

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

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE

INSTITUT DE LA NUTRITION, DE L'ALIMENTATION ET
DES TECHNOLOGIES AGRO-ALIMENTAIRES
I.N.A.T.A.A.

N° d'ordre :

N° de série :

Mémoire

en vue de l'obtention du diplôme de *MAGISTER*
en Sciences Alimentaires
Option : Biochimie et Technologies Alimentaires

Aptitude technologique de trois formules à base de riz pour la fabrication de pain sans gluten

par : **Sabrina BENKARA MOSTEFA**

Présenté le :

Jury composé de :

Président : Pr. NAMOUNE. H. (I.N.A.T.A.A. Univ. M. Constantine)
Rapporteur : Pr. ZIDOUNE. M.N. (I.N.A.T.A.A. Univ. M. Constantine)
Examineurs : Mc. BOUDJELLAL. A. (I.N.A.T.A.A. Univ. M. Constantine)
Pr. KHELIFI. D. (Faculté S.N.C. Univ. M. Constantine)

Table de matières
Introduction
Rapport bibliographique

1- Matières premières	01
1-1- Le blé	01
1-1-1- Transformation du grain de blé	01
1-1-2- Transformation des blés en farines	01
1-1-3- Propriétés de farines.....	01
1-2- Le riz	03
1-2-1- Traitement du riz	03
1-2-2- Étuvage du riz	03
1-2-3- Farine de riz usiné	04
1-2-4- Farines de riz fermentées et farines de légumineuses	04
1-3- Les légumes secs	04
1-3-1- Valeur nutritionnelle et complémentation céréales – légumineuses	05
1-3-2- Digestibilité et valeur biologique des protéines de légumineuses	06
1-3-3- La féverole	06
1-3-4- Le pois chiche	07
1-3-5- Le pois protéagineux	07
2- Constituants biochimiques de la farine et leurs rôles en panification	08
2-1- L'humidité	08
2-2- Les cendres	08
2-3- Les protéines	09
2-3-1- Solubilité et classification	09
2-3-2- Petites protéines riches en cystéine	10
2-3-3- Gliadines	10
2-3-4- Gluténines	11
2-3-5- Gluten	12
2-4- Les glucides	13
2-4-1- L'amidon	13
2-4-2- Les pentosanes	15
2-5- Les lipides et leur importance	16

3- Propriétés rhéologiques des pâtes	18
3-1- Mesure par déformation dynamique oscillatoire	19
3-2- Caractérisation empirique des propriétés rhéologiques des pâtes	19
4- Etapes de panification	20
4-1- Le pétrissage	20
4-2- La fermentation	23
4-2-1- Levée de la pâte	24
4-2-2- Acidification et production d'arômes	24
4-2-3- Rhéologie de la pâte	25
4-3- Les opérations mécaniques	25
4-4- La cuisson	25

Matériel et méthodes

1- Les matières premières de l'étude	27
1-1- Le riz.....	27
1-2- Les légumes secs	27
1-2-1- La féverole	27
1-2-2- Le pois chiche	27
1-2-3- Le pois protéagineux	27
1-3- La levure boulangère	28
1-4- Le sel	28
1-5- L'eau d'hydratation	28
1-6- La farine témoin	28
2- Les traitements préliminaires des matières premières	28
3- Les analyses physicochimiques des matières premières	30
3-1- L'humidité	30
3-2- Les cendres	30
3-3- Les protéines totales	30
3-4- Les lipides totaux	31
3-5- Les glucides totaux	32
4- Les analyses technologiques	32
4-1- Les formules de l'étude	33
4-2- La caractérisation granulométriques des produits de mouture	33
4-3- L'intervalle d'hydratation	34
4-3-1- La détermination du taux minimum d'hydratation	34

4-3-2- La détermination du taux maximum d'hydratation	35
4-3-3- La détermination de l'intervalle d'hydratation de faisabilité	35
4-4- L'appréciation du comportement rhéologique des formules de l'étude par l'alvéographe CHOPIN.....	36
5- La panification d'essai	40
5-1- Le diagramme de fabrication du pain	40
5-1-1- Le pétrissage	41
5-1-2- Le façonnage	41
5-1-3- fermentation	42
5-1-4- La cuisson	42
5-2- La caractérisation du pain	42
6- L'analyse statistique	42

Résultats et discussion

1- Les caractéristiques physico-chimiques des matières premières	43
1-1- La granulométrie	43
1-2- La composition biochimique des matières premières	44
1-3- Les caractéristiques des formules de l'étude	47
1-4- Conclusion.....	48
2- Les caractéristiques technologiques des formules de l'étude	48
2-1- L'intervalles d'hydratation des formules de l'étude	48
2-2- Le comportement rhéologique à l'alvéographe Chopin	50
2-2-1- Caractéristiques alvéographiques du témoin	51
2-2-2- Caractéristiques alvéographiques et aptitude technologique des trois Formules sans étuvage du riz	51
2-2-3- Effet de l'étuvage sur le comportement à l'alvéographe Chopin	56
2-2-4- Effet du niveau d'hydratation sur le comportement à l'alvéographe Chopin	61
2-2-5- Conclusion	64
3- La qualité des pains sans gluten obtenus	64
3-1- La qualité sensorielle des pains obtenus	65
3-1-1- La qualité sensorielle des trois pains à base de riz non étuvé	65
3-1-2- La qualité sensorielle des trois pains à base de riz étuvé	67
3-1-3- Conclusion.....	69
3-2- Les volumes spécifiques des trois pains à base de riz non étuvé	69

3-3- Les volumes spécifiques des trois pains avec étuvage du riz	71
3-4- Conclusion	75

Conclusion générale

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu le tout puissant, le clément, pour nous avoir donné le courage, la patience et la santé pour accomplir ce modeste travail ;

Vifs remerciements et profonde gratitude vont particulièrement à :

Mon enseignant et Directeur de mémoire, Monsieur ZIDOUNE M.N., 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.-I.N.A.T.A.A.), pour m'avoir proposé le sujet de ce mémoire, pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de la réalisation de ce travail, pour son esprit scientifique, ses orientations et ses conseil ;

Mon enseignant de l'I.N.A.T.A.A., Monsieur NAMOUNE H., Professeur et Chef d'équipe au sein du L.N.T.A., pour son intéressement à mon travail, ses conseils techniques, son précieux soutien moral et ses encouragements et enfin pour son acceptation de présider le jury de ce mémoire ;

Mon enseignant et Directeur de l'I.N.A.T.A.A. , Monsieur BOUDJELLAL A., Pour avoir accepté d'évaluer mon travail et de m'honorer par sa participation à ce jury ;

Monsieur KHELIFI D., Professeur au département de la biochimie et de microbiologie de l'université Mentouri de Constantine, pour avoir accepté de consacrer une partie de son temps pour juger ce mémoire ;

Monsieur le Directeur de l'I.T.G.C. (Institut Technique des Grandes Cultures) de Quelma pour son approvisionnement en échantillons de légumes secs qui ont servi à la réalisation de ce mémoire ;

Monsieur le directeur des moulins Beni- Haroun de Grarem wilaya de Mila et toute son équipe pour son aide et pour avoir accepté de m'accueillir et de me donner accès libre à son laboratoire d'analyses, qu'il trouve ici mes respectueuses considérations ;

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, tous les collègues, magisters et doctorants, ainsi que le personnel technique et administratif de l'I.N.A.T.A.A.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A la mémoire de mon père.

A ma très chère mère

Pour ta tendresse, ton amour, ton soutien, ta patience et tes sacrifices tout au long de ma vie et de mon parcours. Que ce travail soit, pour toi, un témoignage de ma vive reconnaissance et ma profonde affection. Que Dieu le tout puissant te donne santé, bonheur et te protège de tout mal.

A mon chère marié

Pour toute sa patience, ces encouragements, son soutien moral et matériel, ainsi que pour son affection et sa tendresse.

A ma chère petite fleur « Rayhene »

Pour les moments agréables qu'elle m'a fait vivre, pour la joie qu'elle m'apporte aux périodes les plus difficiles. Que le tout puissant te garde, te donne bonheur et santé et te montre le droit chemin.

A mes frères et sœurs

A ma famille

A mes amis.

Liste des tableaux

Tableau 01 : Taux d'extraction moyen et taux de cendres des différents types de farines.....	02
Tableau 02 : Exemple d'évaluation des caractéristiques des farines en fonction du taux d'extraction.....	02
Tableau 03 : Exemple de valeurs des indices alvéographiques des farines en relation avec leur usage.....	03
Tableau 04 : Composition moyenne (pour 100% de matière sèche) de trois légumes secs.....	05
Tableau 05 : Taux d'extraction moyen et taux de cendres des différents types de farines	08
Tableau 06 : Modification de la solubilité des lipides de la farine au cours du pétrissage.....	17
Tableau 07 : Diagrammes comparatifs entre les principales techniques de pétrissage des pâtes de pain à base de farine de blé.....	21
Tableau 08 : Formules de l'étude exprimées en rapport de masse.....	33
Tableau 09 : Taux d'hydratation de faisabilité du témoin et des formules de l'étude.....	36
Tableau 10 : Taux d'hydratation de faisabilité des formules de l'étude (TH et TH' en%).....	40
Tableau 11 : Composition biochimique globale des matières premières.....	44
Tableau 12 : Composition biochimique globale des formules de l'étude.....	47
Tableau 13 : Intervalles d'hydratation de faisabilité des formules sur base sèche.....	49
Tableau 14 : Caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz non étuvé.....	54
Tableau 15 : Comparaison des indices alvéographiques des deux études.....	55
Tableau 16 : Caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz étuvé	59
Tableau 17 : Description sensorielle des pains à base de riz non étuvé.....	65
Tableau 18 : Description sensorielle des pains à base de riz étuvé.....	67
Tableau 19 : Caractéristiques des pains et mies des formules à base de riz non étuvé.....	70
Tableau 20 : Caractéristiques des pains et mies des formules à base de riz étuvé.....	72

Liste des figures

Figure 01 : Composition en lipides libres et en lipides liés de la farine.....	17
Figure 02 : Echantillons des trois légumes secs de l'étude.....	28
Figure 03 : Diagramme adopté pour la détermination du taux minimum d'hydratation.....	35
Figure 04 : Diagramme adopté pour la détermination du taux maximum d'hydratation.....	35
Figure 05 : répartition des niveaux de travail à l'intérieur de l'intervalle d'hydratation de faisabilité.....	36
Figure 06 : Diagramme de préparation de pâte pour le test alvéograpgique.....	37
Figure 07 : Alvéogramme type de différents types de farines de blé tendre	38
Figure 08 : nouvelle répartition des niveaux à étudier à l'intérieur de l'intervalle d'hydratation de faisabilité.....	40
Figure 09 : Diagramme de fabrication du pain.....	41
Figure 10 : Granulométrie des farines des différentes matières premières (en % de la masse).....	43
Figure 11 : Alvéogramme de la farine de blé tendre « Beni-Haroun ».....	51
Figure 12 : Alvéogrammes de la formule R ₁ F aux taux d'hydratation (TH' _{1/4} , TH _{1/2} , TH' _{3/4}).....	52
Figure 13 : Alvéogrammes de la formule R ₁ PC aux taux d'hydratation (TH' _{1/4} , TH _{1/2} , TH' _{3/4}).....	52
Figure 14 : Alvéogrammes de la formule R ₁ PP aux taux d'hydratation (TH' _{1/4} , TH _{1/2} , TH' _{3/4}).....	53
Figure 15 : Alvéogrammes de la formule R ₂ F aux taux d'hydratation (TH' _{1/4} , TH _{1/2} , TH' _{3/4}).....	57
Figure 16 : Alvéogrammes de la formule R ₂ PC aux taux d'hydratation (TH' _{1/4} , TH _{1/2} , TH' _{3/4}).....	57

Figure 17 : Alvéogrammes de la formule R₁PP aux taux d'hydratation

(TH_{1/4}, TH_{1/2}, TH_{3/4}).....58

Figure 18 : Effet du niveau d'hydratation sur le rapport de configuration (P/L).....63

Liste des abréviations

ANOVA	Analyse de la variance
BT	Farine de blé tendre
DG	Distribution granulométrique
FAO	Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
G	Gonflement
Ie	Indice d'élasticité de la courbe
I.T.G.C.	Institut Technique des Grandes Cultures
L	Elasticité de la pâte
MC	Maladie coéliquaue
MS	Matière sèche
P	Ténacité de la pâte
P/L	Rapport de configuration de la courbe
Q.E.A	Quantité d'Eau à Ajouter
R1	riz non étuvé
R2	riz étuvé
RF	Formule riz-féverole
SG-FPM	Sous unité Gluténique de Faible poids Moléculaire
SG-HPM	Sous unité Gluténique de Haut poids Moléculaire
RPC	Formule riz-pois chiche
RPP	Formule riz-pois protéagineux
RSG	Régime sans gluten
TH	Taux d'hydratation des farines
Tr/min	Tour/minute
V_{s_m}	Volume spécifique de mie
V_{s_p}	Volume spécifique de pain
W	Travail de déformation

Introduction

La maladie cœliaque (MC) ou -intolérance au gluten- est une entéropathie auto-immune, elle se manifeste par un syndrome de malabsorption, chez des sujets génétiquement prédisposés. (DENERY-PAPINI et coll. 2001 ; MATUCHANSKY et coll. 2004).

La maladie cœliaque est induite par les prolamines des quatre céréales classiquement toxiques pour la muqueuse intestinale du cœliaque, qui sont les gliadines de blé, les sécalines de seigle, les hordénines d'orge, et à faible degré, les avénines d'avoine. Elle est caractérisée par une atrophie villositaire sévère prédominant au niveau de l'intestin grêle proximal (MATUCHANSKY et coll. 2004).

Il ne faut pas confondre l'intolérance au gluten avec l'allergie au gluten. La première entraîne l'activation du système immunologique, avec synthèse d'anticorps de classe IgA et IgG dirigés contre la gliadine d'une part et d'autre part, de toute une série d'anticorps variés : anticorps anti-réticuline (AAR), anti-endomisium (AAE), anti-transglutaminase (AAT). La deuxième, très rare, rencontrée chez les boulangers est une allergie due à une longue exposition aérienne aux protéines allergéniques (gliadine). Elle met en jeu les mécanismes immunitaires. (BERRAH 2000, DUBUISSON 2002, SCHMITZ et CELLIER 2002).

Le régime sans gluten (RSG) demeure le seul traitement de la maladie cœliaque, c'est l'exclusion complète et définitive du gluten de l'alimentation et sa substitution par d'autres céréales, essentiellement le riz et le maïs. (DENERY-PAPINI et coll. 2001, DUBUISSON et coll. 2002, ANCELLIN et coll., 2004, MATUCHANSKY et coll. 2004, SCHMITZ 2007, SCIARINI et coll. 2008).

Pratiquement, l'application du RSG est très contraignante et peut constituer une véritable atteinte à la vie sociale des malades et leurs familles puisque la farine de blé et le gluten sont présents dans la plus part des produits alimentaires à consommation courante (pains, biscuits, gâteaux...), notamment, dans les pays où l'alimentation est à base de céréales (COFFIN 2001, ANCELLIN et coll., 2004).

En Algérie, les malades cœliaques souffrent d'un manque d'aliments sans gluten, les produits alimentaires existants sur le marché pour cette tranche de population sont pour la majorité importés, coûteux, peu diversifiés et ne subviennent pas à la demande. Les aliments souhaités par les malades algériens sont dans l'ensemble les aliments traditionnels et plus particulièrement le pain (galette), non disponibles sur le marché ou coûteux (BENATALLAH et coll. 2004).

Dans le but d'améliorer la qualité de vie des malades cœliaques algériens, de leur donner convivialité et réintégration dans la société, de mettre à leur disposition l'un des aliments les plus consommés quotidiennement « le pain » qui venait en tête de liste de produits réclamés, la présente étude se fixe pour objectif l'estimation de l'aptitude technologique du pain sans gluten, sur la base d'une complémentation céréales-légumes secs de rapport massique 2/1 respectivement.

Ce thème constitue l'un des volets du sujet de recherche lancé au niveau de l'équipe TEPA (Transformation et Elaboration de Produits Agr-alimentaires) du Laboratoire de recherche en Nutrition et Technologie Alimentaire (LNTA) de l'INATAA, portant sur la formulation et la fabrication des aliments pour malades cœliaques algériens.

Trois formules sans gluten sont testées pour la réalisation de notre objectif, en introduisant l'effet de l'étuvage du constituant de base qui est le riz ; cela dédouble nos formules comme suit :

- Riz - féverole (R₁F), riz - pois chiche (R₁PC), riz - pois protéagineux (R₁PP) ;
- Riz étuvé - féverole (R₂F), riz étuvé - pois chiche (R₂PC), riz étuvé - pois protéagineux (R₂PP).

L'aptitude technologique des six formules sans gluten à donner du pain est comparée à celle du témoin de blé tendre avec effet des taux d'hydratation et de l'étuvage du riz. Elle est étudiée à travers l'appréciation des caractéristiques technologiques suivantes :

1. Comportement rhéologique des farines (essai alvéographique) ;
2. Aptitude à la panification.

1- Matières premières

1-1-Le blé

Le blé est une monocotylédone qui appartient au genre *Triticum* de la famille des *Gramineae*. C'est une céréale dont le grain est un fruit sec, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments. Les deux espèces les plus cultivées sont le blé tendre (*Triticum aestivum*) et le blé dur (*Triticum durum*) (BOUDREAU ; MENARD 1992).

L'Algérie se retrouve au premier rang mondial des pays importateurs de céréales (2007), elle signe pour l'acquisition de 4 millions de tonnes de blé, (3,3 millions de tonnes du blé tendre et 8000 tonnes du blé), afin de satisfaire la demande nationale (ANONYME 2007).

1-1-1- Transformation du blé en grain

Les constituants du grain se répartissent d'une manière inégale au sein des fractions histologiques du grain .l'amidon se trouve en totalité dans l'albumen amylicé, les teneurs en protéines du germe et de la couche à aleurone sont particulièrement élevées, les matières minérales abondent dans la couche à aleurone, les pentosanes sont les constituants dominants de cette dernière et du péricarpe, la cellulose présente près de la moitié du celui-ci, les lipides dépassent les 10% dans le germe et dans la couche à aleurone (FAO 1990 ; GODON 1998).

I-1-2- Transformation des blés en farines

A l'issue de la mouture, quatre produits principaux sont obtenus :

- la farine, dont la taille des particules est comprise entre 30 et 200 μm (on parle de semoule quand les particules sont plus grosses), constituée de l'albumen légèrement contaminé par les parties périphériques du grain, d'autant plus que l'extraction des farines est plus poussée ;
- les remoulages, fines particules constituées des enveloppes du grain et comprenant une importante proportion d'amidon originaire de l'albumen ;
- les fins sons ;
- les gros sons (GODON 1991).

I-1-3- Propriétés des farines

En France, les types légaux de farines sont définis par leur teneur en matières minérales suivant la correspondance indiquée dans le tableau 1. Il s'agit d'une définition réglementaire qui ne préjuge en rien de la qualité d'utilisation des farines, bien qu'un usage particulier soit assigné à chacun des types (CALVEL 1984).

Tableau 1 : Taux d'extraction moyen et taux de cendres des différents types de farines (CALVEL 1984).

Types	Taux de cendres	Taux moyen d'extraction	Utilisation
45	Moins de 0.50	67	Pâtisserie
55	De 0.50 à 0.60	75	Pain ordinaire
65	De 0.62 à 0.75	78	Pains spéciaux
80	De 0.75 à 0.90	80 – 85	Pains spéciaux
110	De 1.00 à 1.20	85 – 90	Pain bis
150	Plus de 1.40	90 – 98	Pain complet

Les farines du premier passage proviennent du cœur de l'albumen, celles isolées en fin de mouture contiennent des proportions importantes de couche à aleurone et du péricarpe; elles sont plus riches en matières minérales (ADRIAN et coll. 1995).

Ces farines se différencient également par leur alvéogramme : les farines de broyage ont une faible pression (P) et un gonflement (G) élevé ; celles de claquage présentent une courbe équilibrée proche de celle de la farine entière ; celles de convertissage possède un (P) élevé et un (G) plus faible. De ce fait, la composition chimique et les propriétés d'usage légales des différents types de farines (tableau 1) intermédiaires de celles de l'albumen et des téguments, évoluent en fonction de leur taux d'extraction (tableau 2).

Les caractéristiques technologiques des farines, en particulier leurs indices alvéographiques, diffèrent selon les utilisations (tableau 3) (FEILLET 2000).

Tableau 2 : Exemple d'évolution des caractéristiques des farines en fonction du taux d'extraction.

Taux d'extraction	40	50	60	70	80
Teneur en matière minérale (% ms).	0.39	0.40	0.43	0.50	0.80
Teneur en protéines (% ms).	11.0	11.1	11.2	11.5	11.9
Teneur en gluten humide (% ms).	23	24	25	27	24
Volume du pain (cm ³).	640	650	660	670	610

Tableau 3 : Exemples de valeurs des indices alvéographiques des farines en relation avec leur usage.

Produits finis	W	P	G	L	P/L
Baguette	153	53	22	98	0.54
Croissant	246	69	23	107	0.65
Biscotte	217	57	26	133	0.43
Pain au lait	417	81	27	152	0.53
Farine en sachet	145	49	22	94	0.52

I-2- Le riz

Le riz est une graminée annuelle du genre *Oryza* qui comporte plus d'une vingtaine d'espèces dont deux sont cultivées :

- *Oryza sativa* en Asie avec trois sous espèces : indica, japonica et javanica qui se différencient essentiellement par les caractéristiques physiques du grain ; les indica donnent des riz à grain long, les japonica des riz à grain court, collants ou glutineux à la cuisson.
- *Oryza glaberrima* en Afrique Occidentale (FAO 1990).

La production mondiale de riz en 2008 a progressé de 1,5 pour cent, atteignant 668 millions de tonnes. Une grande part de cet accroissement est le fait des pays d'Asie qui ont rentré quelque 605 millions de tonnes, soit 1,1 pour cent de plus que résultats de 2007 (FAO 2009).

I-2-1- Traitement du riz

Pour pouvoir être consommé, le grain de riz vêtu « *le riz paddy* » doit être séparé de ses balles par décorticage « *le riz cargo* », en suite il est souvent soumis au blanchiment qui a pour effet de retirer de l'extérieur vers l'intérieur les différentes couches du péricarpe ainsi que les téguments séminaux, la couche à aleurone et le germe. On obtient ainsi le « *riz blanchi* » ou « *riz usiné* », on regroupe l'ensemble de ces opérations sous le terme d'usinage (FAO 1990 ; FAO 1993 ; JULIANO 1994 ; LE GOFF 1997).

I-2-2- Étuvage du riz

L'étuvage du riz traditionnellement pratiqué en début du XX^e siècle en Asie du Sud-Est et en Afrique Tropicale puis à partir de 1940 aux Etat-Unis et en Europe consiste en un traitement hydrothermique du riz paddy qui provoque simultanément la gélatinisation de l'amidon, la

désintégration des corpuscules protéiques de l'albumen et une migration des matières minérales et des vitamines vers l'intérieur du grain (ANGLADETTE 1966 ; GARIBOLDI 1972, 1974 ; ALARY 1975 ; BHATTACHARYA 1985 ; FEILLET 2000).

Le procédé utilisé en France par la Société France-Riz dont l'installation est parmi les plus modernes qui soient, est réalisé dans des autoclaves rotatifs par de la vapeur d'eau sous pression à une température supérieure à 100°C et que le séchage s'effectue sous vide à l'intérieur même de l'autoclave.

Les deux principales variables du processus sont l'eau et la chaleur ; utilisées seules ou combinées, ces deux variables permettront de réaliser les trois phases qui constitue l'étuvage : le trempage, le traitement à la vapeur et le séchage (GODON ; WILLM 1998).

I-2-3- Farine de riz usiné

Les grains brisés peuvent être moulus pour donner de la semoule ou des flocons, ainsi que diverses qualités de farines de riz. Cette farine est impropre à la panification car elle ne contient pas les protéines nécessaires à la formation du gluten ; on peut cependant en mélanger à la farine de blé (20 %) pour faire la pâte à pain, la farine de riz est utilisée couramment en pâtisserie ainsi qu'en cuisine familiale traditionnelle japonaise (FAO 1990).

I-2-4- Farines de riz fermentées et farines de légumineuses

"L'idli" et le"dosa" indiens sont des pâtes acides préparées par fermentation bactérienne de riz poli et de haricots mungo écosés, les proportions varient de une à trois parts de riz pour une part d'haricots mungo, on obtient des gâteaux spongieux et moelleux.

Une denrée analogue, le" dhokla", est obtenue à partir d'une pâte fermentée composée de riz grossièrement pilonné et de pois chiche, on peut remplacer ces produits par d'autres céréales et légumineuses pour confectionner ces pâtes fermentées (FAO 1990).

I-3- Les légumes secs

Les légumes secs sont les graines sèches comestibles de légumineuses se distinguant des graines de légumineuses oléagineuses par leur faible teneur en matière grasse. Ce groupe de produits comprend les haricots secs, les lentilles, les pois chiches, les pois rends et cassés, les fèves (FAO 1982 ; BICHON 1991 ; CODEX ALIMENTARIUS 1995).

En Algérie, la culture des légumineuses occupe une superficie près de 102000 hectares (moyenne 1990 - 96), soit 1.26 % de la superficie agricole utile du pays et 4.30 % de la superficie totale des céréales.

Les cultures pratiquées en Algérie sont la fève, principalement la féverole et le pois chiche (occupant plus de 80 % de la superficie nationale), le pois sec (9.7 %), la lentille et la gesse (I.T.G.C. 2000).

I-3-1- Valeur nutritionnelle et complémentation céréales - légumineuses

Les légumineuses jouent un rôle essentiel sur le plan nutritionnel et économique en raison de leur place dans l'alimentation. Leur importance est due au fait qu'elles sont riches en protéines (teneur 2 à 3 fois plus élevée que la plupart des céréales) (FAO 2001).

Tableau 4 : Composition moyenne (pour 100 % de matière sèche) de trois légumes secs (FAO 1982 ; BOYELDIEU 1991 ; CUD, LEYNAUD-ROUAUD 1992 ; GUEGUEN, LEMARIE 1996).

Graines	Protéines (N.6, 25)	Lipides	Glucides totaux	Cendres
Pois chiche	12.4 - 30.6	5 - 5.6	54.9 - 58	4
P- protéagineux	20.2 - 34.4	1.5 - 1.8	57 - 60	3.5
Féverole	23 - 38.1	1.5	48.9 - 52	4-5

Si une communauté peut disposer de produits à base de légumineuses et de céréales de qualité en quantité suffisante pour faire face à ses besoins énergétiques, ces besoins en protéines seront en grande partie satisfaits, ainsi les protéines des céréales trouvent un supplément de lysine dans celles des légumineuses qui en sont riches et ces derniers trouvent une compensation en acides aminés soufrés dans les protéines des céréales qui en ont une bonne teneur, en outre leur pourcentage de protéines utilisables est sensiblement accru (FAO 1982 ; FAO 1990).

Il existe pour les mélanges de céréales et de graines de légumineuses certaines proportions qui portent à son niveau maximal la valeur des protéines combinées. Selon la FAO (1990), une complémentation optimale est assurée avec 65 % de céréales et 35 % de légumes secs (un rapport de 2/1). Ainsi, OUNANE (1983) a montré que d'après la composition chimique des pâtes alimentaires, l'incorporation du pois chiche à la semoule de blé dur améliore quantitativement leur teneur en protéines qui passe d'environ 16 % à 21 % pour les pâtes supplémentées avec 30 % de pois chiche, une telle valeur se rapproche des protéines animales.

I-3-2- Digestibilité et valeur biologique des protéines de légumineuses

Les protéines de légumineuses peuvent être distinguées en deux groupes : les protéines de réserve et les protéines ayant un rôle métabolique de défense. Elles peuvent être classées en albumines (grains d'aleurone : 20% des protéines totales), en globulines contenant à leur tour les légumines et les vicilines (60 à 90% des protéines totales) et en glutélines (0 à 15% en fonction de l'espèce) (CUQ et LEYNAUD-ROUAUD 1992).

Les protéines de légumineuses n'ont de signification nutritionnelle que dans la mesure où ces protéines sont absorbées et sont retenues dans l'organisme. Or, les légumineuses renferment d'autres protéines que celles dont on vient de parler, qui les accompagnent souvent à l'intérieur des corps protéiques et qui interviennent sur leur digestibilité, se sont les "facteurs antinutritionnels", le premier effet de ces substances est de réduire la digestion et l'absorption des protéines (CALET 1992).

Les caractéristiques à reconnaître des substances antinutritionnelles sont les suivantes :

- Elles sont très répandues dans le règne végétal et ne sont pas l'apanage des légumineuses ;
- Elles ne sont pas complètement insolubles et le trempage avant cuisson en élimine beaucoup;
- La cuisson qui suit écarte la plus grande partie de ce qui reste, surtout si on a recours à l'autoclavage (CAYOT et OLSSON 1997 ; ROUDAUT et LEFRANCQ 2005).

La digestibilité des protéines des légumes secs, même lorsqu'ils sont cuits, est relativement basse par rapport aux autres aliments, cela laisse supposer que indépendamment de la présence de facteurs antinutritionnels, la structure de ces aliments doit jouer un rôle sur leur efficacité alimentaire, à savoir la structure des protéines et l'enveloppe glucidique qui les protège (CALET 1992).

I-3-3- La féverole

Légumineuse annuelle très anciennement cultivée dans le bassin méditerranéen (espèce *Vicia faba* famille des papilionacées), les fèves et féveroles sont des cultivars de la même espèce (BOYELDIEU 1991).

D'après la grosseur de la graine on distingue trois sous espèces:

- La féverole petits grains (*V. faba minor*),
- La féverole à grains moyens (*V. faba equira*),
- La féverole à gros grain, ou fève (*V. faba major*) (MAZOYER 2002).

En raison de la richesse de sa graine en protéines (20 % de la M.S.) tout en restant un aliment énergétique (55 % de glucides), la culture de la féverole s'est progressivement étendue en Europe de l'Ouest, sous la pression des besoins pour l'alimentation humaine et animale.

Avec le pois, la lentille et le lupin, la fève a constituée durant toute l'Antiquité et le Moyen-âge, une base alimentaire importante. La farine de fève s'est souvent substituée à la farine de céréales dans les périodes de disette (FOURY 1994).

I-3-4- Le pois chiche

Il existe de nombreuses variétés de pois chiche (*Cicer arietinum*) (20000 dans le monde) qui peuvent se classer en trois grands types : (PLANCQUAERT, WERY 1991 ; BOYELDIEU 1991).

- Desi, à graines assez petites (moins de 300 mg), ridées de couleur jaune à noire ; ce type représente 85 % des surfaces cultivées dans le monde, utilisé pour l'alimentation animale.
- Kabuli, à graines moyennes (plus de 250 mg), ridées, de couleur crème, destiné à l'alimentation humaine.
- Gulabi, beaucoup moins cultivé, de couleur claire, semble promoteur en France.

En Algérie, où le marché du pois chiche de type Kabuli est très porteur, l'accroissement de la production est limité par la faiblesse des rendements, rendant le pois chiche peu compétitif par rapport aux autres cultures (PLUVINAGE 1990), très récemment, quelques lignées de pois chiches d'hiver sont actuellement en phase de production de semence en stations et chez les agriculteurs, il s'agit de : Chetoui et Flip (CHOUAKI 2006).

I-3-5- Le pois protéagineux

Sous des formes botaniques diverses et souvent imprécises, le pois figure parmi les espèces les plus anciennement collectées puis cultivées, sur le continent Eurasiatique (FOURY 1994).

Le terme "pois protéagineux" désigne tous les pois secs (récoltés à maturité complète), de l'espèce *Pisum sativum*, quelque soit leur utilisation (CORPEN 1999).

D'après l'Union Nationale Interprofessionnelle des Protéagineux (UNIP), la production mondiale de protéagineux de 1998 s'élevait à 12.3 millions de t, les deux premiers producteurs étant la France (3.3 millions de t) et le Canada (2.3 millions de t), la production de l'Union européenne était de 5.7 millions de t. L'Allemagne et le Royaume Uni, avec chacun 200000 ha, sont les deux principaux producteurs (MAZOYER 2002).

Au sein de l'espèce *Pisum* commune Clavaud, on distingue :

- *Pisum sativum* ou Hortense, pois de jardin à grains globuleux, vert ou jaune, lisse ou ridé, à fleurs blanches ; il en existe des milliers de cultivars ;
- *Pisum arvense*, pois des champs ou pois fourrager, à grains gris anguleux, à fleur bleuâtre, utilisé pour la pâture ou récolté après maturité et distribué au bétail ;

- *Pisum axiphium*, ou pois sucré ;
- *Pisum elatius*, à fleur rose liliacée (BOYELDIEU 1991).

2- Constituants biochimiques de la farine de blé et leurs rôles en panification

2-1- L'humidité

La teneur en eau des farines est une condition importante de leur bonne conservation. En aucun cas, la teneur en eau des farines ne doit être supérieure à 16 %. Pour certaines utilisations, notamment à l'exportation, il est nécessaire d'abaisser la teneur en eau des farines par étuvage jusqu'à 14%, 12%, voire 7% selon le cas (DUBOIS 1994, COLAS 1998).

Il faut noter que la farine, comme tous les produits dérivés des céréales, est hygroscopique ; il est normal qu'au cours du stockage, la teneur en eau de la farine puisse varier, ainsi que leur poids, mais la matière sèche demeure constante, et le produit garde la même valeur au point de vue technologique et nutritionnel (COLAS 1998).

La teneur en eau est importante en boulangerie puisqu'elle intervient dans le taux d'hydratation des pâtes, et donc dans leurs caractéristiques rhéologiques (KIGER, KIGER 1967).

Plus la teneur en eau de la farine est faible, et plus il est possible de lui ajouter de l'eau au pétrissage pour arriver à une consistance optimum de la pâte. Cette incorporation est d'autant plus aisée que la teneur en eau de la farine est plus faible. Une homogénéisation rapide de la pâte exige des précautions lors de l'introduction de l'eau dans le pétrin. (GRANDVOINNET, PRATX 1994).

2-2- Les cendres

Le taux d'extraction ou la pureté des farines est apprécié indirectement par le taux de cendres. Depuis 1963 les farines commercialisées doivent correspondre à des types légaux basés sur une limite, ou un écart de limites de taux de cendres (tableau 5). (COLAS 1998).

Tableau 5 : Taux d'extraction moyen et taux de cendres des différents types de farines (CALVEL 1984).

Types	Taux de cendres (%)	Taux d'extraction (%)	Utilisation
45	Moins de 0.50	67	Pâtisserie
55	De 0.50 à 0.60	75	Pain ordinaire
65	De 0.62 à 0.75	78	Pains spéciaux
80	De 0.75 à 0.90	80-85	Pains spéciaux
110	De 1.00 à 1.20	85-90	Pain bis
150	Plus de 1.40	90-98	Pain complet

La réglementation en vigueur spécifie que le pain français courant doit être fabriqué à partir de farines panifiables. Le type le plus couramment utilisé est le type 55, elle prend en compte les difficultés qu'il y a à panifier des farines trop chargées en éléments de la périphérie des grains, au fur et à mesure des processus de panification, les pâtes obtenues avec des farines à taux de cendre élevé sont grasses, collantes et présentent des défauts de maniabilité ou de machinabilité (GRANDVOINNET, PRATX 1994).

2-3- Les protéines

Les protéines forment 8 à 18 % de la matière sèche du blé : elles sont inégalement réparties entre les différentes couches histologiques du grain, la teneur en protéines de l'albumen amylicé (les futures farines) étant inférieure d'environ 1% à celle du grain. Cette teneur dépend des conditions agro climatiques de développement de la plante, notamment l'alimentation en eau, la fertilisation azotée et des variétés cultivées. C'est à leurs propriétés fonctionnelles très particulières que la farine doit son aptitude à la panification (FEILLET 2000).

La teneur en protéines des farines de blé destinées à la fabrication de produits de cuisson à base de céréales varie de 7.0 à 15.0 % environ. 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 (GODON 1985).

2-3-1- Solubilité et classification

Traditionnellement, les protéines sont classées par leurs caractéristiques de solubilité.

En 1907, Osborne propose une classification des protéines du blé en quatre types, les albumines, les globulines, les prolamines et les gluténines.

a- les albumines : (solubles dans l'eau)

De forme globulaire, les albumines du blé représentent environ 5 à 10 % des protéines totales. Elles sont concentrées surtout dans la périphérie du grain et dans le germe.

b- les globulines : (solubles dans les solutions salines diluées)

De forme globulaire dans le blé, elles représentent 5 à 10 % des protéines totales et se concentrent comme les albumines dans les parties périphériques de la graine.

c- les prolamines ou gliadines : (solubles dans les solutions alcooliques)

Dans le blé, elles représentent 40 à 50 % des protéines totales et se concentrent surtout dans l'albumen ou albumen du grain. On les retrouve dans le gluten et elles apportent à ce produit ses caractéristiques visqueuses (fluidité, extensibilité).

d- Les glutélines ou gluténines : (solubles dans les solutions d'acides ou d'alcalis)

Avec 30 à 40 % des protéines totales, elles assurent au gluten ses caractéristiques élastiques, sa cohésion et sa résistance aux déformations. Leur poids moléculaire peut varier de 100 000 à 3 millions. Comme les gliadines, on les trouve principalement dans l'albumen du grain (DARDE, 2001 ; ROUSSEL, CHIRON 2003).

En 1986, Shewry a proposé une autre classification basée sur le degré de polymérisation et la teneur en acides aminés soufrés des protéines insolubles : les gliadines forment la famille des prolamines monomériques, mélange de chaînes polypeptidiques simples de teneur variable en soufre ; les gluténines sont regroupées dans la famille des prolamines constituées de sous-unités de faible et de haut poids moléculaire, rassemblées au sein d'agrégats par des liaisons disulfures (FEILLET 2000).

2-3-2- Petites protéines riches en cystéine

On trouve au sein de la famille des albumines et globulines des protéines qui échappent aux classifications traditionnelles, se sont les petites protéines riches en cystéine, ou PPRC, riche en soufre et très riche en acides aminés basiques.

Les puro-indolines principalement localisées dans la couche à aleurone dont une partie est mélangée à l'albumen au cours de l'extraction des farines, seraient impliquées dans les mécanismes de formation de la structure alvéolaire de la mie, elles participent à la stabilité des parois (interface gaz/liquide) des alvéoles gazeuses qui se forment dans la pâte au cours du pétrissage et de la fermentation. L'addition de 0.1 % de puro-indolines dans les farines modifie les propriétés rhéologiques des pâtes, le volume du pain et la structure de la mie dont l'alvéolage devient plus fin et régulier (FEILLET 2000).

En générale, les protéines solubles dans l'eau ou dans les solutions salines ont un rôle faible dans les process permettant d'obtenir des produits de cuisson à base de céréales. 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 (GANDVOINNET, PRATX 1994).

2-3-3- Gliadines

Selon la définition d'Osborne (1907), les gliadines sont la fraction soluble dans l'éthanol à 70 % des protéines de la farine, elles sont également solubles dans l'eau, mais à force ionique très faible. Ce sont des protéines monomériques (ce qui les différencie des gluténines, de type polymérique) associées par des liaisons hydrogène et des interactions hydrophobes. Les

différences de migration électrophorétique permettent de répartir les gliadines du blé en quatre familles appelées α , β , γ , ω (GODON 1991).

Des études effectuées par reconstitution de farines avec une teneur plus ou moins grande en fraction gliadine indiquent nettement que les gliadines sont responsables de la composante visqueuse (extensibilité) du comportement viscoélastique du gluten (POMERANZ 1980).

Chez certains individus susceptibles, un peptide (ou des peptides) issu de la digestion des gliadines provoque une réponse immunitaire spécifique localisée dans la muqueuse de l'intestin grêle. La capacité d'absorption de nutriments par la muqueuse diminue, et le syndrome résultant de cette malabsorption est appelé maladie cœliaque. (CHEFTEL et coll. 1985).

2-3-4- Gluténines

Les gluténines sont la fraction des protéines du blé insolubles dans l'eau. Elles représentent 40 à 50 % des protéines totales de la farine. Elles constituent une famille hétérogène de polymères résultant de la polymérisation de sous-unités gluténines de hauts (SG-HPM) et de faibles (SG-FPM) poids moléculaires et forment des agrégats très complexes. L'aptitude des sous-unités gluténines à s'associer par des liaisons disulfures (S-S) est l'un des principaux facteurs du caractère panifiable du blé (DARDE 2001).

a- Sous-unités gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM)

Le poids moléculaire des SG-HPM est compris entre 67 495 et 88 137. Ces protéines doivent leurs propriétés à la présence de résidus cystéines en positions C- et N- terminales et à une région centrale dont la structure, répétitive, contribuerait à l'élasticité du gluten.

b- Sous-unités gluténines de faible poids moléculaire (SG-FPM)

Elles représentent 60 à 80 %, voire 90 % des gluténines, leur masse moléculaire est comprise entre 36 et 44 kDa, elles se caractérisent par une teneur élevée en cystéine et en acides aminés non polaires, ce qui les rend particulièrement hydrophobes.

c- Agrégats gluténines

L'agrégation de très nombreuses unités polypeptidiques élémentaires qui constituent les gluténines s'effectue principalement par l'intermédiaire de liaisons S-S (formation de polymères), de liaisons hydrogène non covalentes et d'interactions hydrophobes pour former des assemblages.

Selon Belton (1999), les SG-HPM pourraient se lier les unes aux autres par des liaisons disulfures et hydrogènes :

- le travail de la pâte favoriserait la formation de liaisons S-S aux extrémités des chaînes polypeptidiques ce qui explique la résistance des pâtes à l'extension. La taille des chaînes ainsi formées dépendrait de la nature et du nombre de sous-unités, et des conditions de développement des pâtes ;

- ces associations pourraient également se réaliser par des liaisons hydrogène, certaines zones resteraient liées entre elles (elles seraient responsables de la formation d'un squelette relativement rigide), d'autres pas (elles donneraient naissance à des boucles déformables). En effet, lorsque de l'eau est ajoutée à la farine, de nombreuses interactions eau/protéines se forment, mais en quantité insuffisante pour rompre la totalité des liaisons hydrogène liant les protéines entre elles : c'est ainsi qu'apparaîtraient les « zones rigides » et les « boucles » (FEILLET 2000).

2-3-5- Gluten

Décrit pour la première fois en 1745 par Jacopo Beccari, le gluten est un matériel viscoélastique obtenu par lixiviation (lavage par l'eau) d'une pâte de blé. Principalement constitué de protéines (75 à 85 % ms selon les conditions de fabrication), il contient également de l'amidon (8 à 10 % ms), des sucres réducteurs (1 à 2 % ms), des lipides (5 à 10 % ms) dont les 2/3 environ sont des lipides polaires, des pentosanes (2 % ms) et des matières minérales (1 % ms) (DACOSTA 1986).

Les études de MARION et coll. (1987) par Résonance Magnétique Nucléaire du phosphore et microscopie électronique avec cryofracture montrent que les lipides se trouvent dans le gluten sous forme de vésicules insérées dans le réseau protéique. Par simple effet stérique, ces vésicules modifieraient l'agrégation des gliadines et des gluténines au cours des traitements technologiques. Le gluten serait alors comme une microémulsion stabilisée par le réseau protéique (GODON 1991).

Les propriétés du gluten deviennent évidentes quand la farine est hydratée, donnant une pâte extensible, avec de bonnes propriétés de rétention de gaz (GALLAGHER et coll. 2004). On peut remarquer que la ténacité (résistance à l'extensibilité) du gluten peut s'expliquer par la présence de nombreuses liaisons covalentes de type disulfure, mais que celles-ci ne permettent pas de rendre compte de son élasticité (retour à l'état initial après déformation). Ce caractère élastique a été récemment attribué à la capacité des domaines répétitifs des SG-HPM de former des liaisons hydrogène (FEILLET 2000).

2-4- Les glucides

En plus des protéines, les farines de blé contiennent divers types de glucides. De l'amidon (78-82 %), des pentosanes 2-3 %), des sucres réducteurs et non réducteurs (2 %), de la cellulose (0.5 %) (FEILLET 2000).

Les sucres les plus simples sont utilisés rapidement par la levure au cours de la fermentation. L'amidon n'est pas utilisé en l'état par la levure, mais après transformation enzymatique. Une partie des pentosanes forme avec l'eau des gels qui ont un rôle dans le comportement de la pâte. Le faible taux de cellulose de la farine utilisée en panification française limite son rôle. Se sont les amidons et les pentosanes qui ont le plus d'importance en panification française (GANDVOINNET, PRATX 1994).

2-4-1- L'amidon

L'amidon est une substance colloïdale à poids moléculaire élevé, contribue au pouvoir absorbant en eau de la farine. Il donne avec l'eau à des températures convenables, des gels plus ou moins visqueux selon les conditions : chauffés avec de l'eau, les granules se gonflent et finissent par former une sorte de gelée très visqueuse appelée « empois d'amidon », la température à laquelle s'opère cette transformation est de 65-67.5 °C (pour une hydratation d'environ 50 %), mais cette température s'élève sensiblement quand l'hydratation diminue, de sorte que dans le pain cuit (hydratation d'environ 40 %) la gélification est incomplète et qu'on retrouve encore un pourcentage non négligeable d'amidons pas ou peu déformés (KIGER, KIGER 1967).

