

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

UNIVERSITE CONSTANTINE -1-

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

N° d'ordre :

N° de série :

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme
de magister en sciences alimentaires

Option : Technologie Alimentaire

Thème

**Panification à base de blé tendre ou de riz-
fèverole (sans gluten) : essai de prédiction de
la qualité technologique par dissociation
chimique des interactions impliquées**

Présenté par:

FETOUHI Aouatef

Soutenu le : 25/ 06/ 2014.

Devant le Jury composé de :

Président :	ZIDOUNE M. N.	Professeur	I.N.A.T.A.A. UC -1-
Rapporteur :	BENATALLAH Le.	M.C/A.	I.N.A.T.A.A. UC -1-
Examineurs :	AGLI A.	Professeur	I.N.A.T.A.A. UC -1-
	KHELIFI D.	Professeur	S.N.V. U.C.-1-

Année universitaire 2013-2014.

SOMMAIRE

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

INTRODUCTION01

Revue bibliographique

CHAPITRE I. CARACTERISTIQUES BIOCHIMIQUES ET PROPRIETES TECHNO-FONCTIONNELLES DES CONSTITUANTS DES FARINES

I. Farine du blé tendre.....	03
1. Les glucides.....	03
1.1. L'amidon.....	03
1.2. Les pentosanes.....	05
2. Les lipides.....	07
3. Les protéines.....	08
II. Farines des ingrédients exempts en gluten.....	12
1. Le riz.....	12
2. La fèveole.....	12

CHAPITRE II. INTERACTIONS CHIMIQUES AU SEIN DE LA PATE

I. Nature chimique des interactions moléculaires impliquées dans le mécanisme de la formation de la pâte.....	13
1. Liaisons covalentes de type S-S.....	13
2. Interactions électrostatiques.....	13
2.1. Interactions ioniques.....	14
2.2. Interactions hydrogènes.....	14
3. Interactions hydrophobes.....	15
II. Origine des interactions moléculaires dans les protéines de la farine du blé tendre	15
III. Evolution des caractéristiques rhéologiques en fonction des interactions moléculaires au cours de la formation de la pâte.....	18
IV. Méthodes d'étude des interactions moléculaires.....	20

CHAPITRE III. PANIFICATION

I. Processus de la panification.....	22
1. Pétrissage.....	22
2. Fermentation.....	23

3. Cuisson.....	23
II. Caractérisation des produits de la panification.....	23
1. Les propriétés rhéologiques de la pâte.....	23
2. Relation entre le processus de panification et la rhéologie.....	24
3. Méthodes de mesure des propriétés rhéologiques de la pâte.....	25
II.4. Qualité des produits de panification.....	27

Partie expérimentale

CHAPITRE I. MATERIEL ET METHODES

I. Matières premières.....	28
1. Farine de blé tendre.....	28
2. Ingrédients exempts de gluten.....	28
2.3. Mouture des grains et préparation des farines.....	29
3. Autres ingrédients.....	29
II. Méthodes.....	29
1. Caractérisation physicochimique des matières premières.....	29
1.1. Teneur en eau et en extrait sec.....	30
1.2. Teneur en cendres.....	30
1.3. Teneur en protéines totales.....	31
1.4. Teneur des lipides libres.....	32
1.5. Distribution granulométrique des farines.....	33
2. Mise au point d'une méthode d'approche des interactions moléculaires dans la pâte boulangère.....	34
2.1. Choix des agents dissociants.....	34
2.2. Mise au point d'un mode opératoire pour l'estimation des différents types de dissociations la pâte boulangère.....	37
2.3. Application de la méthode de dissociation pour la classification des différentes qualités de pâtes boulangères.....	42
3. Caractérisation des pâtes par des méthodes conventionnelles.....	44
3.1. Caractérisation rhéologique de la pâte par l'alvéographe Chopin.....	44
3.2. Caractérisation des pâtes par test de panification.....	48
3.2.1. Mesure du volume spécifique.....	49
3.2.2. Caractérisation de la structure alvéolaire des pains par analyse morphologique	50

mathématique	
3.3. Caractérisation des pâtes par la détermination du gluten sec et humide.....	54
III. Analyse statistique	55

CHAPITRE II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Caractéristiques physico-chimiques des matières premières.....	56
1.1. Composition biochimique.....	56
1.1.1. Teneur en eau.....	56
1.1.2. Teneur en protéines totaux.....	57
1.1.3. Teneur en lipides libres.....	58
1.1.4. Teneur en cendres.....	58
1.2. Distribution granulométrique des farines	59
2. Caractéristiques rhéologiques et technologiques des pâtes.....	60
2.1. Propriétés rhéologiques des pâtes par l'alvéographe Chopin.....	60
2.2. Teneur en gluten sec et humide.....	63
2.3. Test de panification.....	63
2.3.1. Volume spécifique	64
2.3.2. Propriétés texturales des mies par Analyse d'Image.....	65
3. Classification des pâtes sur la base de leurs propriétés rhéologiques et technologiques	66
4. Mise au point d'une méthode pour la classification de pâtes boulangères sur la base des interactions impliquées entre leurs constituants.....	67
4.1. Choix et délimitation des domaines de faisabilité des agents dissociants.....	67
4.2. Estimation des taux de dissociation en fonction des concentrations en agents dissociants.....	68
4.3. Vérification de la répétabilité du mode opératoire établi	79
4.4. Validation de la méthode par la classification des pâtes boulangères	79
5. Corrélation entre les propriétés technologique et texturales et les taux de dissociation des différents agents dissociants.....	85
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	88
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	90
ANNEXES	

Liste des tableaux

Tableau 01. Nature des liaisons entre les protéines de la pâte	17
Tableau 02. Agents dissociants et types d'interactions visées	37
Tableau 03. Concentration à tester des différents agents dissociants	40
Tableau 04. Composition biochimique des farines pour 100g de la matière sèche	56
Tableau 05. Distribution granulométrique des farines par gramme pour 100g de la farine.	59
Tableau 06. Caractérisation rhéologique des pâtes par l'Alvéographe Chopin	61
Tableau 07. Teneurs en gluten humide et sec en gramme pour 100g de la farine	63
Tableau 08. Tableau récapitulatif des domaines de faisabilité des agents dissociants choisis	68
Tableau 09. Tableau récapitulatif des domaines de faisabilité à valider pour chaque agent dissociant.....	77
Tableau 10. Tableau récapitulatif des résultats de corrélation des propriétés technologiques et texturales avec les taux de dissociations des différents agents dissociants.....	86

