSERSCHMIDT M., BEAN S.R., PARK S. H. and ARENDT E.K. (2005). Gluten-free bread from sorghum: quality differences among hybrids. *Cereal Chemistry*, (82), pp. 394-404.
120. SCHOFIELD J.D., BOTTOMLEY R.A., LEGRYS G.A., TIMMS M.F. and BOOTH M.R. (1984). Effect of heat in wheat gluten. *In: Gluten proteins*. GRAVELAND A. and MOONEN J.H.E., Wageningen, Pays Bas, pp. 81-90.
121. SCHWARZLAFF S.S., JOHNSON J.M., BARBEAU W.E., and DUNCAN S. (1996). Guar and locust bean gums as partial replacers of all-purpose flour in bread: an objective and sensory evaluation. *Journal of Food Quality*, (19), pp. 217-229.
122. 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*. Doi: 10.1007/s11947-008-0098-2.
123. SELSELET A. (1991). Technologie des céréales et produits céréaliers. *Institut de technologie agricole de Mostaganem*, 147 p.
124. SHEWRY P. R. (1995). Plant storage Proteins. *Biol. Rev*, (70), pp. 375-426.
125. SHEWRY P.R., TATHAM A.S., FORD J., KREIS M. and MIFLIN B.J. (1986). The classification and Nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of Cereal Science*, (4), pp. 97- 106.

126. SHITTU T. A., AMINU R. A., ABULUDE E. O. (2009). Functional effects of xanthan gum on composite cassava-wheat dough and bread. *Food Hydrocolloids* (23), pp. 2254-2260.
127. SIEGEL A. et FAWCETT B. (1978). Transformation et utilisation des légumineuses alimentaires (applications particulières aux pays en voie de développement). Centre de recherches pour le développement international. *CRDI*, Ottawa, Ont., CA, 63 p.
128. SIMON J-L. (2001). Gomme xanthane : agent viscosant et stabilisant. *Techniques de l'ingénieur*, Paris. Vol. BIO1, n° F4300, pp. 1-8.
129. SIMON J-L. et CERLES B. (2000). Gomme xanthane. *Techniques de l'ingénieur*, Paris. Vol. 6. J6 670, pp. 1-10.
130. SIVARAMAKRISHNAN H.P., SENGE B. and CHATTOPADHYAY P.K., (2004). Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*, 62 (9), pp. 37-45.
- « T »
131. TAIRA H., NAKAGAHRA M. and NAGAMINE T. (1988). Fatty acid composition of indica, sinica, japonica, and japonica groups of nonglutinous brown rice. *J. Agric. Food Chem.*, (36), pp. 45-47.
132. TANAKA Y., RESURRECCIÓN A.P., JULIANO B.O. and BECHTEL D.B (1978). Properties of whole and undigested fraction of protein bodies of milled rice. *Agric. Biol. Chem.*, (42), pp. 2015-2023.
133. TAVAREZ L. A., GOMEZ M. and MENDOZA H. R. (1991). Management of acute diarrhoeal disease with rice water. *Arch Domin Pediatr.* (27), pp. 20-24.
134. TOUFEILI I., LAMBERT I.A. and KOKINI J.L. (2002). Effect of glass transition and cross linking on rheological properties of gluten: development of a preliminary state diagram. *Cereal Chemistry*, (79), pp.138-142.

« V »

135. 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), pp. 439-460.
136. VENN B.J. and MANN J.I. (2004). Cereal grains, legumes and diabetes. *Eur J Clin Nutr*, (58), pp. 1443-1461.
137. VIÉRLING E. (2008). Aliments et boissons, filière et produits. Collection Biosciences et Techniques, Série Sciences des Aliments, *CRDP-Aquitaine et Doin* 3^{ème} édition, 209 p.