L'action de l'eau sur l'amidon pour donner un empois explique qu'il est formé d'un mélange de deux corps : -l'amylose (26 à 28 %), formée de plusieurs milliers d'unités de glucose reliées en chaînes linéaires, substance amyliacée ne donnant pas de mucilage avec l'eau bouillante où elle est soluble.- l'amylopectine (72 à 74 %), formée de plusieurs centaines de milliers d'unités de glucose reliées en une forêt de ramifications, principe gélatineux facilement hydrolysable, gonflant sans se dissoudre dans l'eau chaude et se gélifiant par refroidissement.

Au cours de la mouture une partie des granules d'amidon est partiellement endommagée. Les lésions permettent la pénétration de l'eau et l'attaque amylasique. Le taux d'amidon lésé d'une farine est lié aux caractéristiques du blé et de la mouture. (GANDVOINNET, PRATX 1994).

L'effet de l'endommagement de l'amidon est simple à analyser, les amylases sont actives dès l'addition de l'eau lors de la fabrication de la pâte. Seule l' α -amylase est capable de dégrader l'amidon natif, mais à des vitesses lentes. Or la fabrication de la farine comporte plusieurs opérations, au cours desquelles les grains d'amidon sont endommagés et avec une fusion cristalline partielle : ils représentent de 5 à 10 % d'une farine classique. Ce taux d'endommagement augmente avec la pression d'écrasement, de même la turboséparation endommage l'amidon d'autant plus que les fractions obtenues sont fines (GODON 1991).

Au cours de la fermentation et de la cuisson, l'amidon est transformé par les α -amylases présentes dans la farine, celle de la levure et par les β -amylases, en dextrines et sucres assimilables (GANDVOINET, PRATX 1994).

La fermentation de la pâte et surtout la production de CO_2 sont liées à la présence d'oses fermentescibles, avec une vitesse de transformation plus lente pour le maltose que pour le glucose. Les dextrines contribuent au goût caractéristique de la mie, à la coloration et à la flaveur de la croûte par les réactions de caramélisation et les réactions de Maillard. (GODON 1991).

Une activité α -amylasique excessive a des effets importants sur la capacité d'absorption d'eau de la pâte et la fermeté du pain. Des activités excessives entraînent une surproduction de dextrines conduisant à des mies collantes, avec des alvéoles très grandes et une croûte fortement colorée (POMERANZ 1978). L'action des amylases dans la pâte est modulée par les paramètres du milieu : état d'endommagement de l'amidon, température et degré d'hydratation de la pâte (REICCHELT 1983, DRAPRON et GODON 1987).

Le ratio des deux activités α - et β -amylasiques a une forte influence sur la qualité du pain. S'il y a un excès d' α -amylase par rapport à la β -amylase, celle-ci ne pourra pas hydrolyser toutes les dextrines, ce qui donnera des surfaces alvéolaires collantes. Dans le cas inverse, les dextrines contribuent à donner une couleur rougeâtre à la croûte (GODON 1991).

- **Rôle de l'amidon en panification**

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 ;
- c'est également un fixateur d'eau. On admet que l'amidon absorbe environ 45 % de l'eau ajoutée à la farine ;
- c'est enfin une charge de remplissage assurant une fonction de dilution du gluten.

Par son pouvoir fixateur d'eau, variable selon le degré d'endommagement des granules, et sa capacité à former des liaisons non-covalantes (liaisons hydrogène) avec les protéines, l'amidon contribue de manière active à la formation de la pâte. Les interactions qui se développent entre l'amidon et les protéines du gluten peuvent modifier les propriétés des pâtes : les glutens de qualité inférieure inter réagiraient plus énergétiquement avec l'amidon et, de ce fait, s'étireraient plus difficilement sous la poussée gazeuse. A l'inverse, les interactions plus faibles qui se forment entre l'amidon et les protéines des farines de qualité supérieure seraient un facteur favorable à un volume de pain élevé (FEILLET 2000).

Enfin, il ressort de travaux d'Eliasson et coll. (1995) que l'aptitude à la panification des amidons de blé serait d'autant meilleure que leur température de gélatinisation est élevée : ce phénomène a été expliqué en supposant que la prise de volume du pain dans le four s'arrête au moment où l'amidon est gélatinisé et que le pain se développe d'autant plus que la gélatinisation est tardive.

2-4-2- Les pentosanes

Les Pentosanes sont des polysaccharides non amyliques constitutifs des parois végétales ; principaux constituants des parois cellulaires de l'albumen (70 à 80 %), ils représentent 6 à 8 % du gluten et 2 à 3 % de la farine. On les subdivise en pentosanes solubles (1/3 des pentosanes totaux) et en pentosanes insolubles en fonction de leur solubilité dans l'eau froide, ou en arabinoxylanes (pentosanes *stricto sensu*) et en arabinogalactanes selon que leur squelette est constitué d'unités D-xylose ou D-galactose. (DUBOIS 1994).

- Les pentosanes solubles qui possèdent une forte capacité de rétention d'eau, sont plus abondants dans l'albumen (30 à 40 % des pentosanes totaux). En solution dans l'eau, ils possèdent une viscosité élevée, 95 % de la viscosité d'un extrait aqueux de farine leur est imputable.
- Les pentosanes insolubles dans l'eau proviennent de fragments d'enveloppes du grain, ils sont partiellement solubles en milieu alcalin. Leur teneur est d'autant plus élevée que les farines sont peu purifiées (FEILLET et coll. 1994).

Les pentosanes sont les molécules les plus hydrophiles de la pâte, ils forment des solutions très visqueuses avec l'eau du fait de la présence des arabinoxylanes. L'acide ferulique intervient dans les mécanismes d'oxydation et crée des liaisons entre les polysaccharides et les protéines. Ces entités de haut poids moléculaire participent à la consistance et à la viscosité de la pâte, améliorent la rétention gazeuse donc le volume du pain (GANDVOINET, PRATX 1994).

- **Rôle des pentosanes en panification**

La quantité d'eau fixée par les pentosanes dépendrait des conditions de pétrissage : 15 et 20 % de l'eau présente dans la pâte, environ 18 % dans les meilleures conditions de pétrissage.

Les pentosanes insolubles favorisent une prise d'eau initiale hétérogène et trop importante : les protéines du gluten seraient à leur tour inégalement hydratées et le réseau protéique ne pourrait se former dans des conditions optimales. Par contre, les pentosanes insolubles retarderaient le rassissement de la mie de pain.

Les pentosanes solubles sont capables de fixer l'eau au sein de la pâte de manière uniforme. Au cours du pétrissage, ils tiennent à disposition des protéines du gluten la quantité d'eau nécessaire à la formation du réseau protéique, simultanément ils fixent l'eau en excès et empêchent la pâte de coller. De plus, ils limiteraient la diffusion du gaz carbonique et participeraient ainsi à un meilleur développement du pain (FEILLET et coll. 1994 ; WANG et coll. 2003).

- L'addition de pentosanes (1 à 2 %) à la pâte immobilise l'eau libre, rend la pâte plus ferme, augmente le temps de pétrissage nécessaire pour atteindre une consistance donnée et modifie la quantité d'énergie requise pour atteindre le développement optimal de la pâte ;

- Utilisées de manière contrôlée, certaines endoxylanases solubilisent les pentosanes insolubles et leur confèrent certaines des propriétés des pentosanes solubles ; l'hydrolyse enzymatique doit être conduite de manière à éviter une dépolymérisation trop poussée de ces derniers pour leur conserver un pouvoir viscosifiant élevé (FEILLET, 2000).

2-5- Les lipides et leur importance

On estime que 20 à 30 % des lipides de la farine, selon le mode de conduite de la mouture, sont issus du germe et de la couche à aleurone, les 70-80 % résiduels provenant de l'albumen. Les triglycérides (lipides non polaires) représentent la majeure part des lipides liés ; les glycolipides et les phospholipides (lipides polaires) constituent l'essentiel des lipides libres (figure 1) (POMERANZ 1983).

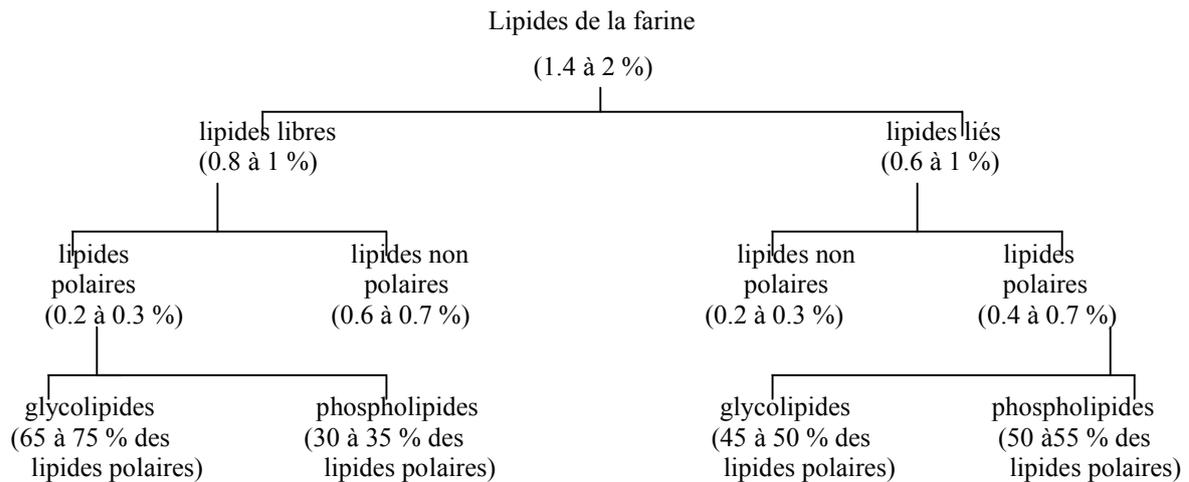


Figure 1 : Composition en lipides libres et en lipides liés de la farine.

- **Modification de la composition lipidique au cours du pétrissage et de la fermentation**

Dès que la farine est hydratée, les lipides libres forment des complexes avec les protéines de la farine, puis ce phénomène s'accroît au cours du pétrissage jusqu'à ce que les 2/3 des lipides libres deviennent insolubles dans les solvants polaires (tableau 6) (FEILLET 2000).

Tableau 6 : Modification de la solubilité des lipides de la farine au cours du pétrissage.

Durée du pétrissage (min)	Lipides libres (% farine)	Lipides liés (% farine)
0	0.9	1.1
1.8	0.5	1.6
14.2	0.4	1.6

Ces modifications s'expliquent en partie par le développement d'interactions complexes entre les lipides et les protéines.

Au cours du pétrissage, les liaisons hydrophiles existant entre l'amidon et les lipides polaires sont rompues, tandis que ces derniers s'associent aux protéines. Les lipides polaires seraient liés à la gliadine et à la gluténine par des liaisons hydrogène et des interactions hydrophobes ; les lipides polaires se lieraient à tous les constituants protéiques par des liaisons de type hydrophobe (FEILLET et coll. 1994).

La quantité de lipides totaux et les proportions des familles lipidiques évoluent peu au cours de la fermentation, à l'exception des glycolipides dont la teneur s'accroît fortement (CHARGELEGUE et coll. 1994).

- **Rôle des lipides en panification**

Bien que leur teneur dans la farine 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, au cours du pétrissage :

- l'oxydation des acides gras poly-insaturés, catalysée par la lipoxigénase, 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 (FEILLET 2000).

Le premier des phénomènes agit sur les propriétés rhéologiques de la pâte, les qualités plastiques du gluten sont renforcées et la pâte montre une tolérance plus grande aux différentes phases de la panification, en même temps les pigments caroténoïdes de la farine sont oxydés entraînant la décoloration de la pâte.

Le second sur la formation et la stabilité des alvéoles de gaz dans la pâte, les lipides polaires (glycolipides et phospholipides) stabilisent les alvéoles gazeuses de la pâte et améliorent le volume du pain, alors que les lipides non polaires (triglycérides) exercent un effet négatif (GANDVOINNET, PRATX 1994).

Les lipides libres agissent principalement sur la viscosité des pâtes et sur leur temps de relaxation ; ils affectent peu l'élasticité. Très bons agents moussants, les glycolipides et les phospholipides très polaires contribueraient à l'accroissement du volume du pain. Les composés de polarité intermédiaire (acides gras libres, monoglycérides, monogalactosyldiglycérides) auraient, à l'inverse, un pouvoir anti-moussant (FEILLET 2000).

3- Propriétés rhéologiques des pâtes

La rhéologie est l'étude des déformations (des écoulements) de la matière, elle est très développée dans le domaine des matériaux. La rhéologie alimentaire est alors l'extension de cette notion aux produits alimentaires.

La détermination des propriétés rhéologiques d'un matériau consiste à mesurer sa déformation γ (strain) et/ou sa vitesse de déformation (strain rate) en fonction de la contrainte σ (stress) à laquelle il est soumis (COUARRAZE, GROSSIORD 1991).

Une pâte boulangère, biscuitière ou pâtissière, est en effet un système rhéologique très complexe possédant à la fois les propriétés d'un solide (composante élastique) et celle d'un liquide (composante visqueuse), c'est un matériau viscoélastique comme le sont, d'une manière générale, les polymères.

La pâte subit une série de déformations dont la nature et l'intensité diffèrent d'une étape à l'autre de la panification, la mesure de l'évolution des propriétés rhéologiques de la pâte est particulièrement importante pour optimiser les conditions de fabrication et la qualité du pain (FEILLET 2000).

Les propriétés rhéologiques des pâtes, et plus précisément leurs propriétés viscoélastiques, sont déterminées en mesurant les déformations qu'elles subissent sous l'effet de contraintes contrôlées (et inversement). Les méthodes de référence reposent sur des mesures en régime dynamique oscillatoire, ce pendant, les méthodes traditionnelles empiriques sont toujours très largement en vigueur, même si leur interprétation est souvent malaisée. (ROUDOT 2002).

3-1- Mesure par déformation dynamique oscillatoire

Ces mesures sont les plus adaptées à la détermination des propriétés rhéologiques d'une pâte, elles sont effectuées selon l'un des dispositifs suivants :

-*dynamomètre plan/plan* : l'échantillon est placé entre deux plaques. La plaque inférieure, fixe, sert de support. La plaque supérieure, mobile exerce sur l'échantillon une contrainte de valeur connue; elle est animée d'un mouvement oscillatoire d'amplitude et de fréquence fixée par l'examineur.

-*dynamomètre cône/plan* : la mesure diffère de la précédente par le remplacement de la plaque supérieure par un cône dont la géométrie est choisie en fonction de la nature des échantillons à analyser. Ce dispositif est plus adapté que le précédent à la mesure des propriétés rhéologiques des pâtes car le cisaillement est homogène dans tout l'échantillon. (COUSSOT, ANCY 1999).

Dans les deux cas, soit on impose une contrainte de cisaillement à l'échantillon et on mesure la déformation de cisaillement à l'aide d'un capteur de déplacement angulaire, ou la vitesse de déformation à l'aide d'un disque de mesure tachymétrique solidaire du mobile; soit on impose la déformation et on mesure le couple (ROUDOT 2002).

3-2- Caractérisation empirique des propriétés rhéologiques des pâtes

De nombreuses méthodes de caractérisation empirique de la pâte par mesure de grandeurs reliées de manière non explicite aux propriétés rhéologique de la pâte ont été développés (elles sont qualifiées, par abus de langage, de rhéologique), il s'agit de mesures relatives et non absolues.

L'alvéographe est l'un des appareils utilisés pour effectuer ce type de mesures, il permet d'apprécier l'état de la pâte après pétrissage, il repose sur l'appréciation de la résistance à la déformation d'un disque de pâte soumis à une extension biaxiale. 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 du gaz carbonique et la cuisson (FEILLET 2000).

4- Etapes de panification

Le pain est le résultat de transformations physiques, de réactions chimiques et d'activités biologiques très complexes qui se produisent au sein d'un mélange de farine (100g), d'eau (60g), de sel (2g) et de levure (2g), et parfois de quelques autres ingrédients, sous l'action d'un apport contrôlé d'énergie mécanique et thermique (ROUSSEL, CHIRON 2003 ; LEVAVASSEUR 2007).

La fabrication du pain comporte les étapes suivantes :

- l'obtention d'une pâte de consistance déterminée, par pétrissage d'eau et de farine en présence d'air ;
- une première fermentation, ou pointage, au cours de la quelle les levures se multiplient ;
- des opérations mécaniques de pesée, division de la pâte et façonnage des pâtons ;
- une seconde fermentation ou apprêt, qui permet l'expansion en volume de la pâte ;
- la transformation de la pâte fermentée en pain, par enfournement dans un four dont la température est fixée à 250 °C (FEILLET 2000).

4-1- Le pétrissage

Première étape de la fabrication du pain, le pétrissage est une opération dont la bonne conduite conditionne la qualité des produits finis. Il permet de former une pâte homogène, lisse, tenace et viscoélastique à partir de ses deux constituants principaux que sont la farine et l'eau, et au sein de laquelle l'amidon, le gluten et l'air occuperaient respectivement 60, 30 et 10 % du volume total. Au cours de cette opération, la pâte est soumise à des forces intenses d'extension, de compression et de cisaillement (FEILLET et coll. 1994).

Du pétrissage à l'ancienne que l'on appelle souvent « conventionnel », on est passé à « l'intensifié » ou méthode « pain blanc ». Ces dernières années de nombreux professionnels sont revenus à des pratiques modérées ou intermédiaires avec le pétrissage amélioré (tableau 7). Pour une qualité donnée, le boulanger a donc un choix possible dans la définition de l'intensité énergétique qu'il veut appliquer à la pâte. Les caractéristiques des matières premières doivent être adaptées à ce choix (ROUSSEL, CHIRON 2003).

Tableau 7 : Diagrammes comparatifs entre les principales techniques de pétrissage des pâtes de pain à base de farine de blé.

	Étape de fabrication	Types de pétrissage		
		conventionnel	amélioré	intensifié
Formule	Farine	100	100	100
	Eau	61-63	60-61	60-61
	Sel	1.8-2.0	1.8-2.0	2.2-2.3
	Levure	1-1.5	1.5-2.0	2.0-3.0
	Acide ascorbique	0	10 à 20 ppm	20 à 80 ppm
Pétrissage	Vitesse lente (40 tr/min)	12-15 min	2-3 min	2-3 min
	Vitesse rapide (80 tr/min)	0 min	10-12 min	18-20 min
Pointage	Fermentation en cuve	3 h - 3 h 30	1 h-1 h 30	5-20 min
Apprêt	25 à 27 °C	1 h 10 – 1 h 20		

• **Transformation physico-chimique de la pâte**

Le pétrissage remplit deux fonctions essentielles à la poursuite de la panification :

- la formation d'un produit viscoélastique par dispersion et solubilisation des constituants, sorption de l'eau, cisaillement et déformation élongationnelles, formation de liaisons covalentes et non covalentes entre les constituants, création de nouvelles structures orientées ;
- l'incorporation de mini-alvéoles d'air au sein de la pâte.

a- développement d'un réseau protéique

Des fibrilles protéiques très extensibles, probablement de type gliadine, se forment dès que l'eau vient en contact de la farine. Ensuite, les phénomènes suivants provoquent une transformation physico-chimique profonde du système réactionnel : (ROUSSEL, CHIRON 2003)

- réarrangement des configurations spatiales des protéines ;
- formation de liaisons non covalentes entre les protéines et avec d'autres constituants de la farine ;
- rupture et reformation de liaison disulfures ;
- apparition d'un réseau protéique complexe.

Il a été suggéré que les interactions entre les gliadines et les gluténines, éléments déterminant du niveau de pétrissage, seraient facilitées par l'addition de sel (NaCl 2 %) : les

nouvelles liaisons inter- et intramoléculaires entre les protéines du gluten seraient responsables de l'accroissement de la force de la pâte. De plus, l'augmentation de la force ionique diminue la capacité de rétention d'eau et la viscosité des pentosanes solubles.

b- Rôle de l'eau

L'eau possède des propriétés plastifiantes et au fur et à mesure qu'elle est ajoutée à la farine : les protéines passent d'un état vitreux à un état caoutchouteux en franchissant leur température de transition vitreuse (T_g), l'eau participe également aux réactions qui se produisent dans la pâte.

L'augmentation de la consistance de la pâte au cours du pétrissage, avant destruction du réseau protéique et après consistance maximale, s'explique en partie par une fixation progressive de l'eau sur les constituants de la farine et donc par diminution de l'eau libre responsable de la fluidité de la pâte : au-delà, une partie de l'eau est relarguée et la pâte devient collante (CALVEL 1984).

Les particules de farine s'hydratent d'autant plus aisément et rapidement qu'elles sont de petite dimension, les molécules les plus petites et les plus solubles passent en solution tandis que les protéines subissent des changements dans leur conformation (les régions hydrophobes se tournent vers l'intérieur des molécules).

Par ailleurs, une hydratation élevée améliore la conservation des pains en retardant leur rassissement et rend la mie souple et finement alvéolée (FEILLET et coll. 1994).

c- Notion de transition vitreuse

En raison du pouvoir plastifiant de l'eau, l'hydratation des farines a pour effet d'abaisser les températures auxquelles les macropolymères des farines, protéines et amidon en particulier, passant d'un état rigide à un état caoutchouteux.

A une température inférieure à la température dite de transition vitreuse (T_g), les polymères sont rigides et cassants et se comportent comme un solide élastique ; au-delà de cette température, ils deviennent souples et caoutchouteux et acquièrent des propriétés viscoélastiques. Cette transition est induite par des variations de températures ou par la présence de molécules plastifiantes, l'eau en particulier, qui ont pour propriété d'accroître la mobilité des macromolécules et donc de diminuer la valeur de T_g (FEILLET 2000).

d- Apparition d'un caractère collant

En début de pétrissage, et peu après que l'eau a été ajoutée à la farine, la pâte en cours de formation est extrêmement collante, ce caractère diminue progressivement au fur et à mesure que

la pâte se développe, jusqu'à disparaître totalement avec les farines de bonne qualité quand elle atteint son stade optimum de formation, il réapparaît si le pétrissage est prolongé au-delà. On considère que ce phénomène est associé aux proportions respectives d'eau liée dans la pâte qu'un excès d'eau libre serait la cause première de ce caractère (CALVEL 1984).

La quantité et la nature des protéines, les quantités et les proportions de pentosanes solubles et insolubles, ainsi que le taux d'amidon endommagé sont autant de paramètres qui doivent être pris en compte. Endommagé, les granules d'amidon fixent de l'eau, gonflent et subissent une hydrolyse partielle par l' α -amylase, il peut y avoir libération de dextrans et apparition d'une pâte collante, en particulier lorsque la teneur en α -amylase est élevée (FEILLET 2000).

e- **Microporosité et alvéoles gazeuses dans la pâte**

Lors du pétrissage, de l'air est incorporé à la pâte. Une partie se dissout dans la phase aqueuse, l'autre forme des microbulles de gaz qui constituent le noyau des futures alvéoles du pain où une partie de gaz carbonique produit par les levures va s'accumuler (BAKER, MIZE 1941).

Protéines, lipides et pentosanes contribuent aux propriétés des parois des alvéoles :

- la paroi des alvéoles gazeuses de la pâte est formée d'une matrice protéique recouverte d'un film liquide contenant un matériel tensio-actif ; aussi la rupture de cette matrice sous la poussée gazeuse ne provoque pas l'échappement des gaz si le film est conservé (GAN et coll. 1990).
- La capacité de la rétention gazeuse de la pâte ne devient importante que lorsque le réseau protéique se met en place. Cependant, le gluten ne suffit pas à lui seul pour permettre une bonne rétention gazeuse des pâtes. Plus la pâte est visqueuse (quantité de dextrans et d'arabinoxylanes solubles) plus l'incorporation de gaz y est difficile mais meilleure est la rétention gazeuse.
- Les lipides de la farine contiennent de nombreuses fractions de pouvoir moussant et émulsifiant divers. Ils contribuent de ce fait à la stabilisation de la structure foisonnante de la pâte (MACRITCHIE, GRAS 1973).

4-2- La fermentation

Saccharomyces cerevisiae est l'espèce de levure de très loin la plus utilisée en fermentation panariaire, en *anaérobiose*, lorsqu'elles ne disposent pas ou guère d'oxygène (ce qui est le cas dans une pâte), les levures se multiplient difficilement, utilisent les sucres pour produire l'énergie dont elles ont besoin pour maintenir leur activité et transforment près de 95 % en éthanol et en gaz carbonique : il y a fermentation (CALVEL 1984).



Les monosaccharides, sucres simples à 6 atomes de carbone (tels que glucose, fructose, galactose), sont utilisés préférentiellement par *S. cerevisiae*, les disaccharides ne peuvent être assimilés qu'après avoir subi une hydrolyse enzymatique :

- le saccharose préexistant dans la farine ou rajouté dans la formule, est transformé en glucose et fructose par l'invertase de la levure.
- le maltose, qui provient pour l'essentiel de la conversion de l'amidon par les α et β amylases de la farine, est scindé en 2 molécules de glucose par la maltase qui est une enzyme intracellulaire (B.POITRENAUD 1994).

La fermentation comprend en principe deux étapes :

- la première fermentation, ou pointage, se déroule de la fin de pétrissage jusqu'au façonnage des pâtons ;
- deuxième fermentation (apprêt) va du façonnage à la mise au four des pâtons.

La conduite de la fermentation (durée, température, phases de repos de la pâte) a suivi l'évolution des modes de pétrissage et est allée dans le sens d'une simplification du travail des boulangers. La méthode dite de pousse contrôlée s'est progressivement imposée après avoir supplanté la méthode dite de pousse lente : la pâte est placée dans une chambre froide, ce qui a pour effet de bloquer totalement l'activité fermentaire ; il est alors possible de programmer l'heure de remise en température chaude et donc la reprise de la fermentation. (P. FEILLET, 2000). La fermentation panair assure trois fonctions principales :

4-2-1- Levée de la pâte

Quelques minutes après la fin du pétrissage, tout l'oxygène introduit aura été consommé par la levure dont le métabolisme s'orientera vers la fermentation. Le gaz carbonique produit se dissoudra d'abord dans l'eau libre de la pâte. Arrivé à saturation il s'accumulera sous forme gazeuse pour exercer une pression interne sur le réseau imperméable du gluten. Celui-ci, élastique et extensible, permettra à la pâte de lever tout en maintenant une structure externe (CALVEL 1984).

4-2-2- Acidification et production d'arômes

La formation d'acide carbonique et d'acides organiques conduit à un abaissement du pH et à une augmentation de l'acidité titrable de la pâte au cours de la fermentation, malgré le fort pouvoir tampon des protéines de la farine.

L'alcool formé, l'abaissement du pH, les métabolites issus des fermentations secondaires participent directement ou en tant que précurseurs au développement du goût et des arômes du pain (BURE 1979).

4-2-3- Rhéologie de la pâte

Indépendamment des modifications physiques qu'elle subit durant les différentes opérations de pétrissage, division, boulage, ou façonnage, la pâte voit ses propriétés viscoélastiques se transformer tout au long de la fermentation. C'est la prise de force de la pâte qui correspond à une réduction de l'extensibilité du gluten associée à une augmentation de sa résistance élastique.

Les causes sont connues, il s'agit :

- d'une part, d'un effet purement mécanique résultant du développement du gluten, à savoir son extension et son organisation en un réseau tridimensionnel, sous la poussée gazeuse ;
- d'autre part, de la formation de liaisons physico-chimiques, renforçant la cohésion du réseau glutineux. L'abaissement du pH, les réactions avec les différents métabolites produits par les fermentations secondaires, les variations de tensions interfaciales entre les différentes phases de la pâte semblent intervenir dans ces phénomènes. (CHARGELEGUE et coll. 1994).

4-3- Les opérations mécaniques

Le façonnage contribue, avec le boulage et la détente à reformer une structure continue en surface de la pâte, perdue lors de la division, de manière à minimiser la perte de gaz ; il rend également la pâte plus malléable en recréant stabilité et élasticité (HLYNKA 1970). Le façonnage permet de conférer à la pâte la forme qui déterminera celle du produit fini, il peut être manuel ou mécanique.

C'est une opération délicate, surtout en panification de pain français où les pâtes demandent à être manipulées avec douceur pour ne pas dégrader une structure qui, même avec une farine de qualité, reste fragile à cause de sa consistance molle, mais doit cependant être suffisamment serrée pour éviter le relâchement et le manque de force (FEILLET et coll. 1994).

4-4- La cuisson

La cuisson résulte d'un échange de chaleur entre l'atmosphère du four et le produit à cuire. Elle se caractérise par une expansion et une transformation physico-chimique de la pâte sous l'action de la chaleur (énergie calorifique ou thermique). Ces modifications assurent, par rapport aux produits non cuits, une qualité organoleptique supérieure, une meilleure aptitude à la conservation pour les produits de panification et une meilleure digestibilité. Les variations qualitatives apportées dépendent des conditions et de la conduite de cuisson par le boulanger (ROUSSEL, CHIRON 2003).

Le pain français est cuit directement sur la sole du four, l'atmosphère de la chambre de cuisson doit être saturée de vapeur d'eau (buée) qui a pour rôle d'éviter le croustade prématuré du pain, faciliter la coloration brillante et limiter les pertes de poids. La durée de cuisson varie avec le poids et la forme du pain (de 12 minutes pour les petits pains aux 50 minutes pour les gros pains) (FRANCOIS et coll. 1994).

Une fois la pâte fermentée introduite dans le four (dont la température est réglée à 250°C), les événements physico-chimiques suivants se produisent : (CALVEL 1984 ; FEILLET 2000).

- Le volume du pain augmente brutalement par dilatation des gaz contenus dans les alvéoles puis, plus progressivement, jusqu'à ce que les levures soient inactivées (55°C). La dilatation des alvéoles peut devenir très importante au-dessus de 70°C, dans la mesure où les contraintes exercées par la pâte ne s'opposent pas à leur expansion (100°C) bien que la mie commence à se figer :

- L'alcool formé au cours de la fermentation se vaporise dans l'air ambiant :

- Dans la mie, les enzymes sont inactivés (l' α -amylase est détruite à 70°C), l'amidon gélatinisé (entre 65 et 80°C) et les protéines thermorigidifiées (elles « coagulent » entre 70 et 90°C). Les matières grasses contribuent momentanément à la stabilité des alvéoles gazeuses ;

- La croûte commence à se former vers 90°C, se solidifie au fur et à mesure que la température de la surface extérieure du pain se rapproche de sa température finale (220°C). Se développent simultanément des réactions de Maillard qui se traduisent par l'apparition de la couleur caractéristique de la croûte ;

- Une partie des alcools et des acides volatils est engagée dans la réaction d'estérification et renforce l'odeur de la mie. Des décompositions thermiques peuvent également intervenir, ce qui engendre un début de caramélisation.

La perte d'eau au cours de la cuisson varie avec la taille et la forme des pains : seule la croûte se dessèche, la teneur en eau de la mie restant peu inférieure à celle de la pâte. Globalement, la teneur en eau s'établit entre 20 et 25 % pour les baguettes. Au cours du ressuage, une nouvelle perte en eau de l'ordre de 1 à 2% se produit.

1- Les matières premières de l'étude

I-I- Le riz

Le riz « *Oryza sativa* » utilisé est un riz blanchi d'origine espagnole (société HERBA RICE MILLS, S.L) récolté en 2006, il est acheté du commerce conditionné dans des sachées de 1kg. Ses caractéristiques dimensionnelles mesurées sur cinq lots de 10 grains pris au hasard sont : une longueur moyenne de 6.2 ± 1.2 mm, une largeur moyenne de 2 ± 0.6 mm. Le rapport entre la longueur et la largeur du grain est supérieur à 3, selon la FAO (1996) notre échantillon est un riz à grain long.

1-2- Les légumes secs

Les légumes secs utilisés (féverole, pois chiche et pois protéagineux) sont de production algérienne, de variétés connues, récoltés et fournis par la station expérimentale de l'Institut Technologique des Grandes Cultures (I.T.G.C.) de Guelma. Leurs caractéristiques dimensionnelles sont mesurées à l'aide d'un pied de coulisse sur cinq lots de dix grains pris au hasard (figure 2).

1-2-1- La féverole

La féverole, *Vicia faba minor*, ou *equira*, est un produit appartenant à la variété SIDI AICH G1 et récolté en 2002, de couleur marron foncé et de forme presque ovoïde. Les grains ont une longueur moyenne de 9.9 ± 1.4 mm et une largeur moyenne 8.8 ± 0.2 mm.

1-2-2- Le pois chiche

Le pois chiche, *Cicer arietinum*, utilisé est un produit récolté en 2002 et appartient à la variété FLIP-9-13C-G1, il a une forme anguleuse et une couleur beige, son diamètre moyen est de 8.5 ± 0.2 mm.

1-2-3- Le pois protéagineux

Le pois protéagineux, *Pisum arvense*, utilisé est récolté en 2001. Il appartient à la variété MESSIRE G2, de grains lisses, de couleur jaune pâle et de diamètre moyen de : 6.8 ± 0.2 mm.



Photo 01 : Féverole



Photo 02 : Pois chiche



Photo 03 : Pois protéagineux

Figure 02 : Echantillons des trois légumes secs de l'étude.

1-3- La levure boulangère

La levure boulangère, *Saccaromyces cerevisiae*, utilisée est de marque Saf- instant produite en France par : S.I. Le saffre, importée et distribuée par : COALA (Algérie). Le produit sous forme de petites granules sèches est conditionné sous vide en paquets de 500g.

1-4- Le sel

Le sel utilisé est un sel de cuisine iodé produit par IKOsel (El-Oued, Algérie) et conditionné dans un paquet de plastique de 1kg.

1-5- L'eau d'hydratation

Pour tous les essais et les préparations, l'eau utilisée est une eau distillée à $\text{pH} = 5.9 \pm 0.3$.

1-6- La farine témoin

Une farine de blé tendre, *Triticum aestivum*, est choisie comme témoin auquel les caractéristiques des différentes formules sont à comparer.

La farine témoin utilisée est un produit de mouture des blés de mélange dont nous ignorons les variétés. Avec un taux d'extraction qui varie entre 75 et 76 %, elle est destinée à la préparation du pain ordinaire. Cette farine est issue des moulins Beni- Haroun de Grarem wilaya de Mila en avril 2006. Elle est conditionnée dans un sac en papier de 2 kg et conservée dans un endroit sec à température ambiante.

2-Les traitements préliminaires des matières premières

- **Le triage**

Les matières premières (riz, féverole, pois chiche, pois protéagineux) sont tout d'abord triées manuellement dans le but d'éliminer les différents déchets qu'elles contiennent (grains endommagés, débris de plantes, cailloux, etc....).

La féverole a subi en plus, un trempage dans l'eau à température ambiante pendant une durée de 5h (faciliter le décorticage et le dégermage manuel des grains) et un séchage à l'air libre avant d'être broyée.

- **L'étuvage du riz**

L'opération de l'étuvage a lieu dans un autoclave de marque SAMOclav (France). Il peut atteindre une température maximale de 160°C et une pression maximale de 4 bars et est muni sur son couvercle d'un thermomètre et d'un manomètre.

Après rinçage et égouttage, le riz est soumis à l'étuvage. Le temps et la température nécessaires sont fixés sur la base des essais préliminaires, pour donner un riz étuvé (avoir le centre du grain complètement translucide à l'examen sous binoculaire).

Le riz est étuvé à $122 \pm 2^\circ\text{C}$ (équivalent d'une pression de 1.5 bar) pendant 20min. Pour homogénéiser l'étuvage des grains, le riz est étuvé pendant 10min puis les grains sont sortis de l'autoclave, remués dans un récipient et sont de nouveau étuvés pendant 10min.

- **Le séchage du riz**

Le séchoir utilisé (de marque Maxel, type MC-100) est une armoire fonctionnant en discontinu par ventilation d'air chaud entre les supports des étagères où sont disposés les échantillons à sécher.

Le riz étuvé est étalé sur la surface des étagères du sécheur et le séchage se déroule pendant 4h à $45 \pm 2^\circ\text{C}$.

- **Le broyage et le tamisage**

Le riz, étuvé ou non, et les légumes secs sont broyés dans un broyeur électrique à meules (de marque UMA Rouiba, Algérie, type MG E3 à 3 chevaux et à 1410 tr / min).

Les particules résultantes des matières premières sont tamisées manuellement à travers un tamis d'ouverture de mailles 200µm. La granulométrie ($< 200\mu\text{m}$) est exigée pour la fabrication de la farine de blé tendre (FAO 1996). Deux fractions de produits sont obtenues :

- le passant du tamis ($< 200\mu\text{m}$) considéré comme farine, conditionné dans des sacs en fibres synthétiques, conservé à température ambiante dans un endroit sec.
- le refus du tamis qui n'est pas utilisé.

3 – Les analyses physicochimiques des matières premières

3-1- L'humidité

L'humidité des farines est déterminée selon la norme AFNOR NF VO3-707 de juin 1989 (AFNOR 1991). La dessiccation a lieu dans une étuve de marque MEMMERT. Une prise d'essai de 5 ± 0.001 g est séchée à $130 \pm 3^\circ\text{C}$ jusqu'à poids constant. La teneur en eau est exprimée en % du produit humide : $H = (m_1/m_0) \cdot 100$

Où : H : humidité en % ;

m_0 : masse en gramme de la prise d'essai ;

m_1 : masse en gramme de la prise d'essai après séchage.

3-2- Les cendres

Une prise d'essai de $3 \pm 0,001$ g est incinérée dans un four à moufle de marque (HERAEUS M110) :

- à 900°C pour la farine de blé et produits de mouture du riz (norme AFNOR NF VO3-720 de décembre 1981 (AFNOR 1991) ;

- à 550°C pour produits de mouture des légumes secs (norme AFNOR NF VO3-760 de décembre 1981 (AFNOR 1991).

Le temps d'incinération est fixé à 2h. Le taux des cendres (C) est exprimé en g pour 100g de produit sec : $C = (M_0 - M_1) \cdot (100/pe) \cdot [100 / (100 - H)]$

Où : M_0 : masse en gramme de la nacelle, couvercle + le résidu après incinération ;

M_1 : masse en gramme de la nacelle + couvercle ;

pe : prise d'essai en gramme ;

H : teneur en eau de l'échantillon en % de la matière humide.

3-3- Les protéines totales

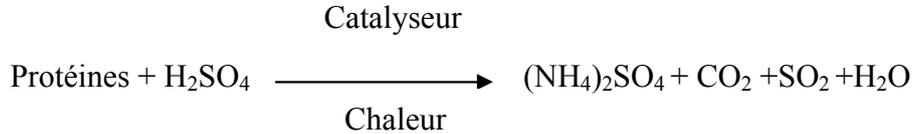
Le dosage des protéines est réalisé par la détermination de l'azote total selon la norme AFNOR. N.F. V03-050 par la méthode de KJELDAHL (AFNOR 1991). Le coefficient de conversion de l'azote total en protéines est de 5.7 pour les farines de blé et de riz (BAR 1995, FAO 1996), et 6.25 pour les légumes secs (GUEGUEN et LEMARIE 1996, FAO 1996).

Le principe de la méthode consiste en une minéralisation à chaud de la matière organique par l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur, une alcalinisation des produits de la réaction (sulfate d'ammonium) par la lessive de soude concentrée, une fixation de l'ammoniac entraîné par la vapeur par l'acide borique et une titration par l'acide sulfurique.

La méthode comporte les étapes suivantes :

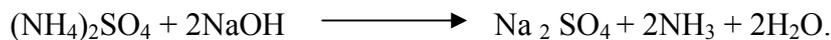
- **La minéralisation**

Sous l'effet de la chaleur, l'acide sulfurique concentré (95%, d = 1.83) en présence de catalyseur oxyde et détruit la matière organique, l'azote organique est transformé en sulfate d'ammonium.



- **La distillation**

Le minéralisât est alcalinisé par de la soude NaOH (10N) et l'ammoniac est libéré de son sel.



Au cours de la distillation, les molécules d'ammoniac (NH₃) libérés sont entraînées par la vapeur et fixées dans une solution de volume connu d'acide borique (4 %).

- **La titration**

Le distillat récupéré est titré par l'acide sulfurique (0,01 N) en présence d'un indicateur coloré (rouge de méthyle). Le titrage soit complet au virage de la couleur du jaune au rose. La teneur en azote total (N) est exprimée en g pour 100g de produit humide :

$$\mathbf{N = (A.V/pe).100}$$

Où : A : quantité d'azote en gramme neutralisée par 1 ml de solution de H₂SO₄

à 0.01 et est égale à 0,0014g ;

V : volume de H₂SO₄ versé à la titration en ml ;

pe : prise d'essai en gramme.

La teneur en protéines (P) est exprimée en pourcentage par rapport à la matière sèche :

$$\mathbf{P = (N.K / 100-H).100}$$

Où : N : teneur en azote en % du produit ;

K : coefficient de conversion de l'azote en protéines ;

H : teneur en eau de l'échantillon en % de la masse humide.

3-4- Les lipides totaux

Le dosage des lipides totaux est réalisé selon la norme AFNOR N.F V03-713 de février 1984 (AFNOR 1991). Les lipides totaux sont constitués par la totalité des substances extraites par

l'hexane dans les conditions opératoires spécifiées et exprimés en % en masse de produit tel quel (AFNOR 1991).

Le principe de la méthode consiste en une hydrolyse de la prise d'essai par l'acide chlorhydrique (HCL) ; les matières grasses libérées des protéines et des glucides sont extraites par l'hexane et récupérées après élimination du solvant, le résidu lipidique est pesé (AFNOR 1991).

Une prise d'essai de 30g d'échantillon est hydrolysée à chaud par de l'HCL (4mol/l, d=1.18) pour libérer les lipides. L'hydrolyse est réalisée dans l'unité d'hydrolyse : BÚCHI B-411 pendant 45 min et l'échantillon hydrolysé est récupéré.

Une extraction des lipides par l'hexane et une dessiccation de l'extrait lipidique sont réalisés dans une unité d'extraction (BÚCHI B-811). La teneur en lipides totaux (L) est exprimée en pourcentage par rapport à la matière sèche :

$$L = (M_0 - M_1) \cdot (100/pe) \cdot [(100/ (100-H))].$$

Où : M_0 : masse en gramme du récipient + résidu ;

M_1 : masse en gramme du récipient vide ;

pe : prise d'essai en gramme ;

H : teneur en eau en % de l'échantillon humide.

3-5- Les glucides totaux

La somme des teneurs en cendres, protéines totales et lipides totaux est soustraite de 100g de matière sèche pour obtenir la teneur en glucides totaux de l'échantillon. Les résultats ne donnent qu'une estimation approchée de la quantité totale des glucides (FAO/OMS 1980).

La teneur en glucides totaux est exprimée en pourcentage de matière sèche :

$$\text{Glucides totaux} = 100 - [\text{cendres (\%)} + \text{protéines (\%)} + \text{lipides (\%)}].$$

4- Les analyses technologiques

4-1- Les formules de l'étude

Les échantillons sur lesquels nous avons appliqué les différents tests technologiques sont les suivants :

1- Farine témoin

Farine panifiable de blé tendre « Beni- Haroun » (BT).

2- Formules

Les formules de l'étude sont celles proposées par l'équipe de recherche Transformation et Elaboration de Produits Agro-alimentaires (T.E.P.A.) du Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.) de l'I.N.A.T.A-A. Elles sont basées sur l'exclusion des ingrédients à gluten et les avantages de la supplémentation céréales - légumes secs. Le but du présent travail est de vérifier le comportement rhéologique de ces formules sans gluten ainsi que leur aptitude à donner du pain tout en testant l'effet de l'étuvage du riz.

Tableau 8 : Formules de l'étude exprimées en rapport de masse.

Formules sans étuvage du riz R₁	abrév	Formules avec étuvage du riz R₂	abrév
2/3 R ₁ + 1/3 F. (féverole).	R ₁ F	2/3 R ₂ + 1/3 F.	R ₂ F
2/3 R ₁ + 1/3 PC. (pois chiche).	R ₁ PC	2/3 R ₂ + 1/3 PC.	R ₂ PC
2/3 R ₁ + 1/3 PP. (p. protéagineux).	R ₁ PP	2/3 R ₂ + 1/3 PP.	R ₂ PP

Abrév : les abréviations choisis pour les différentes formules de l'étude

4-2- La caractérisation granulométrique des produits de mouture

La granulométrie est l'étude de la distribution de la taille des particules d'une farine. Elle permet d'apprécier le comportement de la farine lors de l'hydratation. En boulangerie, la quantité d'eau absorbée lors de la formation de la pâte, ainsi que la vitesse d'absorption d'eau augmente avec la finesse des particules de la farine (FEILLET 2000).

Le but de cet essai est de caractériser les farines obtenues et de les comparer entre elles et avec la farine témoin de blé tendre. Le tamisage manuel (norme AFNOR NF X 11-507) consiste à faire passer une prise d'essai de 100g de chaque produit de mouture à travers une batterie de tamis en ordre décroissant d'ouverture de mailles : 200, 165, 125, 100 et 50µm.

Le tamisage se fait en appliquant un mouvement vibratoire manuel jusqu'à arrêt de la descente des particules, les refus des tamis sont pesés à 0.01g près à l'aide d'une balance technique SATORIUS et sont rapportés sur la quantité d'échantillon totale pour déterminer la distribution granulométrique.

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

$$DG = 100. P_1/P_0$$

Où : P₁ : masse des refus de chaque tamis (g) ;

P₀ : masse de prise d'essai (g).

4-3- L'intervalle d'hydratation

La détermination du taux minimum et maximum d'hydratation d'un échantillon permet de délimiter son intervalle d'hydratation de faisabilité. Nous avons adopté un diagramme de fabrication de pâte que nous avons utilisé pour la farine témoin (BT) ainsi que pour l'ensemble des formules de l'étude (R₁F, R₁PC, R₁PP ; R₂F, R₂PC, R₂PP). A partir des intervalles déterminés, les pâtes obtenues seront soumises aux différentes analyses de l'étude (rhéologie, panification).