Liste des figures

Figure 01. Représentation schématique des différents niveaux structuraux du grain de l'amidon	04
Figure 02. Les éléments structuraux des arabinoxylanes.....	06
Figure 03. Schémas récapitulatif de la composition lipidique de la farine de blé tendre.....	08
Figure 04. Schémas explicatif du phénomène des interactions ioniques	14
Figure 05. Interactions entre molécules d'eau par le biais de liens hydrogènes	15
Figure 06. Schéma représentatif des groupements SH dans les différentes classes des sous unité gluténine (d'après JOYE et <i>al.</i> , 2009).....	16
Figure 07. Schéma représentatif des ponts S-S dans les différentes classes des sous unité gliadine (d'après JOYE et <i>al.</i> , 2009).....	16
Figure 08. Image MCBL montre l'effet des pont S-S dans le maintien de l'homogénéité du réseau de gluten au sein de la pâte	19
Figure 09. Schéma représentatif du mécanisme de la réduction des ponts disulfures par le β -mercapto-éthanol (AA : acide aminée).....	21
Figure 10. Interprétation des résultats de l'Alvéographe Chopin selon les réglementations Française (GUINET et GODON 1994) et Algérienne	26
Figure 11. Alvéogrammes de deux pâtes à base de blé dur : (a) : pâte forte, (b) : pâte faible	27
Figure 12. Image représentative de l'effet du mélangeur sur les disques de pâtons	39
Figure 13. Diagramme récapitulatif des étapes du mode opératoire de la méthode d'approche des interactions moléculaire au sein de la pâte boulangère.....	43
Figure 14. Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre faite sur l'Alvéographe Chopin	47

Figure 15. Principe de codage des intensités des niveaux de gris d'une image monochrome sous la forme d'un tableau chiffré.....	51
Figure 16. Courbe de texture granulométrique en niveaux de gris (LASSOUED, 2005).....	55
Figure 17. Volumes spécifique des pains (FBT1 : farine blé tendre type 1, FBT2 : farine blé tendre type 2, FSG : formule riz-fève).....	64
Figure 18. Courbes granulométriques en niveaux de gris des farines : blé tendre type 1 (FBT1), farine blé tendre type 2(FBT2), formule sans gluten (FSG)	65
Figure19. Image représentative de l'effet dissociant de SDS. a : disque de pâton laminé à l'état natif, b : disque de pâton après 30 min de contact avec une solution de 3% en SDS.	69
Figure 20. Evolution du taux de dissociation de la pâte en fonction de la concentration en SDS	70
Figure 21. Image représentative de l'effet dissociant du β mercapto-éthanol	71
Figure 22. Evolution du taux de dissociation de la pâte en fonction de la concentration de la β mercapto-éthanol.....	72
Figure 23. Image représentative de l'effet dissociant de l'acide acétique	74
Figure 24. Evolution du taux de la dissociation en fonction des concentrations de l'acide acétique	75
Figure25. Image représentative de l'effet dissociant du β mercapto-éthanol.	76
Figure 26. Evolution du taux de dissociation en fonction de la concentration de l'urée	77
Figure 27. Classification des pâtes en fonction de l'effet dissociant du SDS.	80
Figure 28. Classification des pâtes en fonction de la concentration de la β -mercapto-éthanol.	81
Figure 29: classification des farines en fonction de la concentration de l'acide acétique ...	83
Figure 30. Classification des pâtes en fonction de la concentration de l'urée.	84

Liste des abréviations

A : Teneur en azote total	PBT1 : Pâte à base de blé tendre 1
AFNOR : Association Française de Normalisation	PBT2 : Pâte à base de blé tendre 2
ANOVA : Analyse de la variance	PSG : Pâte sans gluten
AXI : Arabinoxylanes insolubles	r : Coefficient de corrélation
AXS : Arabinoxylanes solubles	SDS : Sodium dodécylsulfate
C : Taux des cendres	TD : Taux de dissociation
(Ce)_{cal} : critère de Cochran calculé	V_{sp} : Volume spécifique
C_t : valeur de Cochran tabulé.	W : Travail de déformation
DG : Distribution granulométrique	δ : Ecart type
DTT : Dithiolthreitol	
ES : Extrait sec	
FBT1 : Farine du blé tendre type 1	
FBT2 : Farine du blé tendre type 2	
FSG : Formule sans gluten	
G : Indice de gonflement	
GH : Gluten humide	
GS : Gluten sec	
H : Taux d'humidité	
Ie : Indice d'élasticité	
J.O.R.A : Journal officiel de la république algérienne	
L : Abscisse moyenne à la rupture	
Li : Teneur en lipides libres	
SDS : Sodium dodécylsulfate	
P : Surpression maximal	

Remerciement

Avant tout je tiens à remercier celui qui nous a créés, protégé, aidé et celui qui m'a donné la patience, la volonté et le courage pour pouvoir accomplir entre autre ma formation de magister dans les meilleures conditions en disant " الحمد "

C'est avec un grand honneur et un grand plaisir que je remercie mon enseignant, Monsieur **ZIDOUNE Mohammed Nasreddine**, 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.), pour son esprit scientifique et ses précieux conseils et pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury et d'évaluer ce travail.

J'exprime mes vifs remerciements à Madame **BENATALLAH Leïla** Maitre assistance à l'I.N.A.T.A.A. qui a accepté de m'encadrer. Je lui témoigne ici, de ma profonde gratitude et reconnaissance pour la patiente assistance, les savants conseils, orientations et suivis, qu'elle m'a prodigué et les belles sourires et l'esprit brillant qui me soulager. Soyez assuré de tout mon respect et de ma profonde gratitude.

Je tiens également à remercier :
Monsieur **KHELIFI D.** et monsieur **AGLI A.** pour avoir accepté d'examiner et d'enrichir ce travail par leur bagage scientifique. Mes remerciements les plus vifs.

Je remercie particulièrement monsieur **BOUAASLA A.** et madame **BOUCHHAM N.** pour leurs précieux conseils et leur grand encouragement.

Le soutien et l'encouragement de : Saâida, Hanan, Fatiha, Riam, Nassima, Hayat, Imène, Kelthoum et Madina ont été très importants pour la réalisation de ce mémoire. Qu'elles trouvent ici l'expression de notre profonde affection.

Mes remerciements à tous ceux et celles qui ont contribués de près et de loin à la réalisation de ce travail et à tous les amis et les collègues ; Hocine, Rima, Souâad, Hayat et Alaâ pour leurs encouragements et leur amitié.

Enfin, je remercie du fond de mon cœur, ma famille qui m'a soutenu, encouragé et motivé tout au long de mes études.

DEDICACE

A la bougie qu'éclaircie mes monuments sombres, celle qui sacrifie toute sa vie pour me voir à ce niveau, c'est grâce ses encouragements que j'ai atteint la réussite.

Ma très chère mère

Au mon professeur de vie, la personne qui ma donné les nobles principes pour savoir-vivre. Pour tous les efforts consentis afin de nous armer du savoir, je dédis ce travail à

Mon très cher père

A ma sœur Ibtissem et mes frères Trek et Abderrezak.