« W »

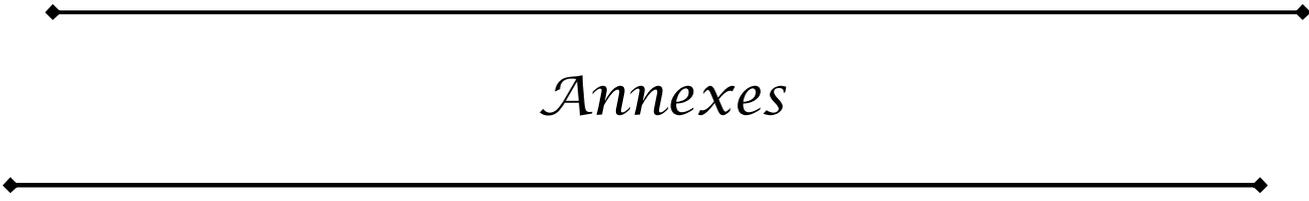
138. WANG M., HAMER R.J., VAN VLIET T., GRUPPEN H., MARSEILLE H. and WEEGELS P.L. (2003). Effect of Water Unextractable Solids on Gluten Formation and Properties: Mechanistic Considerations. *J. Cereal Sci.* 37 (1), pp.55-64.

« Y »

139. YLIMAKI G., HAWRYSH Z. J., HARDIN R. T., and THOMSON A. B. R. (1988). Application of response surface methodology to the development of rice flour yeast breads: Objective measurements. *J. Food Sci.*, (53), pp.1800-1805.
140. YOSHIDA T. and TANNER RD. (1993). Bioproducts and bioprocess, Vol. 2. *Springer-Verlag*. Berlin, Heidelberg, Germany.

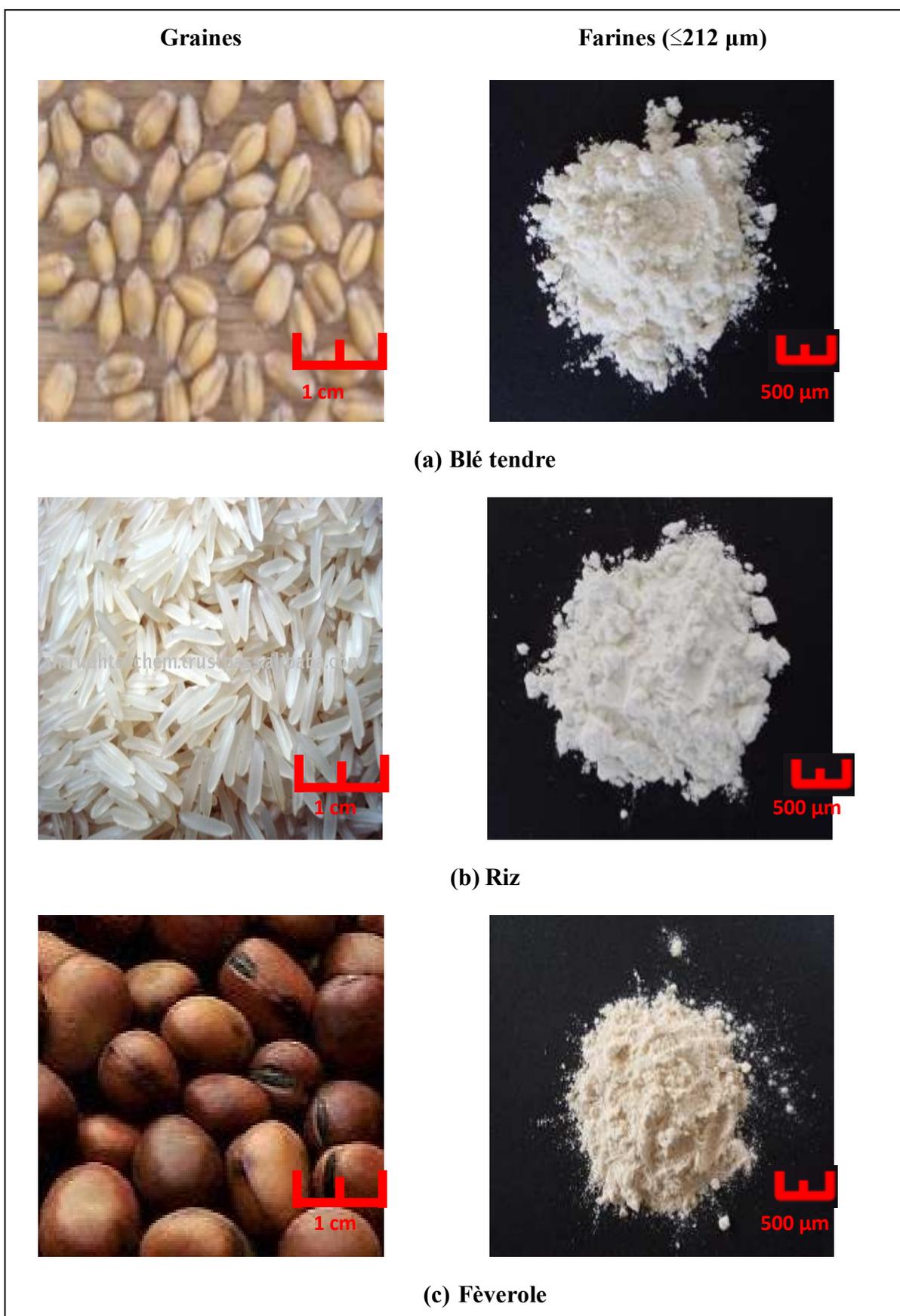
« Z »