Les taux d'hydratations (TH) déterminés sont exprimés en pourcentage de la matière sèche

:
$$\text{TH} = (\text{Ei} + \text{Ea} / \text{MS}).100$$

Où : Ei : masse d'eau initiale en g calculée à partir de l'humidité des formules déjà déterminée

(paragraphe 3-1);

Ea : masse d'eau ajoutée en g ;

MS : masse de la matière sèche en g.

La masse de la matière sèche du témoin et des formules de l'étude est calculée selon :

$$\text{MS} = \text{mh} - \text{Ei}$$

où : mh : masse de la matière humide en g.

La détermination des taux minimum et maximum d'hydratation des pâtes a été effectuée dans l'ambiance du laboratoire à une température moyenne de l'air de $14 \pm 3^\circ\text{C}$ et une humidité relative moyenne de $64 \pm 5\%$, elle permet de situer l'intervalle d'hydratation de faisabilité.

4-3-1- La détermination du taux minimum d'hydratation

Les critères retenus pour la détermination de cette limite inférieure sont la tenue de la pâte et l'absence d'effritement lors du pétrissage manuel, nous avons adopté le mode opératoire donné par la figure 3.

A une prise d'essai de 30g (témoin et formules) placée dans un mortier en verre, l'eau distillée est ajoutée à raison de 1 ml à chaque fois, tout en malaxant et en comprimant le mélange hydraté entre les doigts pendant 30 secondes. Une fois les caractéristiques fixées acquises par la pâte, la quantité d'eau ajoutée et le temps de pétrissage manuel sont notés.

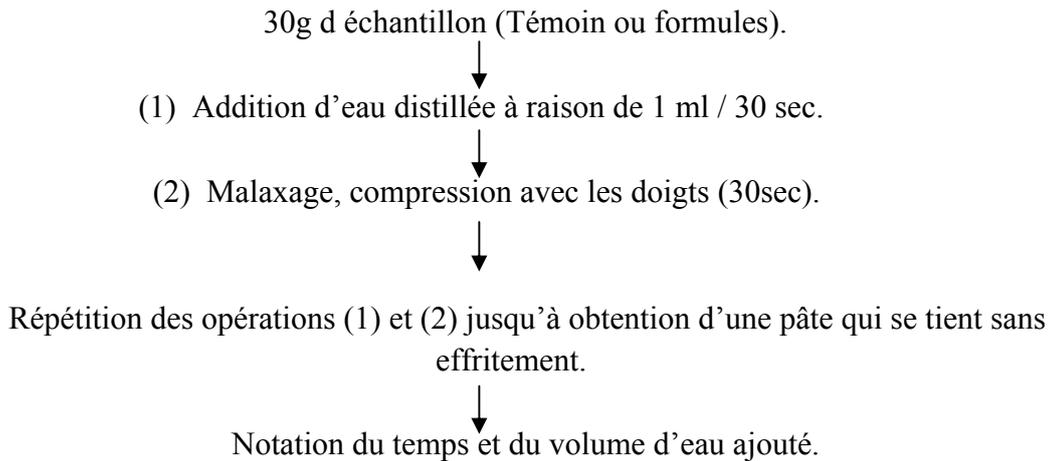


Figure 3 : Diagramme adopté pour la détermination du taux minimum d'hydratation.

4-3-2- La détermination du taux maximum d'hydratation

Il est plus difficile de fixer la limite supérieure de l'intervalle sans se fixer l'usage de la matière hydratée, nous nous sommes limités à étudier l'intervalle qui convient à la technologie de panification. Les critères choisis pour la limite supérieure sont le collant de la pâte et la difficulté à la manier. Le mode opératoire suivi est donné par la figure 4.

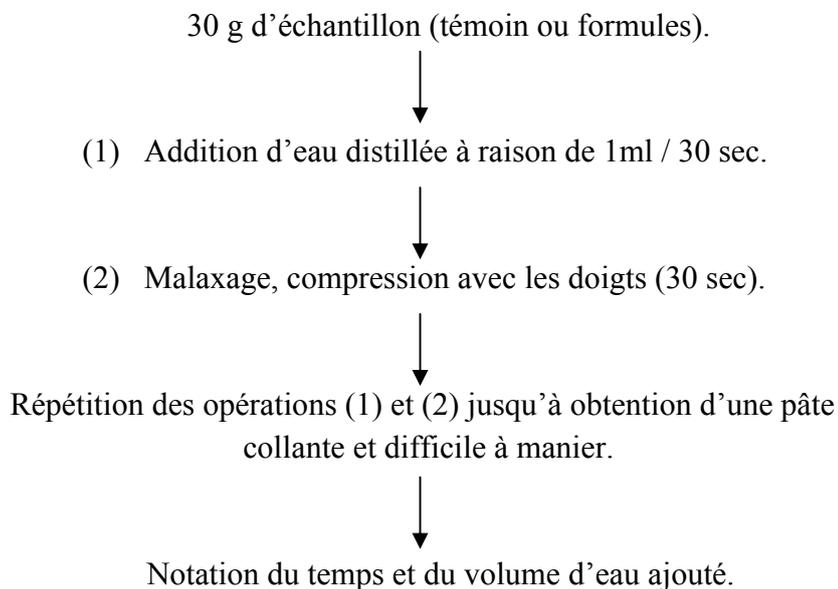


Figure 4 : Diagramme adopté pour la détermination du taux maximum d'hydratation.

4-3-3- La détermination de l'intervalle d'hydratation de faisabilité

A l'intérieur de chaque intervalle d'hydratation fixé par les taux minimum et maximum d'hydratation des farines (témoin et formules), nous avons choisi trois niveaux à étudier : une

valeur médiane encadrée par celles se trouvant au $\frac{1}{4}$ et au $\frac{3}{4}$ de l'intervalle, comme représenté ci-dessous :

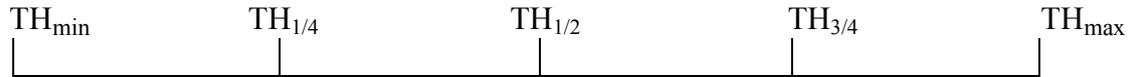


Figure 5 : Répartition des niveaux à étudier à l'intérieur de l'intervalle d'hydratation de faisabilité.

Où : TH_{min} : taux d'hydratation minimal (%) ;

TH_{max} : taux d'hydratation maximal (%).

Les valeurs des taux d'hydratation (TH) déterminés sont présentées dans le tableau 9.

Tableau 9 : Taux d'hydratation de faisabilité du témoin et des formules de l'étude.

Formules	TH_{min} (%)	$TH_{1/4}$ (%)	$TH_{1/2}$ (%)	$TH_{3/4}$ (%)	TH_{max} (%)
BT	58.22	77.84	97.46	117.08	136.70
R₁F	55.50	74.45	93.40	112.35	131.3
R₁PC	55.80	73.77	91.74	109.71	127.7
R₁PP	56.00	75.77	94.74	114.11	133.5
R₂F	122.80	136.97	151.14	165.31	179.5
R₂PC	117.60	136.20	154.80	173.4	192.00
R₂PP	117.80	138.72	159.64	180.56	201.5

4-4- L'appréciation du comportement rhéologique des formules de l'étude par l'alvéographe CHOPIN

Les tests déterminés au moyen de l'alvéographe CHOPIN ont été réalisés au niveau du laboratoire d'analyse des « Moulins de Beni-Haroun » à Grarem afin d'étudier la valeur boulangère et les propriétés plastiques des farines.

L'alvéographe Copin est l'appareil le plus utilisé pour l'appréciation de la valeur boulangère des pâtes destinées à la panification (DELFRÆE 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 fermentation 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).

Pour la préparation des différentes pâtes, nous avons suivi le diagramme de fabrication spécifique au test alvéographique (figure 6),

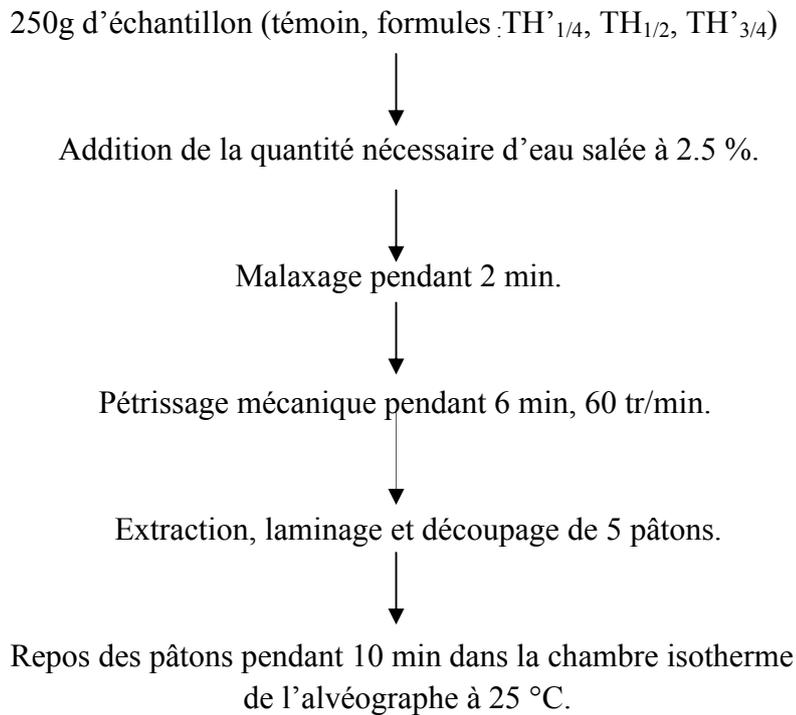


Figure 6 : Diagramme de préparation de pâte pour le test alvéographique.

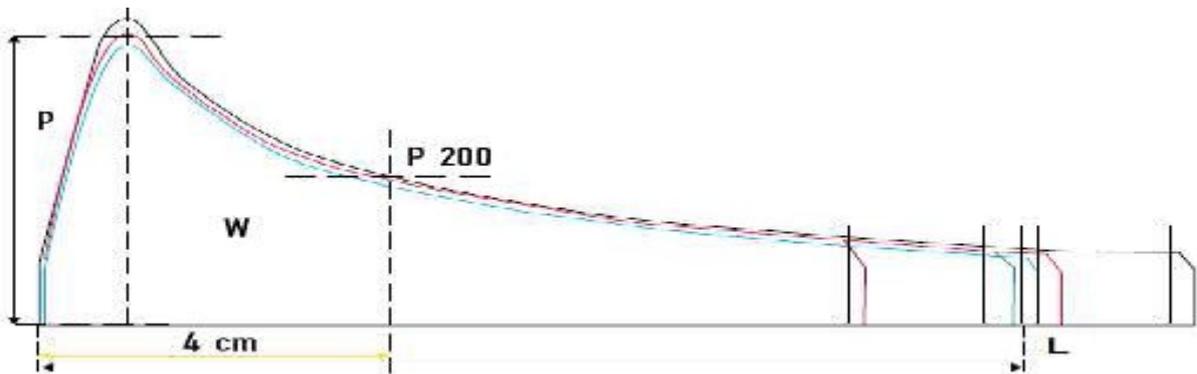
La pâte est pétrie dans le pétrin de l'alvéographe chopin 8 min, 60 tr/min. après son extraction, celle-ci est laminée 7 fois à l'aide d'un rouleau par des mouvements de « va et vient », sur un plateau rectangulaire dont le fond est en verre. La pâte est ensuite lubrifiée avec de l'huile de paraffine. Les 5 pâtons sont ensuite découpés à l'aide d'un emporte-pièce ($r=23\text{mm}$, $h=6\text{mm}$) et laissés relaxer (10 min, 25°C) dans la chambre de repos de l'alvéographe.

Vu que nos formules (riz-légumes secs) ont un comportement rhéologique différent de celui de la farine de blé tendre (pâtes très collantes et non tenaces), leur malaxage avec l'eau est réalisé en dehors du pétrin, avec une spatule dans un récipient en verre puis la pâte formée est placée dans le pétrin de l'alvéographe. Après pétrissage la pâte est extraite manuellement.

La réalisation des essais est effectuée au laboratoire des moulins « Beni-Haroun » à une température ambiante moyenne de l'air de $18 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de l'air moyenne de $75 \pm 5\%$.

Le principe des essais alvéographiques consiste à faire subir à l'éprouvette de pâte des changements de dimension par insufflement d'air, enregistrer sous forme de courbe les variations

de pression **P** à l'intérieur de la bulle qui sont en rapport avec la résistance de la pâte à l'extension, et apprécier les caractéristiques boulangères de la farine d'après la grandeur et la forme des courbes obtenues et le volume de la bulle au moment de la rupture. Une courbe moyenne est tracée à partir des enregistrements de cinq pâtons (Figure 7)



**Figure 7 : Alvéogramme type de différents types de farines de blé tendre
(DELFRATE 2005)**

La lecture d'un alvéogramme (Figure 7) se fait à travers les paramètres suivants (SAKR et HAJJ MOUSSA 2007) :

-Le "**W**" : travail de déformation, il désigne le travail au sens physique du terme et exprime la force boulangère de la pâte . Sa valeur est proportionnelle à la Surface (S) de la courbe obtenue selon l'équation suivante :

$$\mathbf{W \text{ (joules)} = 6.54 \times S}$$

Où : S : La surface du diagramme moyen

6.54 :Coefficient relatif aux farines des céréales.

-Le "**G**" : Se rapporte au gonflement de la pâte qui est exprimé en cm^3 . Il est donné par l'équation suivante : $\mathbf{G \text{ (cm}^3\text{)} = 2.226 \times \sqrt{L}}$

-Le "**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 de celle-ci et est donné en mm sur l'axe des ordonnées de l'alvéogramme ;

-Le "**L**" : Ce paramètre correspond à l'élasticité (extensibilité) de la pâte depuis le début du gonflement jusqu'à éclatement de la bulle. Il est donné en mm sur l'axe des abscisses de l'alvéogramme ;

-Le "**P/L**" : Ce rapport appelé "rapport de configuration de la courbe" ou "rapport de

ténacité au gonflement", représente l'équilibre entre la ténacité et l'élasticité de la pâte.

-Le "Ie" : Correspond à l'indice de l'Elasticité de la courbe. Il est donné par l'équation suivante :

$$Ie = P_{200}/P.100$$

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

- **Essai alvéographique**

L'alvéographe CHOPIN utilisé pour les farines de blé teste des pâtes à hydratation finale de 43.25 % (g d'eau dans 100g de pâte). La quantité d'eau à ajouter à la farine est tirée à partir d'un tableau normalisé en se basant sur la teneur en eau de cette dernière (CALVEL 1980).

Pour les analyses de notre étude, la farine témoin de blé tendre est testée selon l'hydratation exigée par le mode opératoire de l'alvéographe, les formules de mélange (riz-légumes secs) sont testées aux trois taux d'hydratation (TH_{1/4}, TH_{1/2}, TH_{3/4}) déjà fixés à l'intérieur de leurs intervalles d'hydratation de faisabilité.

Des essais préliminaires ont permis de constater que les taux d'hydratation situés aux 1/4, et 3/4 des intervalles de faisabilité de toutes les formules ne peuvent être utilisés à l'alvéographe en raison des difficultés suivantes :

- la dureté du pâton lors de l'insufflement d'air qui bloque l'enregistreur en haut et donne une courbe incomplète à la valeur du premier quart de l'intervalle d'hydratation (TH_{1/4}).
- le collant de la pâte au moment de sa formation, ce qui donne une éprouvette complètement déformée au troisième quart de l'intervalle d'hydratation (TH_{3/4}).

Sur la base d'essais préliminaires, nous avons choisi à l'intérieur de chaque intervalle d'hydratation deux nouveaux taux d'hydratation (TH'_{1/4} et TH'_{3/4}) en cherchant les caractéristiques suivantes :

- une pâte moins dure qui donne une courbe continue avec un sommet de hauteur maximale (TH'_{1/4}).
- une pâte moins hydratée permettant la formation de l'éprouvette (TH'_{3/4}).

Les valeurs des taux d'hydratations situés au deuxième quart des intervalles (TH_{1/2}) étaient identiques avec celles calculées à partir des nouveaux points choisis (TH'_{1/4}, TH'_{3/4}).

Les intervalles testés vont être utilisé pour le reste des analyses de l'étude avec les trois taux d'hydratation (TH'_{1/4}, TH_{1/2}, TH'_{3/4})

Le tableau 10 présente l'ensemble des taux d'hydratation des formules de l'étude (TH et TH').

Tableau 10: Taux d'hydratation de faisabilité des formules de l'étude (TH et TH' en %).

Formules	TH _{min}	TH _{1/4}	TH' _{1/4}	TH _{1/2}	TH' _{1/2}	TH' _{3/4}	TH _{3/4}	TH _{max}
R1F	55.8	73.77	80	91.74	91	103	109.71	127.7
R1PC	55.5	74.45	80.7	93.4	93.2	106.1	112.35	131.3
R1PP	56	75.37	81.8	94.74	94.7	107.7	114.11	133.5
R2F	122.8	136.97	141.6	151.14	151.1	160.6	165.31	179.5
R2PC	117.6	136.2	143	154.8	154.8	167.2	173.4	192
R2PP	117.8	138.72	147.2	159.64	160.4	173.6	180.56	201.5

Les niveaux à étudiés à l'intérieur des intervalles d'hydratation de faisabilité sont représentés dans la figure 8.



Figure 8: nouvelle répartition des niveaux à étudier à l'intérieur de l'intervalle d'hydratation de faisabilité.

5- La panification d'essai

On entend par panification d'essai la réalisation successive des opérations nécessaires à l'obtention du pain à l'échelle du laboratoire. Les différentes analyses effectuées sur les qualités plastiques des pâtes ne permettent pas de tirer des conclusions nécessaires sur la valeur boulangère d'une farine, le moyen qui reste le plus sûr est l'essai expérimental de panification (CALVEL 1980).

5-1- Le diagramme de fabrication du pain

Dans le but de comparer les résultats de panification de nos différentes farines (témoin de blé tendre et formules de mélange : riz et légumes secs), nous avons choisi un diagramme de panification analogue à celui utilisé par BENATALLAH (2009) où les mêmes matières premières sont utilisées.

Les différentes étapes du diagramme de panification sont présentées dans la figure 9.

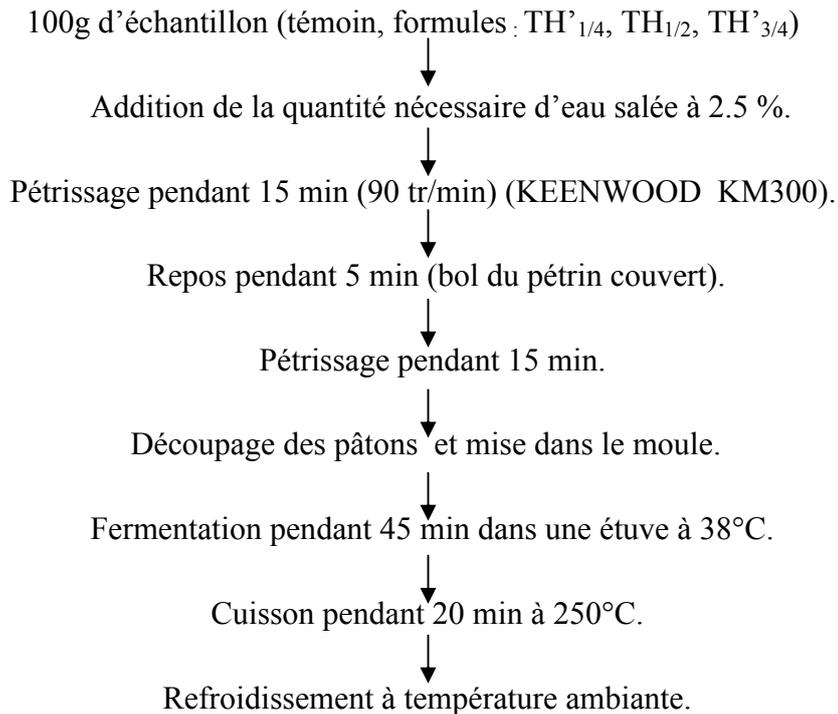


Figure 9 : Diagramme de fabrication du pain.

5-1-1- Le pétrissage

Pour chaque essai, nous avons additionnés à 100g de farine 2g de levure sèche, 2g de chlorure de sodium et le volume d'eau nécessaire. La levure sèche est ajoutée directement à la farine, alors que le sel est dilué dans le volume d'eau utilisé. Le pétrissage des pâtes a été effectué dans l'ambiance du laboratoire à une température moyenne de l'air de $18 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative moyenne de $60 \pm 3 \%$,

Le pétrissage se déroule dans un pétrin de marque KEENWOOD KM300, à une vitesse de (90 tr/min), et est effectué en deux périodes égales de 15 min chacune, séparées d'un temps de repos de 5 min.

5-1-2- Le façonnage

A la fin du pétrissage, la pâte est divisée manuellement en petits pâtons de même volume, cela est assuré en traçant les postes du moule à $1/3$ de leur hauteur ($\approx 73\text{cm}^3$). Les caractéristiques du moule utilisé sont les suivantes :

- marque : TEFAL.
- matière première : proflex.
- dimensions : $(10.5 \times 5.3 \times 4) \text{cm}^3$.
- nombre de postes : 6.

5-1-3- La fermentation

La fermentation est réalisée dans une étuve de marque Memmert, de 0.5 m³ de volume utile, elle est munie de plateaux perforés pour faciliter la répartition de la chaleur. Un récipient rempli d'eau bouillante est mis dans l'étuve pour assurer une atmosphère humide. Lorsque l'humidité atteint 90% (BENATALLAH 2009), la pâte est mise à l'étuve. La fermentation a lieu pendant 45min à une température de 38 ± 2 °C.

5-1-4- La cuisson

La cuisson est réalisée dans un four pâtissier, d'un volume utile de 1 m³, muni de deux résistances, une située sous le plancher de briques réfractaires, l'autre située au plafond de l'enceinte de cuisson.

Le four est préalablement chauffé à une température de 250 ± 10 °C, les pâtons sont cuits dans une atmosphère humide, jusqu'à obtention d'une croûte bien colorée (20 min pour la farine témoin), les mêmes conditions sont appliquées pour tous les échantillons.

5-2- La caractérisation du pain

Les pains entiers et leurs mies, une fois refroidis (30 min après cuisson) ont été caractérisés en déterminant les paramètres suivants :

- le poids du pain et de la mie (g), en utilisant une balance analytique de précision 0.001g, de marque Sartorius BP 110 S.
- le volume de pain et de la mie (cm³), estimé d'une façon indirecte par déplacement de grains solides sphériques de volume spécifique connu (0.69 cm³/g) dans une éprouvette de volume connu.
- les volumes spécifiques des pains et de leurs mies (cm³/g), calculé à partir du rapport volume/poids.

La description des caractéristiques sensorielles des pains et de leurs mies (volume, couleur, odeur, texture et alvéolage) a été effectuée à l'œil nu de l'extérieur et des coupes longitudinales.

6- L'analyse statistique

L'analyse statistique des résultats est réalisée à l'aide du logiciel Excel (version 2007) et MINITAB (version 13.31). Les résultats sont exprimés en tant que moyenne \pm écart type. La comparaison entre les différentes moyennes est évaluée par analyse de la variance (ANOVA) à un facteur en choisissant un seuil de significativité de 5 %.

1- Les caractéristiques physico-chimiques des matières premières

1-1- La granulométrie

Les résultats du tamisage de la farine témoin de blé tendre et des différentes matières premières sont présentés dans la figure 10.

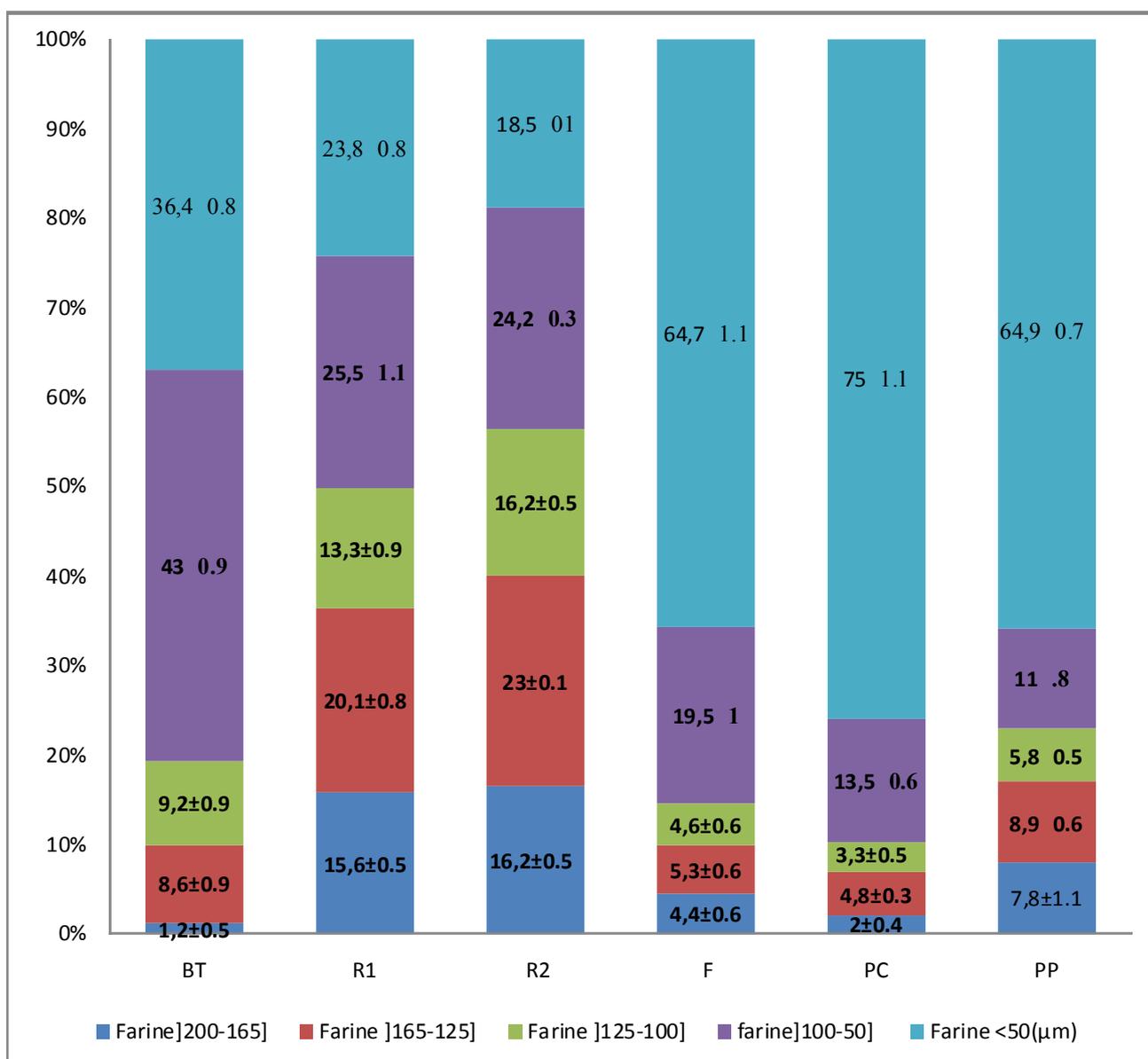


Figure 10 : Granulométrie des farines des différentes matières premières (en % de la masse).

La distribution granulométrique d'une farine permet d'apprécier le comportement de celle-ci lors de l'hydratation (quantité d'eau absorbée et vitesse d'hydratation) (FEILLET 2000).

Il ressort de la figure 10 que toutes les farines présentent plus de 98 % des particules de dimension ($\leq 200 \mu\text{m}$). Ces résultats concordent avec la norme Codex pour la farine de blé établie par CODEX ALIMENTARIUS (1995).

Les deux classes granulométriques ($] 100-50]$, $<50 \mu\text{m}$) constituent pour la majorité des matières premières (BT, F, PC, PP) la grande proportion de farine.

Les trois farines de légumes secs (F, PC, PP) sont très proches dans leur répartition granulométrique de la farine témoin (BT), elles sont constituées principalement de farine fine (< 100) avec 84.26 % pour la féverole, 88.41 % pour le pois chiche, 76 % pour le pois protéagineux et 79.49 % pour le blé tendre. Pour la même classe granulométrique (< 100), la farine de riz présente des proportions inférieures à 50 % (49.3 pour R_1 et 42.68 pour R_2).

La farine témoin montre des proportions proches entre les deux classes les plus fines (43.07 pour la classe $]100-50]$ et 36.42 pour la classe <50). Alors que les légumes secs renferment dans la classe <50 la part principale (64.73 pour la féverole, 74.94 pour le pois chiche et 64.95 pour le pois protéagineux).

La mouture du riz se distingue par une distribution plutôt équilibrée entre toutes les classes de granulométrie inférieure à 200 μm .

La composition granulométrique du riz (R_1) se rapproche fortement à celle du riz étuvé (R_2) avec des proportions presque égales réparties dans les classes $] 165-125] \mu\text{m}$, $] 100-50] \mu\text{m}$ et $<50 \mu\text{m}$.

I-2- La composition biochimique des matières premières

La teneur moyenne des constituants biochimiques des différentes matières premières utilisées est présentée dans le tableau 11.

Tableau 11 : Composition biochimique globale des matières premières.

	Farine de blé tendre	Farine de riz	Farine de féverole	Farine de pois chiche	Farine de p. protéagineux
Humidité (%)	15.14±0.05	13.25±0.04	12.08±0.06	11.10±0.02	11.21±0.05
Cendres (% MS)	0.52±0.19	0.51±0.18	3.41±0.03	3.75±0.12	3.88±0.64
Protéines totales (% MS)	14.11±0.77	7.05±0.43	31.51±0.05	26.32±0.53	24.27±0.16
Lipides totaux (% MS)	0.89±0.21	0.29±0.01	0.76±0.52	3.91±0.23	0.79±0.71
Glucides totaux (% MS)	84.48	92.15	64.32	66.02	71.06
Totaux des extraits secs (% MS)	100	100	100	100	100

Le coefficient de conversion de l'azote total en protéines est de 5.7 pour les farines de blé et de riz et de 6.25 pour les légumes secs.

I-2-1- La farine de blé tendre

La farine de blé tendre choisie comme témoin a présenté la composition chimique suivante :

Une teneur moyenne en eau de 15,14 % supérieure à celle donnée par SOUCI et coll., 1994 (13,10 %), mais reste dans l'intervalle citée par CALVEL, 1984 (13 à 15 %) pour la farine destinée à la panification.

En effet, l'humidité élevée de notre farine est probablement due à la quantité d'eau ajoutée au blé avant mouture (humidité recherchée aux moulins Beni-Haroun), l'humidité des farines doit se situer entre 10 et 16 % pour que la farine se conserve convenablement (CHENE 2001).

La teneur moyenne des cendres est un indicateur de la pureté de la farine, elle est en relation avec son taux d'extraction et la minéralisation des grains mis en mouture. Elle définit, en outre, les types commerciaux des farines (FEILLET 2000). Notre farine de blé tendre présente un taux de cendre de 0,52 % MS, elle se classe bien dans le type commercial 55 qui se caractérise par un intervalle de cendre de 0.50 à 0.60 % MS et est destiné à la fabrication des pains courants, biscottes, panification fine et biscuiterie (ADRIAN et coll. 1995 ; COLAS 1998). Les pâtes obtenus avec des farines à taux de cendre élevé sont grasses, collantes et présentent des défauts de maniabilité (GRANDVOINNET et PRATX 1994).

Les protéines totales représentent une teneur de 14.11 % MS. Pour GODON (1985), GRANDVOINNET et PRATX (1994) la teneur en protéines des farines de blé destinées à la fabrication de produits de cuisson varie de 7 à 15 % MS, ce qui est en accord avec la teneur moyenne en protéines de la farine étudiée.

Selon FEILLET (2000), les farines du blé contiennent 1.4 à 2 % de lipides totaux. cependant CALVEL (1984) indique une teneur en matières grasses entre 1.2 à 1.4 %. La teneur de la farine étudiée est de 0.89 % MS, inférieure aux teneurs données par ces références. Les taux élevés en lipides diminuent la valeur boulangère de la farine et intervient dans l'altération des farine par rancissement.

Les glucides totaux de notre farine témoin constituent 84.48 % de la matière sèche. Ces glucides sont constitués principalement d'amidon (78-82 %), de pentosanes (2-3 %), de sucres réducteurs et non réducteurs (2 %) et de cellulose (0.5 %) (FEILLET 2000). Les sucres simples sont utilisés rapidement par les levures au cours de la fermentation, ce sont les amidons et les pentosanes ainsi que leurs proportions qui ont le plus d'importance en panification (GRANDVOINNET et PRATX 1994).

I-2-2- Le riz

Le riz étudié présente une humidité de 13.27 % qui est en accord avec la norme du Codex Alimentarius (FAO, 1996) qui en fixe la valeur de 15 % comme limite maximale.

La teneur moyenne en cendres est de 0.51 % MS, une valeur qui se range bien dans l'intervalle 0.3-0.8 % cité par LAIGNELET (1990).

Les protéines de la farine de riz représentent une valeur de 7.5 % MS valeur égale à celle donnée par MOHTADJI-LAMBALLAIS (1989).

La teneur moyenne en lipides est de 0.29 % MS, très proche de la teneur en lipides donnée par MOHTADJI-LAMB ALLAIS (1989) qui est de 0.3 %.

Les résultats indiquent que la teneur en glucides totaux est de 92.15 % MS, l'amidon est le principal constituant de ces glucides où la teneur en amylose est directement reliée à la fermeté et le collant du riz cuit, un riz riche en amylose est plus ferme et colle moins (LAIGNELET 1997). Les pentosanes avec des quantités non négligeables jouent un rôle comme chez les autres céréales dans l'absorption d'eau au cours de la cuisson (LAIGNELET 1991). Les autres glucides sont minoritaires, il s'agit principalement de saccharose.

I-2-3- Les légumes secs

Les légumes secs utilisés présentent des valeurs d'humidité (12.03 % pour la féverole, 11.10 % pour le pois chiche et 11.21 % pour le pois protéagineux) inférieures à celles données par la norme du Codex Alimentarius (15 % pour la féverole et le pois et 14 % pour le pois chiche).

Pour les teneurs en protéines de la féverole (31.51 % MS), du pois chiche (26.32 % MS) et du pois protéagineux (24.27 % MS), elles sont bien situées dans les intervalles cités respectivement : 23-38.1 % MS pour la féverole, 12.4-30.6 % MS pour le pois chiche et 20.2-34.4 % MS pour le pois protéagineux (FAO 1982 ; CUD et LEYNAUD 1992).

Les teneurs moyennes en lipides des trois légumes secs : féverole = 0.76 % MS, pois chiche = 3.91 % MS, et pois protéagineux = 0.79 % MS sont nettement inférieurs aux valeurs : 1.5 % MS pour la féverole, 5-5.6 % MS pour le pois chiche et 1.5-1.8 % MS pour le pois protéagineux données par GUEGUEN et LEMERIE (1996).

I-3- Les caractéristiques des formules de l'étude

La composition biochimique globale des formules de l'étude constituées d'un mélange de farines de 2 à 1 de riz-légumes secs déduite par calcul est présentée dans le tableau 12 :

Tableau 12 : Composition biochimique globale des formules de l'étude.

Composition (%MS)	Farine de (BT)	Farine de riz (R)	Farine de (RF)	RF/R	Farine de (RPC)	RPC/R	Farine de (RPP)	RPP/R
Cendres	0.52	0.51	1.48	2.90	1.59	3.12	1.63	3.19
Protéines totales	14.11	7.05	15.20	2.15	13.47	1.91	12.79	1.81
Lipides totaux	0.89	0.29	0.44	1.50	1.49	5.14	0.45	1.55
Glucides totaux	84	92.15	82.87	0.90	83.44	0.90	85.12	0.92

La comparaison de la composition des trois formules de l'étude : RF, RPC et RPP (tableau 12) avec celle de la farine de riz (tableau 11) nous a permis de constater que la complémentation riz-légumes secs a sensiblement changé la teneur en protéine. Cette dernière a marqué une augmentation de 1.81 fois plus à celle du riz pour la formule de RPP, de 1.91 fois plus pour la formule RPC et de 2.15 fois plus pour la formule RF.

L'apport en minéraux des trois formules a nettement augmenté comparé à celui de la farine du riz (2.9 fois plus pour RF, 3.12 fois plus pour RPC et 3.19 fois plus pour RPP).

L'apport lipidique des deux formules RF et RPP a augmenté de 1.5 fois plus par rapport à celui de la farine de riz. Celui de la formule RPC a sensiblement augmenté, il passe de 0.29 % à 1.49 % pour la farine de RPC (5.14 fois plus).

La teneur de glucides totaux des trois formules de l'étude a nettement diminué par rapport à celle de la farine de riz.

A partir de la comparaison des résultats de la complémentation des formules de l'étude avec la farine témoin, nous avons remarqué que les quatre farines présentent des teneurs de protéines totales qui se rapprochent nettement (BT : 14.11 % ; RF : 15.20 % ; RPC : 13.47 % et RPP : 12.79 %), ainsi que des teneurs de glucides totaux qui sont presque identiques (BT : 84 % ; RF : 82.87 % ; RPC : 83.44 % et RPP : 85.12 %).

1-4-Conclusion

Les résultats de la répartition granulométrie des matières premières permettent de conclure que toutes les farines présentent une granulométrie répondant aux exigences de la panification.

Le calcul basé sur le rapport massique 2/1 utilisé pour la supplémentation des formules indique un accroissement de l'apport protéique et minéral en rapport avec la présence des farines de légumineuses dans celle-ci, donc les formules RF, RPC et RPP semblent adéquates pour satisfaire les apports recommandés en protéines.

2- Les caractéristiques technologiques des formules de l'étude

2-1- Intervalles d'hydratation des formules de l'étude

Le but de ce test est de fixer les proportions d'eau nécessaires à l'hydratation des différentes formules, les critères choisis sont :

- la tenue de la pâte et l'absence d'effritement lors du pétrissage pour le taux minimum d'hydratation (TH_{\min});
- avoir la pâte collante et difficile à manier pour le taux maximum d'hydratation (TH_{\max}).

Ces intervalles vont servir de base aux différentes analyses de l'étude (rhéologie, panification) et les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 13: Intervalles d'hydratation de faisabilité des formules sur base sèche.

	BT	R₁F	R₁PC	R₁PP	R₂F	R₂PC	R₂PP
V.E.A (ml/100g)	34.5±0.94	36±0.82	36.2±0.62	36.66±1.22	96.07±1.31	92.13±1.43	92.3±0.41
TH_{min} (%MS)	58.22±1.04	55.80±0.93	55.50±0.71	56.00±1.40	122.8±1.49	117.6±1.63	117.8±0.46
T(sec)	1035±28.28	1080±24.49	1086±18.71	1099.8±36.74	2882.1±39.37	2763.9±43.01	2769±12.25
V.E.A (ml/100g)	101.2±0.41	98.77±1.03	102.6±2.04	104.53±1.08	145.97±1.03	157.83±1.25	166.23±1.02
TH_{max} (%MS)	136.70±0.48	127.70±0.75	131.30±2.33	133.50±1.23	179.50±1.17	192±1.41	201.5±1.16
T(sec)	3036±12.25	2963.1±30.82	3078±44.16	3135.9±32.40	4379.1±30.82	4734.9±37.42	4734.9±30.82

V.E.A : volume d'eau ajouté ; T : temps de pétrissage.

Il ressort du tableau 13 que les taux minima d'hydratation des formules à base de riz non étuvé étaient respectivement 55.80 % pour R₁F, 55.50 % pour R₁PC et 56 % pour R₁PP. Ils concordent bien avec les travaux de GUETTACHE et TLILANI (2005) qui sont respectivement 55.97 % pour R₁F, de 56.93 % pour R₁PC et de 60.76 % pour R₁PP.

Nous n'avons pas remarqué une différence significative entre la valeur TH_{min} du témoin (BT: 58.22 %) et celle des trois formules (R₁F, R₁PC et R₁PP) ce qui permet de conclure que ces formules à base de riz non étuvé ont un pouvoir absorbant d'eau similaire à celui de la farine de blé tendre.

Par contre les taux d'hydratation des formules à base de riz étuvé (R₂F : 122.8 % ; R₂PC : 117.6 % ; R₂PP : 117.8 %) ont été significativement supérieurs (p < 0.05) à celui de la farine témoin de blé tendre (BT : 58.22 %).

Concernant les taux maxima d'hydratation, la capacité d'absorption d'eau des formules à base de riz étuvé était significativement supérieure (p < 0.05) à celle de la farine du blé tendre (179.50 % pour R₂F, 192 % pour R₂PC et 201.5 % pour R₂PP contre 136.7 % pour BT).

Tandis que les formules à base de riz non étuvé ont présenté des taux d'hydratation significativement proches de celui du témoin (131.30 % pour la formule R₁PC, 133.51 % pour la

formule R₁PP contre 136.70 % pour le témoin BT), la formule R₁F a présenté un TH_{max} = 127.70 % significativement inférieure par rapport à la farine témoin (p = 0.001).

Cependant, les taux d'hydratation maxima des trois formules à base de riz non étuvé sont nettement supérieurs à ceux cités par GUETTACHE et TLILANI (2005) concernant les mêmes formules (R₁F : 82.63 %, R₁PC : 86.25 %, R₁PP : 91.31 %).

Nous avons remarqué que la capacité d'hydratation des formules à base de riz étuvé (R₂) était significativement supérieure (p < 0.05) à celle des formules à base de riz non étuvé (R₁).

L'intervalle d'hydratation de la formule R₁F étudié dans les travaux de BENATALLAH (2009) limité par les deux bornes de quantité d'eau ajoutée (Q.E.A_{min}= 90g/100g ; Q.E.A_{max}= 93.75g/100g) se trouve inclus dans l'intervalle d'hydratation de la même formule (R₁F) de la présente étude qui traite un domaine plus vaste (V.E.A_{min}= 36 ml/100g ; V.E.A_{max}= 98.77 ml/100g).

Les deux points essentiels tirés de l'étude de l'intervalle d'hydratation des différentes farines sont les suivants :

✓ Malgré la différence de l'espèce botanique, la nature et le taux de l'amidon endommagé ainsi que la granulométrie, les formules de riz-légumes secs (féverole, pois chiche et pois protéagineux) ont montré une capacité d'absorption d'eau comparable à celle de la farine de blé tendre ;

✓ Les formules riz étuvé-légumes secs ont présenté une augmentation du pouvoir d'absorption d'eau, ce dernier est significativement plus élevé que celui de la farine de blé tendre et des formules du riz non étuvé. Selon FAVIER et coll. (1995), l'étuvage du riz améliore son gonflement et sa capacité d'absorption d'eau sans devenir collant ; PEPLINSKI et PFEIFER (1970) cité par DEBBOUZ et DONNELLY (1996) confirment que la quantité d'eau absorbée augmente avec le degré de gélatinisation de l'amidon.

2-2- Le comportement rhéologique à l'alvéographe Chopin

L'alvéographe CHOPIN permet d'étudier la valeur boulangère et les propriétés plastiques des farines. Les essais alvéograpiques réalisés ont abouti à la caractérisation des différentes formules (témoin, formules riz-légumes secs, formules riz étuvé-légumes secs) et à la comparaison de leurs propriétés rhéologiques et de leur aptitude technologique.

2-2-1- Caractéristiques alvéographiques du témoin

Notre farine témoin a présenté un gonflement (G) de 20.93 cm³, une ténacité (P) de 98.27 mm, une extensibilité (L) de 89.40 mm, le rapport de configuration (P/L) est de 1.11 et un travail de déformation (W) de 276.08 x 10⁻⁴J.

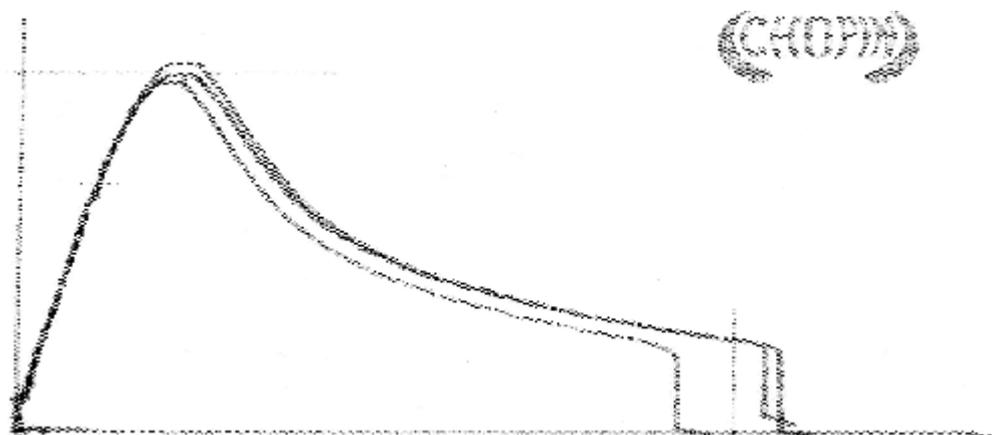


Figure 11 : Alvéogramme de la farine de blé tendre « Beni-Haroun ».

La comparaison des caractéristiques alvéographiques de la farine témoin aux normes algériennes de la panification données par J.O.R.A. (1991) a montré que le gonflement (G) de 20.93 cm³ est admis par ces normes ($G > 20 \text{ cm}^3$), tandis que le rapport de configuration (P/L) de 1.11 est un peu élevé (P/L : compris entre 0.45 et 0.64) renseignant sur la ténacité élevée de cette farine et se traduisant par un alvéogramme légèrement déséquilibré.