A toutes mes amies Hadjira, Soumia, Fatiha, et Micha.

A tous mes oncles Abd elfettah, Abd errahman, Abd elbaki et athman

A la joie de la famille Amin, yaâkoub, Ihab et Ibrahim.

A toutes les personnes qui me poussent pour continuer cette formation Khadidja et Bilal.

A tous mes professeurs dès mes premières études.

Aouatef

INTRODUCTION

La pâte pétrie à base du blé tendre, destinée à la panification, se développe durant le pétrissage et acquière ses caractéristiques rhéologiques et technologiques grâce aux propriétés techno-fonctionnelles de ses constituants. D'après FEILLET (2000) et AÏT KADDOUR *et al.*, (2008), Le développement de ces pâtes nécessite la mise en place de liens covalents et non covalents. Les liens covalents entre les protéines aboutissent à la formation du réseau glutineux. Alors que les liens non covalents favorisent le renforcement de ce réseau et l'assemblage des autres constituants entre eux d'une part et avec le squelette protéique d'autre part. Les liens covalents sont représentés par les liaisons disulfures (ZHOU *et al.*, 2014), et les liens non covalents regroupent les interactions hydrophobes, hydrogènes et ioniques (PERESSINI *et al.*, 2008).

L'appréciation de l'aptitude d'une pâte à la panification, à la fabrication des biscuits, ou à la transformation par une autre industrie céréalière, nécessite l'utilisation des méthodes empiriques permettant l'étude du comportement rhéologique et technologique de celle-ci. En effet, d'après MONDAL et DATTA (2008) et KTENIOUDAKI *et al.*, (2010), les propriétés rhéologiques sont des paramètres importants pour la description du comportement des constituants de la pâte au cours du processus de sa préparation ainsi que la prédiction de la qualité du produit fini. Pour cette raison, plusieurs techniques expérimentales ont été développées, celles-ci se basent essentiellement sur la résistance de la pâte à l'extension et son extensibilité qui sont considérés comme des paramètres importants pour la rétention gazeuses (JIRSA *et al.*, 2008).

En plus des propriétés rhéologiques des pâtes, la prédiction de la qualité boulangère de celles-ci nécessite également l'étude de leur comportement technologique. Pour cela une multitude de tests sont mis en place à savoir teneur et indice du gluten, temps de chute d'Hagberg, et l'indice de sédimentation de Zéleny (FEILLET, 2000).

OSBORNE *et al.*, (2007) et LI VIGNI *et al.*, (2013) ont montré que la qualité du produit fini est étroitement liée avec les propriétés rhéologiques et technologiques de la pâte ainsi que l'efficacité des processus de sa préparation. Dans ce contexte, le test de la cuisson reste le plus appliqué pour l'appréciation de la qualité du produit fini à travers de la mesure des volumes spécifiques des pains et leurs caractéristiques texturales.

Toute fois, il est important de signaler que toutes ces techniques nécessitent d'une part un matériel sophistiqué et un personnel qualifié, et d'autre part elles sont beaucoup plus destinées aux farines de blé tendre qu' à celles à base des ingrédients sans gluten ou des semoules du blé dur.

Par ailleurs, d'autres méthodes d'appréciation de la qualité des produits alimentaires se basant sur la dissociation chimique des interactions moléculaires ont été mise en place. Ce type de techniques est dernièrement appliqué seulement pour la classification des gels laitiers selon leurs qualités (LEFEBVRE-CASES *et al.*, 1988, BENYAHYA-KRID *et al.*, 2010, ZIKIOU, 2013). C'est dans ce contexte que l'équipe de Transformation et Elaboration des Produits Alimentaires (T.E.P.A) s'est lancée dans la mise au point d'une méthode rapide simple et pratique de classification des pâtes panifiables en se basant sur la dissociation chimique des interactions moléculaires. Pour cela, les objectifs suivants ont été fixés :

1. Mise au point d'un mode opératoire pour l'estimation de la dissociation des différents types d'interactions au sein des pâtes boulangères et ce à travers :
 - Le choix des agents dissociants spécifiques pour chaque type d'interaction ;
 - L'optimisation de la surface et le temps de contact de la pâte avec l'agent dissociant ;
 - Délimitation des domaines de faisabilité pour chaque agent dissociant ;
2. Application de la méthode de dissociation chimique pour la classification de trois pâtes panifiables de différentes qualités, deux à base du blé tendre et une sans gluten ;
3. Classification de ces pâtes par des méthodes conventionnelles (alvéographe Chopin, test de panification) ;
4. Validation de la méthode mise au point par la comparaison de ses résultats à ceux des méthodes conventionnelles.

CHAPITRE I. CARACTERISTIQUES BIOCHIMIQUES ET PROPRIETES TECHNO-FONCTIONNELLES DES CONSTITUANTS DES FARINES

I. Farine de blé tendre

La farine est le produit résultant des différentes étapes de la mouture du grain de blé tendre, et plus particulièrement du broyage de l'albumen amylicé. Ce dernier contient plusieurs milliers des graines d'amidon (dont deux ou trois grosses granules) emprisonnés dans une structure riche en matière azotée appelée « ciment azoté », ces deux constituants majeurs représentent plus de 90% de la matière sèche de la farine. Les autres constituants sont adsorbés aux colloïdes, liés à des complexes (lipides, gluténines) ou tout simplement dispersés indépendamment (LAHLOU, 1999).

La farine du blé tendre est l'ingrédient de base dans la panification, elle est principalement constituée de l'amidon (70 - 75)%, l'eau (14%), de protéines (10 - 12) %, des polysaccharides qui ne font pas partie de l'amidon (2 - 3) %, en particulier les arabinoxylanes, et les lipides (2%) qui représentent le principal constituant mineur affectant la production et la qualité du pain (GOESAERT et *al.*, 2005).

1. Les glucides

1.1. L'amidon

C'est le constituant le plus abondant de la farine (80% de la matière sèche). Il s'agit d'un polysaccharide complexe constitué d'une fraction glucidique majeur dont l'unité constitutive est le glucose (98 à 99)%, et une fraction mineur non glucidique (1 à 2) % constituée essentiellement des protéines (0,2 à 0,3), % des enzymes liées à la surface des granules, des lipides (0,5 à 1,1)% composés principalement des phospholipides et des acides gras libres, et de la matière minérale (0,15 à 0,3) % (FEUILLET, 2000). Selon BAUER et *al.*, (2010), la fraction non glucidique a une influence directe sur les propriétés de l'amidon. Les granules de l'amidon du blé sont des entités semi-cristallines formées de deux molécules l'amylose (26 à 28)% et l'amylopectine (72 à 74)% (FEUILLET, 2000). Leur structure ainsi que leurs propriétés physicochimiques a fait l'objet des plusieurs travaux (BULEON et *al.*, 1998 ; ELIASSON et GUDMUNDSSON, 1996; HIZUKURI, 1996; PARKER et RING, 2001).