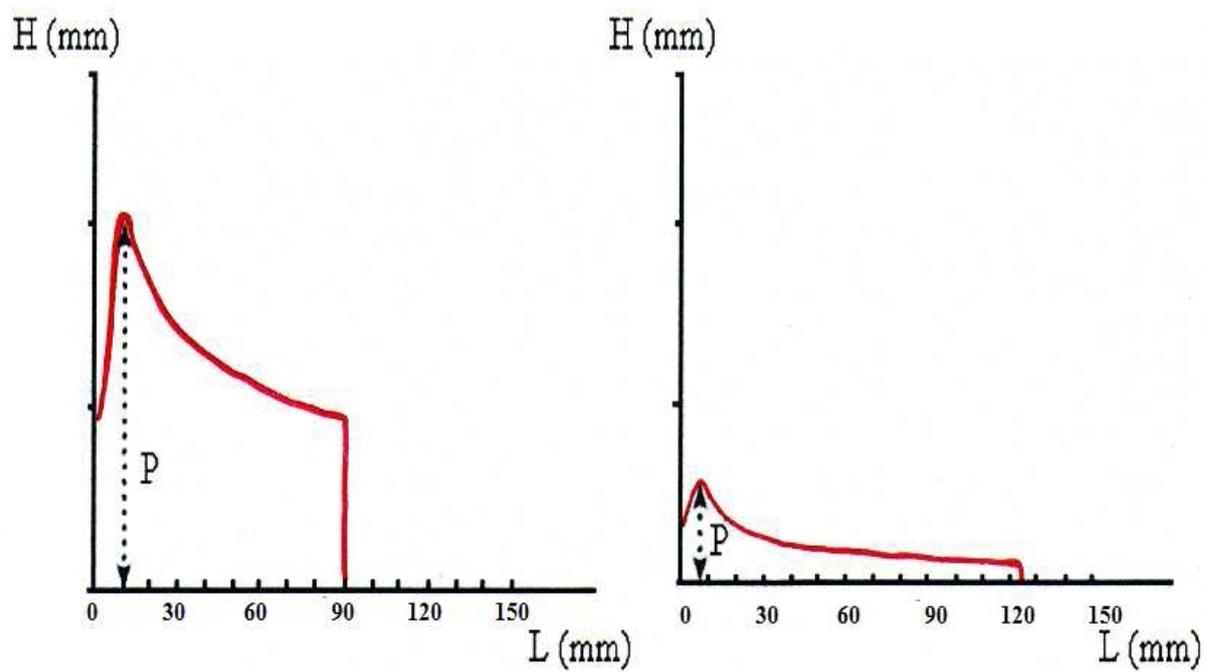
141. ZULET M.A., MACARULLA M.T., PORTILLO M. P., NOEL-SUBERVILLE C., HIGUERET P. and MARTINEZ J. A. (1999). Lipid and glucose utilization in hypercholesterolemic rats fed a diet containing heated chickpea (*Cicer arietinum L.*): a potential functional food. *Int. J. Vitam. Nutr. Res.*, (69), pp. 403-411.