La farine témoin s'est caractérisée par un travail de déformation ($W : 276.08 \times 10^{-4} \text{J}$) assez élevé selon les normes algériennes J.O.R.A. 1991 (W compris entre 130 et 180 x 10⁻⁴J), renseignant sur une farine de force boulangère trop élevée. Alors qu'ils se rapprochent des intervalles de valeurs données par GUINET et GODON (1994) en panification française (W : compris entre 200 et 250 x 10⁻⁴J).

Sur la base des valeurs alvéographiques, la farine témoin de blé tendre peut être jugée panifiable malgré ses propriétés rhéologiques moyennes.

2-2-2- Caractéristiques alvéographiques et aptitude technologique des trois formules sans étuvage du riz

A partir des essais alvéographiques réalisés sur les formules sans gluten (riz-légumes secs) trois alvéogrammes ont été tracés en utilisant les trois taux d'hydratation choisis de chaque intervalle de faisabilité ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$), et ce pour chacune des trois formules sans étuvage du riz (R_1F , R_1PC , R_1PP). Les tracés alvéographiques sont présentés par les figures : 12, 13, 14.

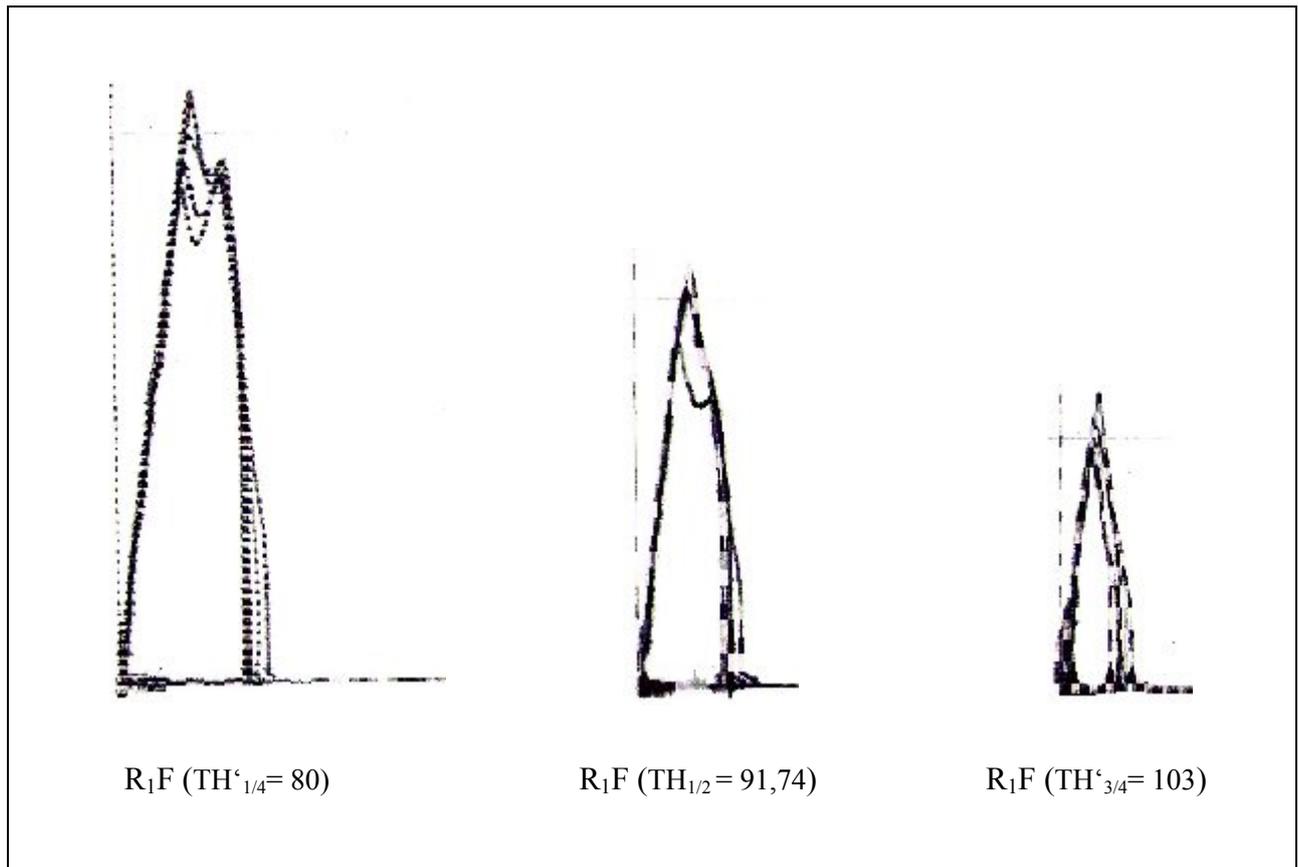


Figure 12 : Alvéogrammes de la formule R_1F aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

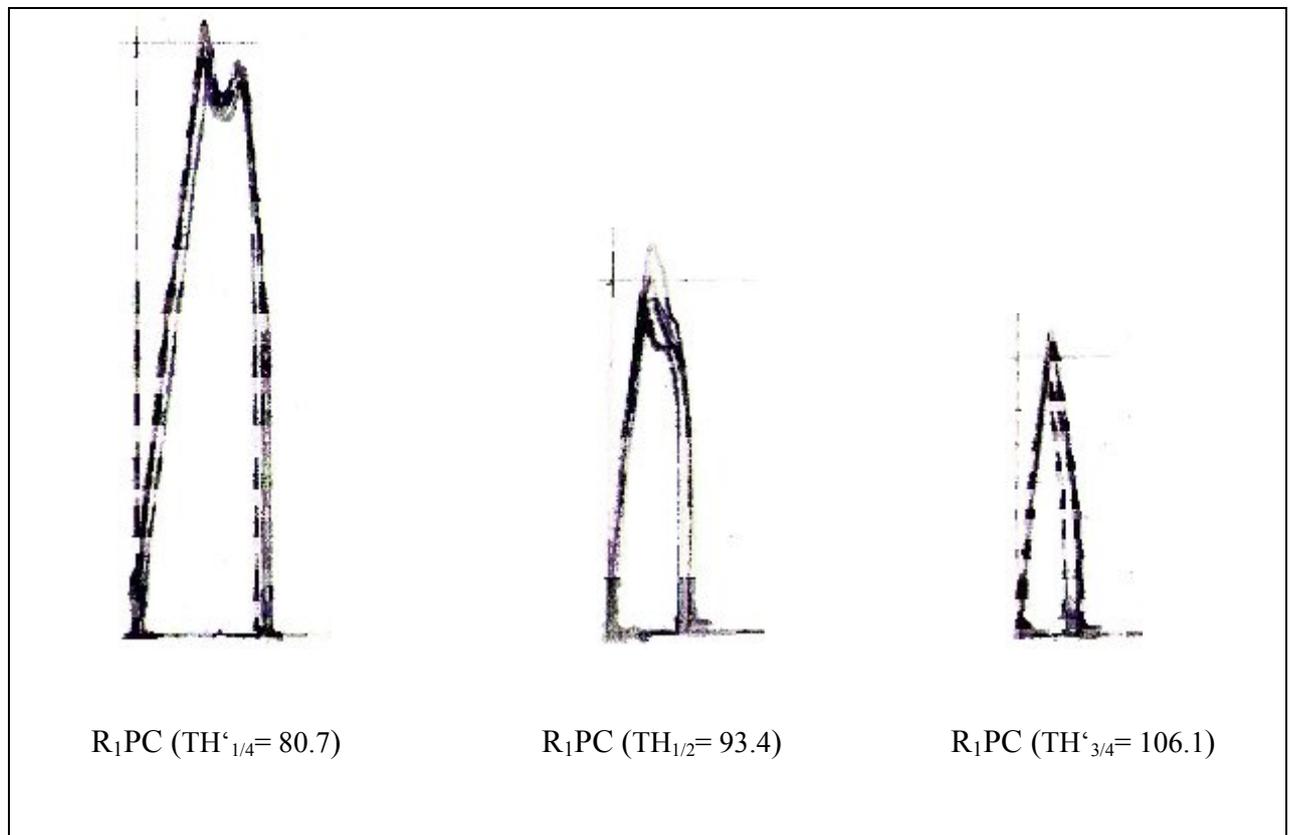


Figure 13: Alvéogrammes de la formule R_1PC aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

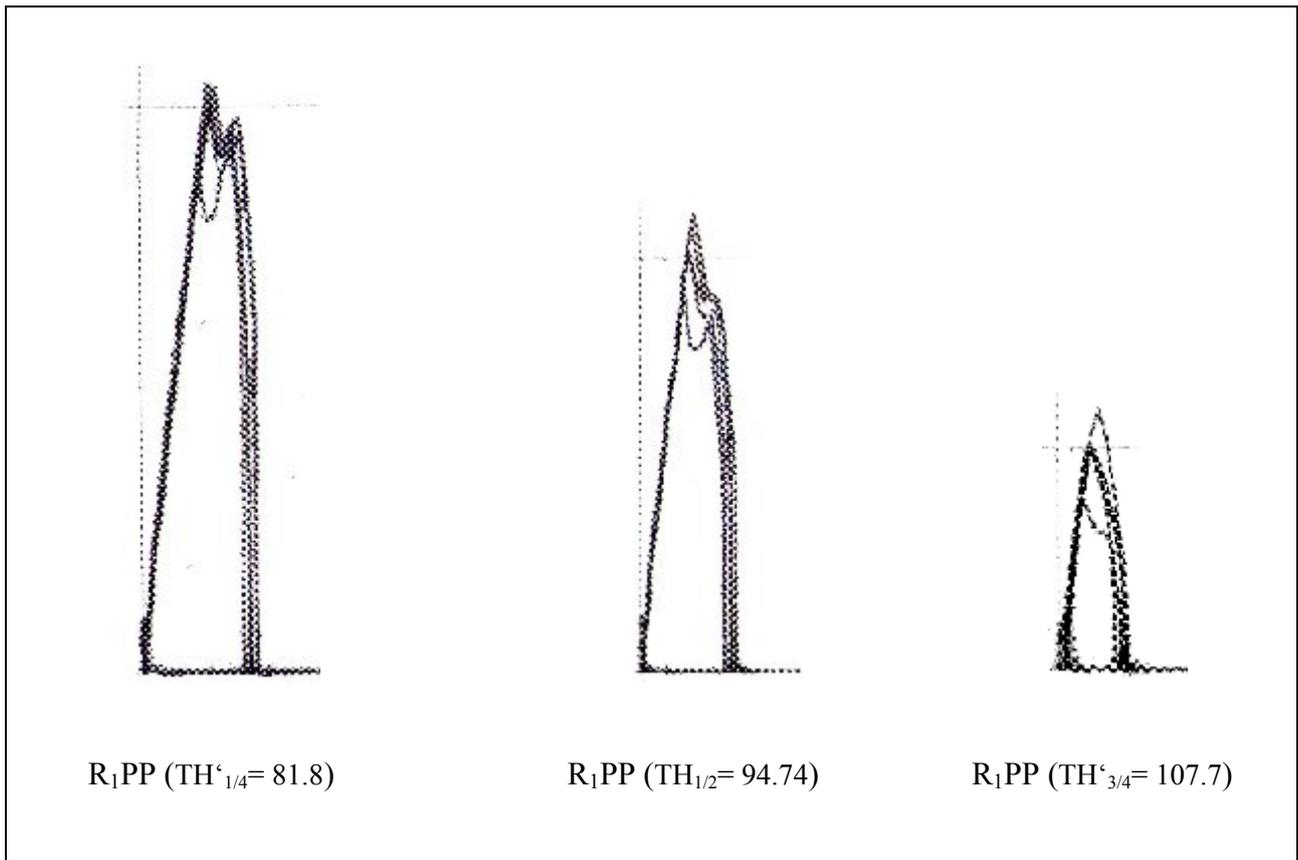


Figure 14: *Alvéogrammes de la formule R₁PP aux taux d'hydratation (TH'_{1/4}, TH_{1/2}, TH'_{3/4}).*

D'une manière générale, nous constatons que :

1. Les courbes alvéographiques des trois formules à base de riz non étuvé (R₁F, R₁PC, R₁PP) ont présenté des allures identiques avec une différence dans les dimensions de ces courbes.
2. L'augmentation du taux d'hydratation des trois pâtes se traduit par une diminution des dimensions des courbes donc des caractéristiques alvéographiques (P et L).
3. La comparaison des courbes des trois formules sans gluten avec celle de la farine témoin de blé tendre indique une différence dans les allures essentiellement au niveau de la longueur des courbes (élasticité L) où cette valeur demeure beaucoup moins importante dans le cas de nos échantillons. La descente perpendiculaire de ces courbes sur l'axe des abscisses commence à partir du sommet du tracé (point de rupture de la bulle) et donne des valeurs d'élasticité (L) très petites renseignant sur la faible capacité de dilatation de ces pâtes.

Les valeurs des caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz non étuvé sont regroupées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz non étuvé.

Formules	Taux d'hydratation TH'(%MS)	Gonflement G (cm ³)	Ténacité P (mm)	Élasticité L (mm)	Rapport de configuration P/L	Tarvail de déformation W (10 ⁻⁴ J)
FI	43.25(g/100g de pâte)	> à 20	-	-	0.45 - 0.65	130-180
BT	TH = 76	20.93± 0.68	98.27 ± 2.26	89.40 ± 6.20	1.11 ± 0.10	276.08 ± 0.44
	TH ^c _{1/4} = 80	10.77± 0.33	115.50± 8.85	23.30 ± 1.27	4.99 ± 0.67	110.00 ± 0.16
R₁F	TH _{1/2} = 91,74	8.73 ± 0.34	76.27 ± 2.07	15.33 ± 1.25	5.01 ± 0.51	40.79 ± 0.03
	TH ^c _{3/4} = 103	7.23 ± 0.61	53.17 ± 2.89	9.67 ± 2.87	6.00 ± 1.75	19.05 ± 0.06
	TH ^c _{1/4} = 80.7	10.20± 0.24	110.37± 3.15	20.67 ± 0.47	5.35 ± 0.27	98.23 ± 0.13
R₁PC	TH _{1/2} = 93.4	7.80 ± 0.28	64.53 ± 3.63	12.33 ± 0.94	5.29 ± 0.72	28.34 ± 0.08
	TH ^c _{3/4} = 106.1	6.97 ± 0.40	55.37 ± 4.15	9.00 ± 1.41	6.37 ± 1.43	20.58 ± 0.06
	TH ^c _{1/4} = 81.8	10.23± 0.21	130.90± 0.90	20.70 ± 0.42	6.33 ± 0.17	99.08 ± 0.05
R₁PP	TH _{1/2} = 94.74	9.53 ± 0.25	99.00 ± 3.24	18.20 ± 0.88	5.46 ± 0.44	65.86 ± 0.14
	TH ^c _{3/4} = 107.7	7.87 ± 0.19	50.97 ± 3.63	12.00 ± 1.41	4.29 ± 0.46	20.86 ± 0.05

FI : farine Idéale (réglementation algérienne : J.O.R.A. 1991).

Les valeurs des indices alvéographiques des trois formules sans gluten (R₁F, R₁PC, R₁PP) ont été pour le gonflement (G), le rapport de configuration (P/L) et le travail de déformation (W), très différentes de celles du témoin de blé tendre ainsi que des normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 : (W : 130-180 x10⁻⁴J ; P/L : 0.45-0.65 et G > à 20 cm³).

Concernant les valeurs du gonflement (G) et de travail de déformation (W), ce sont celles de la formule R₁F au taux d'hydratation TH^c_{1/4} : (G = 10.77 ± 0.33 cm³ ; W = 110 ± 0.16 x 10⁻⁴ J) qui se rapprochent le plus des normes algériennes J.O.R.A. 1991 (G > à 20 cm³ ; W entre (130-180) x 10⁻⁴ J) et du témoin de blé tendre (G = 20.93 ± 0.68 ; W = 276.08 ± 0.44 x 10⁻⁴ J) tout en restant significativement inférieure (G : p < 0.05 ; W : p < 0.05).

Les deux formules restantes (R₁PC, R₁PP) ont présenté quant à elles aussi, les meilleurs valeurs de gonflement (G) et de travail de déformation (W) au taux d'hydratation TH^c_{1/4} : (G) = 10.23 ± 0.21 cm³ et (W) = 99.08 ± 0.05 x 10⁻⁴ J pour la formule R₁PP, suivie des valeurs de (G) = 10.20 ± 0.24 cm³ et (W) = 98.23 ± 0.13 x 10⁻⁴ J pour la formule R₁PC.

En ce qui concerne le rapport de configuration (P/L), c'est la formule R₁PP au taux d'hydratation TH_{3/4} qui a présenté la valeur de (P/L) la plus basse (P/L = 4.29 ± 0.46) et demeure celle qui se rapproche le plus des normes algériennes J.O.R.A. 1991 (P/L entre 0.45 et 0.65), et du témoin de blé tendre (P/L = 1.11 ± 0.10) avec une différence significative avec ce dernier (p < 0.05). D'une manière générale, les valeurs des rapports de configuration de l'ensemble des formules sans gluten étudiées aux différents taux d'hydratation étaient assez élevées par rapport aux normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 (P/L entre 0.45 et 0.65), renseignant sur la forte ténacité des pâtes sans gluten ainsi que sur leur faible capacité d'extensibilité.

Les travaux de BENATALLAH (2009) présentent les caractéristiques alvéographiques des mêmes formules sans gluten en utilisant des quantités d'eau ajoutées aux formules (Q.E.A.) qui se rapprochent de celles de la présente étude au taux d'hydratation TH_{3/4} (**R₁F**_(TH_{3/4}) = 77.84 g/100g contre **RF** = 88.64 g/100g ; **R₁PC**_(TH_{3/4}) = 80.52 g/100g contre **RPC** = 89.12 g/100g ; **R₁PP**_(TH_{3/4}) = 81.92 g/100g contre **RPP** = 90.83 g/100g). La comparaison des indices alvéographiques des deux études a montré que pour le gonflement (G), les valeurs des formules R₁F_(TH_{3/4}), R₁PC_(TH_{3/4}) et R₁PP_(TH_{3/4}) concordent avec celles des formules RF, RPC et RPP en prenant en considération la différence qui existe entre les quantités d'eau ajoutées. Par contre, pour le rapport de configuration (P/L) et le travail de déformation (W), les formules R₁F_(TH_{3/4}), R₁PC_(TH_{3/4}) et R₁PP_(TH_{3/4}) ont présenté des valeurs trop élevées par rapport à celles des formules RF, RPC et RPP. Cette augmentation des valeurs de (P/L) et de (W) peut être attribuée à la différence des (Q.E.A.) utilisées dans les deux études (Tableau 15).

Tableau 15 : Comparaison des indices alvéographiques des deux études.

Indices alvéographiques	R₁F (TH _{3/4})	RF	R₁PC (TH _{3/4})	RPC	R₁PP (TH _{3/4})	RPP
Q.E.A (g/100g)	77.84	88.64	80.52	89.12	81.92	90.83
G (cm³)	7.23 ± 0.61	8.00 ± 0.01	6.97 ± 0.4	8.00 ± 0.04	7.87 ± 0.19	7.50 ± 0.07
P/L	6.00 ± 1.75	1.50 ± 0.04	6.37 ± 1.43	0.20 ± 0.001	4.29 ± 0.46	1.59 ± 0.004
W (10⁻⁴J)	19.05 ± 0.06	13.80 ± 0.01	20.58 ± 0.06	5.30 ± 0.07	20.86 ± 0.05	10.40 ± 0.01

Parmi les formules étudiées, c'est la R₁F au taux d'hydratation TH'_{1/4} qui a présenté le gonflement ($G = 10.77 \pm 0.33 \text{ cm}^3$) et le travail de déformation ($W = 110 \pm 0.16 \times 10^{-4} \text{ J}$) les plus proches aux normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 ($G > \text{à } 20 \text{ cm}^3$, W entre $130-180 \times 10^{-4} \text{ J}$). Le rapport de configuration de cette formule reste parmi les meilleurs enregistrés ($P/L = 4.99 \pm 0.67$). Toutefois, toutes les formules sans étuvage du riz restent jugées non panifiables, cela est du probablement à la différence de l'espèce botanique donc de la composition biochimique des farines étudiées (blé tendre, riz et légumes secs).

Pour la farine de blé tendre ROUSSEL et CHIRON (2003) montrent qu'il y a formation d'un réseau protéique au cours du pétrissage, commençant par la formation de fibrilles protéiques très extensibles de gliadine, ensuite il y a réarrangement des configurations spatiales des protéines, formation de liaisons non covalentes entre les protéines et avec les autres constituants de la farine, rupture et reformation de liaisons disulfures et en fin il y a apparition d'un réseau protéique complexe « le gluten ».

Selon FEILLET (2000), l'amidon et les pentosanes jouent un rôle important dans la formation de la pâte par leur pouvoir fixateur d'eau, ils tiennent à la disposition des protéines du gluten la quantité nécessaire à la formation du réseau protéique, simultanément ils fixent l'eau en excès et empêchent la pâte de coller.

La composition biochimique des formules de riz-légumes secs, leurs propriétés fonctionnelles ainsi que les interactions physicochimiques pouvant s'installer à l'intérieur de ces farines au cours des différentes étapes de la panification sont mal connues, l'explication à proposer est celle d'attribuer la baisse des indices alvéographiques et donc de la force boulangère des pâtes testées à l'absence totale des protéines du gluten de la farine de riz.

2-2-3-Effet de l'étuvage sur le comportement à l'alvéographe Chopin

Dans le but de tester l'effet de l'étuvage sur les caractéristiques rhéologiques voir la valeur boulangère des formules sans gluten, des essais alvéographiques ont été réalisés pour les mêmes formules en utilisant du riz étuvé (R₂F, R₂PC, R₂PP). Pour chaque formule, trois alvéogrammes ont été tracés en utilisant les trois taux d'hydratation déjà choisis (TH'_{1/4}, TH'_{1/2}, TH'_{3/4}). Les alvéogrammes des trois formules à base de riz étuvé sont présentés par les figures : 15, 16, 17.

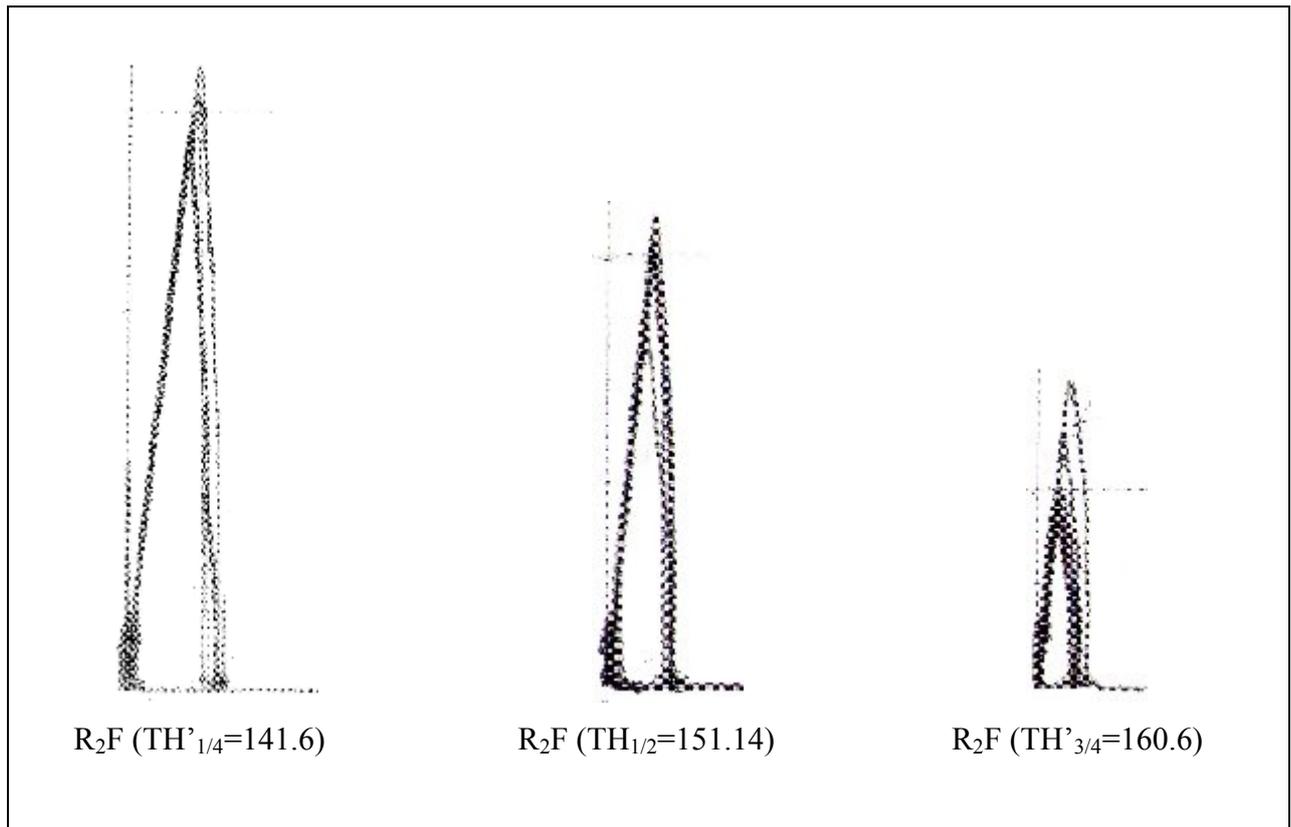


Figure 15: Alvéogrammes de la formule R_2F aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

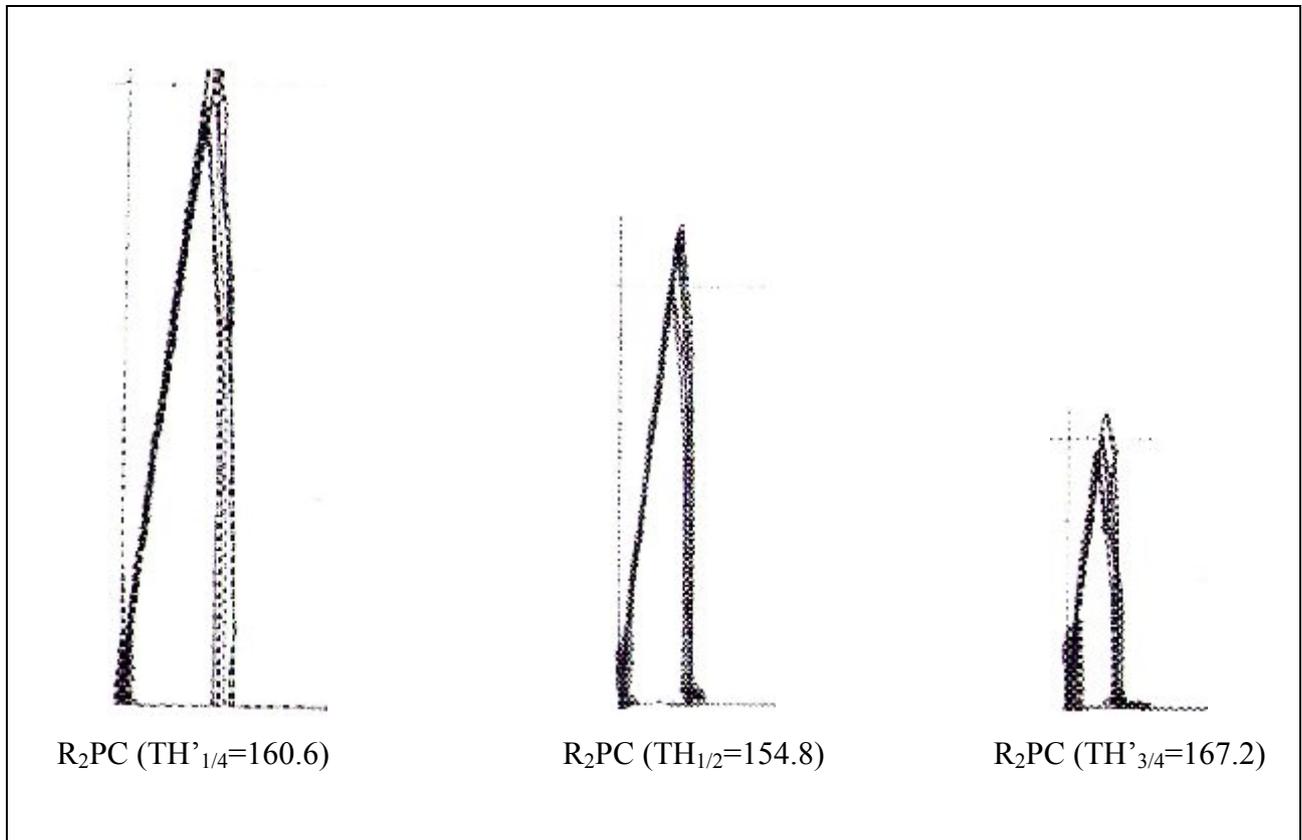


Figure 16: Alvéogrammes de la formule R_2PC aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

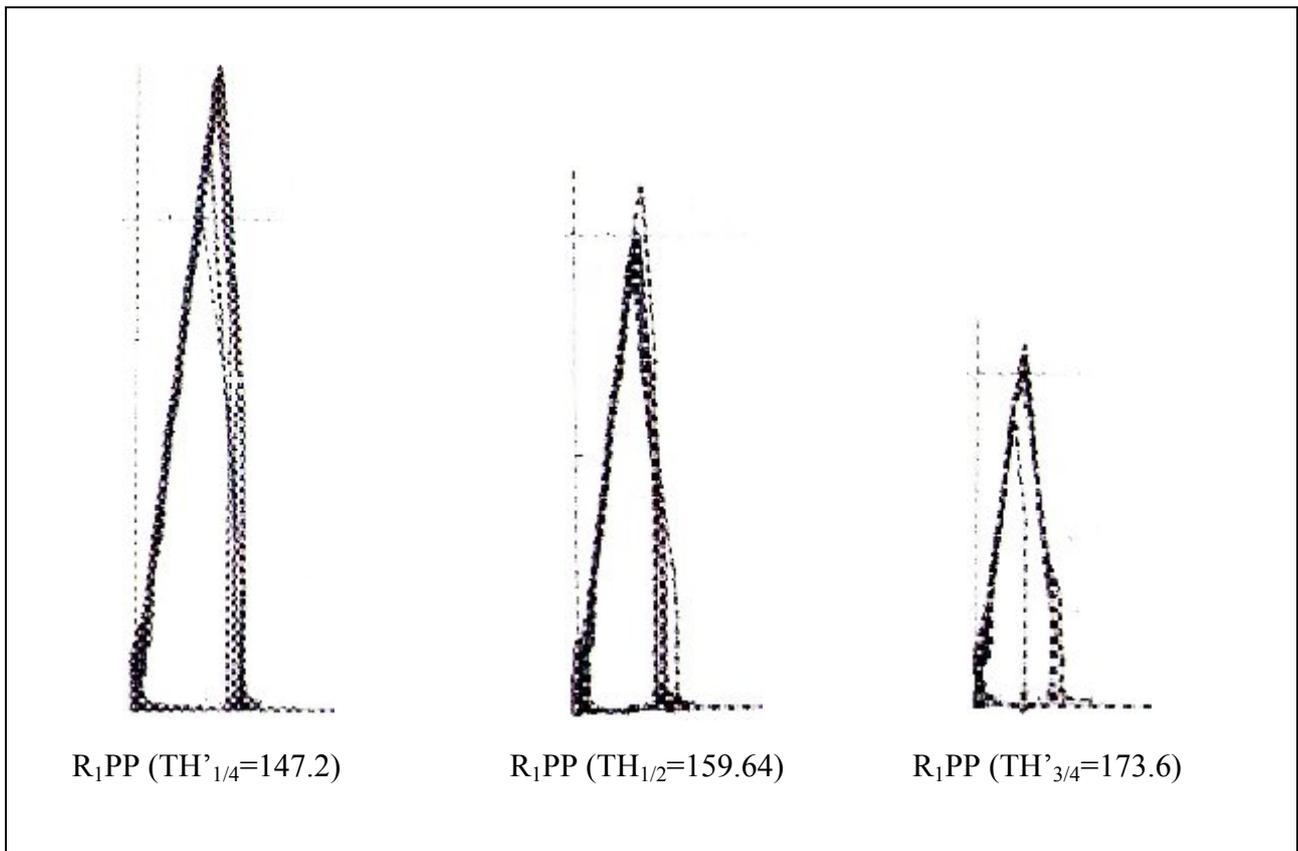


Figure 17: *Alvéogrammes de la formule R₂PP aux taux d'hydratation (TH'_{1/4}, TH_{1/2}, TH'_{3/4}).*

A partir des figures (15, 16, 17) nous pouvons remarquer que :

1. Le comportement des trois formules à base de riz étuvé (R₂F, R₂PC, R₂PP) à l'alvéographe Chopin était généralement similaire à celui des mêmes formules à base de riz non étuvé : les courbes ont présenté des allures presque identiques, ainsi que l'augmentation du taux d'hydratation des pâtes a provoqué une diminution des dimensions des courbes.

2. Les différences observées entre les tracés (R₂) et les tracés (R₁) étaient au niveau des sommets des tracés, ces derniers sont pour les courbes (R₂) plus aigues renseignant sur la facilité de la rupture des bulles et le manque de résistance des pâtes à la déformation. D'autre part, les courbes (R₂) étaient elles mêmes plus étroites par rapport aux courbes (R₁) renseignant sur la rapidité de la rupture des bulles.

Le tableau 16 présente les valeurs des caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz étuvé.

Tableau 16 : Caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz étuvé.

Formules	Taux d'hydratation TH'(%MS)	Gonflement G (cm ³)	Ténacité P (mm)	Élasticité L (mm)	Rapport de configuration P/L	Tarvail de déformation W (10 ⁻⁴ J)
FI	43.25(g/100g de pâte)	> à 20	-	-	0.45 - 0.65	130-180
BT	TH = 76	20.93 ± 0.68	98.27 ± 2.26	89.40 ± 6.20	1.11 ± 0.10	276.08 ± .44
	TH ^c _{1/4} = 141.6	9.07 ± 0.45	131.27 ± 5.41	16.17 ± .18	8.19 ± 0.94	66.03 ± 0.03
R2F	TH _{1/2} = 151.14	7.30 ± 0.22	81.03 ± 18.41	9.67 ± 1.89	8.32 ± 0.33	32.22 ± 0.11
	TH ^c _{3/4} = 160.6	6.53 ± 0.09	45.10 ± 7.13	7.33 ± 0.24	6.19 ± 1.19	10.03 ± 0.06
	TH ^c _{1/4} = 143	9.90 ± 0.29	133.93 ± 7.53	19.77 ± .17	6.81 ± 0.65	83.45 ± 0.37
R₂PC	TH _{1/2} = 154.8	8.67 ± 0.47	105.23 ± 7.53	15.13 ± 1.51	7.06 ± 1.12	43.80 ± 0.06
	TH ^c _{3/4} = 167.2	7.00 ± 0.14	60.13 ± 3.63	9.33 ± 0.47	6.47 ± 0.66	16.20 ± 0.08
	TH ^c _{1/4} = 147.2	9.50 ± 0.41	128.33 ± 8.33	18.17 ± 1.59	7.16 ± 1.05	68.10 ± 0.06
R₂PP	TH _{1/2} = 159.64	8.97 ± 0.45	98.27 ± 6.11	16.17 ± 1.67	6.18 ± 1.04	48.55 ± 0.11
	TH ^c _{3/4} = 173.6	7.93 ± 0.78	71.87 ± 0.52	12.70 ± 2.87	6.00 ± 1.52	30.32 ± 0.03

FI : farine Idéale (réglementation algérienne : J.O.R.A. 1991).

Les caractéristiques rhéologiques des trois formules à base de riz étuvé (R₂F, R₂PC, R₂PP) ont été pour le gonflement (G), le rapport de configuration (P/L) et le travail de déformation (W), très différentes de celles du témoin de blé tendre ainsi que des normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 : (W : 130-180 x 10⁻⁴J ; P/L : 0.45-0.65 et G > à 20 cm³).

En ce qui concerne le gonflement (G) et le travail de déformation (W), c'est la formule R₂PC au taux d'hydratation TH^c_{1/4} : (G = 9.90 ± 0.29 cm³ ; W = 83.45 ± 0.37 x 10⁻⁴ J) qui se rapproche le plus des normes algériennes J.O.R.A. 1991 (G > à 20 cm³ ; W entre (130-180) x 10⁻⁴ J) et du témoin de blé tendre (G = 20.93 ± 0.68 ; W = 276.08 ± 0.44 x 10⁻⁴ J) tout en restant significativement inférieure (G : p < 0.05 ; W : p < 0.05).

Les deux formules restantes (R₂F, R₂PP) ont présenté les meilleures valeurs de gonflement (G) et de travail de déformation (W) au même taux d'hydratation (TH'_{1/4}) que la formule R₂PC : (G) = 9.50 ± 0.41 cm³ et (W) = 68.10 ± 0.06 x 10⁻⁴ J pour la formule R₂PP, suivies des valeurs de (G) = 9.07 ± 0.45 cm³ et (W) = 66.03 ± 0.03 x 10⁻⁴ J pour la formule R₂F.

Pour le rapport de configuration (P/L), c'est la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{3/4} qui a présenté la valeur de (P/L) la plus basse (P/L = 6.00 ± 1.52) et donc la plus proche des normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 (P/L entre 0.45 et 0.65), et du témoin de blé tendre (P/L = 1.11 ± 0.10) avec une différence significative avec ce dernier (p < 0.05).

Les valeurs des rapports de configuration (P/L) de l'ensemble des formules à base de riz étuvé testées aux différents taux d'hydratation ont été trop élevées par rapport aux normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 (P/L entre 0.45 et 0.65), reflétant la forte ténacité des pâtes sans gluten à base de riz étuvé ainsi que leur faible aptitude d'élasticité.

Parmi les trois formules à base de riz étuvé, c'est la R₂PC au taux d'hydratation TH'_(1/4) qui a présenté le gonflement (G = 9.90 ± 0.29 cm³) et le travail de déformation (W = 83.45 ± 0.37 x 10⁻⁴ J) les plus proches aux normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 (G > à 20 cm³, W entre 130-180 x 10⁻⁴ J). Le rapport de configuration de cette formule reste parmi les meilleurs enregistrés (P/L = 4.99 ± 0.67). D'une manière générale, toutes les formules sans gluten à base de riz étuvé restent jugées non panifiables.

Afin de faire ressortir l'effet de l'étuvage sur la qualité boulangère des formules sans gluten, les indices alvéographiques des formules à base de riz étuvé (R₂) ont été comparés avec ceux des formules à base de riz non étuvé (R₁), et cela pour le même légume sec et le même taux d'hydratation (tableau 16, tableau 14).

D'une manière générale, les valeurs des indices alvéographiques des formules (R₂) ont été plus éloignées des normes algériennes J.O.R.A. 1991 (G > à 20 cm³; P/L entre 0.45 et 0.65; W entre (130-180) x 10⁻⁴ J), ainsi que du témoin de blé tendre (G = 20.93 ± 0.68; P/L = 1.11 ± 0.10; W = 276.08 ± 0.44 x 10⁻⁴ J) que celles des formules (R₁).

L'analyse statistique de la différence entre les indices alvéographiques des deux formules (R₁ et R₂) a abouti à des résultats non significatifs entre la majorité des valeurs du gonflement (G),

et du rapport de configuration (P/L). Concernant le travail de déformation (W), la différence était significative ($p < 0.05$) pour toutes les comparaisons faites entre les deux formules (R₁) et (R₂).

En conclusion, l'étuvage du riz a influé négativement les valeurs des caractéristiques alvéographiques (G, P/L et W) des trois formules sans gluten (R₁F, R₁PC et R₁PP) testées aux différents taux d'hydratation : TH'_{1/4}, TH'_{1/2} et TH'_{3/4}, par conséquent, il a baissé la valeur boulangère de ces formules.

Selon BHATACHARYA (1985) l'étuvage du riz provoque simultanément la gélatinisation de l'amidon, ELLIASSON et coll. (1995) supposent que la prise du volume du pain dans le four s'arrête au moment où l'amidon est gélatinisé et que le pain se développe d'autant plus que la gélatinisation est tardive. Ce phénomène risque d'empêcher dans le cas de nos formules la dilatation des pâtes sous l'effet de la poussée d'air exercée par l'alvéographe.

2-2-4-Effet du niveau d'hydratation sur le comportement à l'alvéographe Chopin

Les résultats alvéographiques (tableau 14, 16) permettent d'analyser l'effet du niveau d'hydratations (TH'_{1/4}, TH'_{1/2}, TH'_{3/4}) sur les caractéristiques alvéographiques (G, W, P/L) des différentes formules (R₁ et R₂).

Le gonflement (G) présente au taux d'hydratation (TH'_{1/4}) la valeur la plus proche à celle du témoin, aussi bien pour les formules au riz étuvé (R₂) que pour celles au riz non étuvé (R₁), puis cette valeur diminue à chaque fois que le taux d'hydratation augmente (TH'_{1/2}, TH'_{3/4}). Le même phénomène est remarqué pour le travail de déformation (W).

Selon CALVEL (1984), l'augmentation de la consistance de la pâte au cours du pétrissage s'explique en grande partie par une fixation progressive de l'eau sur les constituants de la farine et donc par diminution de l'eau libre responsable de la fluidité de la pâte.

La baisse des indices alvéographiques de nos formules engendrée par l'augmentation des taux d'hydratation peut être expliquée par la présence d'un excès d'eau entre les constituants des farines induisant ainsi une grande fluidité, l'apparition d'un caractère collant (CALVEL 1984) et par conséquent une diminution de la force boulangère des pâtes.

Concernant la relation entre le changement du niveau d'hydratation et le rapport de configuration (P/L) (figure 18), les formules R₁F, R₁PC présentent les valeurs du (P/L) les plus élevées aux taux d'hydratation (TH_{3/4}), le (P/L) des formules (R₁PP et R₂PP) diminuent avec l'augmentation du taux d'hydratation et en fin les formules (R₂F, R₂PC) présentent la valeur la plus élevée de rapport de configuration (P/L) au taux d'hydratation (TH_{1/2}). Ces résultats sont dus à une diminution de la ténacité (P) plus ou moins importante que la diminution de l'élasticité (L) à chaque fois qu'on augmente le taux d'hydratation.

Les valeurs des rapports de configuration de l'ensemble des formules étudiées aux différents taux d'hydratation étaient assez élevées par rapport à celle de la farine témoin de blé tendre, renseignant sur la forte ténacité des pâtes sans gluten ainsi que sur leur faible capacité d'élasticité.

2-2-5-Conclusion

La faine témoin de blé tendre peut être jugée panifiable malgré ses propriétés rhéologiques moyennes.

Parmi les formules étudiées, c'est la R₁F au taux d'hydratation TH'_{1/4}=80 % qui a présenté le gonflement (G) et le travail de déformation (W) les plus proches des normes algériennes de panification J.O.R.A. (1991) ainsi que du témoin de blé tendre (BT). Le rapport de configuration (P/L) reste parmi les meilleurs enregistrés. Toutefois, toutes les formules sans étuvage du riz restent jugées non panifiables,

Parmi les trois formules à base de riz étuvé, c'est la R₂PC au taux d'hydratation TH'_{1/4}=160.6 % qui a présenté le gonflement (G) et le travail de déformation (W) les plus proches aux normes algériennes de panification J.O.R.A. (1991) et au témoin de blé tendre (BT). Le rapport de configuration reste parmi les meilleurs enregistrés. Toutes les formules sans gluten à base de riz étuvé restent jugées non panifiables.

Les valeurs des indices alvéographiques des formules (R₂) étaient plus éloignées des normes algériennes J.O.R.A. (1991) et du témoin de blé tendre (BT) que celles des formules (R₁). Nous pouvons conclure que l'étuvage du riz a influé négativement les valeurs des indices alvéographiques (G, P/L et W) des formules (R₁) testées aux différents taux d'hydratation : TH'_{1/4}, TH'_{1/2} et TH'_{3/4}, par conséquent, il a baissé la valeur boulangère de ces formules.

Concernant le changement du niveau d'hydratation, le gonflement (G) et le travail de déformation (W) ont présenté au taux d'hydratation (TH'_{1/4}) les meilleures valeurs aussi bien pour les formules au riz étuvé que pour celles au riz non étuvé, puis ces valeurs ont diminué à chaque fois que le taux d'hydratation augmente (TH'_{1/2}, TH'_{3/4}). Le rapport de configuration (P/L) a suivi globalement une loi anarchique en changeant le niveau d'hydratation pour l'ensemble des formules testées, ces valeurs étaient assez élevées par rapport à celle de la farine témoin de blé tendre.

3- La qualité des pains sans gluten obtenus

L'aptitude des formules sans gluten à la panification était étudiée par l'essai de panification qui reste le moyen le plus garanti permettant de tirer des conclusions confirmatives sur la valeur boulangère d'une farine (FEILLET 2000). Un beau pain se caractérise par sa couleur, son volume important, son odeur, son goût et son comportement à la mastication (NAMOUNE 1989).

Après 30 min de la sortie du four, les pains obtenus ont été caractérisés selon deux critères :

- La qualité sensorielle (couleur, odeur et texture) des pains et mies ;
- Les volumes spécifiques des pains et mies.

3-1- La qualité sensorielle des pains obtenus

Les caractéristiques sensorielles des pains témoin, à base de riz étuvé et non étuvé a été effectuée à l'œil nu de l'extérieur et des coupes longitudinales. La description a porté sur la croûte (couleur, texture, épaisseur), la mie (couleur, texture, alvéolage) et sur l'odeur du pain (bonne, désagréable). La couleur, l'odeur et la texture du pain sont les premiers aspects qui attirent l'attention du consommateur.