1.1.1. l'amylose

C'est le constituant le plus simple, le moins abondant, et sa molécule est la plus petite (150 à 600) kDa. Il s'agit d'une molécule linéaire composée des unités de D-glucopyranosyl liées par des liaisons de type α (1,4) avec un degré de polymérisation se situe entre 500 et 6000 résidus de glucose. Il est actuellement reconnu que les molécules d'amylose sont faiblement ramifiées par des liaisons α (1,6) (figure 1). (HIZUKURI et *al.*, 1981; SHIBANUMA et *al.*, 1994).

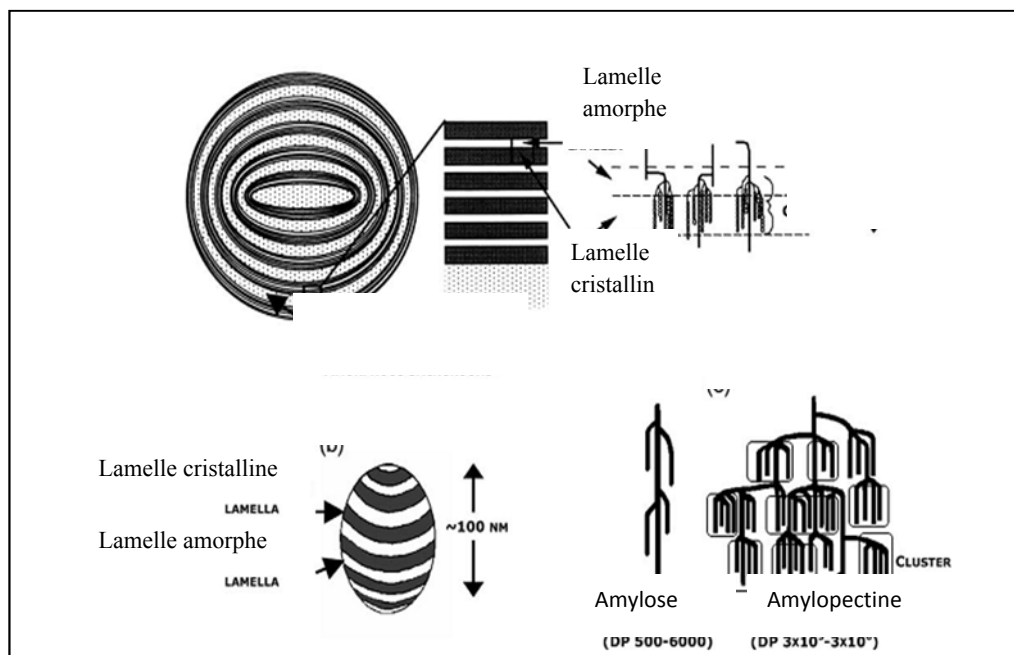


Figure 01 : Schéma des différents niveaux structurels du grain de l'amidon (DONALD et *al.*, 1997).

1.1.2. l'amylopectine

Contrairement à l'amylose, l'amylopectine est très largement reconnu comme un polysaccharide hautement ramifié avec un degré de polymérisation de l'ordre de 3×10^5 à 3×10^6 unités de glucose. Il se compose par des chaînes dont l'unité de base de construction est le résidu D- glucopyranosyl liées par des liaisons de type α (1,4), la ramification des chaînes se fait par l'intermédiaire des liaisons de type α (1,6) (ZOBEL, 1988). Il est important de noter que les chaînes latérales ont la même composition que la chaîne principale (figure 1) (FEUIELLET, 2000; JEANTET ; 2007 ; ALIAS et *al.*, 2008).

En raison de ses propriétés techno-fonctionnelles, l'amidon joue un rôle primordial en panification. C'est un bon fixateur de l'eau. Il contribue à la dilution des autres constituants de la pâte (on admet que l'amidon absorbe environ 45% de l'eau ajoutée à la farine) (FRENCH, 1984; FEUILLET, 2000). D'autre part, une augmentation de la teneur en amidon implique une réduction de l'extensibilité de la pâte (BLOSKMA 1981).

Dans le même sens, LARSSON et ELIASSON (1997) ont étudié l'influence de la surface de l'amidon sur les propriétés rhéologiques de la pâte, où ils ont fait additionner trois types d'amidon à une farine riche en protéines, amidon modifié, adsorption d'une fraction protéique et de lécithine sur la surface des granules de l'amidon. Les résultats révèlent que la modification des propriétés de la surface de la granule d'amidon induit un changement significatif dans le comportement de la pâte, alors que l'addition de la même quantité de lécithine ou des protéines à la farine ne semble pas affecter les propriétés de la pâte.

Selon les travaux d'ELIASSON et GUDMUNDSSON (1995), l'aptitude à la panification des amidons de blé serait d'autant meilleure que leur température de la gélatinisation est plus élevée. Ce phénomène a été expliqué par le fait 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 que la gélatinisation de l'amidon est tardive (FEUILLET, 2000).

L'amidon contribue également à la levée du pain. Sous l'action des amylases, une certaine quantité d'amidon est hydrolysée en maltose, ce qui favorise d'une part, l'action de la levure et la production du gaz carbonique, et d'autre part l'entraînement d'un ramollissement de la pâte et donc une évolution des propriétés rhéologiques de cette dernière (BLOKSMA et BUSHUK, 1988).

1.2. Les pentosanes

Ce sont des polysaccharides qui représentent plus de 75% de la matière sèche des parois cellulaires de l'endosperme, dont les constituants majeurs (plus de 85%) sont les arabinoxylanes (MARES et STONE, 1973a). En fonction de leur unité structurale les pentosanes regroupent :

1.2.1. Les arabinoxylyanes:

Représentent les polysaccharides les plus abondants dans l'albumen. Ce sont des hétéropolymères de longues chaînes linéaires de xylose associé par des liaisons β (1,4) sur lesquelles sont griffées des molécules d'arabinofuranose au niveau des carbones C3 et/ou C2. Les arabinoxylyanes contiennent également une faible quantité d'acide férulique à raison de 2 mg par g de pentosane (figure 02) (FEUILLET, 2000). Selon leur solubilité dans l'eau, les arabinoxylyanes se divisent en deux groupes ; les arabinoxylyanes solubles (AXS) et les arabinoxylyanes insolubles (AXI).