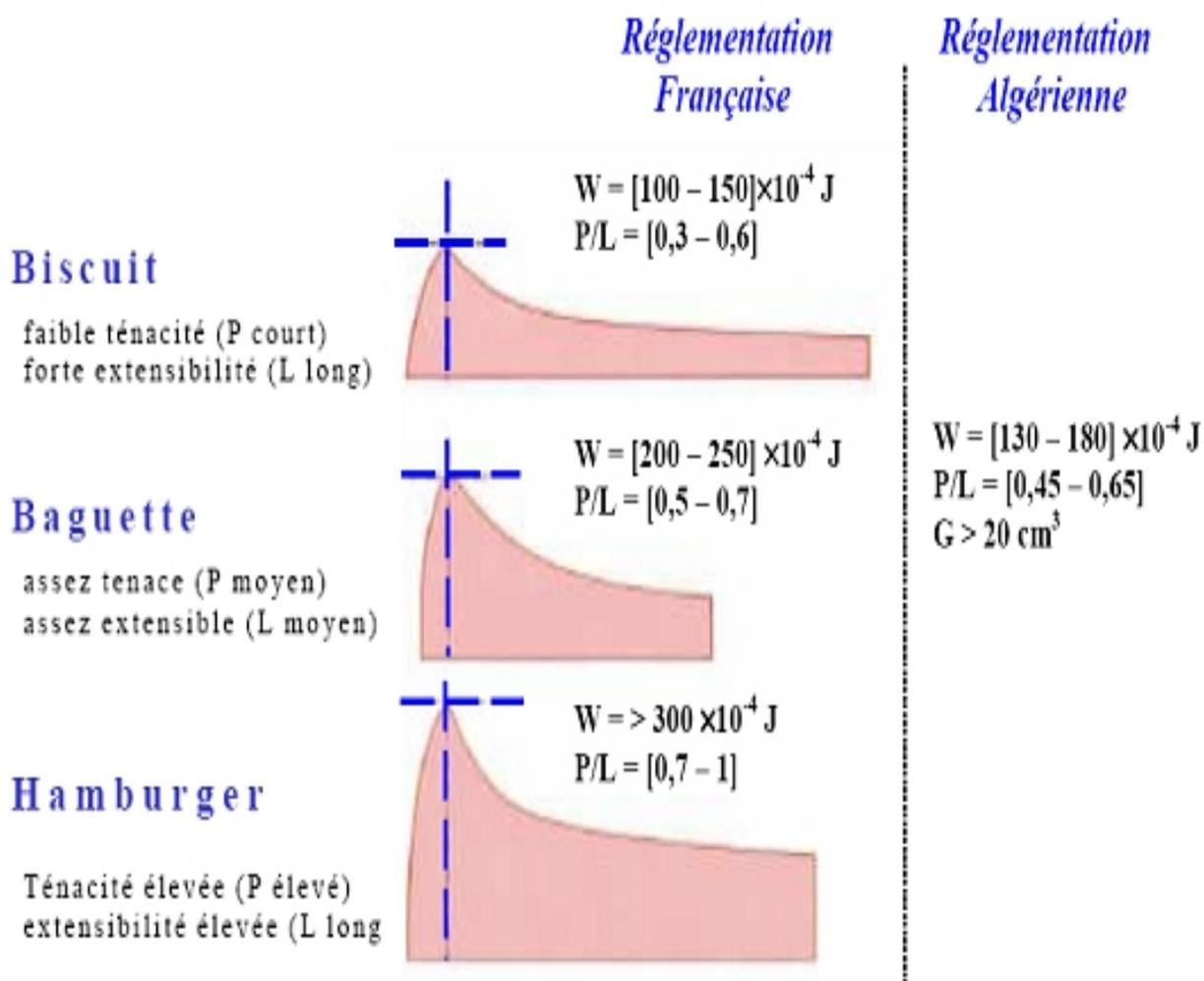
Annexes

Annexe 1. Matières premières utilisées en panification



Annexe 2. L'alvéographe Chopin de la minoterie de SIDI ARGHIS d'Oum El-Bouaghi**Annexe 3.** Alvéogrammes de deux pâtes à base de blé dur : (a) : pâte forte, (b) : pâte faible (NAEGA, 2005).

Annexe 4. Corrélations entre paramètres définis à l'alvéographe et la valeur boulangère en panification selon les réglementations française (GUINET et GODON 1994) et algérienne (J.O.R.A. 1991)



Annexe 5. Illustration du matériel utilisé pour les tests de panification.



technique (SARTORIUS)
biochimie I.N.A.T.A.A

(a₁). Balance
Laboratoire de



(b₁). Mélangeur (HEDOLPH)
de « L.N.T.A. » I.N.A.T.A.A



(b₂).
Moule Tefal proflex ($10,5 \times 5,3 \times 4 \text{ cm}^3$)
de « L.N.T.A. » I.N.A.T.A.A



(a₂). Etuve MEMMERT
Laboratoire de biochimie I.N.A.T.A.A



(a₃). Four pâtissier ($0,60 \times 0,90 \times 0,18 \text{ m}^3$),
Laboratoire de biochimie I.N.A.T.A.A

ملخص

وضعت صياغة الخبز الخالي من الغلوتين استنادا على طحين الأرز والفول ذو الحبوب الصغيرة ، وذلك باستخدام تصميم من التجارب وسطي مركب مع اثنين من العوامل كزانتان - ماء وخمسة مستويات وحسنت باستخدام منهجية الاستجابة السطحية. وتمت دراسة تأثير إضافة صمغ الكزانتان على الخواص الريولوجية للعجين وعلى معايير جودة الخبز.