3-1-1- La qualité sensorielle des trois pains à base de riz non étuvé

La description des caractéristiques sensorielles des pains et mies (témoin – formules à base de riz non étuvé) est représentée dans le tableau 17.

Tableau 17 : Description sensorielle des pains à base de riz non étuvé.

Pain	Croûte			Mie			Odeur
	Couleur	Texture	Epaisseur	Couleur	Texture	Forme des alvéoles	
BT	Brune	Crousti- ante	Fine	Blanche à crème	Alvéolée	Régulière	Bonne
R₁F (TH _{1/4})	Rougeâtre**	Dure	Fine	Crème à brunâtre**	Compacte	-	Désagréable
R₁F (TH _{1/2})	Rougeâtre*	Dure	Fine	Crème à brunâtre*	Compacte	-	Désagréable
R₁F (TH _{3/4})	Rougeâtre	Dure	Fine	Crème à brunâtre	Peu alvéolée	Irrégulière	Désagréable
R₁PC (TH _{1/4})	Rougeâtre**	Dure	Fine	Crème à jaunâtre**	Compacte	-	Désagréable
R₁PC (TH _{1/2})	Rougeâtre*	Dure	Fine	Crème à jaunâtre*	Compacte	-	Désagréable
R₁PC (TH _{3/4})	Rougeâtre	Dure	Fine	Crème à jaunâtre	Peu alvéolée	Irrégulière	Désagréable
R₁PP (TH _{1/4})	Rougeâtre**	Dure	Fine	Crème**	Compacte	-	Désagréable
R₁PP (TH _{1/2})	Rougeâtre*	Dure	Fine	Crème*	Compacte	-	Désagréable
R₁PP (TH _{3/4})	Rougeâtre	Dure	Fine	Crème	Peu alvéolée	Irrégulière	Désagréable

* : intensité du critère.

Le pain témoin de blé tendre a présenté une croûte de couleur brunâtre, elle est fine et croustillante. D'autre part, la mie est de couleur blanche à crème, elle a présenté des alvéoles de forme régulière. L'odeur du pain témoin de blé tendre est jugée bonne.

Les trois pains à base de riz non étuvé (R_1F , R_1PC , R_1PP) ont montré aux différents taux d'hydratation une croûte de couleur rougeâtre, elle est plus sombre au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ des trois formules (R_1F , R_1PC , R_1PP), puis elle devient claire en augmentant les taux d'hydratation des pâtes à pain. Les croûtes de tous les pains à base de riz non étuvé ont présenté une texture fine et dure.

Les mies des trois pains sans gluten étaient de couleurs différentes et caractéristiques selon leur composition en matières premières : la mie (R_1F) est crème à brunâtre, la mie (R_1PC) est crème à jaunâtre, et enfin la mie (R_1PP) est de couleur crème. L'intensité de chaque couleur diminue avec l'augmentation des taux d'hydratation.

Les mies des pains à base de riz non étuvé (R_1F , R_1PC , R_1PP) aux taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ et $TH_{1/2}$, ont montré une texture compacte et entassée avec absence presque totale des alvéoles. Les mies des trois pains au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ ont présenté peu d'alvéoles de forme irrégulière ce qui pourrait être dû aux quantités d'eau élevées utilisées pour la préparation de ces pains

Les trois pains à base de riz non étuvé ont dégagé des odeurs caractéristiques des légumes secs qui les composent, ces différentes odeurs peuvent être jugées désagréables.

En conclusion, les trois pains à base de riz non étuvé aux différents taux d'hydratation ont présenté les meilleures caractéristiques sensorielles au niveau de la croûte où la couleur «rougeâtre» était jugée mieux appréciée que celle du pain témoin de blé tendre «brune», ainsi que l'épaisseur de la croûte jugée de même finesse que celle de la croûte du pain témoin.

D'autre part, les trois pains (R_1F , R_1PC , R_1PP) au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ ont montré un meilleur alvéolage de mie par rapport aux deux autres taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$). Toutefois, les trois pains à base de riz non étuvé étaient de qualité nettement inférieure à celle du pain témoin de blé tendre, notamment au niveau de la couleur et de l'alvéolage des mies ainsi qu'au niveau de l'odeur.

3-1-2- La qualité sensorielle des trois pains à base de riz étuvé

La description des caractéristiques sensorielles des pains et mies (témoin – formules à base de riz étuvé) est représentée dans le tableau 18.

Tableau 18 : Description sensorielle des pains à base de riz étuvé.

Pain	Croûte			Mie			Odeur
	Couleur	Texture	Epaisseur	Couleur	Texture	Forme des alvéoles	
BT	Brune	Croustiante	Fine	Blanche à crème	Alvéolée	Régulière	Bonne
R₂F (TH^{1/4})	Rougeâtre pâle	Dure	Epaisse	Crème foncée à brunâtre**	Compacte	-	Désagréable
R₂F (TH_{1/2})	Rougeâtre pâle*	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée à brunâtre*	Compacte, collante	-	Désagréable
R₂F (TH^{3/4})	Rougeâtre pâle**	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée à brunâtre	Collante avec très grandes alvéoles	Irrégulière	Désagréable
R₂PC (TH^{1/4})	Rougeâtre pâle	Dure	Epaisse	Crème foncée à jaunâtre**	Compacte	-	Désagréable
R₂PC (TH_{1/2})	Rougeâtre pâle*	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée à jaunâtre*	Compacte, collante	-	Désagréable
R₂PC (TH^{3/4})	Rougeâtre pâle**	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée à jaunâtre	Collante avec très grandes alvéoles	Irrégulière	Désagréable
R₂PP (TH^{1/4})	Rougeâtre pâle	Dure	Epaisse	Crème foncée**	Compacte	-	Désagréable
R₂PP (TH_{1/2})	Rougeâtre pâle*	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée*	Compacte, collante	-	Désagréable
R₂PP (TH^{3/4})	Rougeâtre pâle**	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée	Collante avec très grandes alvéoles	Irrégulière	Désagréable

* : intensité du critère.

Les trois pains à base de riz étuvé (R₂F, R₂PC, R₂PP) ont présenté aux différents taux d'hydratation une croûte de couleur rougeâtre pâle, elle est plus sombre au taux d'hydratation TH^{1/4} des trois formules (R₂F, R₂PC, R₂PP), puis elle devient claire aux taux d'hydratation élevés (TH_{1/2}, TH^{3/4}). L'intensité de cette couleur pâle est proportionnelle avec l'augmentation des quantités d'eau ajoutées aux pâtes à pain. Les croûtes de tous les pains à base de riz étuvé ont

présenté une texture épaisse et dure au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ puis cette texture est devenue plus épaisses et fissurées aux taux d'hydratation élevés ($TH'_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

Les mies des trois pains sans gluten étaient de couleurs différentes et caractéristiques : la mie (R_2F) est crème foncée à brunâtre, la mie (R_2PC) est crème foncée à jaunâtre, et la mie (R_2PP) est de couleur crème foncée. L'intensité de chaque couleur diminue avec l'augmentation des taux d'hydratation.

Les mies des pains à base de riz étuvé (R_2F , R_2PC , R_2PP) aux taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ et $TH'_{1/2}$, ont montré une texture compacte, entassée et collante avec absence presque totale des alvéoles. Les mies des trois pains au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ ont présenté une grande alvéole pour chacun, ce qui pourrait être dû aux quantités d'eau élevées utilisées lors de la formation des pâtes, la fluidité de ces dernières a facilité l'accumulation des gaz de fermentation dans ces grandes alvéoles donnant l'impression que les mies étaient trouées.

Les trois pains à base de riz étuvé ont dégagé des odeurs caractéristiques des légumes secs qui les composent, ces différentes odeurs sont jugées désagréables.

Pour faire ressortir l'effet de l'étuvage sur l'aptitude technologique des pains sans gluten, les caractéristiques sensorielles des pains à base de riz étuvé (R_2) sont comparées à celles des pains à base de riz non étuvé (R_1) (tableau 18, tableau 17).

Les croûtes des pains (R_2) qui étaient de couleur rougeâtre pâle, de texture dure, fissurée et plus ou moins épaisse semblent présentées des caractéristiques inférieures à celles des croûtes à base de riz non étuvé (rougeâtre, dure, fine).

D'autre part, les mies des pains (R_2) ont montré des couleurs sombres dues à l'étuvage qui change la couleur de riz du blanc au crème, des textures compactes et collantes avec grandes alvéoles au $TH'_{3/4}$ contre des textures de mies (R_1) compactes mais non collantes avec peu d'alvéoles dispersées au $TH'_{3/4}$.

Les mauvaises caractéristiques sensorielles présentées par les pains à base de riz étuvé sont conférées en grande part aux volumes d'eau excessifs ajoutés aux pâtes à pains. Par conséquent, l'étuvage du riz a diminué les caractéristiques sensorielles des pains.

3-1-3- Conclusion

Le pain témoin de blé tendre a présenté une croûte de couleur brunâtre, elle est fine et croustillante. La mie est de couleur blanche à crème, elle a présenté des alvéoles de forme régulière. L'odeur du pain témoin est jugée bonne.

Les trois pains à base de riz non étuvé aux différents taux d'hydratation ont montré les meilleures caractéristiques sensorielles au niveau de la croûte où la couleur «rougeâtre» était jugée mieux appréciée que celle du pain témoin « brune », ainsi que l'épaisseur de la croûte jugée de même finesse que celle de la croûte du pain témoin. D'autre part, les trois pains (R₁F, R₁PC, R₁PP) au taux d'hydratation TH_{3/4} ont montré un meilleur alvéolage de mie par rapport aux autres taux d'hydratation.

Toutefois, les trois pains à base de riz non étuvé étaient de qualité inférieure à celle du pain témoin, notamment au niveau de la couleur et de l'alvéolage des mies ainsi qu'au niveau de l'odeur.

Les croûtes des pains (R₂) qui ont été de couleur rougeâtre pâle, de texture dure, fissurée et plus ou moins épaisse semblent présentées des caractéristiques inférieures à celles des croûtes à base de riz non étuvé (rougeâtre, dure, fine).

D'autre part, les mies des pains (R₂) ont montré des couleurs sombres dues à l'étuvage qui change la couleur de riz du blanc au crème, des textures compactes et collantes avec grandes alvéoles au TH_{3/4} contre des textures de mies (R₁) compactes mais non collantes avec peu d'alvéoles au TH_{3/4}. Ces mauvaises caractéristiques sensorielles sont attribuées en grande part aux volumes d'eau excessifs ajoutés aux pâtes à pains. En finalité, l'étuvage du riz a diminué les caractéristiques sensorielles des pains.

3-2- Les volumes spécifiques des trois pains à base de riz non étuvé

L'appréciation des pains au riz non étuvé était réalisée en premier temps par la mesure des volumes spécifiques des pains et des mies (tableau 19).

Tableau 19 : Caractéristiques des pains et mies des formules à base de riz non étuvé.

Farines	Taux d'hydratation TH'(%MS)	V _{sp} (cm ³ /g)	V _{sm} (cm ³ /g)
BT	TH = 76	2.6 ± 0.4	2.8 ± 0.0
R₁F	TH' _{1/4} = 80	1 ± 0.1	1.2 ± 0.0
R₁F	TH' _{1/2} = 91	1.1 ± 0.0	1.1 ± 0.0
R₁F	TH' _{3/4} = 103	1.2 ± 0.02	1.4 ± 0.0
R₁PC	TH' _{1/4} = 80.7	1.1 ± 0.0	1.5 ± 0.0
R₁PC	TH' _{1/2} = 93.2	1.2 ± 0.0	1.4 ± 0.0
R₁PC	TH' _{3/4} = 106.1	1.2 ± 0.0	1.5 ± 0.0
R₁PP	TH' _{1/4} = 81.8	1 ± 0.0	1.2 ± 0.0
R₁PP	TH' _{1/2} = 94.7	1.1 ± 0.0	1.2 ± 0.0
R₁PP	TH' _{3/4} = 107.7	1.2 ± 0.0	1.2 ± 0.0

P_{ds_p} et P_{ds_m}: poids du pain et de sa mie respectivement.

V_p et V_m: volume du pain et de sa mie respectivement.

V_{sp} et V_{sm}: volume spécifique du pain et de sa mie respectivement.

Rappelons que tous les pâtons (témoin, formules) avaient le même volume initial de pâte (≈73 cm³) avec les différents taux d'hydratation testés.

Les valeurs des volumes spécifiques de témoin de blé tendre (BT) ont été pour le pain (V_{sp}= 2.6 cm³/g) et pour la mie (V_{sm} = 2.8 cm³/g). Comparé aux travaux de BENATALLAH (2009) et de GHERAIRIA (2011) qui présentent un pain de blé tendre de volume spécifique (V_{sp}= 3,3 cm³/g et V_{sp}= 3,6 cm³/g) successivement, notre pain témoin est jugé moins développé et son volume spécifique reste inférieur.

Concernant les pains sans étuvage du riz, les trois formules (R₁F, R₁PC, R₁PP) au taux d'hydratation TH_{3/4} ont donné leur meilleur volume spécifique, avec une valeur identique de (V_{sp}= 1.2 cm³/g), par conséquent c'est le volume spécifique le plus proche du pain témoin de blé tendre (V_{sp}= 2.6 cm³/g) tout en restant significativement inférieur (p < 0.05). Comparé au pain de la

formule RF cité par GHERAIRIA 2011 ($V_{sp} = 2.7 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour un taux d'hydratation de 86.7%) notre pain R1F ($TH_{1/2}$) est jugé moins développé et son volume spécifique reste inférieur. Cela peut être dû à la différence de la température de fermentation existante entre les deux diagrammes de panification (38C° pour R1F contre 35C° pour RF).

En ce qui concerne les volumes spécifiques des mies, ce sont ceux de la formule (R₁PC) aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4} = 80.7 \%$ et $TH'_{3/4} = 106.1 \%$) qui ont présenté la valeur la plus élevée ($V_{sm} = 1.5 \text{ cm}^3/\text{g}$), donc la plus proche du volume spécifique de la mie de blé tendre ($V_{sm} = 2.8 \text{ cm}^3/\text{g}$) tout en restant significativement inférieur ($p < 0.05$).

Les deux formules restantes ont présenté quant à elles aussi leurs meilleurs volumes spécifiques de mie au taux d'hydratation ($TH'_{3/4}$) avec les valeurs successives de : ($V_{sm} = 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$) pour la formule (R₁F) et ($V_{sm} = 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$) pour la formule (R₁PP).

Parmi les trois pains sans étuvage du riz testés, c'est celui de la formule (R₁PC) au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ qui a présenté le volume spécifique de pain ($V_{sp} = 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$) et celui de mie ($V_{sm} = 1.5 \text{ cm}^3/\text{g}$) les plus proches de pain témoin de blé tendre ($V_{sp} = 2.6 \text{ cm}^3/\text{g}$, $V_{sm} = 1.54 \text{ cm}^3/\text{g}$). Néanmoins, les volumes spécifiques de tous les pains sans étuvage du riz restent significativement inférieurs de ceux du pain témoin de blé tendre.

Ces résultats ne concordent pas avec la conclusion tirée des essais alvéographiques indiquant que c'est la formule (R₁F) au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ qui présente les meilleures caractéristiques alvéographiques tout en restant significativement inférieur au témoin de blé tendre. A partir de ces comparaisons, les formules sans étuvage de riz ont présenté aux essais alvéographiques un comportement indépendant de celui de l'essai de panification.

Les augmentations du volume spécifique des pains et celui des mies au taux d'hydratation ($TH'_{3/4}$) sont dues probablement aux quantités élevées d'eau utilisées lors de la fabrication de ces pâtes, par conséquent l'excès d'eau provoque l'augmentation de la fluidité de la pâte et de la viscosité ce qui facilite l'emprisonnement d'une quantité des gaz de la fermentation à l'intérieur de petites alvéoles.

3-3- Les volumes spécifiques des trois pains avec étuvage du riz

La caractérisation des pains à base de riz étuvé était réalisée en premier temps par la mesure des volumes spécifiques des pains et des mies (tableau 20).

Tableau 20: Caractéristiques des pains et mies des formules à base de riz étuvé.

Farines	Taux d'hydratation TH'(%MS)	V _{sp} (cm ³ /g)	V _{sm} (cm ³ /g)
BT	TH = 76	2.6 ± 0.4	2.8 ± 0.0
R ₂ F	TH' _{1/4} = 141.6	1.2 ± 0.0	1.4 ± 0.0
R ₂ F	TH' _{1/2} = 151.1	1.2 ± 0.0	1.4 ± 0.0
R ₂ F	TH' _{3/4} = 160.6	1.4 ± 0.0	1.3 ± 0.0
R ₂ PC	TH' _{1/4} = 143	1.1 ± 0.0	1.5 ± 0.0
R ₂ PC	TH' _{1/2} = 154.8	1.2 ± 0.1	1.3 ± 0.0
R ₂ PC	TH' _{3/4} = 167.2	1.3 ± 0.0	1.2 ± 0.0
R ₂ PP	TH' _{1/4} = 147.2	1.2 ± 0.0	1.6 ± 1.6
R ₂ PP	TH' _{1/2} = 160.4	1.2 ± 0.0	1.1 ± 0.1
R ₂ PP	TH' _{3/4} = 173.6	1.3 ± 0.0	1 ± 0.0

P_{ds_p} et P_{ds_m}: poids du pain et de sa mie respectivement.

V_p et V_m: volume du pain et de sa mie respectivement.

V_{sp} et V_{sm}: volume spécifique du pain et de sa mie respectivement.

Rappelons que tous les pâtons (témoin, formules) avaient le même volume initial de pâte (≈73 cm³) avec les différents taux d'hydratation testés.

Concernant les pains à base de riz étuvé, c'est celui de la formule (R₂F) au taux d'hydratation TH'_{3/4} = 160.6 qui a donné le volume spécifique le plus élevé (V_{sp} = 1.4 cm³/g), par conséquent il est le plus proche du pain témoin de blé tendre (V_{sp} = 2.6 cm³/g) tout en restant significativement inférieur (p < 0.05).

Les pains des deux formules restantes (R₂PC, R₂PP) ont présenté les volumes spécifiques les plus élevés au même taux d'hydratation (TH'_{3/4}), (V_{sp} = 1.3 cm³/g pour la formule (R₂PP) et V_{sp} = 1.31 ± 0.05 cm³/g pour la formule (R₂PC)).

En ce qui concerne les volumes spécifiques des mies, c'est celui de la formule (R₂PP) au taux d'hydratation $TH'_{1/4} = 147.2$ qui a présenté la valeur la plus élevée ($V_{S_m} = 1.6 \text{ cm}^3/\text{g}$), donc c'est celui qui se rapproche le plus du volume spécifique de la mie de blé tendre ($V_{S_m} = 2.8 \text{ cm}^3/\text{g}$) tout en restant significativement inférieur ($p < 0.05$)

Les deux formules restantes ont présenté quant à elles aussi leurs meilleurs volumes spécifiques de mie au même taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$) avec les valeurs successives de : ($V_{S_m} = 1.51 \pm 0.03 \text{ cm}^3/\text{g}$) pour la formule (R₂PC) et ($V_{S_m} = 1.39 \pm 0.01 \text{ cm}^3/\text{g}$) pour la formule (R₂F).

Parmi les trois pains à base de riz étuvé, c'est celui de la formule (R₂F) au taux d'hydratation $TH'_{3/4} = 160.6$ qui a présenté le volume spécifique ($V_{S_p} = 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$) le plus proche de pain témoin de blé tendre ($V_{S_p} = 2.6 \text{ cm}^3/\text{g}$). Par contre, il a présenté au même taux d'hydratation le volume spécifique de mie le plus bas ($V_{S_m} = 1.3 \text{ cm}^3/\text{g}$).

La même remarque était notée pour les pains des deux formules (R₂PC, R₂PP), ils ont présenté les meilleurs volumes spécifiques de pains avec les mauvais volumes spécifiques de mies. Toutefois, les volumes spécifiques de tous les pains à base de riz étuvé restent significativement inférieurs de ceux du pain témoin de blé tendre.

Ces résultats ne concordent pas avec la conclusion tirée des essais alvéographiques indiquant que c'est la formule (R₂PC) au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ qui a présenté les meilleures caractéristiques alvéographiques tout en restant significativement inférieur au témoin de blé tendre. A partir de ces comparaisons, les formules à base de riz étuvé ont présenté aux essais alvéographiques un comportement indépendant de celui de l'essai de panification.

Afin de faire ressortir l'effet de l'étuvage sur la qualité boulangère des formules sans gluten, les volumes spécifiques des pains et des mies des formules à base de riz étuvé (R₂) ont été comparés à ceux des formules à base de riz non étuvé (R₁) (tableau 18, tableau 17).

En ce qui concerne les pains, les volumes spécifiques (V_{S_p}) de toutes les formules à base de riz étuvé ont présenté des valeurs significativement supérieures à celles des (V_{S_p}) des formules à base de riz non étuvé pour le même légume sec et le même aux d'hydratation, à l'exception de la formule R₂PC qui a présenté les mêmes volumes spécifiques que la formule R1PP au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ et $TH'_{1/2}$ ($V_{S_p} = 1.1 \text{ cm}^3/\text{g}$ au $TH'_{1/4}$ et $V_{S_p} = 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ au $TH'_{1/2}$). A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que l'étuvage du riz a amélioré les volumes spécifiques des pains sans gluten, tout en restant significativement inférieurs à ceux du pain témoin de blé tendre.

Les formules à base de riz étuvé ont présenté aux essais alvéographiques un comportement indépendant de celui de l'essai de panification.

Pour les comparaisons des mies, les volumes spécifiques (V_{sm}) de la majorité des formules à base de riz étuvé ont présenté par contre des valeurs significativement inférieures à celles des (V_{sm}) des formules à base de riz non étuvé pour le même légume sec et le même taux d'hydratation. Les améliorations des (V_{sm}) ont été enregistrées pour la formule R₂F au taux d'hydratation TH'_{1/4} et TH'_{1/2} ($V_{sm}= 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₂F au TH'_{1/4} contre $V_{sm}= 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₁F au même taux d'hydratation ; $V_{sm}= 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₂F au TH'_{1/2} contre $V_{sm}= 1.1 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₁F au même taux d'hydratation), ainsi que pour la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{1/4} ($V_{sm}= 1.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₂PP contre $V_{sm}= 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₁PP au même taux d'hydratation).

Il faut noter que les meilleurs volumes spécifiques ont été enregistrés pour les formules à base de riz étuvé (R₂) avec un $V_{sp}= 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour la formule R₂F au taux d'hydratation TH'_{3/4} et un $V_{sm}= 1.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{1/4}. Les volumes spécifiques de tous les pains à base de riz étuvé restent significativement inférieurs de ceux du pain témoin de blé tendre.

Selon CALVEL (1984), le gaz carbonique produit au cours de la fermentation des pains de blé tendre s'accumule pour exercer une pression interne sur le réseau imperméable du gluten, ce qui permet à la pâte de lever en maintenant une structure externe. CHARGELEGUE et coll. (1994) expliquent ce phénomène par la prise de force de la pâte qui correspond à une réduction de la ténacité (P) du gluten associée à une augmentation de sa résistance élastique (L).

Une fois la pâte fermentée est mise au four, FEILLET (2000) souligne que le volume du pain augmente brutalement par dilatation des gaz contenues dans les alvéoles, ensuite progressivement jusqu'à ce que les levures sont inactivées (55°C) les enzymes (α -amylase est détruite à 70°C), l'amidon gélatinisé (65 - 80°C) et les protéines termorigidifiées (70 - 90°C). La dilatation des gaz continue au dessus de 70°C dans la mesure où les contraintes exercées par la pâte ne s'opposent pas à leur expansion, bien que la mie commence à se figer à 100 °C.

De ce fait nous pouvons conclure que, l'absence totale des protéines formant le réseau imperméable de gluten dans la farine de riz peut être la cause principale de l'échappement du gaz

carbonique au cours de la fermentation et la cuisson. Par conséquent les pains cuits sont très peu développés et leurs mies sont compactes et entassées.

3-4- Conclusion

Parmi les trois pains sans étuvage du riz testés, c'est celui de la formule (R₁PC) au taux d'hydratation TH'_{3/4} qui a présenté le volume spécifique de pain et celui de mie les plus proches de pain témoin de blé tendre.

Concernant les trois pains à base de riz étuvé, c'est celui de la formule (R₂F) au taux d'hydratation TH'_{3/4} qui a présenté le volume spécifique le plus proche de pain témoin de blé tendre. Par contre, il a présenté au même taux d'hydratation le volume spécifique de mie le plus bas. La même remarque a été notée pour les pains des deux formules (R₂PC, R₂PP). Toutefois, les volumes spécifiques de tous les pains (R₁ et R₂) restent significativement inférieurs de ceux du pain témoin de blé tendre

Les volumes spécifiques de pain (V_{sp}) de toutes les formules à base de riz étuvé ont présenté des valeurs significativement supérieures à celles des (V_{sp}) des formules à base de riz non étuvé pour le même légume sec et le même taux d'hydratation, à l'exception de la formule R₂PC au taux d'hydratation TH'_{1/4} et TH'_{1/2}. Nous pouvons conclure que l'étuvage du riz a amélioré les volumes spécifiques des pains sans gluten, tout en restant significativement inférieurs à ceux du pain témoin.

Les volumes spécifiques de mie (V_{sm}) de la majorité des formules à base de riz étuvé ont présenté par contre des valeurs significativement inférieures à celles des (V_{sm}) des formules à base de riz non étuvé pour le même légume sec et le même taux d'hydratation. Les améliorations des (V_{sm}) sont enregistrées pour la formule R₂F au taux d'hydratation TH'_{1/4} et TH'_{1/2}, ainsi que pour la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{1/4}.

Il faut noter que les meilleurs volumes spécifiques étaient enregistrés pour les formules à base de riz étuvé (R₂) avec un V_{sp}= 1.4 cm³/g pour la formule R₂F au taux d'hydratation TH'_{3/4} et un V_{sm}= 1.6 cm³/g pour la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{1/4}.

P/L

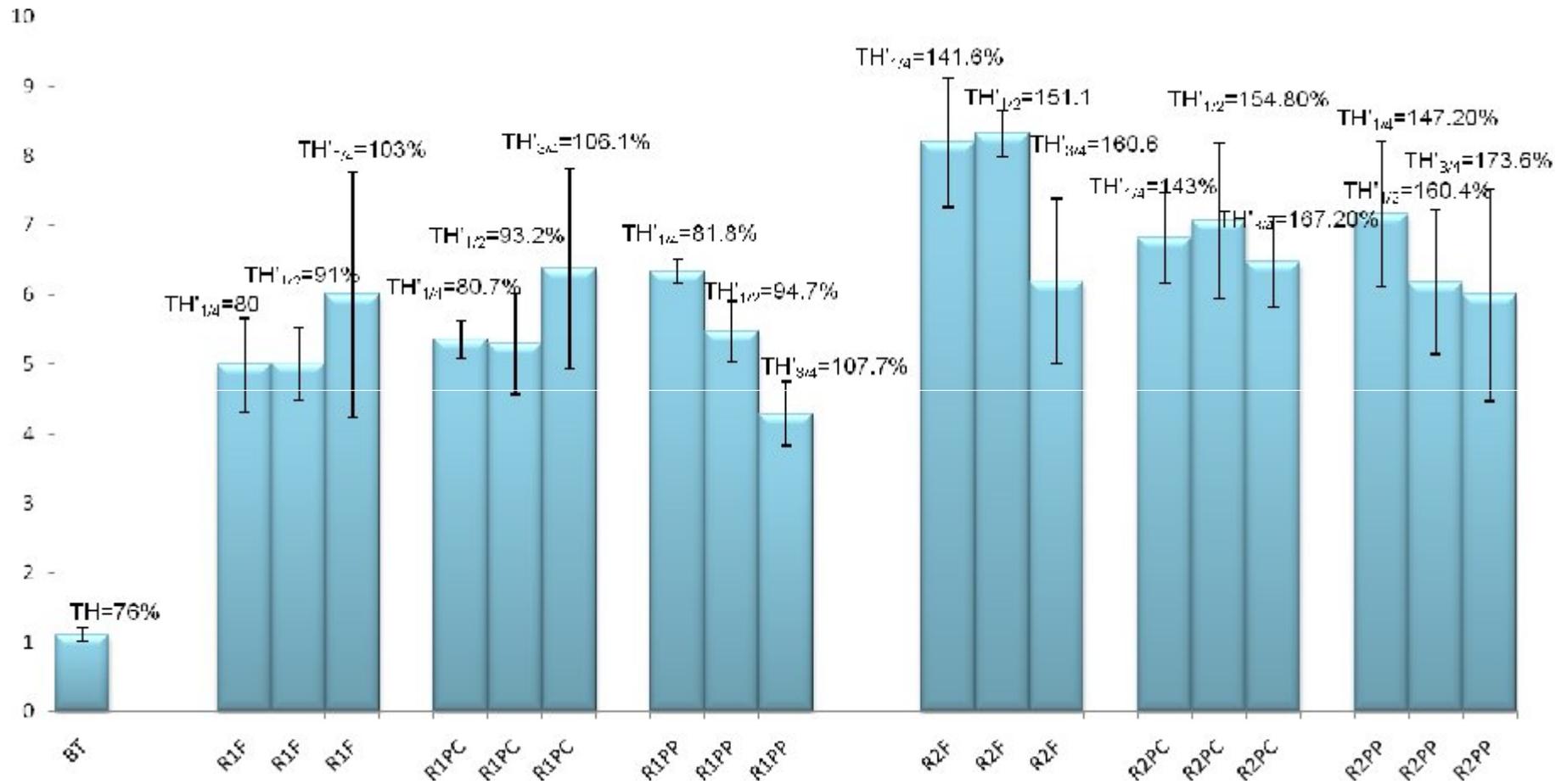


Figure 18 : Effet du niveau d'hydratation sur le rapport de configuration (P/L).

1- Les caractéristiques physico-chimiques des matières premières

1-1- La granulométrie

Les résultats du tamisage de la farine témoin de blé tendre et des différentes matières premières sont présentés dans la figure 10.

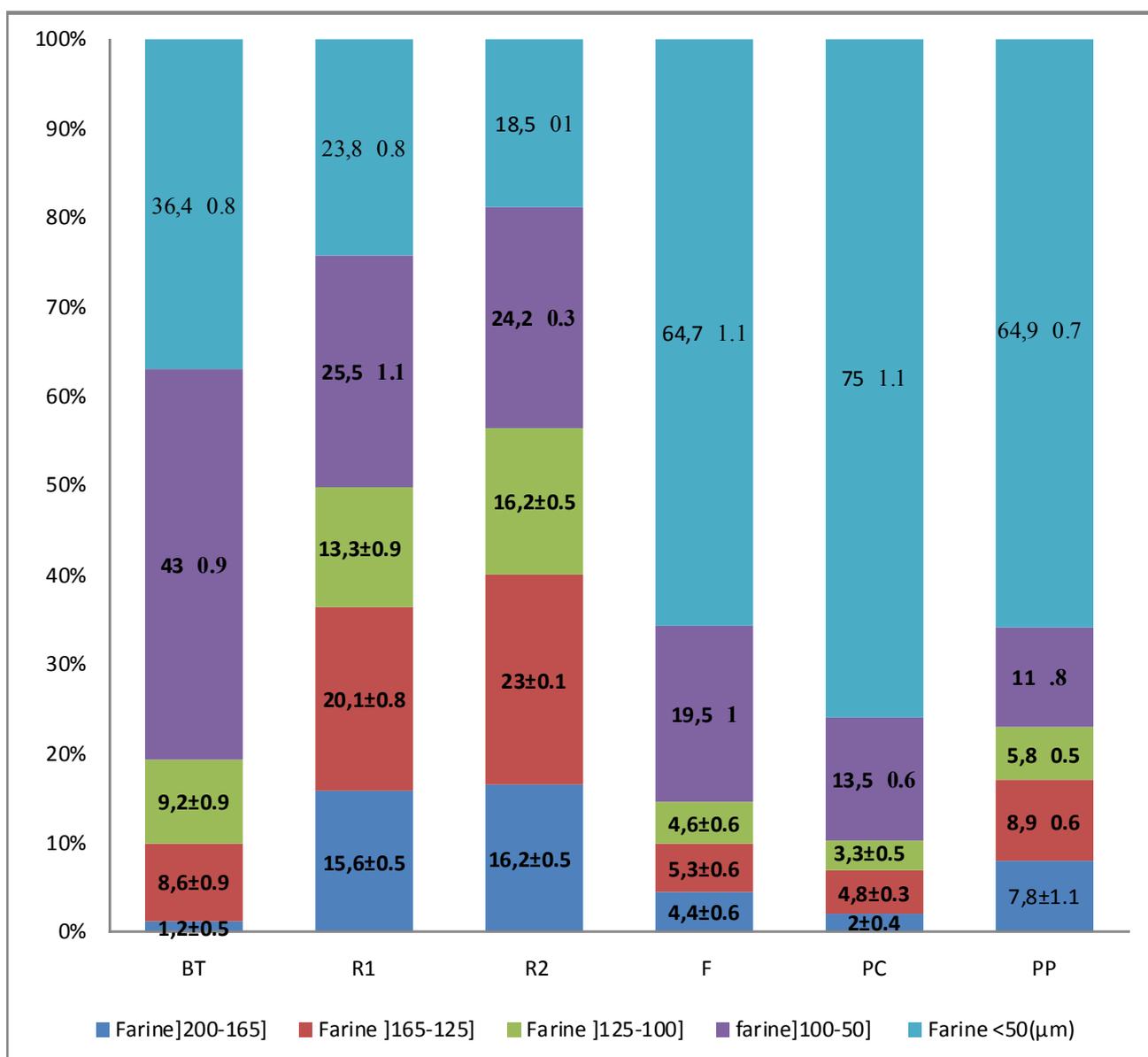


Figure 10 : Granulométrie des farines des différentes matières premières (en % de la masse).

La distribution granulométrique d'une farine permet d'apprécier le comportement de celle-ci lors de l'hydratation (quantité d'eau absorbée et vitesse d'hydratation) (FEILLET 2000).

Il ressort de la figure 10 que toutes les farines présentent plus de 98 % des particules de dimension ($\leq 200 \mu\text{m}$). Ces résultats concordent avec la norme Codex pour la farine de blé établie par CODEX ALIMENTARIUS (1995).

Les deux classes granulométriques ($] 100-50]$, $<50 \mu\text{m}$) constituent pour la majorité des matières premières (BT, F, PC, PP) la grande proportion de farine.

Les trois farines de légumes secs (F, PC, PP) sont très proches dans leur répartition granulométrique de la farine témoin (BT), elles sont constituées principalement de farine fine (< 100) avec 84.26 % pour la féverole, 88.41 % pour le pois chiche, 76 % pour le pois protéagineux et 79.49 % pour le blé tendre. Pour la même classe granulométrique (< 100), la farine de riz présente des proportions inférieures à 50 % (49.3 pour R_1 et 42.68 pour R_2).

La farine témoin montre des proportions proches entre les deux classes les plus fines (43.07 pour la classe $]100-50]$ et 36.42 pour la classe <50). Alors que les légumes secs renferment dans la classe <50 la part principale (64.73 pour la féverole, 74.94 pour le pois chiche et 64.95 pour le pois protéagineux).

La mouture du riz se distingue par une distribution plutôt équilibrée entre toutes les classes de granulométrie inférieure à 200 μm .

La composition granulométrique du riz (R_1) se rapproche fortement à celle du riz étuvé (R_2) avec des proportions presque égales réparties dans les classes $] 165-125] \mu\text{m}$, $] 100-50] \mu\text{m}$ et $<50 \mu\text{m}$.

I-2- La composition biochimique des matières premières

La teneur moyenne des constituants biochimiques des différentes matières premières utilisées est présentée dans le tableau 11.

Tableau 11 : Composition biochimique globale des matières premières.

	Farine de blé tendre	Farine de riz	Farine de féverole	Farine de pois chiche	Farine de p. protéagineux
Humidité (%)	15.14±0.05	13.25±0.04	12.08±0.06	11.10±0.02	11.21±0.05
Cendres (% MS)	0.52±0.19	0.51±0.18	3.41±0.03	3.75±0.12	3.88±0.64
Protéines totales (% MS)	14.11±0.77	7.05±0.43	31.51±0.05	26.32±0.53	24.27±0.16
Lipides totaux (% MS)	0.89±0.21	0.29±0.01	0.76±0.52	3.91±0.23	0.79±0.71
Glucides totaux (% MS)	84.48	92.15	64.32	66.02	71.06
Totaux des extraits secs (% MS)	100	100	100	100	100

Le coefficient de conversion de l'azote total en protéines est de 5.7 pour les farines de blé et de riz et de 6.25 pour les légumes secs.

I-2-1- La farine de blé tendre

La farine de blé tendre choisie comme témoin a présenté la composition chimique suivante :

Une teneur moyenne en eau de 15,14 % supérieure à celle donnée par SOUCI et coll., 1994 (13,10 %), mais reste dans l'intervalle citée par CALVEL, 1984 (13 à 15 %) pour la farine destinée à la panification.

En effet, l'humidité élevée de notre farine est probablement due à la quantité d'eau ajoutée au blé avant mouture (humidité recherchée aux moulins Beni-Haroun), l'humidité des farines doit se situer entre 10 et 16 % pour que la farine se conserve convenablement (CHENE 2001).

La teneur moyenne des cendres est un indicateur de la pureté de la farine, elle est en relation avec son taux d'extraction et la minéralisation des grains mis en mouture. Elle définit, en outre, les types commerciaux des farines (FEILLET 2000). Notre farine de blé tendre présente un taux de cendre de 0,52 % MS, elle se classe bien dans le type commercial 55 qui se caractérise par un intervalle de cendre de 0.50 à 0.60 % MS et est destiné à la fabrication des pains courants, biscottes, panification fine et biscuiterie (ADRIAN et coll. 1995 ; COLAS 1998). Les pâtes obtenus avec des farines à taux de cendre élevé sont grasses, collantes et présentent des défauts de maniabilité (GRANDVOINNET et PRATX 1994).

Les protéines totales représentent une teneur de 14.11 % MS. Pour GODON (1985), GRANDVOINNET et PRATX (1994) la teneur en protéines des farines de blé destinées à la fabrication de produits de cuisson varie de 7 à 15 % MS, ce qui est en accord avec la teneur moyenne en protéines de la farine étudiée.

Selon FEILLET (2000), les farines du blé contiennent 1.4 à 2 % de lipides totaux. cependant CALVEL (1984) indique une teneur en matières grasses entre 1.2 à 1.4 %. La teneur de la farine étudiée est de 0.89 % MS, inférieure aux teneurs données par ces références. Les taux élevés en lipides diminuent la valeur boulangère de la farine et intervient dans l'altération des farine par rancissement.

Les glucides totaux de notre farine témoin constituent 84.48 % de la matière sèche. Ces glucides sont constitués principalement d'amidon (78-82 %), de pentosanes (2-3 %), de sucres réducteurs et non réducteurs (2 %) et de cellulose (0.5 %) (FEILLET 2000). Les sucres simples sont utilisés rapidement par les levures au cours de la fermentation, ce sont les amidons et les pentosanes ainsi que leurs proportions qui ont le plus d'importance en panification (GRANDVOINNET et PRATX 1994).

I-2-2- Le riz

Le riz étudié présente une humidité de 13.27 % qui est en accord avec la norme du Codex Alimentarius (FAO, 1996) qui en fixe la valeur de 15 % comme limite maximale.

La teneur moyenne en cendres est de 0.51 % MS, une valeur qui se range bien dans l'intervalle 0.3-0.8 % cité par LAIGNELET (1990).

Les protéines de la farine de riz représentent une valeur de 7.5 % MS valeur égale à celle donnée par MOHTADJI-LAMBALLAIS (1989).

La teneur moyenne en lipides est de 0.29 % MS, très proche de la teneur en lipides donnée par MOHTADJI-LAMB ALLAIS (1989) qui est de 0.3 %.

Les résultats indiquent que la teneur en glucides totaux est de 92.15 % MS, l'amidon est le principal constituant de ces glucides où la teneur en amylose est directement reliée à la fermeté et le collant du riz cuit, un riz riche en amylose est plus ferme et colle moins (LAIGNELET 1997). Les pentosanes avec des quantités non négligeables jouent un rôle comme chez les autres céréales dans l'absorption d'eau au cours de la cuisson (LAIGNELET 1991). Les autres glucides sont minoritaires, il s'agit principalement de saccharose.

I-2-3- Les légumes secs

Les légumes secs utilisés présentent des valeurs d'humidité (12.03 % pour la féverole, 11.10 % pour le pois chiche et 11.21 % pour le pois protéagineux) inférieures à celles données par la norme du Codex Alimentarius (15 % pour la féverole et le pois et 14 % pour le pois chiche).

Pour les teneurs en protéines de la féverole (31.51 % MS), du pois chiche (26.32 % MS) et du pois protéagineux (24.27 % MS), elles sont bien situées dans les intervalles cités respectivement : 23-38.1 % MS pour la féverole, 12.4-30.6 % MS pour le pois chiche et 20.2-34.4 % MS pour le pois protéagineux (FAO 1982 ; CUD et LEYNAUD 1992).

Les teneurs moyennes en lipides des trois légumes secs : féverole = 0.76 % MS, pois chiche = 3.91 % MS, et pois protéagineux = 0.79 % MS sont nettement inférieurs aux valeurs : 1.5 % MS pour la féverole, 5-5.6 % MS pour le pois chiche et 1.5-1.8 % MS pour le pois protéagineux données par GUEGUEN et LEMERIE (1996).

I-3- Les caractéristiques des formules de l'étude

La composition biochimique globale des formules de l'étude constituées d'un mélange de farines de 2 à 1 de riz-légumes secs déduite par calcul est présentée dans le tableau 12 :

Tableau 12 : Composition biochimique globale des formules de l'étude.

Composition (%MS)	Farine de (BT)	Farine de riz (R)	Farine de (RF)	RF/R	Farine de (RPC)	RPC/R	Farine de (RPP)	RPP/R
Cendres	0.52	0.51	1.48	2.90	1.59	3.12	1.63	3.19
Protéines totales	14.11	7.05	15.20	2.15	13.47	1.91	12.79	1.81
Lipides totaux	0.89	0.29	0.44	1.50	1.49	5.14	0.45	1.55
Glucides totaux	84	92.15	82.87	0.90	83.44	0.90	85.12	0.92

La comparaison de la composition des trois formules de l'étude : RF, RPC et RPP (tableau 12) avec celle de la farine de riz (tableau 11) nous a permis de constater que la complémentation riz-légumes secs a sensiblement changé la teneur en protéine. Cette dernière a marqué une augmentation de 1.81 fois plus à celle du riz pour la formule de RPP, de 1.91 fois plus pour la formule RPC et de 2.15 fois plus pour la formule RF.

L'apport en minéraux des trois formules a nettement augmenté comparé à celui de la farine du riz (2.9 fois plus pour RF, 3.12 fois plus pour RPC et 3.19 fois plus pour RPP).

L'apport lipidique des deux formules RF et RPP a augmenté de 1.5 fois plus par rapport à celui de la farine de riz. Celui de la formule RPC a sensiblement augmenté, il passe de 0.29 % à 1.49 % pour la farine de RPC (5.14 fois plus).

La teneur de glucides totaux des trois formules de l'étude a nettement diminué par rapport à celle de la farine de riz.

A partir de la comparaison des résultats de la complémentation des formules de l'étude avec la farine témoin, nous avons remarqué que les quatre farines présentent des teneurs de protéines totales qui se rapprochent nettement (BT : 14.11 % ; RF : 15.20 % ; RPC : 13.47 % et RPP : 12.79 %), ainsi que des teneurs de glucides totaux qui sont presque identiques (BT : 84 % ; RF : 82.87 % ; RPC : 83.44 % et RPP : 85.12 %).

1-4-Conclusion

Les résultats de la répartition granulométrie des matières premières permettent de conclure que toutes les farines présentent une granulométrie répondant aux exigences de la panification.

Le calcul basé sur le rapport massique 2/1 utilisé pour la supplémentation des formules indique un accroissement de l'apport protéique et minéral en rapport avec la présence des farines de légumineuses dans celle-ci, donc les formules RF, RPC et RPP semblent adéquates pour satisfaire les apports recommandés en protéines.

2- Les caractéristiques technologiques des formules de l'étude

2-1- Intervalles d'hydratation des formules de l'étude

Le but de ce test est de fixer les proportions d'eau nécessaires à l'hydratation des différentes formules, les critères choisis sont :

- la tenue de la pâte et l'absence d'effritement lors du pétrissage pour le taux minimum d'hydratation (TH_{\min});
- avoir la pâte collante et difficile à manier pour le taux maximum d'hydratation (TH_{\max}).

Ces intervalles vont servir de base aux différentes analyses de l'étude (rhéologie, panification) et les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 13: Intervalles d'hydratation de faisabilité des formules sur base sèche.

	BT	R₁F	R₁PC	R₁PP	R₂F	R₂PC	R₂PP
V.E.A (ml/100g)	34.5±0.94	36±0.82	36.2±0.62	36.66±1.22	96.07±1.31	92.13±1.43	92.3±0.41
TH_{min} (%MS)	58.22±1.04	55.80±0.93	55.50±0.71	56.00±1.40	122.8±1.49	117.6±1.63	117.8±0.46
T(sec)	1035±28.28	1080±24.49	1086±18.71	1099.8±36.74	2882.1±39.37	2763.9±43.01	2769±12.25
V.E.A (ml/100g)	101.2±0.41	98.77±1.03	102.6±2.04	104.53±1.08	145.97±1.03	157.83±1.25	166.23±1.02
TH_{max} (%MS)	136.70±0.48	127.70±0.75	131.30±2.33	133.50±1.23	179.50±1.17	192±1.41	201.5±1.16
T(sec)	3036±12.25	2963.1±30.82	3078±44.16	3135.9±32.40	4379.1±30.82	4734.9±37.42	4734.9±30.82

V.E.A : volume d'eau ajouté ; T : temps de pétrissage.