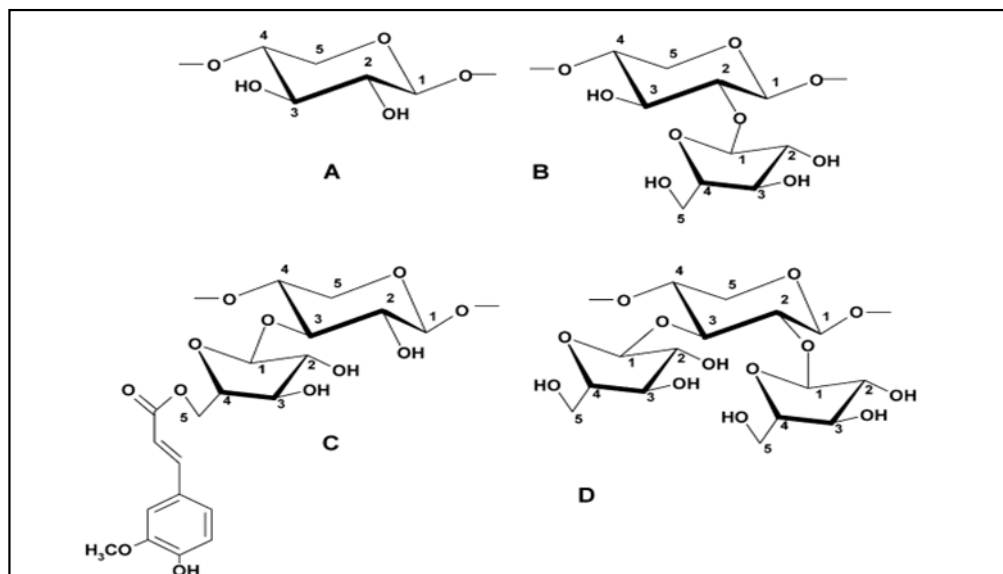


Figure 02 : les éléments structuraux des arabinoxylyanes ; A : résidu de D-xylopyranosyl non lié, B : résidu de D-xylopyranosyl lié en C2 avec le résidu de L-arabinofuranosyl, C : résidu de D-xylopyranosyl lié en C3 avec L-arabinofuranosyl qui est lié à son tour en C5 avec l'acide férulique, D : résidu de D-xylopyranosyl en C2 et C3 résidu de L-arabinofuranosyl

1.2.2. Les arabinogalactanes :

Se sont des molécules solubles dans l'eau, constituées d'un squelette ramifié d'unité D galactose liée par des liaisons β (1,3) et β (1,6) et sur lesquelles sont branchées des unités d' α arabinofuranose (figure 2) (FEUILLET, 2000).

D'après ATWELL (1998), la fonctionnalité des pentosanes en général et des arabinoxylyanes en particulier, repose essentiellement sur leurs propriétés physico-chimiques. Quelque soit leur degré de solubilité, les pentosanes sont dépourvus de la structure cristalline, d'une part absorbent et fixent facilement plus d'un-quart de l'eau ajoutée à une pâte fraîchement préparée, et d'autre part, libèrent sous certaines conditions,

une partie de l'eau absorbée. Ceci fait que ces composants jouent un rôle des régulateurs de l'hydratation dans la pâte (FEUILLET, 2000).

Les caractéristiques visqueuses des gels des AXS interviennent sur la tenue et l'extensibilité de la pâte où ils jouent un rôle des surf-actifs et peuvent participer à l'association des protéines par l'intermédiaire de l'acide férulique essentiellement (ELIASSON et LARSSON, 1993 ; WANG *et al.*, 2003).

Ils influent aussi sur l'aptitude de développement de la pâte en inhibant la diffusion du gaz carbonique hors de celle-ci et stabilisent les alvéoles gazeuses par la formation d'un environnement aqueux saturé en CO₂ autour des alvéoles au cours de leur formation dans la mie (HOSENEY, 1984, GAN *et al.*, 1995, FEUILLET, 2000).

Selon RENARD et THERY (1998), les AXI constituent une fraction biochimique qui joue un rôle significatif dans les paramètres alvéographiques. Afin de déterminer leur rôle, des essais de reconstitution de la farine en arabinoxylanes ont été réalisés. En effet, l'addition d'une certaine quantité d'AXI à la pâte entraîne une augmentation de l'absorption d'eau, du temps de développement et de la résistance à l'extension de la pâte, avec une diminution de la formation du réseau du glutineux, ce phénomène est expliqué par la grande aptitude d'absorption d'eau des AXI, ce qui gênerait la formation du réseau de gluten entraînant ainsi une déstabilisation des alvéoles gazeuses durant le développement de la pâte (MICHNIEWICZ *et al.*, 1991; COURTIN *et al.*, 1999).

2. Les lipides

La farine du blé tendre renferme approximativement de 2 à 2,5% des lipides (PAREYT *et al.*, 2011). Cette fraction grasse est traditionnellement classée, en fonction de leur solubilité lors de l'extraction sélective, en lipides liés à l'amidon (polaires), et les lipides non liés à l'amidon. Ces derniers englobent les lipides libres (polaires et apolaires) et les lipides liés aux autres constituants (polaires), comme il est montré dans la figure 03 (ELIASSON et LARSSON, 1993; HOSENEY, 1994 ; CHUNG *et al.*, 2009). D'après ces auteurs, les lipides non liés à l'amidon représentent environ 2/3 à 3/4 des lipides totaux de la farine, les triglycérides et les lipides non polaires sont les lipides majoritaires de cette fraction.

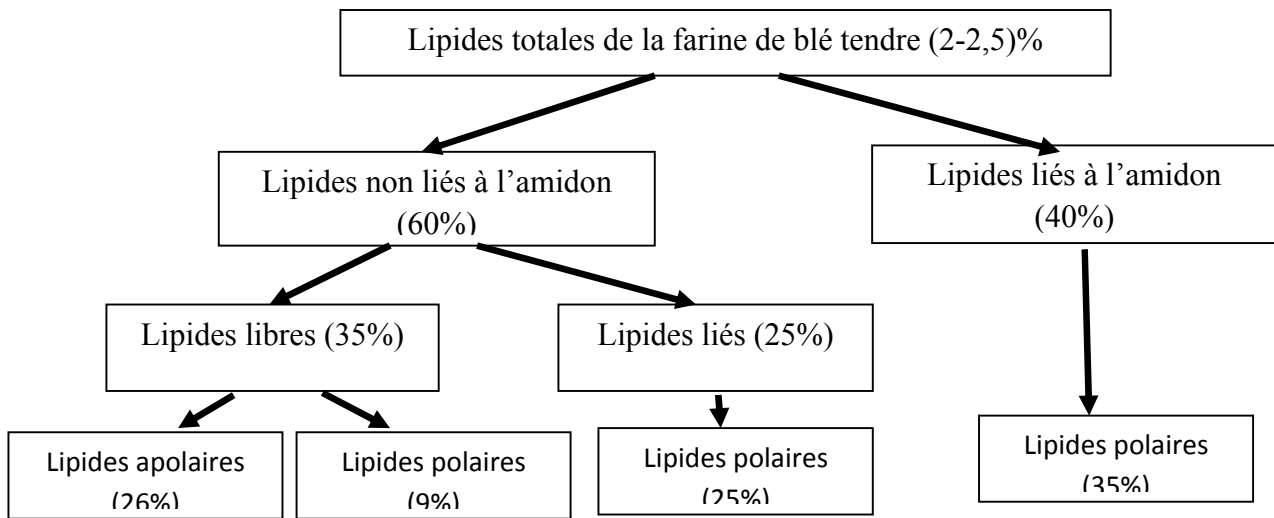


Figure 03. Schémas récapitulatif de la composition lipidique de la farine de blé tendre.