أظهر التوصيف الريولوجية للأزواج كزانتان - ماء باستعمال ألفيوغراف شوبان أن إضافة صمغ الكزانتان للصيغة أرز-فول أدى إلى تحسن نوعي في المعلمات الريولوجية (W, P/L, G)، في حين تبقى أقل من مستويات القمح اللين الشاهد و المعايير الجزائرية و الفرنسي للصناعة الخبز.

أعطت تجارب صناعة الخبز للأزواج كزانتان - ماء أرغفة ذات لون مشابه للشاهد وذات أحجام كتلية و حجيرات هوائية مختلفة. وتقع عينات الخبز الخالي من الغلوتين التي أعطت أحجام الكتلية الأقرب للشاهد ($3,56 \pm 0,22 \text{ cm}^3/\text{g}$) في المنطقة التي تتضمن الأزواج ذات المجال $[0,20\% - 0]$ كزانتان و $[92,5-95\%]$ ماء وتم التحقق من إمكانية صناعة الخبز الخالي من الغلوتين على الأزواج كزانتان - ماء المستخرجة من الحقل الأمثل المتحصل عليه بواسطة مطابقة منحنيات الاستجابة السطحية لرقم النسبي (P/L) و الحجم الكتلي (Vsp). تتناسب الأحجام الكتلية للأرغفة الخالية من الغلوتين في هذا المجال إلى حد كبير مع نسبة الكزانتان المضافة ($r=0.99$) في حين تبقى دون مستوى الشاهد. وتمثل العينة التي أعطت الحجم الكتلي الأقرب للشاهد الزوج كزانتان - ماء (0,19 ، 93,38) ب ($3,06 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$) مع حجيرات هوائية أكبر.