Il ressort du tableau 13 que les taux minima d'hydratation des formules à base de riz non étuvé étaient respectivement 55.80 % pour R₁F, 55.50 % pour R₁PC et 56 % pour R₁PP. Ils concordent bien avec les travaux de GUETTACHE et TLILANI (2005) qui sont respectivement 55.97 % pour R₁F, de 56.93 % pour R₁PC et de 60.76 % pour R₁PP.

Nous n'avons pas remarqué une différence significative entre la valeur TH_{min} du témoin (BT: 58.22 %) et celle des trois formules (R₁F, R₁PC et R₁PP) ce qui permet de conclure que ces formules à base de riz non étuvé ont un pouvoir absorbant d'eau similaire à celui de la farine de blé tendre.

Par contre les taux d'hydratation des formules à base de riz étuvé (R₂F : 122.8 % ; R₂PC : 117.6 % ; R₂PP : 117.8 %) ont été significativement supérieurs (p < 0.05) à celui de la farine témoin de blé tendre (BT : 58.22 %).

Concernant les taux maxima d'hydratation, la capacité d'absorption d'eau des formules à base de riz étuvé était significativement supérieure (p < 0.05) à celle de la farine du blé tendre (179.50 % pour R₂F, 192 % pour R₂PC et 201.5 % pour R₂PP contre 136.7 % pour BT).

Tandis que les formules à base de riz non étuvé ont présenté des taux d'hydratation significativement proches de celui du témoin (131.30 % pour la formule R₁PC, 133.51 % pour la

formule R₁PP contre 136.70 % pour le témoin BT), la formule R₁F a présenté un TH_{max} = 127.70 % significativement inférieure par rapport à la farine témoin (p = 0.001).

Cependant, les taux d'hydratation maxima des trois formules à base de riz non étuvé sont nettement supérieurs à ceux cités par GUETTACHE et TLILANI (2005) concernant les mêmes formules (R₁F : 82.63 %, R₁PC : 86.25 %, R₁PP : 91.31 %).

Nous avons remarqué que la capacité d'hydratation des formules à base de riz étuvé (R₂) était significativement supérieure (p < 0.05) à celle des formules à base de riz non étuvé (R₁).

L'intervalle d'hydratation de la formule R₁F étudié dans les travaux de BENATALLAH (2009) limité par les deux bornes de quantité d'eau ajoutée (Q.E.A_{min}= 90g/100g ; Q.E.A_{max}= 93.75g/100g) se trouve inclus dans l'intervalle d'hydratation de la même formule (R₁F) de la présente étude qui traite un domaine plus vaste (V.E.A_{min}= 36 ml/100g ; V.E.A_{max}= 98.77 ml/100g).

Les deux points essentiels tirés de l'étude de l'intervalle d'hydratation des différentes farines sont les suivants :

✓ Malgré la différence de l'espèce botanique, la nature et le taux de l'amidon endommagé ainsi que la granulométrie, les formules de riz-légumes secs (féverole, pois chiche et pois protéagineux) ont montré une capacité d'absorption d'eau comparable à celle de la farine de blé tendre ;

✓ Les formules riz étuvé-légumes secs ont présenté une augmentation du pouvoir d'absorption d'eau, ce dernier est significativement plus élevé que celui de la farine de blé tendre et des formules du riz non étuvé. Selon FAVIER et coll. (1995), l'étuvage du riz améliore son gonflement et sa capacité d'absorption d'eau sans devenir collant ; PEPLINSKI et PFEIFER (1970) cité par DEBBOUZ et DONNELLY (1996) confirment que la quantité d'eau absorbée augmente avec le degré de gélatinisation de l'amidon.

2-2- Le comportement rhéologique à l'alvéographe Chopin

L'alvéographe CHOPIN permet d'étudier la valeur boulangère et les propriétés plastiques des farines. Les essais alvéograpiques réalisés ont abouti à la caractérisation des différentes formules (témoin, formules riz-légumes secs, formules riz étuvé-légumes secs) et à la comparaison de leurs propriétés rhéologiques et de leur aptitude technologique.

2-2-1- Caractéristiques alvéographiques du témoin

Notre farine témoin a présenté un gonflement (G) de 20.93 cm³, une ténacité (P) de 98.27 mm, une extensibilité (L) de 89.40 mm, le rapport de configuration (P/L) est de 1.11 et un travail de déformation (W) de 276.08 x 10⁻⁴J.

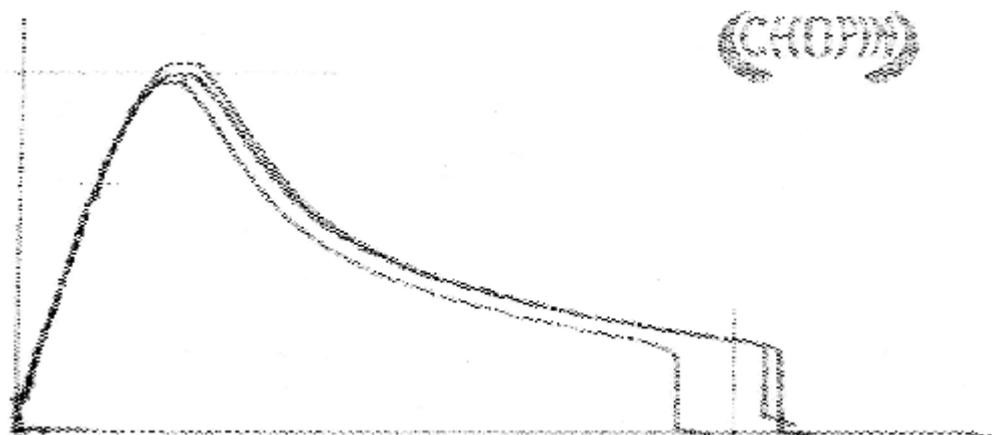


Figure 11 : Alvéogramme de la farine de blé tendre « Beni-Haroun ».

La comparaison des caractéristiques alvéographiques de la farine témoin aux normes algériennes de la panification données par J.O.R.A. (1991) a montré que le gonflement (G) de 20.93 cm³ est admis par ces normes ($G > 20 \text{ cm}^3$), tandis que le rapport de configuration (P/L) de 1.11 est un peu élevé (P/L : compris entre 0.45 et 0.64) renseignant sur la ténacité élevée de cette farine et se traduisant par un alvéogramme légèrement déséquilibré.

La farine témoin s'est caractérisée par un travail de déformation ($W : 276.08 \times 10^{-4} \text{J}$) assez élevé selon les normes algériennes J.O.R.A. 1991 (W compris entre 130 et 180 x 10⁻⁴J), renseignant sur une farine de force boulangère trop élevée. Alors qu'ils se rapprochent des intervalles de valeurs données par GUINET et GODON (1994) en panification française (W : compris entre 200 et 250 x 10⁻⁴J).

Sur la base des valeurs alvéographiques, la farine témoin de blé tendre peut être jugée panifiable malgré ses propriétés rhéologiques moyennes.

2-2-2- Caractéristiques alvéographiques et aptitude technologique des trois formules sans étuvage du riz

A partir des essais alvéographiques réalisés sur les formules sans gluten (riz-légumes secs) trois alvéogrammes ont été tracés en utilisant les trois taux d'hydratation choisis de chaque intervalle de faisabilité ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$), et ce pour chacune des trois formules sans étuvage du riz (R_1F , R_1PC , R_1PP). Les tracés alvéographiques sont présentés par les figures : 12, 13, 14.

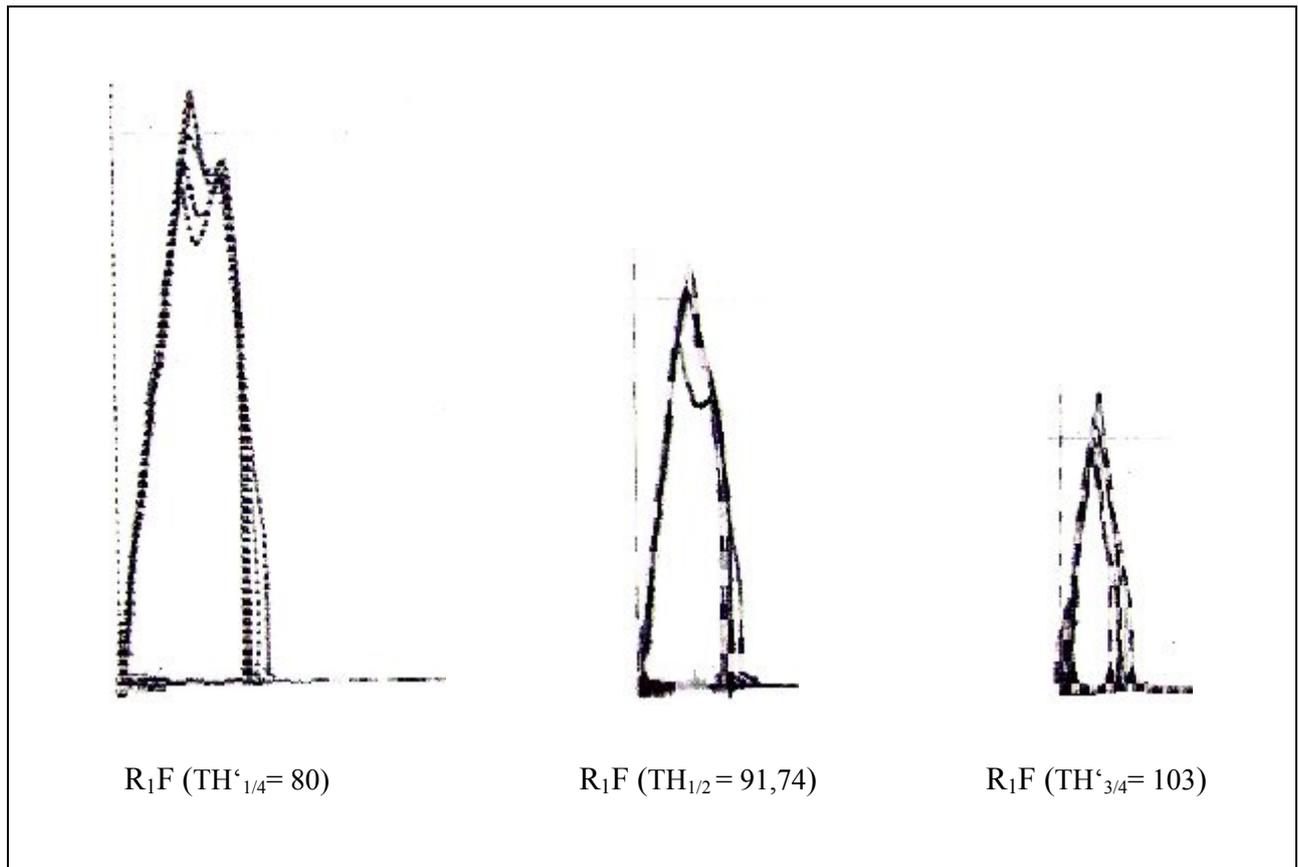


Figure 12 : Alvéogrammes de la formule R_1F aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

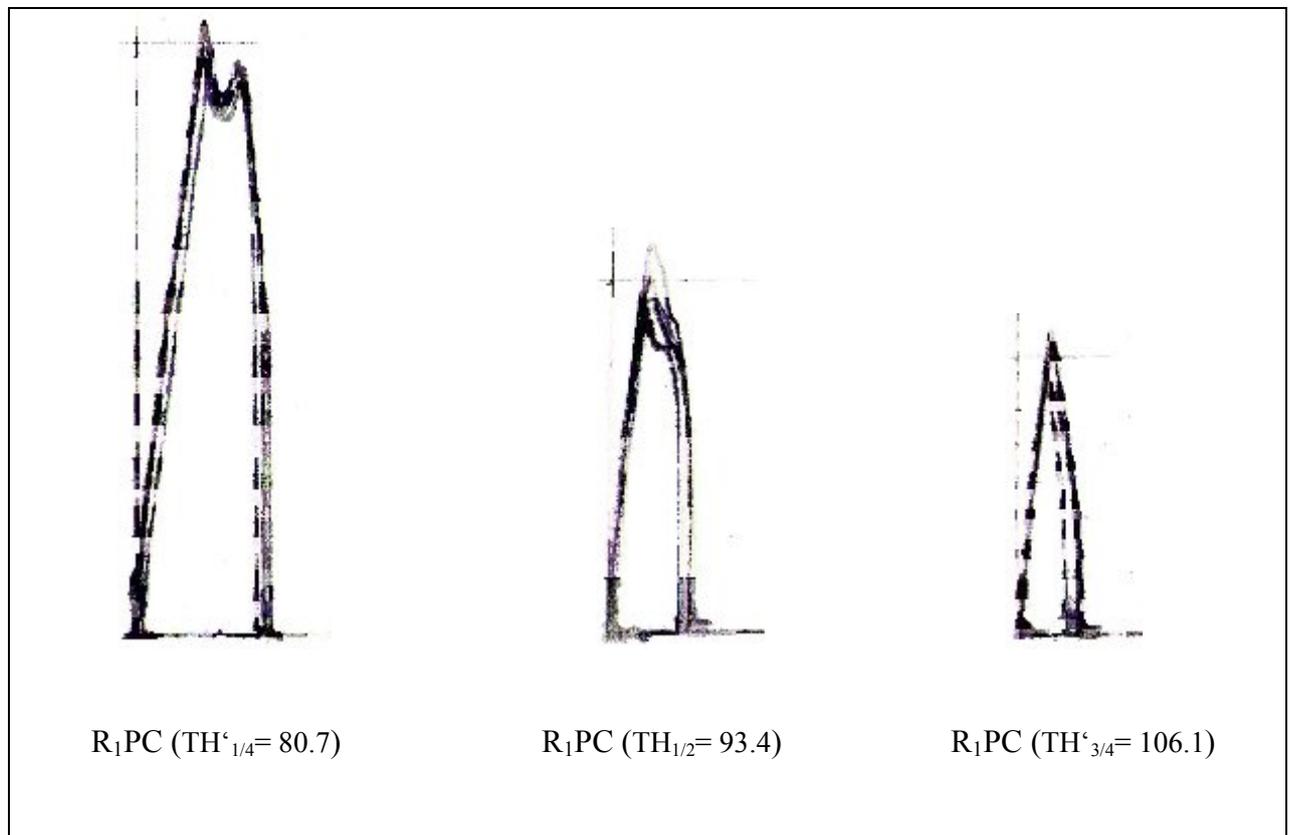


Figure 13: Alvéogrammes de la formule R_1PC aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

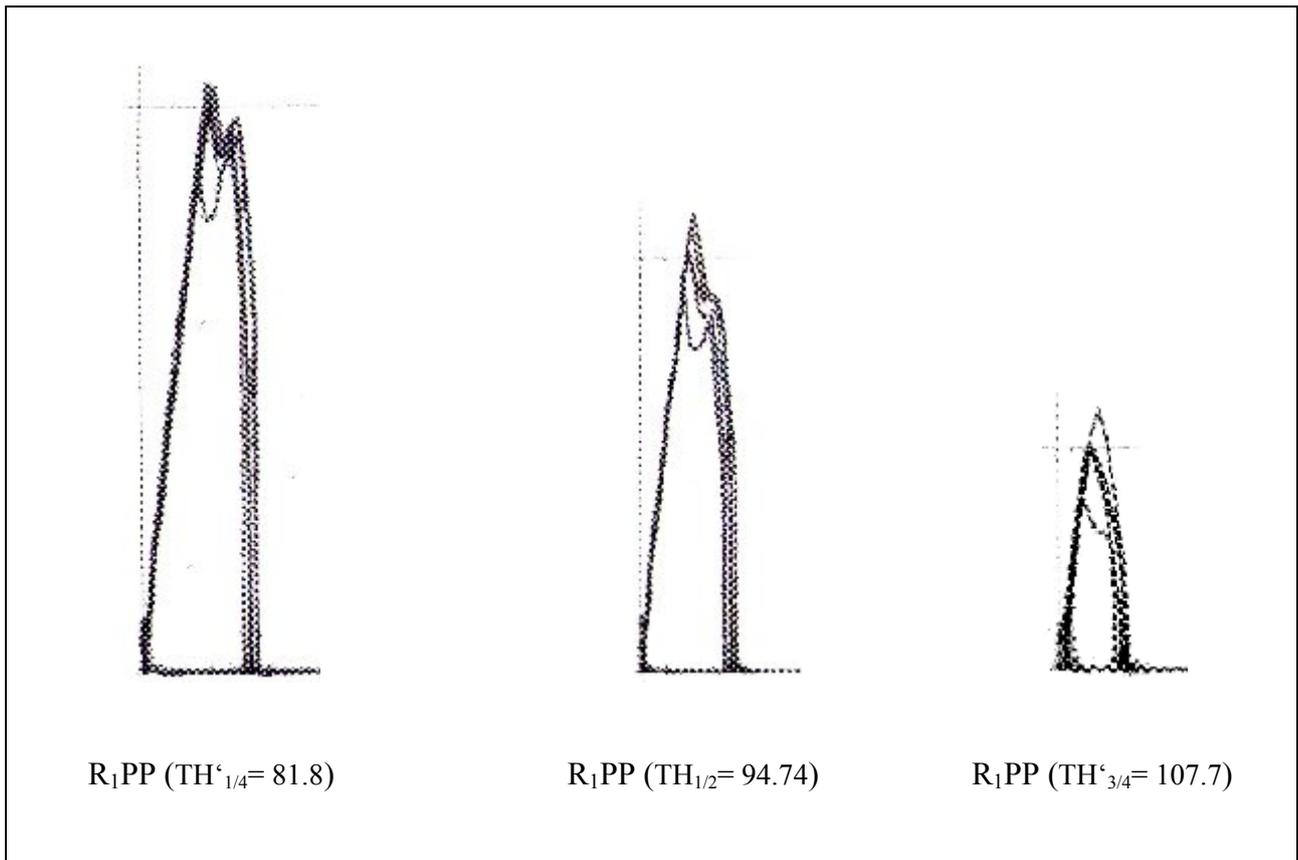


Figure 14: *Alvéogrammes de la formule R₁PP aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).*

D'une manière générale, nous constatons que :

1. Les courbes alvéographiques des trois formules à base de riz non étuvé (R₁F, R₁PC, R₁PP) ont présenté des allures identiques avec une différence dans les dimensions de ces courbes.
2. L'augmentation du taux d'hydratation des trois pâtes se traduit par une diminution des dimensions des courbes donc des caractéristiques alvéographiques (P et L).
3. La comparaison des courbes des trois formules sans gluten avec celle de la farine témoin de blé tendre indique une différence dans les allures essentiellement au niveau de la longueur des courbes (élasticité L) où cette valeur demeure beaucoup moins importante dans le cas de nos échantillons. La descente perpendiculaire de ces courbes sur l'axe des abscisses commence à partir du sommet du tracé (point de rupture de la bulle) et donne des valeurs d'élasticité (L) très petites renseignant sur la faible capacité de dilatation de ces pâtes.

Les valeurs des caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz non étuvé sont regroupées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz non étuvé.

Formules	Taux d'hydratation TH'(%MS)	Gonflement G (cm ³)	Ténacité P (mm)	Élasticité L (mm)	Rapport de configuration P/L	Tarvail de déformation W (10 ⁻⁴ J)
FI	43.25(g/100g de pâte)	> à 20	-	-	0.45 - 0.65	130-180
BT	TH = 76	20.93± 0.68	98.27 ± 2.26	89.40 ± 6.20	1.11 ± 0.10	276.08 ± 0.44
	TH ^c _{1/4} = 80	10.77± 0.33	115.50± 8.85	23.30 ± 1.27	4.99 ± 0.67	110.00 ± 0.16
R₁F	TH _{1/2} = 91,74	8.73 ± 0.34	76.27 ± 2.07	15.33 ± 1.25	5.01 ± 0.51	40.79 ± 0.03
	TH ^c _{3/4} = 103	7.23 ± 0.61	53.17 ± 2.89	9.67 ± 2.87	6.00 ± 1.75	19.05 ± 0.06
	TH ^c _{1/4} = 80.7	10.20± 0.24	110.37± 3.15	20.67 ± 0.47	5.35 ± 0.27	98.23 ± 0.13
R₁PC	TH _{1/2} = 93.4	7.80 ± 0.28	64.53 ± 3.63	12.33 ± 0.94	5.29 ± 0.72	28.34 ± 0.08
	TH ^c _{3/4} = 106.1	6.97 ± 0.40	55.37 ± 4.15	9.00 ± 1.41	6.37 ± 1.43	20.58 ± 0.06
	TH ^c _{1/4} = 81.8	10.23± 0.21	130.90± 0.90	20.70 ± 0.42	6.33 ± 0.17	99.08 ± 0.05
R₁PP	TH _{1/2} = 94.74	9.53 ± 0.25	99.00 ± 3.24	18.20 ± 0.88	5.46 ± 0.44	65.86 ± 0.14
	TH ^c _{3/4} = 107.7	7.87 ± 0.19	50.97 ± 3.63	12.00 ± 1.41	4.29 ± 0.46	20.86 ± 0.05

FI : farine Idéale (réglementation algérienne : J.O.R.A. 1991).

Les valeurs des indices alvéographiques des trois formules sans gluten (R₁F, R₁PC, R₁PP) ont été pour le gonflement (G), le rapport de configuration (P/L) et le travail de déformation (W), très différentes de celles du témoin de blé tendre ainsi que des normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 : (W : 130-180 x10⁻⁴J ; P/L : 0.45-0.65 et G > à 20 cm³).

Concernant les valeurs du gonflement (G) et de travail de déformation (W), ce sont celles de la formule R₁F au taux d'hydratation TH^c_{1/4} : (G = 10.77 ± 0.33 cm³ ; W = 110 ± 0.16 x 10⁻⁴ J) qui se rapprochent le plus des normes algériennes J.O.R.A. 1991 (G > à 20 cm³ ; W entre (130-180) x 10⁻⁴ J) et du témoin de blé tendre (G = 20.93 ± 0.68 ; W = 276.08 ± 0.44 x 10⁻⁴ J) tout en restant significativement inférieure (G : p < 0.05 ; W : p < 0.05).

Les deux formules restantes (R₁PC, R₁PP) ont présenté quant à elles aussi, les meilleurs valeurs de gonflement (G) et de travail de déformation (W) au taux d'hydratation TH^c_{1/4} : (G) = 10.23 ± 0.21 cm³ et (W) = 99.08 ± 0.05 x 10⁻⁴ J pour la formule R₁PP, suivie des valeurs de (G) = 10.20 ± 0.24 cm³ et (W) = 98.23 ± 0.13 x 10⁻⁴ J pour la formule R₁PC.

En ce qui concerne le rapport de configuration (P/L), c'est la formule R₁PP au taux d'hydratation TH_{3/4} qui a présenté la valeur de (P/L) la plus basse (P/L = 4.29 ± 0.46) et demeure celle qui se rapproche le plus des normes algériennes J.O.R.A. 1991 (P/L entre 0.45 et 0.65), et du témoin de blé tendre (P/L = 1.11 ± 0.10) avec une différence significative avec ce dernier (p < 0.05). D'une manière générale, les valeurs des rapports de configuration de l'ensemble des formules sans gluten étudiées aux différents taux d'hydratation étaient assez élevées par rapport aux normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 (P/L entre 0.45 et 0.65), renseignant sur la forte ténacité des pâtes sans gluten ainsi que sur leur faible capacité d'extensibilité.

Les travaux de BENATALLAH (2009) présentent les caractéristiques alvéographiques des mêmes formules sans gluten en utilisant des quantités d'eau ajoutées aux formules (Q.E.A.) qui se rapprochent de celles de la présente étude au taux d'hydratation TH_{3/4} (**R₁F**_(TH_{3/4}) = 77.84 g/100g contre **RF** = 88.64 g/100g ; **R₁PC**_(TH_{3/4}) = 80.52 g/100g contre **RPC** = 89.12 g/100g ; **R₁PP**_(TH_{3/4}) = 81.92 g/100g contre **RPP** = 90.83 g/100g). La comparaison des indices alvéographiques des deux études a montré que pour le gonflement (G), les valeurs des formules R₁F_(TH_{3/4}), R₁PC_(TH_{3/4}) et R₁PP_(TH_{3/4}) concordent avec celles des formules RF, RPC et RPP en prenant en considération la différence qui existe entre les quantités d'eau ajoutées. Par contre, pour le rapport de configuration (P/L) et le travail de déformation (W), les formules R₁F_(TH_{3/4}), R₁PC_(TH_{3/4}) et R₁PP_(TH_{3/4}) ont présenté des valeurs trop élevées par rapport à celles des formules RF, RPC et RPP. Cette augmentation des valeurs de (P/L) et de (W) peut être attribuée à la différence des (Q.E.A.) utilisées dans les deux études (Tableau 15).

Tableau 15 : Comparaison des indices alvéographiques des deux études.

Indices alvéographiques	R₁F (TH _{3/4})	RF	R₁PC (TH _{3/4})	RPC	R₁PP (TH _{3/4})	RPP
Q.E.A (g/100g)	77.84	88.64	80.52	89.12	81.92	90.83
G (cm³)	7.23 ± 0.61	8.00 ± 0.01	6.97 ± 0.4	8.00 ± 0.04	7.87 ± 0.19	7.50 ± 0.07
P/L	6.00 ± 1.75	1.50 ± 0.04	6.37 ± 1.43	0.20 ± 0.001	4.29 ± 0.46	1.59 ± 0.004
W (10⁻⁴J)	19.05 ± 0.06	13.80 ± 0.01	20.58 ± 0.06	5.30 ± 0.07	20.86 ± 0.05	10.40 ± 0.01

Parmi les formules étudiées, c'est la R₁F au taux d'hydratation TH'_{1/4} qui a présenté le gonflement ($G = 10.77 \pm 0.33 \text{ cm}^3$) et le travail de déformation ($W = 110 \pm 0.16 \times 10^{-4} \text{ J}$) les plus proches aux normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 ($G > \text{à } 20 \text{ cm}^3$, W entre 130-180 $\times 10^{-4} \text{ J}$). Le rapport de configuration de cette formule reste parmi les meilleurs enregistrés ($P/L = 4.99 \pm 0.67$). Toutefois, toutes les formules sans étuvage du riz restent jugées non panifiables, cela est du probablement à la différence de l'espèce botanique donc de la composition biochimique des farines étudiées (blé tendre, riz et légumes secs).

Pour la farine de blé tendre ROUSSEL et CHIRON (2003) montrent qu'il y a formation d'un réseau protéique au cours du pétrissage, commençant par la formation de fibrilles protéiques très extensibles de gliadine, ensuite il y a réarrangement des configurations spatiales des protéines, formation de liaisons non covalentes entre les protéines et avec les autres constituants de la farine, rupture et reformation de liaisons disulfures et en fin il y a apparition d'un réseau protéique complexe « le gluten ».

Selon FEILLET (2000), l'amidon et les pentosanes jouent un rôle important dans la formation de la pâte par leur pouvoir fixateur d'eau, ils tiennent à la disposition des protéines du gluten la quantité nécessaire à la formation du réseau protéique, simultanément ils fixent l'eau en excès et empêchent la pâte de coller.

La composition biochimique des formules de riz-légumes secs, leurs propriétés fonctionnelles ainsi que les interactions physicochimiques pouvant s'installer à l'intérieur de ces farines au cours des différentes étapes de la panification sont mal connues, l'explication à proposer est celle d'attribuer la baisse des indices alvéographiques et donc de la force boulangère des pâtes testées à l'absence totale des protéines du gluten de la farine de riz.

2-2-3-Effet de l'étuvage sur le comportement à l'alvéographe Chopin

Dans le but de tester l'effet de l'étuvage sur les caractéristiques rhéologiques voir la valeur boulangère des formules sans gluten, des essais alvéographiques ont été réalisés pour les mêmes formules en utilisant du riz étuvé (R₂F, R₂PC, R₂PP). Pour chaque formule, trois alvéogrammes ont été tracés en utilisant les trois taux d'hydratation déjà choisis (TH'_{1/4}, TH'_{1/2}, TH'_{3/4}). Les alvéogrammes des trois formules à base de riz étuvé sont présentés par les figures : 15, 16, 17.

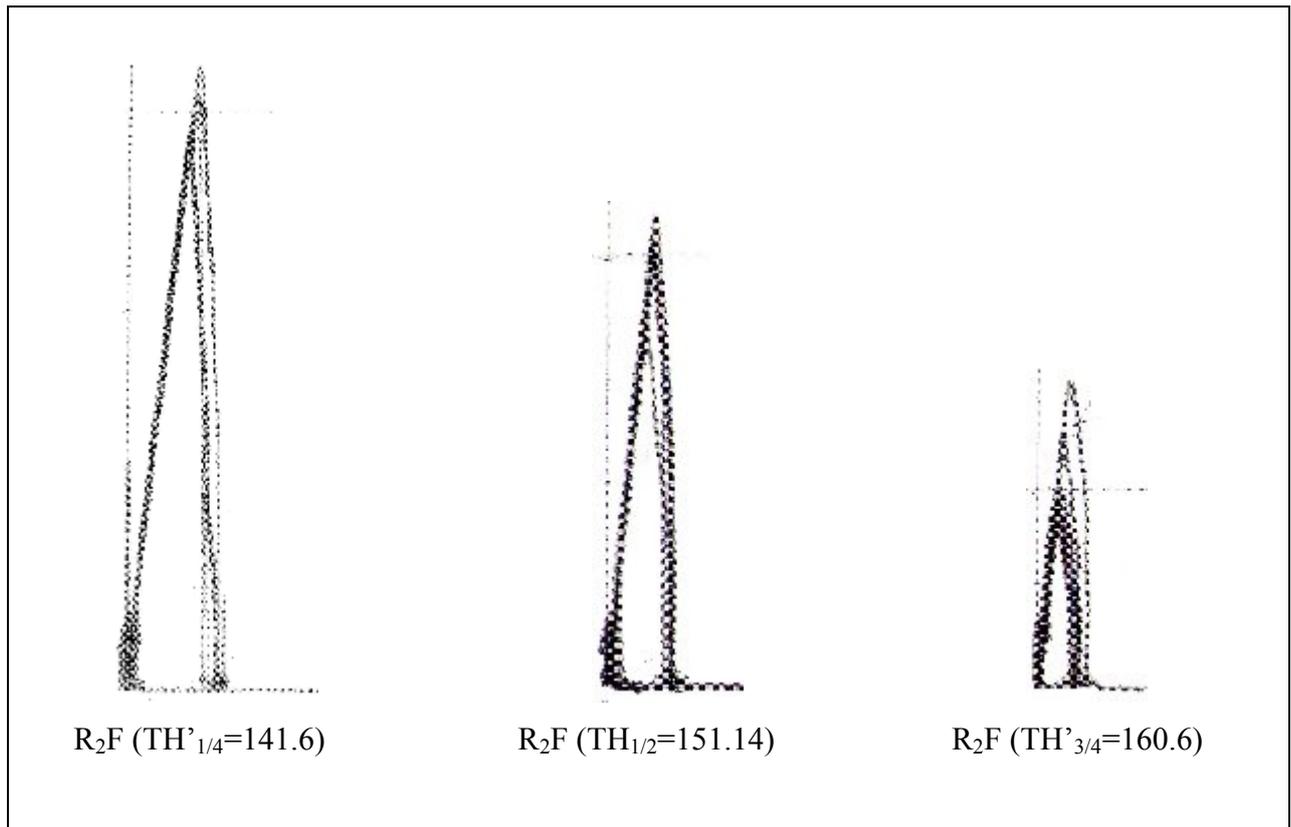


Figure 15: Alvéogrammes de la formule R_2F aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

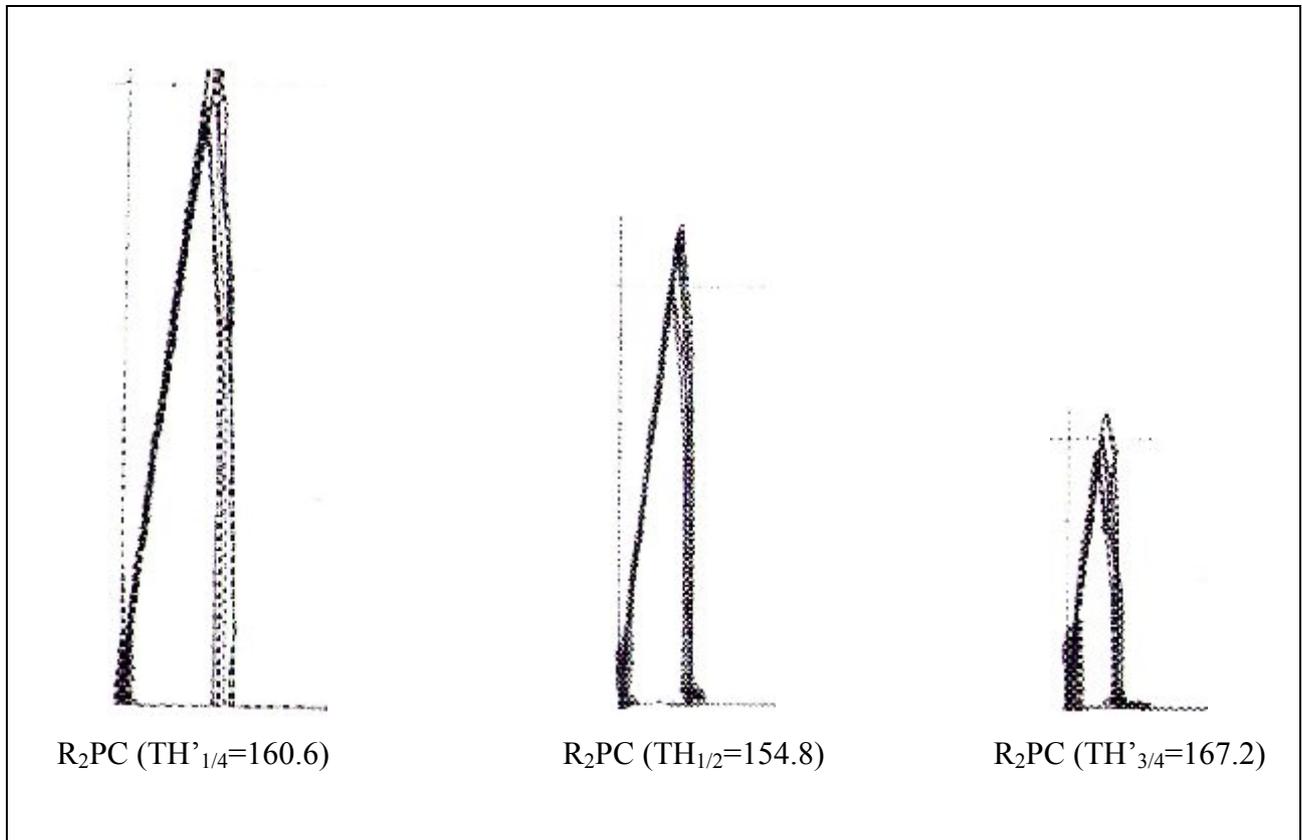


Figure 16: Alvéogrammes de la formule R_2PC aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

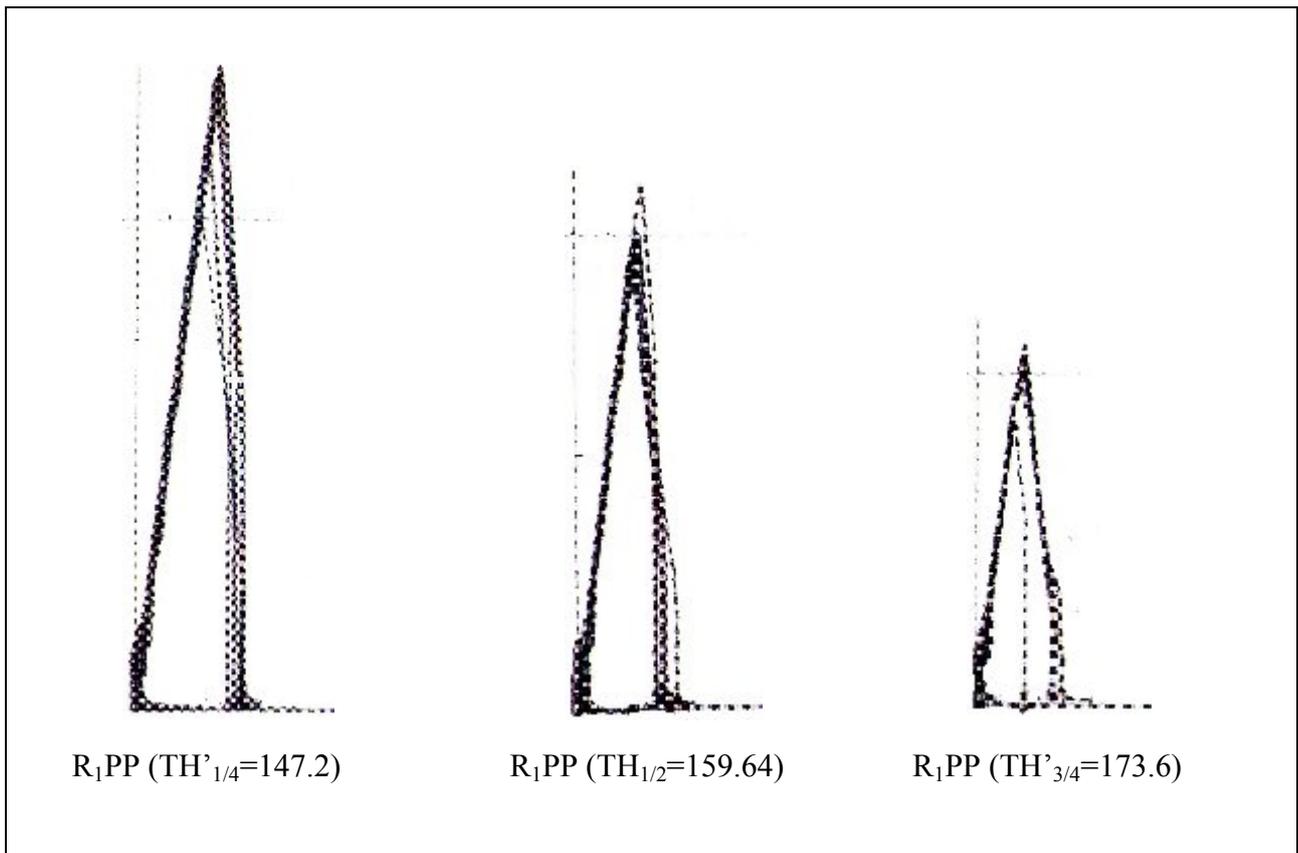


Figure 17: *Alvéogrammes de la formule R₂PP aux taux d'hydratation (TH'_{1/4}, TH_{1/2}, TH'_{3/4}).*

A partir des figures (15, 16, 17) nous pouvons remarquer que :

1. Le comportement des trois formules à base de riz étuvé (R₂F, R₂PC, R₂PP) à l'alvéographe Chopin était généralement similaire à celui des mêmes formules à base de riz non étuvé : les courbes ont présenté des allures presque identiques, ainsi que l'augmentation du taux d'hydratation des pâtes a provoqué une diminution des dimensions des courbes.

2. Les différences observées entre les tracés (R₂) et les tracés (R₁) étaient au niveau des sommets des tracés, ces derniers sont pour les courbes (R₂) plus aigues renseignant sur la facilité de la rupture des bulles et le manque de résistance des pâtes à la déformation. D'autre part, les courbes (R₂) étaient elles mêmes plus étroites par rapport aux courbes (R₁) renseignant sur la rapidité de la rupture des bulles.

Le tableau 16 présente les valeurs des caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz étuvé.

Tableau 16 : Caractéristiques alvéographiques des formules à base de riz étuvé.

Formules	Taux d'hydratation TH'(%MS)	Gonflement G (cm ³)	Ténacité P (mm)	Élasticité L (mm)	Rapport de configuration P/L	Tarvail de déformation W (10 ⁻⁴ J)
FI	43.25(g/100g de pâte)	> à 20	-	-	0.45 - 0.65	130-180
BT	TH = 76	20.93 ± 0.68	98.27 ± 2.26	89.40 ± 6.20	1.11 ± 0.10	276.08 ± .44
	TH ^c _{1/4} = 141.6	9.07 ± 0.45	131.27 ± 5.41	16.17 ± .18	8.19 ± 0.94	66.03 ± 0.03
R2F	TH _{1/2} = 151.14	7.30 ± 0.22	81.03 ± 18.41	9.67 ± 1.89	8.32 ± 0.33	32.22 ± 0.11
	TH ^c _{3/4} = 160.6	6.53 ± 0.09	45.10 ± 7.13	7.33 ± 0.24	6.19 ± 1.19	10.03 ± 0.06
	TH ^c _{1/4} = 143	9.90 ± 0.29	133.93 ± 7.53	19.77 ± .17	6.81 ± 0.65	83.45 ± 0.37
R₂PC	TH _{1/2} = 154.8	8.67 ± 0.47	105.23 ± 7.53	15.13 ± 1.51	7.06 ± 1.12	43.80 ± 0.06
	TH ^c _{3/4} = 167.2	7.00 ± 0.14	60.13 ± 3.63	9.33 ± 0.47	6.47 ± 0.66	16.20 ± 0.08
	TH ^c _{1/4} = 147.2	9.50 ± 0.41	128.33 ± 8.33	18.17 ± 1.59	7.16 ± 1.05	68.10 ± 0.06
R₂PP	TH _{1/2} = 159.64	8.97 ± 0.45	98.27 ± 6.11	16.17 ± 1.67	6.18 ± 1.04	48.55 ± 0.11
	TH ^c _{3/4} = 173.6	7.93 ± 0.78	71.87 ± 0.52	12.70 ± 2.87	6.00 ± 1.52	30.32 ± 0.03

FI : farine Idéale (réglementation algérienne : J.O.R.A. 1991).

Les caractéristiques rhéologiques des trois formules à base de riz étuvé (R₂F, R₂PC, R₂PP) ont été pour le gonflement (G), le rapport de configuration (P/L) et le travail de déformation (W), très différentes de celles du témoin de blé tendre ainsi que des normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 : (W : 130-180 x 10⁻⁴J ; P/L : 0.45-0.65 et G > à 20 cm³).

En ce qui concerne le gonflement (G) et le travail de déformation (W), c'est la formule R₂PC au taux d'hydratation TH^c_{1/4} : (G = 9.90 ± 0.29 cm³ ; W = 83.45 ± 0.37 x 10⁻⁴ J) qui se rapproche le plus des normes algériennes J.O.R.A. 1991 (G > à 20 cm³ ; W entre (130-180) x 10⁻⁴ J) et du témoin de blé tendre (G = 20.93 ± 0.68 ; W = 276.08 ± 0.44 x 10⁻⁴ J) tout en restant significativement inférieure (G : p < 0.05 ; W : p < 0.05).

Les deux formules restantes (R₂F, R₂PP) ont présenté les meilleures valeurs de gonflement (G) et de travail de déformation (W) au même taux d'hydratation (TH'_{1/4}) que la formule R₂PC : (G) = 9.50 ± 0.41 cm³ et (W) = 68.10 ± 0.06 x 10⁻⁴ J pour la formule R₂PP, suivies des valeurs de (G) = 9.07 ± 0.45 cm³ et (W) = 66.03 ± 0.03 x 10⁻⁴ J pour la formule R₂F.

Pour le rapport de configuration (P/L), c'est la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{3/4} qui a présenté la valeur de (P/L) la plus basse (P/L = 6.00 ± 1.52) et donc la plus proche des normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 (P/L entre 0.45 et 0.65), et du témoin de blé tendre (P/L = 1.11 ± 0.10) avec une différence significative avec ce dernier (p < 0.05).

Les valeurs des rapports de configuration (P/L) de l'ensemble des formules à base de riz étuvé testées aux différents taux d'hydratation ont été trop élevées par rapport aux normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 (P/L entre 0.45 et 0.65), reflétant la forte ténacité des pâtes sans gluten à base de riz étuvé ainsi que leur faible aptitude d'élasticité.

Parmi les trois formules à base de riz étuvé, c'est la R₂PC au taux d'hydratation TH'_(1/4) qui a présenté le gonflement (G = 9.90 ± 0.29 cm³) et le travail de déformation (W = 83.45 ± 0.37 x 10⁻⁴ J) les plus proches aux normes algériennes de panification J.O.R.A. 1991 (G > à 20 cm³, W entre 130-180 x 10⁻⁴ J). Le rapport de configuration de cette formule reste parmi les meilleurs enregistrés (P/L = 4.99 ± 0.67). D'une manière générale, toutes les formules sans gluten à base de riz étuvé restent jugées non panifiables.

Afin de faire ressortir l'effet de l'étuvage sur la qualité boulangère des formules sans gluten, les indices alvéographiques des formules à base de riz étuvé (R₂) ont été comparés avec ceux des formules à base de riz non étuvé (R₁), et cela pour le même légume sec et le même taux d'hydratation (tableau 16, tableau 14).

D'une manière générale, les valeurs des indices alvéographiques des formules (R₂) ont été plus éloignées des normes algériennes J.O.R.A. 1991 (G > à 20 cm³; P/L entre 0.45 et 0.65; W entre (130-180) x 10⁻⁴ J), ainsi que du témoin de blé tendre (G = 20.93 ± 0.68; P/L = 1.11 ± 0.10; W = 276.08 ± 0.44 x 10⁻⁴ J) que celles des formules (R₁).