Il est généralement connu que les lipides de la farine, et en particulier ceux de la fraction non liés à l'amidon, affectent significativement la qualité de la panification. Tandis que les lipides liés avec l'amidon n'ont aucun effet, parce qu'ils ne seront disponibles qu'après sa gélatinisation (GOESAERT *et al.*, 2005).

Grace à leur capacité de se lier avec les protéines du gluten, les lipides libres polaires peuvent s'aligner à l'interface eau-air des alvéoles gazeuses durant la première étape du pétrissage, en agissant comme des agents tensioactifs, ce qui entraîne la stabilité de cette structure lors des différentes étapes de la panification, en particulier la fermentation (GAN *et al.*, 1995, SROAN et MACRITCHIE 2009). Des techniques de fractionnement et de reconstitution, montrent qu'une farine à des faibles quantités en lipides stabilise mieux les alvéoles gazeuses, et par conséquent, le volume du pain (SROAN et MACRITCHIE, 2009).

L'oxydation des lipides au cours du pétrissage, par les lipoxgénases, provoque la production des radicaux libres entraînant à leur tour l'oxydation couplée des groupements thiols du gluten en ponts disulfures, ce qui conduit à une amélioration des propriétés rhéologiques de la pâte (HOSENE, 1994).

3. Les protéines

Les protéines sont considérées comme étant les constituants majeurs de la farine de blé tendre (8 - 15) % après l'amidon. En se basant sur leurs propriétés fonctionnelles, les protéines de la farine de blé tendre sont classées essentiellement en deux groupes; les

protéines solubles (les albumines et les globulines), et les protéines de gluten (les gliadines et les gluténines) (GOESAERT et *al.*, 2005).

Selon la spécificité de leur solubilité, les protéines sont regroupées en quatre classes. Les albumines hydrosolubles, les globulines solubles dans les sels, les gliadines solubles dans l'éthanol, et les gluténines solubles dans les acides. Les gliadines et les gluténines, généralement réunis sous l'appellation prolamines, se sont les protéines de réserve qui représentent environ 80% des protéines totales de la farine de blé tendre (SHAWRY et TATHAM, 1997).

Selon SHEWRY et HALFORD (2002), un nouveau système de classification divise les protéines en trois classes :

Les protéines riches en soufre : α :/ β et γ gliadines, B et D sous unité gluténines de faible poids moléculaire.

Les protéines pauvres en soufre : ω -gliadines, et C sous unité gluténines de faible poids moléculaire.

Les protéines de sous unité gluténine de haut poids moléculaire.

3.1. Les protéines solubles (Albumines et globulines)

Cette famille représente 15 à 20% des protéines totaux de la farine. Ces protéines ont une masse moléculaire comprise entre 5 et 30 kDa. Ce sont des protéines monomériques ayant généralement un rôle physiologique et structural (GOESAERT et *al.*, 2005). Leur rôle en panification reste non claire (VERAVERBEKE et DELCOUR, 2002).

Il existe au sein de cette famille des protéines qui échappent à la classification traditionnelle. Ce sont les petites protéines riches en cystéines. Elles sont qualifiées, selon les équipes de recherche et les conditions de leur purification en CM protéines (protéines solubles dans le mélange chloroforme-méthanol). Comme exemple, on peut citer les S-safarines, les ligolines, les friabilines, les puroindolines, et les purothionine.

Ces protéines participent grâce à leur forte affinité aux lipides et leurs propriétés tensioactives particulièrement élevées, à la formation et la stabilisation de la couche monomoléculaire protéines/lipides située à l'interface eau/gaz des alvéoles gazeuses. L'addition de 0,1% de puroindoline à la farine modifie les propriétés rhéologiques de la

pâte, le volume du pain, et la structure de la mie où l'alvéolage devient plus fin et régulier (DUBEEIL *et al.*, 1998).

3.2. Les protéines de gluten

Cette fraction constitue 80 à 85% des protéines totales de la farine de blé tendre. Au sein de cette classe, deux types des protéines sont distinctes ; les gliadines monomériques et les gluténines polymériques. Le gluten est riche en gliadines et en gluténines mais contient également les lipides (3,5 - 6,8) %, les minéraux (0,5 - 0,9) %, et les carbohydrates (7 - 16)% (SANG *et al.*, 2007).

3.2.1. Les gliadines

Les gliadines sont des protéines monomériques associées par des liaisons hydrogènes et des interactions hydrophobes (FEILLET, 2000). Ils ont un poids moléculaire entre 60 et 80 kDa (SANG et ZANG, 2007). Ils sont biochimiquement classés en quatre groupes : α , β , γ , et ω gliadines.

Les α , β gliadines : sont très similaires, classés sous le nom des α gliadines. Ils possèdent six molécules de cystéines engagées dans les trois ponts disulfures intramoléculaires (FEILLET, 2000 ; TAHAM *et al.*, 1995 ; LINDSAY *et al.*, 1999).

Les γ gliadines : contiennent huit molécules de cystéines généralement engagés dans quatre ponts disulfures intramoléculaires. Ils ont une composition en acides aminés similaire à celle des α gliadines, mais s'en différencient par une teneur légèrement élevée en glutamine, en proline, en phénylalanine, et plus faible en tyrosine.

Les ω gliadines : sont caractérisés par l'absence totale des cystéines. C'est pour cette raison que les ω gliadines sont incapables de participer à l'établissement du réseau protéique par la formation des liaisons covalentes de types S-S (WANG *et al.*, 2008).

Les gliadines hydratés forment une pâte faible avec une viscosité élevée (KHATKAR *et al.*, 1995). Selon les travaux de WANG *et al.* (2008), les ω gliadines ont un effet très important dans la qualité de la pâte à base des différents types de blé tendre. Ces résultats montrent que les variétés du blé qui ont une teneur importante en ω gliadines représentent une force de la pâte et un volume de pain significativement plus importants que ceux des variétés pauvres en ω gliadines. D'un autre côté, ce type de gliadines n'ont aucun effet sur l'extensibilité de la pâte.

3.2.2. Les gluténines

Ils se composent de sous unités de gluténines de faibles et haut poids moléculaires avec respectivement : 12 à 60 kDa et 60 à 120 kDa.