Summary

The formulation of the gluten-free bread with rice and field bean flours was developed, by employing a central-composite experimental design to two factors (*Xanthan and Hydration*) and five levels and optimized, by the use of the Response Surface Methodology. The effects of the addition of xanthan gum on the rheology properties of the paste and the quality parameters of bread were studied.

The rheological characterization of the *Xanthan-Hydration* couples of the rice- field bean formula realized by the Chopin alveograph, showed that there is an improvement of the all rheological parameters (W, P/L and G) in relation to the addition of xanthan gum, while remaining lower than the values of common wheat witness thus to the Algerian and French breadmaking standards.

The baking tests of the *Xanthan-Water* couples gave similar color breads to that of the witness and various specific volumes and crumb alvéolations. Thus the gluten-free bread samples which gave the V_{sp} closest to the common wheat witness ($3,56 \pm 0,22 \text{ cm}^3 / \text{g}$) locate in the area including the couple of intervals [0-0,20%] xanthan and [92,5-95%] water. The ability to manufacture gluten-free bread is then checked on *Xanthan-Hydration* couples drawn from the optimum field obtained by superposition of the responses level curve of the configuration report (P/L) and specific volume (V_{sp}). Specific volumes of the gluten-free breads in this field are significantly proportional to the xanthan rates ($r = 0,99$) while remaining, lower than that witness. The GFB samples which gave the V_{sp} nearest to the common wheat witness corresponds to the *Xanthan-Hydration* couple (0,19, 93,38) with $3,06 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$ and a crumb grain coarser than that witness.

Résumé

La formulation du pain sans gluten à base de farine de riz et de fève de fève a été développée, en employant un plan d'expériences central composite à deux facteurs (Xanthane et Hydratation) et cinq niveaux et optimisée, en utilisant la Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR). Les effets de l'addition de la gomme de xanthane sur les propriétés rhéologie de la pâte et sur les paramètres de qualité de pain ont été étudiés.

La caractérisation rhéologique des couples *Xanthane-Hydratation* de la Formule Riz-Fève effectuée par l'alvéographe Chopin, a montré qu'il y a une amélioration des paramètres rhéologiques (W, P/L et G) en rapport avec l'addition de la gomme de xanthane à la Formule Riz-Fève, tout en restant inférieure aux valeurs du témoin de blé tendre ainsi qu'aux normes algériennes et françaises de panification.

Les tests de panification des couples *Xanthane-Eau* ont donné des pains de couleur semblable à celle du témoin et de différents volumes spécifique et alvéolations de mie. De ce fait, les échantillons de pain sans gluten qui ont donné des V_{sp} les plus proches du témoin de blé tendre ($3,56 \pm 0,22 \text{ cm}^3/\text{g}$) se situent dans la zone incluant le couple d'intervalles [0-0,20%] xanthane et [92,5-95%] eau. L'aptitude à fabriquer du pain sans gluten est ensuite vérifiée sur des couples *Xanthane-Hydratation* tirés du domaine optimum obtenu par superposition des courbes de niveau des réponses du rapport de configuration (P/L) et du volume spécifique (V_{sp}). Les volumes spécifiques des pains sans gluten dans ce domaine sont significativement proportionnels aux taux de xanthane ($r = 0,99$) tout en restant, inférieurs à celui du témoin. L'échantillon de PSG qui a donné le V_{sp} le plus proche du témoin de blé tendre correspond au couple *Xanthane-Hydratation* (0,19 - 93,38) avec $3,06 \pm 0,07 \text{ cm}^3/\text{g}$ et un grain de mie plus grossier que celui du témoin de blé tendre.

Mots clés : Pain sans gluten, formule Riz-Fève, méthodologie des surfaces de réponses, caractérisation rhéologique, tests de panification.