L'analyse statistique de la différence entre les indices alvéographiques des deux formules (R₁ et R₂) a abouti à des résultats non significatifs entre la majorité des valeurs du gonflement (G),

et du rapport de configuration (P/L). Concernant le travail de déformation (W), la différence était significative ($p < 0.05$) pour toutes les comparaisons faites entre les deux formules (R₁) et (R₂).

En conclusion, l'étuvage du riz a influé négativement les valeurs des caractéristiques alvéographiques (G, P/L et W) des trois formules sans gluten (R₁F, R₁PC et R₁PP) testées aux différents taux d'hydratation : TH'_{1/4}, TH'_{1/2} et TH'_{3/4}, par conséquent, il a baissé la valeur boulangère de ces formules.

Selon BHATACHARYA (1985) l'étuvage du riz provoque simultanément la gélatinisation de l'amidon, ELLIASSON et coll. (1995) supposent que la prise du volume du pain dans le four s'arrête au moment où l'amidon est gélatinisé et que le pain se développe d'autant plus que la gélatinisation est tardive. Ce phénomène risque d'empêcher dans le cas de nos formules la dilatation des pâtes sous l'effet de la poussée d'air exercée par l'alvéographe.

2-2-4-Effet du niveau d'hydratation sur le comportement à l'alvéographe Chopin

Les résultats alvéographiques (tableau 14, 16) permettent d'analyser l'effet du niveau d'hydratations (TH'_{1/4}, TH'_{1/2}, TH'_{3/4}) sur les caractéristiques alvéographiques (G, W, P/L) des différentes formules (R₁ et R₂).

Le gonflement (G) présente au taux d'hydratation (TH'_{1/4}) la valeur la plus proche à celle du témoin, aussi bien pour les formules au riz étuvé (R₂) que pour celles au riz non étuvé (R₁), puis cette valeur diminue à chaque fois que le taux d'hydratation augmente (TH'_{1/2}, TH'_{3/4}). Le même phénomène est remarqué pour le travail de déformation (W).

Selon CALVEL (1984), l'augmentation de la consistance de la pâte au cours du pétrissage s'explique en grande partie par une fixation progressive de l'eau sur les constituants de la farine et donc par diminution de l'eau libre responsable de la fluidité de la pâte.

La baisse des indices alvéographiques de nos formules engendrée par l'augmentation des taux d'hydratation peut être expliquée par la présence d'un excès d'eau entre les constituants des farines induisant ainsi une grande fluidité, l'apparition d'un caractère collant (CALVEL 1984) et par conséquent une diminution de la force boulangère des pâtes.

Concernant la relation entre le changement du niveau d'hydratation et le rapport de configuration (P/L) (figure 18), les formules R₁F, R₁PC présentent les valeurs du (P/L) les plus élevées aux taux d'hydratation (TH_{3/4}), le (P/L) des formules (R₁PP et R₂PP) diminuent avec l'augmentation du taux d'hydratation et en fin les formules (R₂F, R₂PC) présentent la valeur la plus élevée de rapport de configuration (P/L) au taux d'hydratation (TH_{1/2}). Ces résultats sont dus à une diminution de la ténacité (P) plus ou moins importante que la diminution de l'élasticité (L) à chaque fois qu'on augmente le taux d'hydratation.

Les valeurs des rapports de configuration de l'ensemble des formules étudiées aux différents taux d'hydratation étaient assez élevées par rapport à celle de la farine témoin de blé tendre, renseignant sur la forte ténacité des pâtes sans gluten ainsi que sur leur faible capacité d'élasticité.

2-2-5-Conclusion

La faine témoin de blé tendre peut être jugée panifiable malgré ses propriétés rhéologiques moyennes.

Parmi les formules étudiées, c'est la R₁F au taux d'hydratation TH'_{1/4}=80 % qui a présenté le gonflement (G) et le travail de déformation (W) les plus proches des normes algériennes de panification J.O.R.A. (1991) ainsi que du témoin de blé tendre (BT). Le rapport de configuration (P/L) reste parmi les meilleurs enregistrés. Toutefois, toutes les formules sans étuvage du riz restent jugées non panifiables,

Parmi les trois formules à base de riz étuvé, c'est la R₂PC au taux d'hydratation TH'_{1/4}=160.6 % qui a présenté le gonflement (G) et le travail de déformation (W) les plus proches aux normes algériennes de panification J.O.R.A. (1991) et au témoin de blé tendre (BT). Le rapport de configuration reste parmi les meilleurs enregistrés. Toutes les formules sans gluten à base de riz étuvé restent jugées non panifiables.

Les valeurs des indices alvéographiques des formules (R₂) étaient plus éloignées des normes algériennes J.O.R.A. (1991) et du témoin de blé tendre (BT) que celles des formules (R₁). Nous pouvons conclure que l'étuvage du riz a influé négativement les valeurs des indices alvéographiques (G, P/L et W) des formules (R₁) testées aux différents taux d'hydratation : TH'_{1/4}, TH'_{1/2} et TH'_{3/4}, par conséquent, il a baissé la valeur boulangère de ces formules.

Concernant le changement du niveau d'hydratation, le gonflement (G) et le travail de déformation (W) ont présenté au taux d'hydratation (TH'_{1/4}) les meilleures valeurs aussi bien pour les formules au riz étuvé que pour celles au riz non étuvé, puis ces valeurs ont diminué à chaque fois que le taux d'hydratation augmente (TH'_{1/2}, TH'_{3/4}). Le rapport de configuration (P/L) a suivi globalement une loi anarchique en changeant le niveau d'hydratation pour l'ensemble des formules testées, ces valeurs étaient assez élevées par rapport à celle de la farine témoin de blé tendre.

3- La qualité des pains sans gluten obtenus

L'aptitude des formules sans gluten à la panification était étudiée par l'essai de panification qui reste le moyen le plus garanti permettant de tirer des conclusions confirmatives sur la valeur boulangère d'une farine (FEILLET 2000). Un beau pain se caractérise par sa couleur, son volume important, son odeur, son goût et son comportement à la mastication (NAMOUNE 1989).

Après 30 min de la sortie du four, les pains obtenus ont été caractérisés selon deux critères :

- La qualité sensorielle (couleur, odeur et texture) des pains et mies ;
- Les volumes spécifiques des pains et mies.

3-1- La qualité sensorielle des pains obtenus

Les caractéristiques sensorielles des pains témoin, à base de riz étuvé et non étuvé a été effectuée à l'œil nu de l'extérieur et des coupes longitudinales. La description a porté sur la croûte (couleur, texture, épaisseur), la mie (couleur, texture, alvéolage) et sur l'odeur du pain (bonne, désagréable). La couleur, l'odeur et la texture du pain sont les premiers aspects qui attirent l'attention du consommateur.

3-1-1- La qualité sensorielle des trois pains à base de riz non étuvé

La description des caractéristiques sensorielles des pains et mies (témoin – formules à base de riz non étuvé) est représentée dans le tableau 17.

Tableau 17 : Description sensorielle des pains à base de riz non étuvé.

Pain	Croûte			Mie			Odeur
	Couleur	Texture	Epaisseur	Couleur	Texture	Forme des alvéoles	
BT	Brune	Croustissante	Fine	Blanche à crème	Alvéolée	Régulière	Bonne
R₁F (TH _{1/4})	Rougeâtre**	Dure	Fine	Crème à brunâtre**	Compacte	-	Désagréable
R₁F (TH _{1/2})	Rougeâtre*	Dure	Fine	Crème à brunâtre*	Compacte	-	Désagréable
R₁F (TH _{3/4})	Rougeâtre	Dure	Fine	Crème à brunâtre	Peu alvéolée	Irrégulière	Désagréable
R₁PC (TH _{1/4})	Rougeâtre**	Dure	Fine	Crème à jaunâtre**	Compacte	-	Désagréable
R₁PC (TH _{1/2})	Rougeâtre*	Dure	Fine	Crème à jaunâtre*	Compacte	-	Désagréable
R₁PC (TH _{3/4})	Rougeâtre	Dure	Fine	Crème à jaunâtre	Peu alvéolée	Irrégulière	Désagréable
R₁PP (TH _{1/4})	Rougeâtre**	Dure	Fine	Crème**	Compacte	-	Désagréable
R₁PP (TH _{1/2})	Rougeâtre*	Dure	Fine	Crème*	Compacte	-	Désagréable
R₁PP (TH _{3/4})	Rougeâtre	Dure	Fine	Crème	Peu alvéolée	Irrégulière	Désagréable

* : intensité du critère.

Le pain témoin de blé tendre a présenté une croûte de couleur brunâtre, elle est fine et croustillante. D'autre part, la mie est de couleur blanche à crème, elle a présenté des alvéoles de forme régulière. L'odeur du pain témoin de blé tendre est jugée bonne.

Les trois pains à base de riz non étuvé (R_1F , R_1PC , R_1PP) ont montré aux différents taux d'hydratation une croûte de couleur rougeâtre, elle est plus sombre au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ des trois formules (R_1F , R_1PC , R_1PP), puis elle devient claire en augmentant les taux d'hydratation des pâtes à pain. Les croûtes de tous les pains à base de riz non étuvé ont présenté une texture fine et dure.

Les mies des trois pains sans gluten étaient de couleurs différentes et caractéristiques selon leur composition en matières premières : la mie (R_1F) est crème à brunâtre, la mie (R_1PC) est crème à jaunâtre, et enfin la mie (R_1PP) est de couleur crème. L'intensité de chaque couleur diminue avec l'augmentation des taux d'hydratation.

Les mies des pains à base de riz non étuvé (R_1F , R_1PC , R_1PP) aux taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ et $TH_{1/2}$, ont montré une texture compacte et entassée avec absence presque totale des alvéoles. Les mies des trois pains au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ ont présenté peu d'alvéoles de forme irrégulière ce qui pourrait être dû aux quantités d'eau élevées utilisées pour la préparation de ces pains

Les trois pains à base de riz non étuvé ont dégagé des odeurs caractéristiques des légumes secs qui les composent, ces différentes odeurs peuvent être jugées désagréables.

En conclusion, les trois pains à base de riz non étuvé aux différents taux d'hydratation ont présenté les meilleures caractéristiques sensorielles au niveau de la croûte où la couleur «rougeâtre» était jugée mieux appréciée que celle du pain témoin de blé tendre «brune», ainsi que l'épaisseur de la croûte jugée de même finesse que celle de la croûte du pain témoin.

D'autre part, les trois pains (R_1F , R_1PC , R_1PP) au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ ont montré un meilleur alvéolage de mie par rapport aux deux autres taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$, $TH_{1/2}$). Toutefois, les trois pains à base de riz non étuvé étaient de qualité nettement inférieure à celle du pain témoin de blé tendre, notamment au niveau de la couleur et de l'alvéolage des mies ainsi qu'au niveau de l'odeur.

3-1-2- La qualité sensorielle des trois pains à base de riz étuvé

La description des caractéristiques sensorielles des pains et mies (témoin – formules à base de riz étuvé) est représentée dans le tableau 18.

Tableau 18 : Description sensorielle des pains à base de riz étuvé.

Pain	Croûte			Mie			Odeur
	Couleur	Texture	Epaisseur	Couleur	Texture	Forme des alvéoles	
BT	Brune	Croustiante	Fine	Blanche à crème	Alvéolée	Régulière	Bonne
R₂F (TH^{1/4})	Rougeâtre pâle	Dure	Epaisse	Crème foncée à brunâtre**	Compacte	-	Désagréable
R₂F (TH_{1/2})	Rougeâtre pâle*	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée à brunâtre*	Compacte, collante	-	Désagréable
R₂F (TH^{3/4})	Rougeâtre pâle**	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée à brunâtre	Collante avec très grandes alvéoles	Irrégulière	Désagréable
R₂PC (TH^{1/4})	Rougeâtre pâle	Dure	Epaisse	Crème foncée à jaunâtre**	Compacte	-	Désagréable
R₂PC (TH_{1/2})	Rougeâtre pâle*	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée à jaunâtre*	Compacte, collante	-	Désagréable
R₂PC (TH^{3/4})	Rougeâtre pâle**	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée à jaunâtre	Collante avec très grandes alvéoles	Irrégulière	Désagréable
R₂PP (TH^{1/4})	Rougeâtre pâle	Dure	Epaisse	Crème foncée**	Compacte	-	Désagréable
R₂PP (TH_{1/2})	Rougeâtre pâle*	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée*	Compacte, collante	-	Désagréable
R₂PP (TH^{3/4})	Rougeâtre pâle**	Dure fissurée	Epaisse*	Crème foncée	Collante avec très grandes alvéoles	Irrégulière	Désagréable

* : intensité du critère.

Les trois pains à base de riz étuvé (R₂F, R₂PC, R₂PP) ont présenté aux différents taux d'hydratation une croûte de couleur rougeâtre pâle, elle est plus sombre au taux d'hydratation TH^{1/4} des trois formules (R₂F, R₂PC, R₂PP), puis elle devient claire aux taux d'hydratation élevés (TH_{1/2}, TH^{3/4}). L'intensité de cette couleur pâle est proportionnelle avec l'augmentation des quantités d'eau ajoutées aux pâtes à pain. Les croûtes de tous les pains à base de riz étuvé ont

présenté une texture épaisse et dure au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ puis cette texture est devenue plus épaisses et fissurées aux taux d'hydratation élevés ($TH'_{1/2}$, $TH'_{3/4}$).

Les mies des trois pains sans gluten étaient de couleurs différentes et caractéristiques : la mie (R_2F) est crème foncée à brunâtre, la mie (R_2PC) est crème foncée à jaunâtre, et la mie (R_2PP) est de couleur crème foncée. L'intensité de chaque couleur diminue avec l'augmentation des taux d'hydratation.

Les mies des pains à base de riz étuvé (R_2F , R_2PC , R_2PP) aux taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ et $TH'_{1/2}$, ont montré une texture compacte, entassée et collante avec absence presque totale des alvéoles. Les mies des trois pains au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ ont présenté une grande alvéole pour chacun, ce qui pourrait être dû aux quantités d'eau élevées utilisées lors de la formation des pâtes, la fluidité de ces dernières a facilité l'accumulation des gaz de fermentation dans ces grandes alvéoles donnant l'impression que les mies étaient trouées.

Les trois pains à base de riz étuvé ont dégagé des odeurs caractéristiques des légumes secs qui les composent, ces différentes odeurs sont jugées désagréables.

Pour faire ressortir l'effet de l'étuvage sur l'aptitude technologique des pains sans gluten, les caractéristiques sensorielles des pains à base de riz étuvé (R_2) sont comparées à celles des pains à base de riz non étuvé (R_1) (tableau 18, tableau 17).

Les croûtes des pains (R_2) qui étaient de couleur rougeâtre pâle, de texture dure, fissurée et plus ou moins épaisse semblent présentées des caractéristiques inférieures à celles des croûtes à base de riz non étuvé (rougeâtre, dure, fine).

D'autre part, les mies des pains (R_2) ont montré des couleurs sombres dues à l'étuvage qui change la couleur de riz du blanc au crème, des textures compactes et collantes avec grandes alvéoles au $TH'_{3/4}$ contre des textures de mies (R_1) compactes mais non collantes avec peu d'alvéoles dispersées au $TH'_{3/4}$.

Les mauvaises caractéristiques sensorielles présentées par les pains à base de riz étuvé sont conférées en grande part aux volumes d'eau excessifs ajoutés aux pâtes à pains. Par conséquent, l'étuvage du riz a diminué les caractéristiques sensorielles des pains.

3-1-3- Conclusion

Le pain témoin de blé tendre a présenté une croûte de couleur brunâtre, elle est fine et croustillante. La mie est de couleur blanche à crème, elle a présenté des alvéoles de forme régulière. L'odeur du pain témoin est jugée bonne.

Les trois pains à base de riz non étuvé aux différents taux d'hydratation ont montré les meilleures caractéristiques sensorielles au niveau de la croûte où la couleur «rougeâtre» était jugée mieux appréciée que celle du pain témoin « brune », ainsi que l'épaisseur de la croûte jugée de même finesse que celle de la croûte du pain témoin. D'autre part, les trois pains (R₁F, R₁PC, R₁PP) au taux d'hydratation TH'_{3/4} ont montré un meilleur alvéolage de mie par rapport aux autres taux d'hydratation.

Toutefois, les trois pains à base de riz non étuvé étaient de qualité inférieure à celle du pain témoin, notamment au niveau de la couleur et de l'alvéolage des mies ainsi qu'au niveau de l'odeur.

Les croûtes des pains (R₂) qui ont été de couleur rougeâtre pâle, de texture dure, fissurée et plus ou moins épaisse semblent présentées des caractéristiques inférieures à celles des croûtes à base de riz non étuvé (rougeâtre, dure, fine).

D'autre part, les mies des pains (R₂) ont montré des couleurs sombres dues à l'étuvage qui change la couleur de riz du blanc au crème, des textures compactes et collantes avec grandes alvéoles au TH'_{3/4} contre des textures de mies (R₁) compactes mais non collantes avec peu d'alvéoles au TH'_{3/4}. Ces mauvaises caractéristiques sensorielles sont attribuées en grande part aux volumes d'eau excessifs ajoutés aux pâtes à pains. En finalité, l'étuvage du riz a diminué les caractéristiques sensorielles des pains.

3-2- Les volumes spécifiques des trois pains à base de riz non étuvé

L'appréciation des pains au riz non étuvé était réalisée en premier temps par la mesure des volumes spécifiques des pains et des mies (tableau 19).

Tableau 19 : Caractéristiques des pains et mies des formules à base de riz non étuvé.

Farines	Taux d'hydratation TH'(%MS)	V _{sp} (cm ³ /g)	V _{sm} (cm ³ /g)
BT	TH = 76	2.6 ± 0.4	2.8 ± 0.0
R₁F	TH' _{1/4} = 80	1 ± 0.1	1.2 ± 0.0
R₁F	TH' _{1/2} = 91	1.1 ± 0.0	1.1 ± 0.0
R₁F	TH' _{3/4} = 103	1.2 ± 0.02	1.4 ± 0.0
R₁PC	TH' _{1/4} = 80.7	1.1 ± 0.0	1.5 ± 0.0
R₁PC	TH' _{1/2} = 93.2	1.2 ± 0.0	1.4 ± 0.0
R₁PC	TH' _{3/4} = 106.1	1.2 ± 0.0	1.5 ± 0.0
R₁PP	TH' _{1/4} = 81.8	1 ± 0.0	1.2 ± 0.0
R₁PP	TH' _{1/2} = 94.7	1.1 ± 0.0	1.2 ± 0.0
R₁PP	TH' _{3/4} = 107.7	1.2 ± 0.0	1.2 ± 0.0

P_{ds_p} et P_{ds_m}: poids du pain et de sa mie respectivement.

V_p et V_m: volume du pain et de sa mie respectivement.

V_{sp} et V_{sm}: volume spécifique du pain et de sa mie respectivement.

Rappelons que tous les pâtons (témoin, formules) avaient le même volume initial de pâte ($\approx 73 \text{ cm}^3$) avec les différents taux d'hydratation testés.

Les valeurs des volumes spécifiques de témoin de blé tendre (BT) ont été pour le pain ($V_{sp} = 2.6 \text{ cm}^3/\text{g}$) et pour la mie ($V_{sm} = 2.8 \text{ cm}^3/\text{g}$). Comparé aux travaux de BENATALLAH (2009) et de GHERAIRIA (2011) qui présentent un pain de blé tendre de volume spécifique ($V_{sp} = 3,3 \text{ cm}^3/\text{g}$ et $V_{sp} = 3,6 \text{ cm}^3/\text{g}$) successivement, notre pain témoin est jugé moins développé et son volume spécifique reste inférieur.

Concernant les pains sans étuvage du riz, les trois formules (R₁F, R₁PC, R₁PP) au taux d'hydratation TH_{3/4} ont donné leur meilleur volume spécifique, avec une valeur identique de ($V_{sp} = 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$), par conséquent c'est le volume spécifique le plus proche du pain témoin de blé tendre ($V_{sp} = 2.6 \text{ cm}^3/\text{g}$) tout en restant significativement inférieur ($p < 0.05$). Comparé au pain de la

formule RF cité par GHERAIRIA 2011 ($V_{sp} = 2.7 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour un taux d'hydratation de 86.7%) notre pain R1F ($TH_{1/2}$) est jugé moins développé et son volume spécifique reste inférieur. Cela peut être dû à la différence de la température de fermentation existante entre les deux diagrammes de panification (38C° pour R1F contre 35C° pour RF).

En ce qui concerne les volumes spécifiques des mies, ce sont ceux de la formule (R₁PC) aux taux d'hydratation ($TH'_{1/4} = 80.7 \%$ et $TH'_{3/4} = 106.1 \%$) qui ont présenté la valeur la plus élevée ($V_{sm} = 1.5 \text{ cm}^3/\text{g}$), donc la plus proche du volume spécifique de la mie de blé tendre ($V_{sm} = 2.8 \text{ cm}^3/\text{g}$) tout en restant significativement inférieur ($p < 0.05$).

Les deux formules restantes ont présenté quant à elles aussi leurs meilleurs volumes spécifiques de mie au taux d'hydratation ($TH'_{3/4}$) avec les valeurs successives de : ($V_{sm} = 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$) pour la formule (R₁F) et ($V_{sm} = 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$) pour la formule (R₁PP).

Parmi les trois pains sans étuvage du riz testés, c'est celui de la formule (R₁PC) au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ qui a présenté le volume spécifique de pain ($V_{sp} = 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$) et celui de mie ($V_{sm} = 1.5 \text{ cm}^3/\text{g}$) les plus proches de pain témoin de blé tendre ($V_{sp} = 2.6 \text{ cm}^3/\text{g}$, $V_{sm} = 1.54 \text{ cm}^3/\text{g}$). Néanmoins, les volumes spécifiques de tous les pains sans étuvage du riz restent significativement inférieurs de ceux du pain témoin de blé tendre.

Ces résultats ne concordent pas avec la conclusion tirée des essais alvéographiques indiquant que c'est la formule (R₁F) au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ qui présente les meilleures caractéristiques alvéographiques tout en restant significativement inférieur au témoin de blé tendre. A partir de ces comparaisons, les formules sans étuvage de riz ont présenté aux essais alvéographiques un comportement indépendant de celui de l'essai de panification.

Les augmentations du volume spécifique des pains et celui des mies au taux d'hydratation ($TH'_{3/4}$) sont dues probablement aux quantités élevées d'eau utilisées lors de la fabrication de ces pâtes, par conséquent l'excès d'eau provoque l'augmentation de la fluidité de la pâte et de la viscosité ce qui facilite l'emprisonnement d'une quantité des gaz de la fermentation à l'intérieur de petites alvéoles.

3-3- Les volumes spécifiques des trois pains avec étuvage du riz

La caractérisation des pains à base de riz étuvé était réalisée en premier temps par la mesure des volumes spécifiques des pains et des mies (tableau 20).

Tableau 20: Caractéristiques des pains et mies des formules à base de riz étuvé.

Farines	Taux d'hydratation TH'(%MS)	V _{sp} (cm ³ /g)	V _{sm} (cm ³ /g)
BT	TH = 76	2.6 ± 0.4	2.8 ± 0.0
R ₂ F	TH' _{1/4} = 141.6	1.2 ± 0.0	1.4 ± 0.0
R ₂ F	TH' _{1/2} = 151.1	1.2 ± 0.0	1.4 ± 0.0
R ₂ F	TH' _{3/4} = 160.6	1.4 ± 0.0	1.3 ± 0.0
R ₂ PC	TH' _{1/4} = 143	1.1 ± 0.0	1.5 ± 0.0
R ₂ PC	TH' _{1/2} = 154.8	1.2 ± 0.1	1.3 ± 0.0
R ₂ PC	TH' _{3/4} = 167.2	1.3 ± 0.0	1.2 ± 0.0
R ₂ PP	TH' _{1/4} = 147.2	1.2 ± 0.0	1.6 ± 1.6
R ₂ PP	TH' _{1/2} = 160.4	1.2 ± 0.0	1.1 ± 0.1
R ₂ PP	TH' _{3/4} = 173.6	1.3 ± 0.0	1 ± 0.0

P_{ds_p} et P_{ds_m}: poids du pain et de sa mie respectivement.

V_p et V_m: volume du pain et de sa mie respectivement.

V_{sp} et V_{sm}: volume spécifique du pain et de sa mie respectivement.

Rappelons que tous les pâtons (témoin, formules) avaient le même volume initial de pâte (≈73 cm³) avec les différents taux d'hydratation testés.

Concernant les pains à base de riz étuvé, c'est celui de la formule (R₂F) au taux d'hydratation TH'_{3/4} = 160.6 qui a donné le volume spécifique le plus élevé (V_{sp} = 1.4 cm³/g), par conséquent il est le plus proche du pain témoin de blé tendre (V_{sp} = 2.6 cm³/g) tout en restant significativement inférieur (p < 0.05).

Les pains des deux formules restantes (R₂PC, R₂PP) ont présenté les volumes spécifiques les plus élevés au même taux d'hydratation (TH'_{3/4}), (V_{sp} = 1.3 cm³/g pour la formule (R₂PP) et V_{sp} = 1.31 ± 0.05 cm³/g pour la formule (R₂PC)).

En ce qui concerne les volumes spécifiques des mies, c'est celui de la formule (R₂PP) au taux d'hydratation $TH'_{1/4} = 147.2$ qui a présenté la valeur la plus élevée ($V_{S_m} = 1.6 \text{ cm}^3/\text{g}$), donc c'est celui qui se rapproche le plus du volume spécifique de la mie de blé tendre ($V_{S_m} = 2.8 \text{ cm}^3/\text{g}$) tout en restant significativement inférieur ($p < 0.05$)

Les deux formules restantes ont présenté quant à elles aussi leurs meilleurs volumes spécifiques de mie au même taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$) avec les valeurs successives de : ($V_{S_m} = 1.51 \pm 0.03 \text{ cm}^3/\text{g}$) pour la formule (R₂PC) et ($V_{S_m} = 1.39 \pm 0.01 \text{ cm}^3/\text{g}$) pour la formule (R₂F).

Parmi les trois pains à base de riz étuvé, c'est celui de la formule (R₂F) au taux d'hydratation $TH'_{3/4} = 160.6$ qui a présenté le volume spécifique ($V_{S_p} = 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$) le plus proche de pain témoin de blé tendre ($V_{S_p} = 2.6 \text{ cm}^3/\text{g}$). Par contre, il a présenté au même taux d'hydratation le volume spécifique de mie le plus bas ($V_{S_m} = 1.3 \text{ cm}^3/\text{g}$).

La même remarque était notée pour les pains des deux formules (R₂PC, R₂PP), ils ont présenté les meilleurs volumes spécifiques de pains avec les mauvais volumes spécifiques de mies. Toutefois, les volumes spécifiques de tous les pains à base de riz étuvé restent significativement inférieurs de ceux du pain témoin de blé tendre.

Ces résultats ne concordent pas avec la conclusion tirée des essais alvéographiques indiquant que c'est la formule (R₂PC) au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ qui a présenté les meilleures caractéristiques alvéographiques tout en restant significativement inférieur au témoin de blé tendre. A partir de ces comparaisons, les formules à base de riz étuvé ont présenté aux essais alvéographiques un comportement indépendant de celui de l'essai de panification.

Afin de faire ressortir l'effet de l'étuvage sur la qualité boulangère des formules sans gluten, les volumes spécifiques des pains et des mies des formules à base de riz étuvé (R₂) ont été comparés à ceux des formules à base de riz non étuvé (R₁) (tableau 18, tableau 17).

En ce qui concerne les pains, les volumes spécifiques (V_{S_p}) de toutes les formules à base de riz étuvé ont présenté des valeurs significativement supérieures à celles des (V_{S_p}) des formules à base de riz non étuvé pour le même légume sec et le même aux d'hydratation, à l'exception de la formule R₂PC qui a présenté les mêmes volumes spécifiques que la formule R1PP au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ et $TH'_{1/2}$ ($V_{S_p} = 1.1 \text{ cm}^3/\text{g}$ au $TH'_{1/4}$ et $V_{S_p} = 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ au $TH'_{1/2}$). A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que l'étuvage du riz a amélioré les volumes spécifiques des pains sans gluten, tout en restant significativement inférieurs à ceux du pain témoin de blé tendre.

Les formules à base de riz étuvé ont présenté aux essais alvéographiques un comportement indépendant de celui de l'essai de panification.

Pour les comparaisons des mies, les volumes spécifiques (V_{sm}) de la majorité des formules à base de riz étuvé ont présenté par contre des valeurs significativement inférieures à celles des (V_{sm}) des formules à base de riz non étuvé pour le même légume sec et le même taux d'hydratation. Les améliorations des (V_{sm}) ont été enregistrées pour la formule R₂F au taux d'hydratation TH'_{1/4} et TH'_{1/2} ($V_{sm}= 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₂F au TH'_{1/4} contre $V_{sm}= 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₁F au même taux d'hydratation ; $V_{sm}= 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₂F au TH'_{1/2} contre $V_{sm}= 1.1 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₁F au même taux d'hydratation), ainsi que pour la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{1/4} ($V_{sm}= 1.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₂PP contre $V_{sm}= 1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour R₁PP au même taux d'hydratation).

Il faut noter que les meilleurs volumes spécifiques ont été enregistrés pour les formules à base de riz étuvé (R₂) avec un $V_{sp}= 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour la formule R₂F au taux d'hydratation TH'_{3/4} et un $V_{sm}= 1.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{1/4}. Les volumes spécifiques de tous les pains à base de riz étuvé restent significativement inférieurs de ceux du pain témoin de blé tendre.

Selon CALVEL (1984), le gaz carbonique produit au cours de la fermentation des pains de blé tendre s'accumule pour exercer une pression interne sur le réseau imperméable du gluten, ce qui permet à la pâte de lever en maintenant une structure externe. CHARGELEGUE et coll. (1994) expliquent ce phénomène par la prise de force de la pâte qui correspond à une réduction de la ténacité (P) du gluten associée à une augmentation de sa résistance élastique (L).

Une fois la pâte fermentée est mise au four, FEILLET (2000) souligne que le volume du pain augmente brutalement par dilatation des gaz contenues dans les alvéoles, ensuite progressivement jusqu'à ce que les levures sont inactivées (55°C) les enzymes (α -amylase est détruite à 70°C), l'amidon gélatinisé (65 - 80°C) et les protéines termorigidifiées (70 - 90°C). La dilatation des gaz continue au dessus de 70°C dans la mesure où les contraintes exercées par la pâte ne s'opposent pas à leur expansion, bien que la mie commence à se figer à 100 °C.

De ce fait nous pouvons conclure que, l'absence totale des protéines formant le réseau imperméable de gluten dans la farine de riz peut être la cause principale de l'échappement du gaz

carbonique au cours de la fermentation et la cuisson. Par conséquent les pains cuits sont très peu développés et leurs mies sont compactes et entassées.

3-4- Conclusion

Parmi les trois pains sans étuvage du riz testés, c'est celui de la formule (R₁PC) au taux d'hydratation TH'_{3/4} qui a présenté le volume spécifique de pain et celui de mie les plus proches de pain témoin de blé tendre.

Concernant les trois pains à base de riz étuvé, c'est celui de la formule (R₂F) au taux d'hydratation TH'_{3/4} qui a présenté le volume spécifique le plus proche de pain témoin de blé tendre. Par contre, il a présenté au même taux d'hydratation le volume spécifique de mie le plus bas. La même remarque a été notée pour les pains des deux formules (R₂PC, R₂PP). Toutefois, les volumes spécifiques de tous les pains (R₁ et R₂) restent significativement inférieurs de ceux du pain témoin de blé tendre

Les volumes spécifiques de pain (V_{sp}) de toutes les formules à base de riz étuvé ont présenté des valeurs significativement supérieures à celles des (V_{sp}) des formules à base de riz non étuvé pour le même légume sec et le même taux d'hydratation, à l'exception de la formule R₂PC au taux d'hydratation TH'_{1/4} et TH'_{1/2}. Nous pouvons conclure que l'étuvage du riz a amélioré les volumes spécifiques des pains sans gluten, tout en restant significativement inférieurs à ceux du pain témoin.

Les volumes spécifiques de mie (V_{sm}) de la majorité des formules à base de riz étuvé ont présenté par contre des valeurs significativement inférieures à celles des (V_{sm}) des formules à base de riz non étuvé pour le même légume sec et le même taux d'hydratation. Les améliorations des (V_{sm}) sont enregistrées pour la formule R₂F au taux d'hydratation TH'_{1/4} et TH'_{1/2}, ainsi que pour la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{1/4}.

Il faut noter que les meilleurs volumes spécifiques étaient enregistrés pour les formules à base de riz étuvé (R₂) avec un V_{sp}= 1.4 cm³/g pour la formule R₂F au taux d'hydratation TH'_{3/4} et un V_{sm}= 1.6 cm³/g pour la formule R₂PP au taux d'hydratation TH'_{1/4}.

Conclusion générale

Dans le but de rendre meilleur les conditions de vie des malades cœliaques algériens et d'améliorer leurs ration alimentaire quotidienne, l'objectif de la présente étude était de contribuer à la fabrication de pain sans gluten, en testant l'aptitude technologique d'une formulation à base de riz et de légumes secs de rapport massique 2/1 respectivement. Les six formules envisagées (en plus de la farine témoins de blé tendre) ont été étudiées.

La détermination des intervalles d'hydratation de la farine témoin et des six formules mises en œuvres, a été réalisé sur le chois des critères les mieux adaptés à la technologie de panification.

L'étude de la capacité d'absorption d'eau a montré qu'aux taux minima d'hydratation (TH_{min}), les formules R_1F , R_1PC , R_1PP ont présenté des résultats significativement proches de ceux de la farine témoin de blé tendre (R_1F : 55.80 ± 0.93 % ; R_1PC : 55.50 ± 0.71 % ; R_1PP : 56.00 ± 1.40 % contre BT : 58.22 ± 1.04 %). Par contre les taux d'hydratation des formules à base de riz étuvé (R_2F : 122.8 ± 1.49 % ; R_2PC : 117.6 ± 1.63 % ; R_2PP : 117.8 ± 0.46 %) étaient significativement supérieurs ($p < 0.05$) à celui de la farine témoin de blé tendre (BT : 58.22 ± 1.04 %).

Concernant les taux maxima d'hydratation (TH_{max}), la capacité d'absorption d'eau des formules à base de riz étuvé (R_2) était significativement supérieure ($p < 0.05$) à celle de la farine du blé tendre (R_2F : 179.50 ± 1.17 % ; R_2PC : 192 ± 1.41 % ; R_2PP : 201.50 ± 1.16 % contre BT : 136.70 ± 0.48 %). Tandis que les formules à base de riz non étuvé (R_1) ont présenté des taux d'hydratation significativement proches de celui du témoin (R_1PC : 131.30 ± 2.33 % ; R_1PP : 133.50 ± 1.23 % contre BT : 136.70 ± 0.48 %), la formule R_1F avec ($TH_{max} = 127.70 \pm 0.75$ %) était significativement inférieure par rapport à la farine témoin ($p = 0.001$).

La capacité d'hydratation des formules à base de riz étuvé (R_2) était significativement supérieure à celle des formules à base de riz non étuvé (R_1) ($p < 0.05$).

Les résultats alvéographiques ont indiqué que parmi les formules étudiées, c'est la R_1F au taux d'hydratation $TH'_{1/4}=80\%$ qui a présenté le gonflement (G) et le travail de déformation (W) les plus proches des normes algériennes de panification J.O.R.A. (1991) ainsi que du témoin de blé tendre (BT). Le rapport de configuration (P/L) reste parmi les

meilleurs enregistrés. Toutefois, les valeurs des indices alvéographiques restent significativement inférieures à celles du témoin de blé tendre.

Concernant les trois formules à base de riz étuvé, c'est la R₂PC au taux d'hydratation $TH'_{1/4}=160.6\%$ qui a présenté le gonflement (G) et le travail de déformation (W) les plus proches des normes algériennes de panification J.O.R.A. (1991) et du témoin de blé tendre (BT). Le rapport de configuration reste parmi les meilleurs enregistrés. Egalement les valeurs des indices alvéographiques des formules à base de riz étuvé restent significativement inférieures à celles du témoin de blé tendre.

Les valeurs des indices alvéographiques des formules (R₂) étaient plus éloignées des normes algériennes J.O.R.A. (1991) et du témoin de blé tendre (BT) que celles des formules (R₁). Nous pouvons conclure que l'étuvage du riz a influé négativement les valeurs des indices alvéographiques (G, P/L et W) des formules (R₁) testées aux différents taux d'hydratation. Par conséquent, il a baissé la valeur boulangère de ces formules.

Concernant le changement du niveau d'hydratation, le gonflement (G) et le travail de déformation (W) ont présenté au taux d'hydratation ($TH'_{1/4}$) les meilleures valeurs aussi bien pour les formules au riz étuvé que pour celles au riz non étuvé, puis ces valeurs ont diminué à chaque fois que le taux d'hydratation augmente ($TH_{1/2}$, $TH'_{3/4}$). Le rapport de configuration (P/L) a suivi globalement une loi anarchique en changeant le niveau d'hydratation pour l'ensemble des formules testées, ces valeurs étaient assez élevées par rapport à celle de la farine témoin de blé tendre.

L'aptitude des formules sans gluten à la panification a été étudiée à travers l'essai de panification qui reste le moyen le plus garanti pour juger la valeur boulangère d'une farine. Le pain témoin de blé tendre a présenté un volume moyen par rapport au pain ordinaire. La croûte est de couleur brunâtre, elle est fine et croustillante. La mie est de couleur blanche à crème, elle a présenté des alvéoles de forme régulière. L'odeur du pain témoin est jugée bonne.

Les trois pains à base de riz non étuvé aux différents taux d'hydratation ont montré les meilleures caractéristiques sensorielles au niveau de la croûte où la couleur «rougeâtre» était jugée mieux appréciée que celle du pain témoin «brune», ainsi que l'épaisseur de la croûte jugée de même finesse que celle de la croûte du pain témoin. D'autre part, les trois pains (R₁F, R₁PC, R₁PP) au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ ont montré un meilleur alvéolage de mie par rapport aux autres taux d'hydratation. Néanmoins, les trois pains à base de riz non étuvé

étaient de qualité inférieure à celle du pain témoin, notamment au niveau de la couleur et l'alvéolage des mies ainsi qu'au niveau de l'odeur.

Les croûtes des pains (R_2) qui ont été de couleur rougeâtre pâle, de texture dure, fissurée et plus ou moins épaisse semblent présenter des caractéristiques inférieures à celles des croûtes à base de riz non étuvé (rougeâtre, dure, fine).

D'autre part, les mies des pains (R_2) ont montré des couleurs sombres dues à l'étuvage qui change la couleur de riz du blanc au crème, des textures compactes et collantes avec grandes alvéoles au $TH'_{3/4}$ contre des textures de mies (R_1) compactes mais non collantes avec peu d'alvéoles au $TH'_{3/4}$. Ces mauvaises caractéristiques sensorielles sont attribuées en grande part aux volumes d'eau excessifs ajoutés aux pâtes à pains. Par conséquent, l'étuvage du riz a diminué les caractéristiques sensorielles des pains sans gluten.

Le pain témoin de blé tendre a présenté un volume spécifique de pain $V_{Sp} = 2.63 \pm 0.45$ cm^3/g et un volume spécifique de mie $V_{Sm} = 2.82 \pm 0.00$ cm^3/g .

Parmi les trois pains sans étuvage du riz testés, c'est celui de la formule (R_1PC) au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ qui a présenté le volume spécifique de pain et celui de mie les plus proches de pain témoin de blé tendre.

Concernant les trois pains à base de riz étuvé, c'est celui de la formule (R_2F) au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ qui a présenté le volume spécifique de pain le plus proche à celui du pain témoin de blé tendre. Par contre, il a présenté au même taux d'hydratation le volume spécifique de mie le plus bas. La même remarque a été notée pour les pains des deux formules (R_2PC , R_2PP). Toutefois, les volumes spécifiques de tous les pains (R_1 et R_2) restent significativement inférieurs ($p < 0.05$) à ceux du pain témoin de blé tendre.

Les volumes spécifiques (V_{Sp}) de toutes les formules à base de riz étuvé (R_2) ont présenté des valeurs significativement supérieures à celles des (V_{Sp}) des formules à base de riz non étuvé (R_1) pour le même légume sec et le même aux d'hydratation, à l'exception de la formule R_2PC au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ et $TH'_{1/2}$. Nous pouvons conclure que l'étuvage du riz a amélioré les volumes spécifiques des pains sans gluten, tout en restant significativement inférieurs à ceux du pain témoin. Les formules à base de riz étuvé ont présenté aux essais alvéographiques un comportement indépendant de celui de l'essai de panification.

Les volumes spécifiques de mie (V_{S_m}) de la majorité des formules à base de riz étuvé (R_2) ont présenté par contre des valeurs significativement inférieures à celles des (V_{S_m}) des formules à base de riz non étuvé (R_1) pour le même légume sec et le même taux d'hydratation. Les améliorations des (V_{S_m}) étaient enregistrées pour la formule R_2F au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$ et $TH'_{1/2}$, ainsi que pour la formule R_2PP au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$.

Il faut noter que les meilleurs volumes spécifiques étaient enregistrés pour les formules à base de riz étuvé (R_2) avec un $V_{S_p} = 1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour la formule R_2F au taux d'hydratation $TH'_{3/4}$ et un $V_{S_m} = 1.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour la formule R_2PP au taux d'hydratation $TH'_{1/4}$.

L'ensemble des résultats auxquels à abouti la présente étude a prouvé la possibilité de fabriquer des pains sans gluten à partir des formules testées mais avec une qualité technologique et organoleptique inférieure à celle du pain témoin de blé tendre.

Ce travail constitue une approche de la possibilité de substituer la farine de blé tendre par des formules sans gluten dans la technologie de panification. Il serait nécessaire d'améliorer et de compléter cette étude en s'intéressant aux volets suivants :

- Etude de l'aptitude technologique des formules (riz-légume sec) en réduisant la fraction légume sec dans le but d'améliorer les caractéristiques organoleptiques ;
- Etude de l'aptitude technologique d'autres matières premières exemptes de gluten tel que le maïs dans le but de diversifier la gamme des pains sans gluten et de diminuer leur coût de revient ;
- Utilisation d'autres tests d'appréciation des qualités technologiques et rhéologiques des pâtes sans gluten ;
- Utilisation d'améliorants technologiques tel que l'hydroxypropyl méthyl cellulose (HPMC) qui a prouvé l'amélioration de la rétention gazeuse au moment de la cuisson du pain sans gluten (BENATALLA 2009).
- Utilisation d'additifs alimentaires de nature chimique ou mieux biologique en vue d'améliorer les caractéristiques organoleptiques des pains fabriqués : texture, goût, odeur et couleur ;

- Etude de la faisabilité d'autres diagrammes traditionnels notamment la galette sans levure qui implique l'utilisation d'une quantité intéressante de matière grasse contribuant à améliorer les qualités technologiques et organoleptique de la galette ;
- Etude de la possibilité de préparer des recettes de fabrication de pain « galette » sans gluten facile à appliquer au niveau des ménages et des boulangeries.

Liste bibliographique

- ADRIAN J., POTUS J., FRANGNE R. (1995)

La science alimentaire de A à Z. 2^{ème} édition. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 457p.

-AFNOR (1991)

Recueil de normes –contrôle de la qualité des produits alimentaires : céréales et produits céréaliers. AFNOR/DGCC RF. 3^{ème} édition. Paris. 360p.

-ANCELLIN R., BERTA J.L., DUBUISSON C., LA VIEILLE S., MARTINA. (2004)

Allergies alimentaires : connaissances, clinique et prévention. Afssa. Paris. 65p.

- ANGLADETTE A. (1966)

Le riz. 425-442, Maisonneuve et Larose. Paris.

-ANONYME (2007)

Importation de blé en Algérie. « BLADI. NET ».

-AUTIO K., LANDER L., KINNUNEN A., HEINONEN R. (2001)

Bread quality relationship with rheological measurements of wheat flour dough. Cereal chemistry. 78. 654-657.

-BALTSAVIA A., JURGENS A. VAN VLIET T. (1997)

Rheological properties of short doughs at small deformation. Journal of Cereal Science. 26. 289-300.

-BAR C. (1995)

Contrôle de la qualité des céréales et des protéagineux. Guide pratique. ITCF. Paris. 253p.

-BELTON P.S. (1999)

On the elasticity of wheat gluten. In : Le grain de blé : composition et utilisation. FEILLET P. INRA. Paris. 308p.

-BENATALLAH L. (2009)

Couscous et pain sans gluten pour malades cœliaques : aptitude technologique de formules à base de riz et de légumes secs. Diplôme de doctorat en sciences alimentaires. INATAA. Constantine. Algérie.

-BENATALLAH L., ZIDOUNE M.N., AGLI A. (2004)

La maladie cœliaque : cas recensée de 1998 à 2003 et diététique associée a Jijel, Batna, Khanchla. Colloque *ADELFI-EPIBIO* : « L'Epidémiologie et la prise de décision en santé publique », Santé publique & Sciences Sociales (10). Oran : 88-89.

-BERKANI S. (2007)

Evaluation de la valeur boulangère d'ingrédients et de formules sans gluten par l'alvéographe Chopin. Diplôme d'ingénieur d'état. INATTA. Constantine. Algérie.

-BERRAH M., BENHASSINE F., CHAOUI N. (2000)

Actualité sur la maladie cœliaque de l'enfant. Société algérienne de pédiatrie. Table ronde, 9 nov. Alger, 45p.

-BERTRAM A. (2005)

Elasticity and plasticity of large deformations. Springer. Germany. 322p.