Les gluténines sont constituées par l'agrégation de très nombreuses unités polypeptidiques élémentaires. Cet assemblage s'effectue principalement par l'intermédiaire des liaisons S-S pour la formation des polymères, des liaisons hydrogènes non covalentes et des interactions hydrophobes pour assurer cet assemblage (FEUILLET, 2000).

3.2.3. Fonctionnalité des protéines de gluten en panification

La qualité boulangère des farines de blé tendre dépend essentiellement de leur composition en protéines. Durant le pétrissage de la pâte, les constituants de la farine vont s'hydrater. L'énergie fournie par cette action permet l'assemblage des protéines, et le réseau de gluten est établi. Celui-ci se caractérise par le fait d'être continu, cohésif et viscoélastique (SINGH et MACRITCHIE, 2001).

Il existe deux facteurs déterminants des caractéristiques du réseau de gluten. La ration gliadines/gluténines joue un rôle très important dans la formation ainsi que la qualité de la pâte. A cause de leur taille importante, les polymères de gluténines forment un réseau offrant à la pâte sa résistance à la déformation ainsi que son caractère élastique (BELTON, 1999). De l'autre côté, les monomères des gliadines montrent un rôle plastifiant du réseau établis par les gluténines. De ce fait, il est important de signaler que le réseau du gluten de la pâte se forme essentiellement par l'agrégation des gliadines et gluténines. Ces dernières confèrent à la pâte ses propriétés viscoélastiques (PENA et *al.*, 2006). En effet, les gluténines sont responsables du caractère élastique, tandis que les gliadines sont à l'origine du caractère visqueux de la pâte (SANG et ZANG, 2007).

La différence de la composition des gluténines montre une variation de la qualité élastique de la pâte, cela est expliqué par la différence des interactions non covalentes qui contribuent au caractère élastique des gluténines (GOESAERT et *al.*, 2005).

II. Ingrédients exemptes du gluten

1. Le riz

Le riz est considéré comme la céréale de la plus abondante consommation dans le monde (GUIMARÃS, 2009). Grace à son effet bénéfique sur la santé, la farine du riz est utilisée comme une alternative de celle de blé dans la panification pour les maladies cœliaques (ALVAREZ-JUBETE *et al.*, 2010, KAWAMURA-KONISHI *et al.*, 2013).

1.1. Description physicochimique de la farine du riz

Comme tous les produits céréaliers, la farine du riz se compose essentiellement de 73% de l'amidon qui caractérise par une meilleure digestibilité comparativement à celui du blé (HO et YIP 2001). Le riz est la céréale qui présente la plus faible teneur en protéines (6,3% - 7,1%) (FAVIER *et al.* 1995). L'extraction séquentielle de ces derniers montre que la teneur protéique de la farine du riz se compose de 9% de prolamines (solubles dans l'alcool), 7% d'albumine (soluble dans l'eau) plus globuline (soluble dans les solutions salées) et 84% de glutéline (solubles dans les alcalis) (HUEBNER *et al.* 1990). Malgré que cette classification soit proche à celle du blé, les protéines du riz sont dépourvues de la capacité de la formation d'un réseau viscoélastique semblable à celui formé par les protéines du blé (KAWAMURA-KONISHI *et al.*, 2013).

2. La fève

La fève (*Vicia faba L.*) est une légumineuse appartenant à la famille des *Papilionacées*, elle appartient à la variété *minor* dite aussi *equina*. Le moyen Orient (surtout l'Égypte) et le Maghreb en sont de gros consommateurs (BOYDELDIEU, 1991). L'utilisation de la fève dans les formules sans gluten ne se repose que sur la complémentation nutritionnelle mais aussi sur l'amélioration de leurs caractéristiques technologiques et sensorielles (WITCZAK *et al.* 2010).

2.1. Description physicochimique

Selon l' FAO (1982), la farine de la fève se compose de 27 à 31% de protéines, 2% des lipides, 48,9 à 52% des glucides totaux, 4 à 5% des minéraux et 10% des fibres. Par rapport aux céréales, la fève se caractérise par une quantité en protéines plus importante de qualité différente que celle des céréales, d'où son rôle dans la complémentation nutritionnelle.

CHAPITRE II. INTERACTIONS BIOCHIMIQUES AU SEIN DE LA PÂTE

Le comportement rhéologique de la pâte repose essentiellement sur son évolution structurale au cours des différents stades de sa préparation. Cette architecture tridimensionnelle est formée par l'intermédiaire de liaisons et d'interactions moléculaires spécifiques entre les constituants de la pâte. L'organisation spatiale de cette dernière est considérée comme le résultat d'un équilibre entre les forces d'attractions et de répulsions non covalentes ainsi que des liens covalents entre les différents constituants (LEVAVASSEUR, 2007).

I. Nature chimique des interactions moléculaires impliquées dans le mécanisme de la formation de la pâte

Lors de la formation de la pâte, l'hydratation des molécules qui composent la farine permet l'établissement de nombreuses interactions entre ces dernières telles que des liaisons hydrogènes, ioniques, hydrophobes et covalentes (ponts disulfure). Lors du pétrissage, l'ensemble de ces interactions sont susceptibles d'être remaniées du fait des contraintes mécaniques et de la présence d'autres ingrédients dans la formulation des pâtes (levure, NaCl, etc.) (FEILLET, 2000).

1. liaisons covalentes de type S-S

Une liaison est dite covalente entre deux molécules, si chacune met en commun un électron pour assurer son équilibre électronique (MONTEL *et al.*, 1979). Les ponts disulfures sont formés dans la pâte par l'oxydation des groupements SH libres sous l'action des enzymes endogènes de la farine ainsi que de ses agents oxydatifs (glutathion, radicaux libres de lipides (HIRD *et al.*, 1968 ; TILLEY *et al.*, 2001 ; WIESER, 2007). Ce type des liaisons se trouve fréquemment dans les structures plus développées des protéines de différentes natures (STRYER *et al.*, 2003).

2. Interactions électrostatiques

Les interactions électrostatiques représentent les forces d'attraction et de répulsion entre une molécule ou un groupe de molécules. Les molécules de charges opposées auront tendance à s'attirer, alors que celles à charges similaires se repulseront (MONTEL *et al.*,

1979). Cette catégorie englobe les liaisons ioniques et hydrogènes. Ces derniers nécessitent pour leur établissement la présence des cations H^+ (CREIGHTON, 1993).

2.1. Interactions ioniques

Une solution n'est dite « électriquement neutre » que si la somme des charges portées par l'ensemble de ses molécules est nulle. Les interactions entre molécules portant des charges électriques sont régies par la loi de Coulomb. L'énergie potentielle d'interaction de deux charges électriques Q_1 et Q_2 séparées par une distance d est obtenue en calculant le travail nécessaire à la séparation de ces deux charges à une distance infinie (CHEVREUX, 2005).