- BHATTACHARYA K. R. (1985)

Parboiling of rice. *In*: "rice chemistry and technology". JULLIANO B. O., 289-348, AACC, ST Paul, Minnesola. USA.

-BICHON SAFRANE L. (1991)

Place des légumes secs dans l'alimentation et l'équilibre nutritionnel des français aujourd'hui. LET. SC. FFN. 10 : 305-312.

-BOUAB C. (2002)

Maladie cœliaque : fréquence – diététique associée à Jijel et comportement rhéologique d'ingrédients sans gluten. Diplôme d'ingénieur d'état. INATTA. Constantine. Algérie.

- BOUDREAU A., MENARD G. (1992)

Le blé : éléments fondamentaux et transformation. Les presses de l'université Laval. 4^{ème} trimestre. Québec et Ottawa. 413p.

-BOUMGBAR M.Y. (2000)

Le marché des légumineuses en Algérie. Agroligne. 7 :8-10.

-BOYELDIEU J. (1991)

Produire des grains oléagineux et protéagineux. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 232pp.

-BROOKER B.E. (1996)

The role of fat in the stabilisation of gas cells in bread dough. Cereal Science. 24(3) : 187-198.

-BULEON A., COLONNA P., LELOUP V. (1990)

Les amidons et leurs dérivés dans les industries des céréales. IAA Juin : 515-532.

-BURE J. (1979)

Le pain. Acte du colloque du C.N.E.R.N.A. Edition C.N.R.S. Paris. 243p.

-BURE J., DELMER-CTU F. (1983)

Fermentation panair. APRIA. ISBN. Paris. 139p.

-CALET C. (1992)

Les légumes secs, apport protidique. Cah. Nut. Diet. 2 : 99-108.

-CALVEL R. (1984)

La boulangerie moderne. 10^{ème} édition. Eyrolle. Paris. 436p.

-CAMPBELL G.M., RIELLY C.D., FRYER P.J., SADD P.A. (1998)

Aeration of bread dough during mixing : effect of mixing dough at reduced pressure. Cereal Foods World. 43(3) : 163-167.

-CAYOT N. , OLSSON A. (1997)

Farines et protéines de pois chiche : données récentes sur les applications en alimentation humaine. Cahier scientifique. Vol. 114. IND. ALIM. AGR. : 99-108.

-CHARGELEGUE A., GUINET R., NEYRENEUF O., ONNO B., POITRENAUD B. (1994)

La fermentation. In : la panification française. GUINET R., GODON B. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 238-324.

-CHEFTEL J. C., CHEFTEL H., BESANÇON P. (1979)

Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Tome 2. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 420p.

-CHEFTEL J.C., CUQ J.L., LORIENT D. (1985)

Protéines alimentaires : biochimie, propriétés fonctionnelles, valeur nutritionnelle, modification chimiques. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 309p.

-CHENE. (2001)

La farine. *Journal de l'ADRIANOR*. (26), pp. C.3-C.8.

-CHEVALLIER S., DELLA VALLE G., COLLONA P., BROYART B., TRYSTRAMG. (2002)

Structural and chemical modifications of short dough during baking. *Journal of Cereal Science*. 35 : 1-10.

-CHOUAKI S. (2006)

Deuxième rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques. INRA. 92p.

-CODEX ALIMENTARIUS. (1995)

Céréales, légumes secs, légumineuses, produits dérivés et protéines végétales. Programme mixte *FAO/OMS* sur les normes alimentaires. 2^{ème} édition, *FAO/OMS*, Vol. 7, Rome.

-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.

-COFFIN (2001)

Maladie cœliaque et régime sans gluten. La lettre de l'institut Danone. Objectif Nutrition. 58 : 3-31.

-COLAS A., THARRAULDI J.F (1997)

Granulométrie des particules. In : Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. GODON B., LOISEL W. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 42-49.

-COLAS A. (1998)

Définition de la qualité des farines pour les différentes utilisations. *In* : Les industries de première transformation des céréales. GODON B., WILLM C. Tec et Doc, Lavoisier, Paris. 579-589.

-CORPEN. (1999)

Fertilisation azotée de trois légumineuses : le haricot, la luzerne et le pois protéagineux. CORPEN. Paris. 49p.

-COUARRAZE G., GROSSIORD J.L. (1991)

Initiation à la rhéologie. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 213p.

-COUSSOT P. ANCY C. (1999)

Rhéophysique des pâtes et des suspensions. EDP sciences. France. 265p.

-CUQ J.L., LEYNAUD-ROUAUD C. (1992)

Les graines de légumineuses. In : alimentation et nutrition humaine. DUPIN H., CUQ J. L., MALEWIAK M. I., LEYNAUD-ROUAUD C. ESF. Paris. 941-961.

-CUQ J.L., LORIENT D. (1992)

Influence des traitements technologiques sur la valeur nutritionnelle des protéines alimentaires. Les cahiers de l'ENS. BANA. 8/93-115.

-DACOSTA Y. (1986)

Le gluten de blé et ses applications. APRIA. ISBN2. Paris. 124p.

-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 nationale polytechnique de Toulouse, France, 172 p.

-DELFRATE R. et STEPHANE C. (2005)

Mieux connaître la farine, spécial analyses. *SOTAL*, 12 p.

-DENERY-PAPYNI S., POPINEAU Y., GUEGUEN J. (2001)

Implication des protéines des céréales dans la maladie cœliaque. Cah. Nut. Diet., 36, 1 : 43-51.

-DILLAHUNTY A.L., SIEBENMORGEN T.J., MAUROMOUSTAKOS A. (2001)

Effect of temperature, exposure duration, and moisture content on color and viscosity of rice. Cereal. Chem. 78 (5) :559-563.

-DOBRASZCZYK B.J., MORGENSTERN M.P. (2003)

Rheology and the breadmaking process. Journal of Cereal Science. 38. 229-245.

-DUBOIS M. (1994)

Le contrôle qualité. In : la panification française. GUINET R., GODON B. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 506-522.

-DUBUISSON C., LA VIEILLE S, MARTIN A. (2002)

Allergies alimentaires : Etat des lieux et propositions d'orientations. Afssa. Paris. 104p.

-ELIASSON A.C., GUDMUNDSSON M., SEVENSON G. (1995)

Thermol behaviour of wheat starch in flour- revelation to flour quality. In : Le grain de blé : composition et utilisation. FEILLET P. INRA. Paris. 308p.

-FAO (1982).

Les graines de légumineuses dans l'alimentation humaine. FAO. Alimentation et Nutrition 20. Rome. 152p.

-FAO (1990)

Utilisation des aliments tropicaux : Céréales. FAO. Alimentation et Nutrition. 47/1. Rome. 120p.

-FAO (1990)

Utilisation des aliments tropicaux : légumineuses tropicales. FAO. Alimentation et Nutrition. 47/4. Rome. 76p.

-FAO (1996)

Codex Alimentarius : céréales, légumes secs, légumineuses, produits dérivés et protéines végétales. FAO. Vol 7. 2ème édition. Rome. 164p.

-FAO (2001)

Légumineuses. FAO/SMIAR. Perspectives de l'alimentation. N°4. 15p.

-FAVIER J.C., IRELAND-RIPERT J., TOQUE C., FNEIBERG M. (1995)

Répertoire général des aliments – Table de composition. INRA-CNEVA-CIQUAL. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 897p.

- FEILLET P., ALARY R. (1975)

L'étuvage du riz : influence des conditions de traitement et des facteurs variétaux sur les caractéristiques des produits finis. Ann Techno. Agric. 24, 11-23.

-FEILLET P., GUINET R., MOREL M.H., ROUAU X. (1994)

La pâte : formation et développement. In : la panification française. GUINET R., GODON B. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 226-276.

- FEILLET P. (2000)

Le grain de blé : composition et utilisation. INR. Paris. 303p.

-FESSAS D., SCHIRALDI A. (2001).

Water properties in wheat flour dough. I : Classical thermogravimetry approach. Food Chemistry. 72 : 237-244.

-FOURY C.L. (1994)

Production légumineuse. Tome 3 : Légumineuses potagères, légumes, fruits. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. : 1-73.

-FRANÇOIS J., GOUET P., GODON B., LÉVÉQUE B. (1994)

La cuisson. In : la panification française. GUINET R., GODON B. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 328-369.

- GARIBOLDI F. (1972)

Parboiled rice. In: Rice chemistry and technologie. HOUSTON D.F., 358-380, AACC, ST Paul, Minnesota, USA.

- GARIBOLDI F. (1974)

L'étuvage du riz. Cahier n° 97, Collection FAO, Rome.

- GARIBOLDI F. (1986)

Rice testing methods and equipments. FAO. Rome.

- GODON B. (1991)

Biotransformation des produits céréaliers. INRA. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 221p.

- GODON B. (1996)

Protéines végétales. 2^{ème} édition. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 657p.

-GODON B., LOISEL W. (1997)

Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 813p.

- GODON B., WILLM C. (1998)

Les industries de première transformation des céréales. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 679p.

-GRANDVOINET P., PRATX B. (1994)

Farines et mixes. In : la panification française. GUINET R., GODON B. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 100-130.

-GUIGUEN R., GODON B. (1994)

La panification française. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 525p.

-GUEGUEN J., LEMARIE J. (1996)

Composition, structure et propriétés physicochimiques des protéines de légumineuses et d'oléagineuses. In : Protéines végétales. GODON B. 2^{ème} édition. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 657p.

-GHERAIRIA N. (2011)

Pain sans gluten pour malades coeliaques : aptitude technologique d'une formule riz – féverole. Mémoire de magistère en sciences alimentaires. INATAA. Constantine. Algérie. 86 p.

-GUETTACHE M., TLILANIE R. (2005)

Fabrication de trida et de couscous à base de riz et de légumes secs (pos chiche, pois protéagineux et féverole). Diplôme d'études universitaires appliquées. INTAA. Constantine. Algérie.

-HERVE F., BERNET J., ROBADAY S., FRANÇOIS A., LEVESQUE H., MARIE I. (2005)

Une cause d'hépatite cytolitique à ne pas méconnaître : la maladie cœliaque. La revue de médecine interne. Vol 26. Issue 11 : 907-909.

-ICARD-VERNIERE C., FEILLET P. (1999)

Effects of mixing conditions on pasta development and biochemical changes. Cereal Chem. 76(4) :558-565.

-I.T.G.C. (2000)

Les légumineuses alimentaires en Algérie : état actuel et perspectives de développement. Agroligne.7 :15p.

-J.O.R.A. (Journal Officiel de la République Algérienne) (1991)

Décret exécutif N°91/572 du 31 décembre relatif à la farine de la panification et du pain.

-JULIANO B.O. (1994)

Le riz dans l'alimentation humaine. FAO. Alimentation et Nutrition 26. Rome. 184p.

-KERMOUNI S. M. (2003)

Régime sans gluten. Office des publications universitaires. Alger. Algérie.

- KIGER J.L., KIGER J.G. (1968)

Techniques modernes de la biscuiterie, pâtisserie, boulangerie industrielles et artisanales et des produits de régimes. Vol 1 "matières premières", vol 2 "fabrication", Dunod. Paris. 696p.

LOH J. (1986)

Rheology of rice dough. In : Fundamentals of dough rheology. FARIDI H., FAUBION M. American Association of Cereal Chemists. USA. 105-116.

-LAIGNELET B., ALARY R. (1990)

Traitement du riz. In : Les industries de première transformation des céréales. GODON B., WILLM C. Tec et Doc, Lavoisier, Paris. 653p.

-LAIGNELET B. (1991)

Le riz. In : Les industries de première transformation des céréales. GODON B., WILLM C. Tec et Doc, Lavoisier, Paris. 653p.

-LAIGNELET B. (1997)

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

-LAUNAY B. (1991)

Techniques rhéologiques. In : techniques d'analyses et de contrôle dans les IAA. Tome 2. Principe des techniques d'analyses. 2^{ème} édition. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 183-215.

-LAUNAY B., BARTOLUCCI J.C. (1997)

Comportement rhéologique des pâtes et des produits finis : les pâtes de farine de blé. In : Guide pratique dans les industries des céréales. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 122-174. 813p.

-LAZARD L. (1991)

Développement et innovations dans le traitement des produits alimentaires. IAA. N°11. 972-975.

-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.

-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. Thèses de doctorat. Agro. *Paris Tech*. France .415p.

-LOPEZ-BELLIDO L., FUENTES M. (1990)

Cooking quality of chickpea. In : Options méditerranéennes. Série séminaires. 9 : 118-125.

-MARION D., LEROUX C., AKOKA S. TELLIER C., GALLANT D. (1987)

Protein interactions in wheat gluten : a phosphorous nuclear magnetic resonance spectroscopy and freeze-fracture electron microscopy study. *J. Cereal Sc.* 5 : 101-115.

-MATUCHANSKY C., ROUSSEAU S., MORIN M. C. (2004)

Maladie coeliaque de l'adulte : actualité du régime sans gluten. *Cah. Nut. Diet.* 39,5 : 311-317.

-MAZOYER M. (2002)

Larousse agricole. VUEF. Milan. Italie.

- MOHTADJI-LAMBALLAIS C. (1989)

Les aliments. Édition MELOINE. Paris. 203p.

-NAMOUNE H. (1996)

Panification de blé dur : mise au point d'un test de panification et aspects variétaux, génétiques, histologique et technologique. Thèse de doctorat d'état. I.N.R.A. Laboratoire de technologie des céréales de Montpellier. I.N.A.T.A.A. Université de Constantine Algérie.

- NDZONDZI-BOKOUANGO G., BAU H.M., GIANNANGELI F., DEBRY G. (1989)

Effet de la germination sur la composition chimique et la valeur nutritive des graines de féverole. *Science des aliments.* 9(4) :785-797.

-OMS (1996)

Codex Alimentarius : Céréales, légumes secs, légumineuses, produits dérivés et protéines végétales. OMS. Vol 7. 2^{ème} édition. Rome. 164p.

-PLANCQUAERT PH., WERY J. (1991)

Le pois chiche : culture, utilisation, publications sur les protéagineux. Edition 1991. ITCF. Paris. 12p.

-PLUVINAGE J. (1990)

Chickpea in the Mediterranean production systems : two contrasting examples of possible developments in Algeria and France. *Options méditerranéennes. Série séminaires.* 9 : 133-136.

-POITRENAUD B. (1994)

La levure. In : la panification française. GUINET R., GODON B. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 165-200.

-POMERANZ Y. (1978)

Wheat : chemistry and technology, 2nd ed. AM. ASSOC. Cereal chem, ST Paul, MIN. In : biotransformation des produits céréaliers. INRA. Tec et Doc Lavoisier. Paris. 221p.

-POMERANZ Y. (1983)

Molecular approach to bread making : an update and new perspectives. The baker's Digest. 7-8 : 72-86.

-POPINEAU Y., DENERY-PAPINI S. (1996)

Les protéines de réserve du grain de blé. In : Protéines végétales. GODON B. 2^{ème} édition. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 657p.

-PYLER E.J. (1988)

The dough mixing process. Baking Science and Technology. Vol 2. 589-624.

- RAUX J. (1990)

Les industries de transformation du riz et de sous produits au Japon. IAA. Avril. N° 4, pp : 259-262.

-ROELS S.P., CLEEMPUT G., VANDEWALLE X., NYS M., DELCOUR A. (1993)

Bread volum potential of variable- quality flours with constant protein level as determined by factors governing time and baking absorption levels. Cereals Chem. 70(3) :318-323.

-ROUDOT A.C. (2002)

Rhéologie et analyse de texture des aliments. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 186p.

-ROUDAUT H et LEFRANCQ E. (2005)

Alimentation théorique. Série Sciences des Aliments, CRDP-*Aquitaine et Doin*, 305 p.

-ROUSSEL P., CHIRON H. (2003)

Les pains français : évolution, qualité, production. MAÉ-ERIT. 293p.

-SADD M.H. (2005)

Elasticity, theory, applications and numerics. Elsevier. Butterworth. Heinemann.U.S.A. 457P.

-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.

-SCHMITZ J. (2007)

Le régime sans gluten chez l'enfant. Journal de pédiatrie et de périculture, 20 : 337-344.

- SCHMITZ J., CELLIER C. (2002)

La maladie cœliaque. X^e symposium international sur la maladie cœliaque. Paris 3-5 juin 2002. A.F.D.I.A.G. 2002. 4P.

-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.

-SOUCI S.W., FACHMANN W., KRAUT H. (1994)

La composition des aliments : tableau des valeurs nutritives. Medpharm Scientific publishers. 5^{ème} édition. Stuttgart. Germany. 1091p.

-SEGUCHI M., ISHIHARA C. YOSHINO Y., NAKATSUKA K., YOSHIHIRA T. (1999)

Breadmaking properties of triticale flour with wheat flour and relationship to amylase activity. *Journal of food science*. 64(4) : 582-586. Using a 2-g mixograph and a texture analyser. *Cereal.Chem.* 77(1):39-43.

-SIVARAMAKRISHNAN H. P., SENGE B., CHATTOPADHYAY P. K. (2004)

Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*. 62. 37-45.

-THIRRAULT J.F., LAUNAY B. (1990)

Compactage sous pression de farine de blé et de formules type « pain-plat », relation avec le comportement en cuisson-extrusion. IAA juin : 533-535.

-WEINMAN S. (2000)

Biochimie : structure et fonction des protéines. ISBN. Dumord. Paris. 243p.

-WANG M., HAMER R.J., VAN VLIET T., GRUPPEN H., MARSEILLE H., WEEGELS P.L. (2003)

Effect of water Unextractable Solids on Gluten Formation and Properties : Mechanistic Considerations. *J. Cereal Sci.* 37 (1), pp. 55-64.

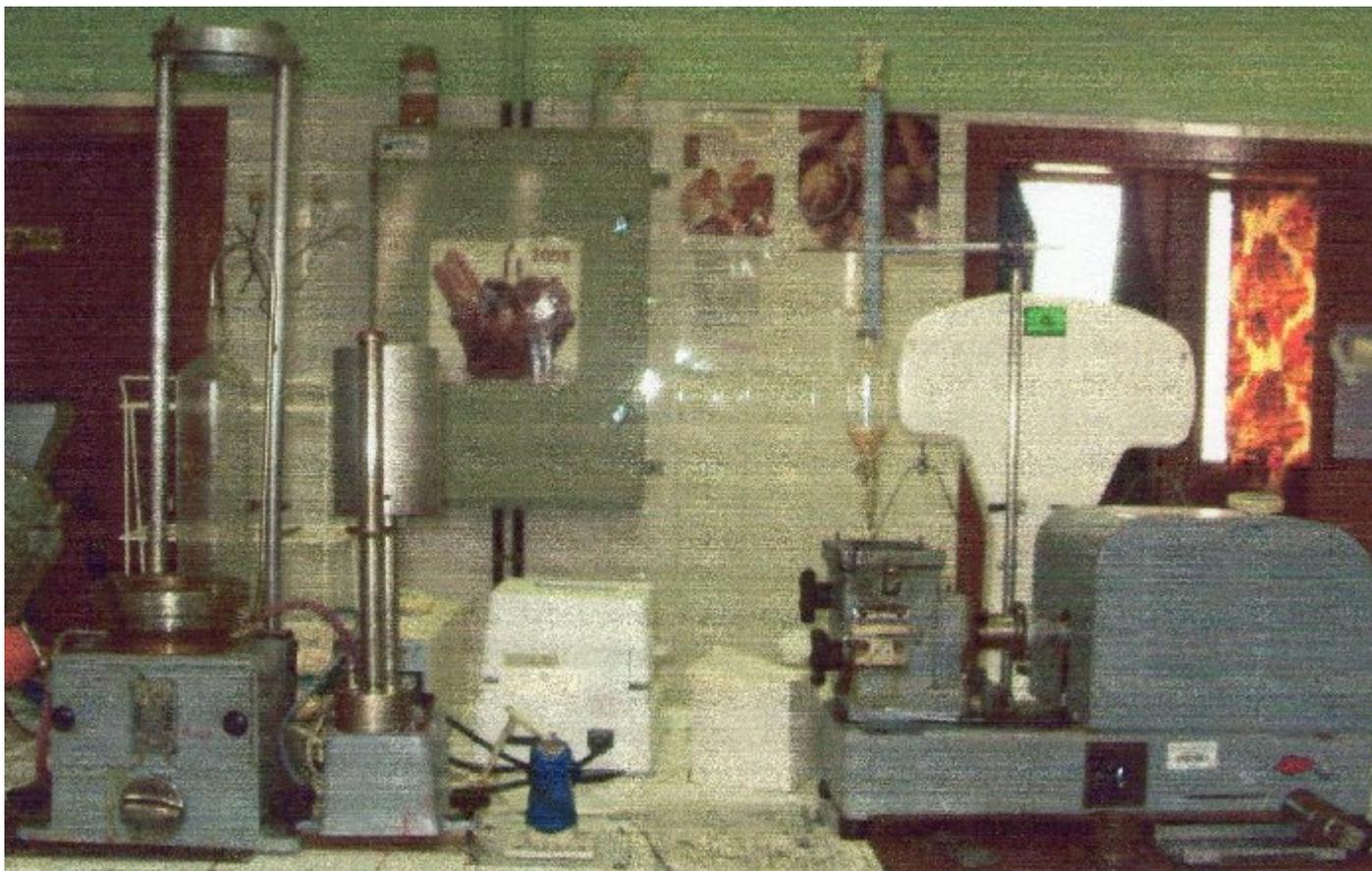
-YON-KAHN J. (2006)

Histoire de la science des protéines. ISBN. EDP sciences. France. 307p.

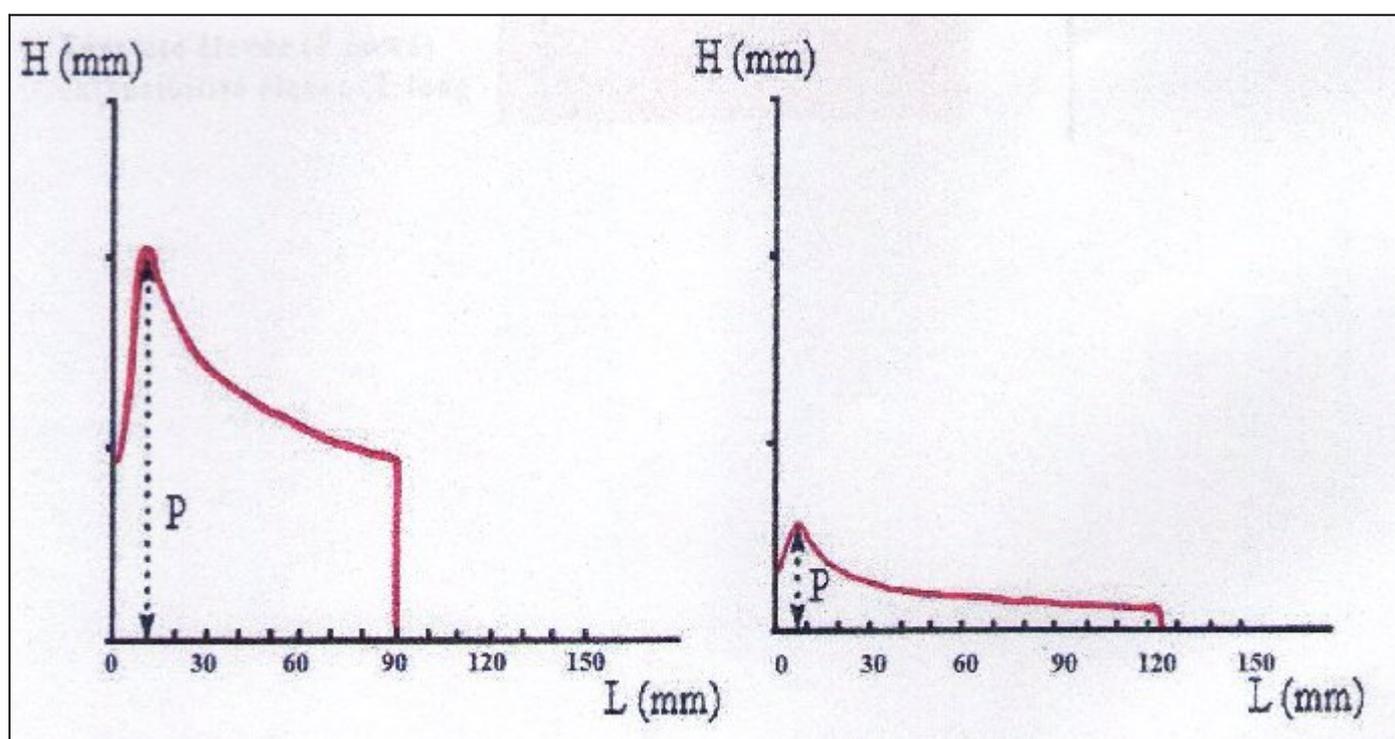
-ZOUNIS S., QUAIL K.J. (1997)

Predicting test bakery requirements from laboratory mixing tests. *Journal of Cereal Science*. 25 : 185-196.

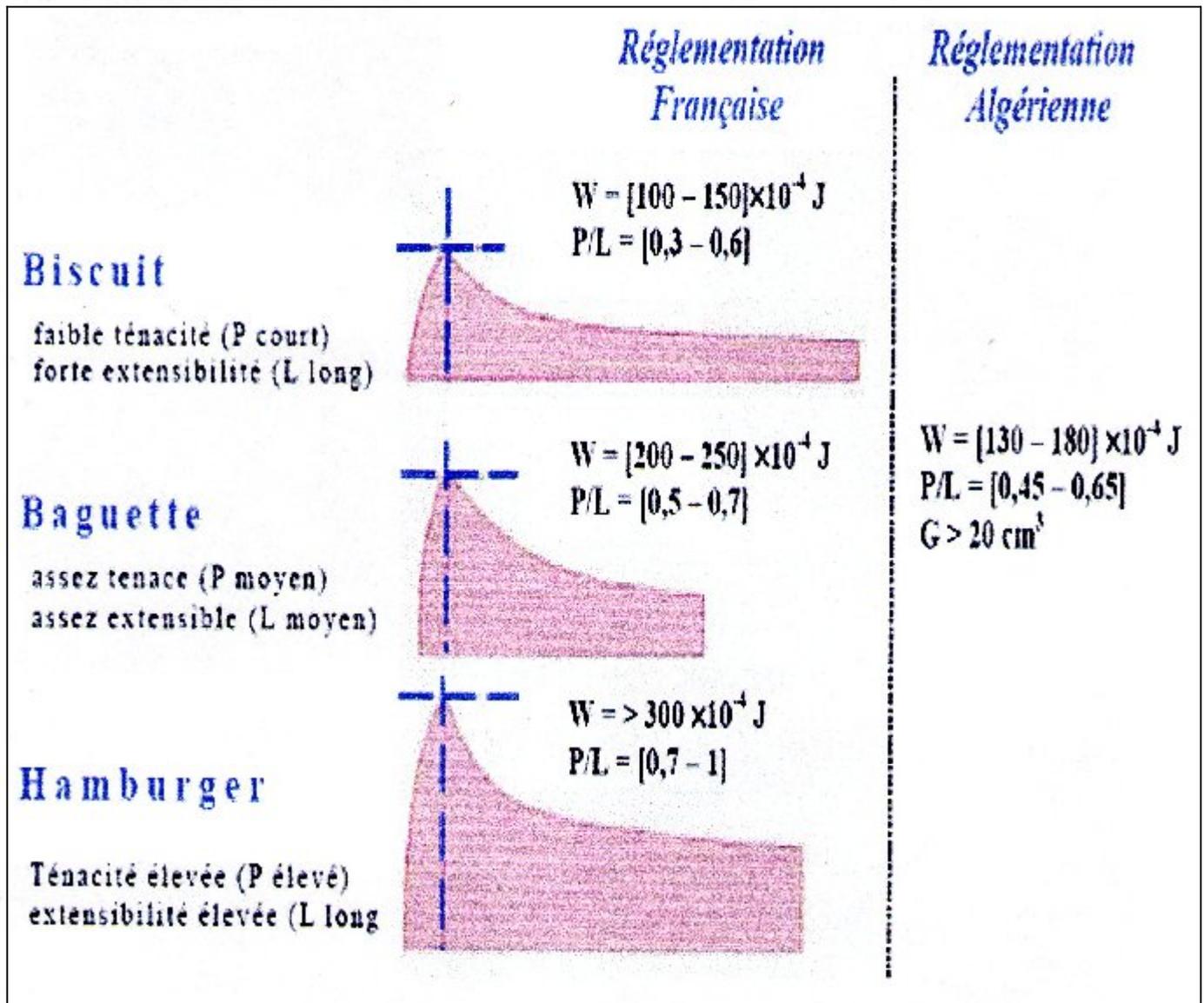
Annexe 1 : Alvéographe Chopin.



Annexe 2 : Alvéogrammes de deux pâtes de blé dur : (a) : pâte forte ; (b) : pâte faible (NAEGA 2005).



Annexe 4 : corrélation 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.).



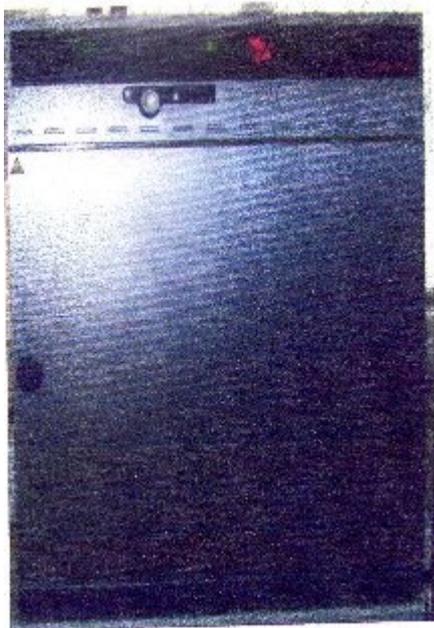
Annexe 5 : Matériel utilisé pour le test de panification.



3.a. Pétrin *Kenwood* KM300
de « L.N.T.A. » I.N.A.T.A.A.



3.b. Moule Tefal proflex (10,5 × 5,3 × 4) cm
de « L.N.T.A. » I.N.A.T.A.A.



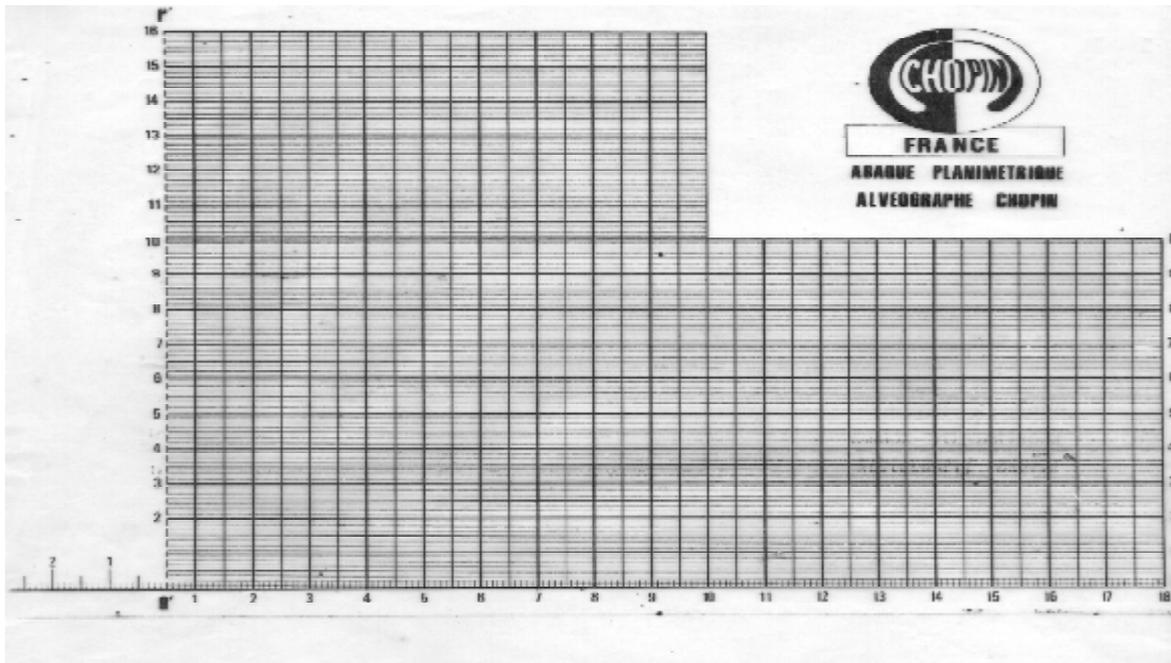
3.c. Etuve MEMMERT
Laboratoire de biochimie de l'I.N.A.T.A.A.



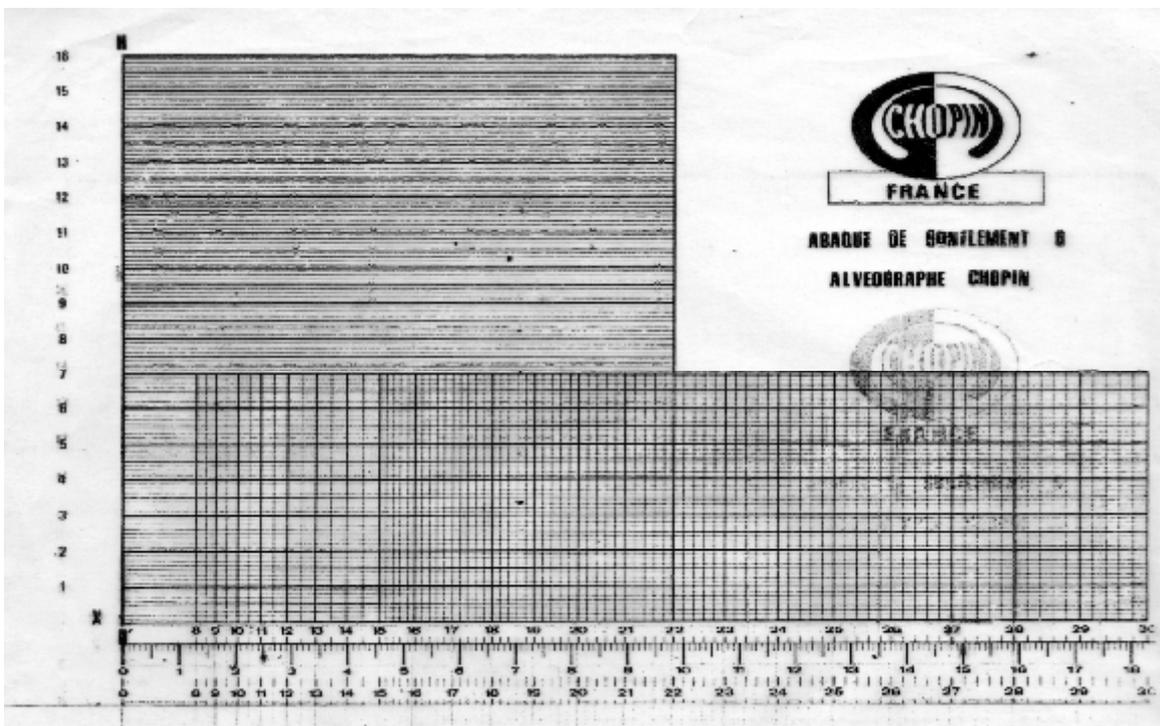
3.d. Four pâtissier (0.60 x 0.90 x 0.18 m³)
Laboratoire de biochimie de l'I.N.A.T.A.A.

Annexe 3 : Abaques utilisés pour la esue des difféentes caractéristiques de la courbe alvéographique.

Annexe 3.a. Abaque planimétrique.



Annexe 3.b. Abaque de gonflement « G ».



ملخص

الهدف من هذا البحث هو محاولة تصنيع خبز خال من الغلوتين و ذلك باختبار القدرة التكنولوجية لخليط من الأرز و البقول الجافة بنسبة 1 / 2 على التوالي. الخلطات المستخدمة هي: أرز- فول (R_1F) ، أرز- حمص (R_1PC)، أرز- بازلاء (R_1PP)، أرز مبخر-فول (R_2F)، أرز مبخر-حمص (R_2PC)، أرز مبخر- بازلاء (R_2PP).

إن تحديد مجالات التمييز لإمكانية تصنيع الخلطات المستعملة كان قائما على اختيار المعايير الأكثر ملائمة لتكنولوجيا تصنيع الخبز. بعدها تم اختيار ثلاث مستويات من كل مجال تمييزه لدراسة قابلية التصنيع عند هذه النقاط، و ذلك عن طريق الاختبار الألفيوغرافي كمرحلة أولى ثم تليه عملية الخبز كمرحلة ثانية.

أشارت نتائج الألفيوغراف و بان إلى ان الخلطة R_1F أعطت عند نسبة التمييز $TH'_{1/4}$ قيمتي (W) و (G) الأقرب إلى شاهد القمح اللين، و تبقى قيمة (P/L) من بين أفضل القيم المسجلة مقارنة بباقي الخلطات. فيما يخص خلطات الأرز المبخر، أعطت خلطة R_2PC عند نسبة التمييز $TH'_{1/4}$ قيمتي (G) و (W) الأقرب إلى الشاهد، و تبقى قيمة (P/L) من بين أفضل القيم المسجلة مقارنة بباقي الخلطات. مع ذلك تبقى كل القيم الألفيوغرافية لجميع الخلطات أقل دلالة من الشاهد. إن قيم خلطات الأرز المبخر الألفيوغرافية كانت أكثر ابتعادا عن الشاهد مقارنة بباقي الخلطات، و بذلك نستنتج أن لعملية تبخير الأرز تأثير سلبي على قابلية التصنيع لهذه الخلطات. من جهة أخرى، كان لتغيير نسب التمييز بالزيادة أثرا سلبيا على القيم الألفيوغرافية لكل الخلطات.

ظهر التحليل الحسي (استعملت الحواس) أنتاج الخبز ان أنواع الخبز R_1 ذات نوعية أقل من الخبز الشاهد (اللون/الرائحة/النية). أظهرت أنواع خبز الأرز المبخر R_2 أحجاما مماثلة ظاهريا لأحجام الخبز R_1 ، في المقابل، كانت نوعية اللب و القشرة للخبز المبخر أقل جودة من نوعية الخبز R_1 . بالتالي، تبخير الأرز كان له الأثر السلبي على نوعية الخصائص الحسية لجميع خلطات الخبز الخالية من الغلوتين.

أعطت الخلطة R_1PC الحجم النوعي للخبز V_{sp} الأقرب إلى الشاهد عند نسبة التمييز $TH'_{1/2}$ بينما كان الحجم النوعي للخبز V_{sm} أقرب للشاهد عند نسبة التمييز $TH'_{3/4}$ أما بالنسبة لنتائج خبز الأرز المبخر، فقد أعطت الخلطة R_2F عند نسبة التمييز $TH'_{3/4}$ الحجم النوعي للخبز الأقرب إلى الشاهد، في المقابل و لنفس خصائص الخلطة كان الحجم النوعي للخبز في أدنى المستويات. تبقى دلالة الأحجام النوعية لكل أنواع الخبز أقل من تلك الخاصة بالشاهد.

أثبتت مجموعة النتائج المحصل عليها لهذه الدراسة إمكانية تصنيع الخبز الخالي من الغلوتين انطلاقا من الخلطات المدروسة إلا انها تكون ذات نوعية تكنولوجية و ذوقية أقل جودة من خبز القمح اللين. يعد هذا العمل تمهيدا لإمكانية تعويض طحين القمح اللين بطحين خلطات خالية من الغلوتين في تقانة تصنيع الخبز.

الكلمات الدالة:

مرض عدم تحمل الغلوتين- أرز- تبخير- فول- حمص- بازلاء- ألفيوغراف و بان - تصنيع الخبز.

Summary

The objective of this research is to contribute to the manufacture of gluten-free bread, by testing the technological aptitude of a formulation containing rice and of dry legumes with a mass report/ratio of 2/1 respectively. Three formulas were tested: rice-field bean (R₁F), rice-chickpea (R₁PC), rice-pea (R₁PP). The introduction of the effect of the stoving of rice duplicated the formulas while giving: stoving rice-field bean (R₂F), stoving rice-chickpea (R₂PC), stoving rice-pea (R₂PP).

The determination of the intervals of hydration and feasibility of the formulas implemented was carried out on the choice of the best criteria adapted to the technology of panification. Then three points of each interval were selected to test their value baker by the Chopin alveograph and by the test of panification.

The results alveographic indicated that among the studied formulas, the R₁F at the rate of hydration TH'_{1/4}=80% presented it "G" and it "W" closest with the witness flour. "P/L" remains among the best recorded. Concerning the formulas containing stoving rice, the R₂PC at the rate of hydration TH'_{1/4}=143% showed it "G" and it "W" closest with the witness. "P/L" remains among the best recorded. However, the indices alveographic of the formulas (R₁) and (R₂) significantly remain lower than the witness. The indices alveographic of the formulas (R₂) were further away from the witness than those of the formulas (R₁). Consequently, the stoving of rice lowered the value baker of formulas tested. The change of the rates of hydration decreased the indices alveographic of the formulas (R₁ and R₂) with each time the rate of hydration increases.

The sensory analysis of the results of panification showed that the breads (R₁) were judged of quality lower than that of the pilot bread (color, texture and odor). The breads (R₂) had volumes visually identical to the breads (R₁). On the other hand, the crusts and the crumbs were of quality lower than that of the breads (R₁). In conclusion, the stoving of rice decreased the sensory characteristics of the gluten-free breads.

Bread R₁PC had the volume specific of bread (V_{sp}) nearest to that to the pilot bread to TH'_{1/2}=93.2% and the volume specific of crumb (V_{sm}) nearest to that to the pilot crumb with TH'_{3/4}=106.1. Concerning the breads containing stoving rice, bread R₂F with TH'_{3/4}=160.6 had the volume specific of bread nearest to that to the pilot bread. On the other hand, it had to the same rate of hydration the specific volume of crumb low. Nevertheless, specific volumes of all the breads (R₁ and R₂) significantly remain lower than those of the pilot bread.

The whole of the results which with reached the present study has proved the possibility of manufacturing gluten-free breads starting from the formulas tested but with a technological and organoleptic quality lower than that of the pilot bread. This work constitutes an approach of the possibility of substituting the tender wheat flour by gluten-free formulas in the technology of panification.

Key-words: celiac disease, rice, stoving, bean, chick-pea, pea, gluten-free bread, alveograph.

Résumé

L'objectif de cette recherche est de contribuer à la fabrication de pain sans gluten, en testant l'aptitude technologique d'une formulation à base de riz et de légumes secs de rapport massique 2/1 respectivement. Trois formules ont été testées : riz-féverole (R_1F), riz-pois chiche (R_1PC), riz-pois protéagineux (R_1PP). L'introduction de l'effet de l'étuvage du riz a dédoublé les formules en donnant : riz étuvé-féverole (R_2F), riz étuvé-pois chiche (R_2PC), riz étuvé-pois protéagineux (R_2PP).

La détermination des intervalles d'hydratation et de faisabilité des formules mises en œuvres a été réalisée sur le choix des critères les mieux adaptés à la technologie de panification. Ensuite trois points de chaque intervalle ont été choisis pour tester leur valeur boulangère à l'aide de l'alvéographe Chopin, ainsi que par le test de panification.

Les résultats alvéographiques ont indiqué que parmi les formules étudiées, la R_1F au taux d'hydratation $TH'_{1/4}=80\%$ a présenté un « G » et un « W » les plus proches au témoin de blé tendre. Le rapport « P/L » reste parmi les meilleurs enregistrés. Concernant les formules à base de riz étuvé, la R_2PC au taux d'hydratation $TH'_{1/4}=143\%$ a montré un « G » et un « W » les plus proches au témoin. Le rapport « P/L » reste parmi les meilleurs enregistrés. Toutefois, les indices alvéographiques des formules (R_1) et (R_2) restent significativement inférieures au témoin. Les valeurs des indices alvéographiques des formules (R_2) étaient plus éloignées du témoin de blé tendre que celles des formules (R_1). En conséquence, l'étuvage du riz a baissé la valeur boulangère de formules testées. Le changement des taux d'hydratation a diminué les indices alvéographiques des formules (R_1 et R_2) à chaque fois que le taux d'hydratation augmente.

L'analyse sensorielle des résultats de panification a montré que les pains (R_1) étaient jugés de qualité inférieure à celle du pain témoin (couleur, texture et odeur). Les pains (R_2) ont présenté des volumes visuellement identiques aux pains (R_1). Par contre, les croûtes et les mies étaient de qualité inférieure à celle des pains (R_1). En conclusion, l'étuvage du riz a diminué les caractéristiques sensorielles des pains sans gluten.

Le pain R_1PC a présenté le volume spécifique de pain (V_{sp}) le plus proche à celui du pain témoin au $TH'_{1/2}=93.2\%$ et le volume spécifique de mie (V_{sm}) le plus proche à celui de la mie témoin au $TH'_{3/4}=106.1$. Concernant les pains à base de riz étuvé, le pain R_2F au $TH'_{3/4}=160.6$ a présenté le volume spécifique de pain le plus proche à celui du pain témoin. Par contre, il a présenté au même taux d'hydratation le volume spécifique de mie le plus bas. Néanmoins, les volumes spécifiques de tous les pains (R_1 , R_2) restent significativement inférieurs à ceux du pain témoin.

L'ensemble des résultats auxquels à abouti la présente étude a prouvé la possibilité de fabriquer des pains sans gluten à partir des formules testées mais avec une qualité technologique et organoleptique inférieure à celle du pain de blé tendre. Ce travail constitue une approche de la possibilité de substituer la farine de blé tendre par des formules sans gluten dans la technologie de panification.

Mots-clés : maladie cœliaque, riz, étuvage, féverole, pois chiche, pois protéagineux, pain sans gluten, alvéographe.