Malgré que les interactions ioniques sont caractérisées par leur force, celles-ci ne permettant pas de stabiliser les protéines. En effet, en milieu aqueux, les acides aminés chargés sont majoritairement exposés à la surface de la protéine et sont donc très solvatés. Ceci réduit considérablement l'interaction charge/charge (RATTÉ, 2013). Les interactions solvant- soluté au sein des solutions sont les plus représentants des interactions ioniques (figure 05)

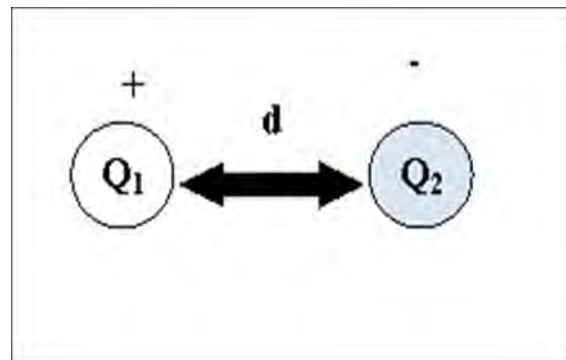


Figure 04. Schémas explicatif du phénomène des interactions ioniques, Q : la charge électrique.

2.2. Interactions hydrogènes

Ces liens se produisent lorsqu'un atome d'hydrogène, qui est déjà lié à un atome de carbone (c), d'oxygène (O), ou d'azote (N), est également attiré par un autre atome par le biais d'une interaction électrostatique (MONTEL *et al.*, 1979). Généralement, le dipôle contenant l'hydrogène qui possède une charge partielle positive, interagit avec la charge

négative de l'autre atome (CREIGHTON, 1993). Une illustration de ce type de liaison est présentée le cas des molécules d'eau (figure 05).

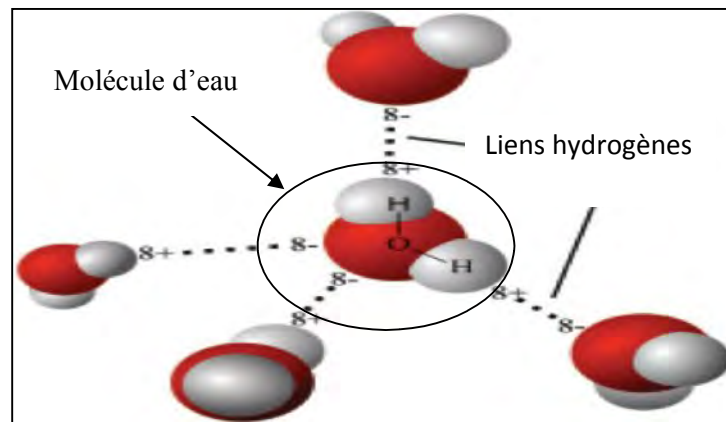


Figure 05. Interactions entre molécules d'eau par le biais de liens hydrogène (RATTÉ, 2013).

3. Interactions hydrophobes

Les interactions hydrophobes peuvent être considérées comme une tendance spontanée des groupements non polaires à se regrouper pour minimiser leur contact avec l'eau dans une solution aqueuse (CREIGHTON, 1993; MEYER *et al.*, 2006). Le contact entre l'eau et l'huile se fait par le biais des interactions hydrophobes (ALIAS, 2008).

II. Origine des interactions moléculaires dans les protéines de la farine de blé tendre

Au sein de la granule de la farine, les protéines du gluten forment un ciment azoté auquel sont adhérents les autres constituants (amidon, pentosanes, lipides). Ce ciment azoté se compose essentiellement des gliadines et gluténines (LAHLOU, 1999).

L'aptitude des protéines de gluten à former des interactions entre elles et avec les autres constituants de la farine est étroitement liée avec leur composition particulière en résidus des acides aminés, ainsi que le positionnement de ces derniers (FEILLET, 2000).

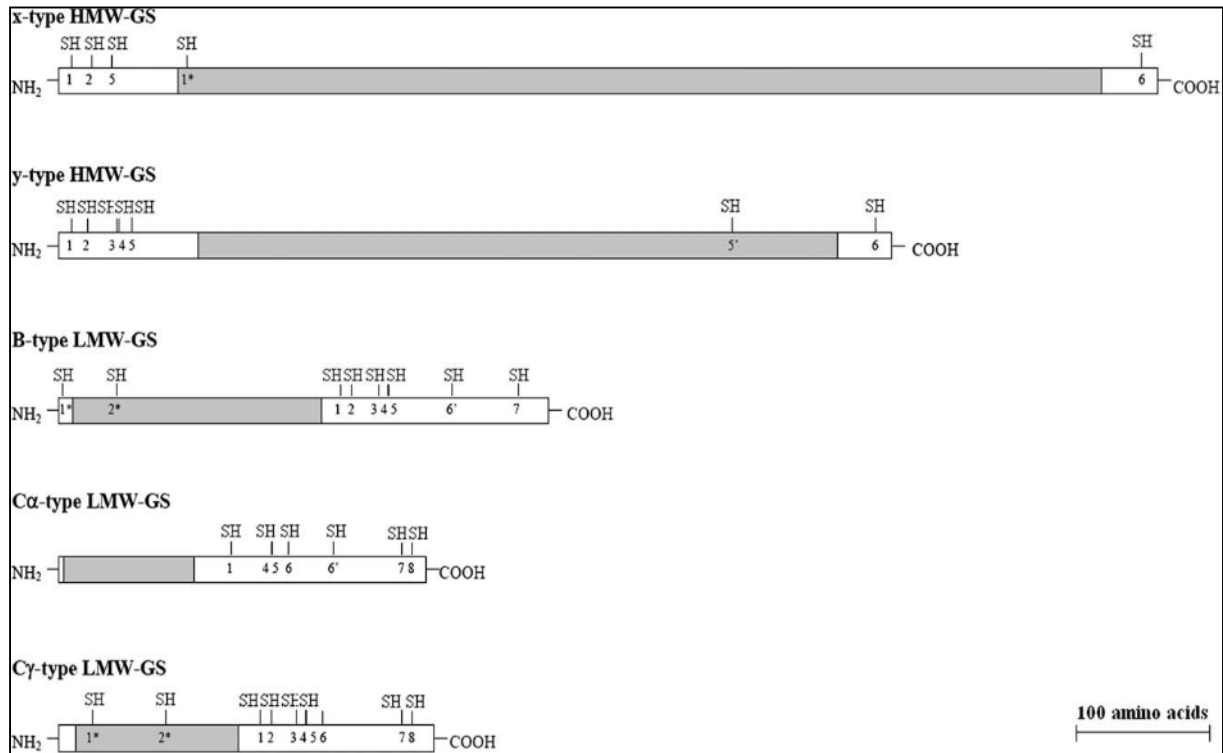


Figure 06. Schéma représentatif des groupements SH dans les différentes classes des sous unité gluténine (d'après JOYE et *al.*, 2009).

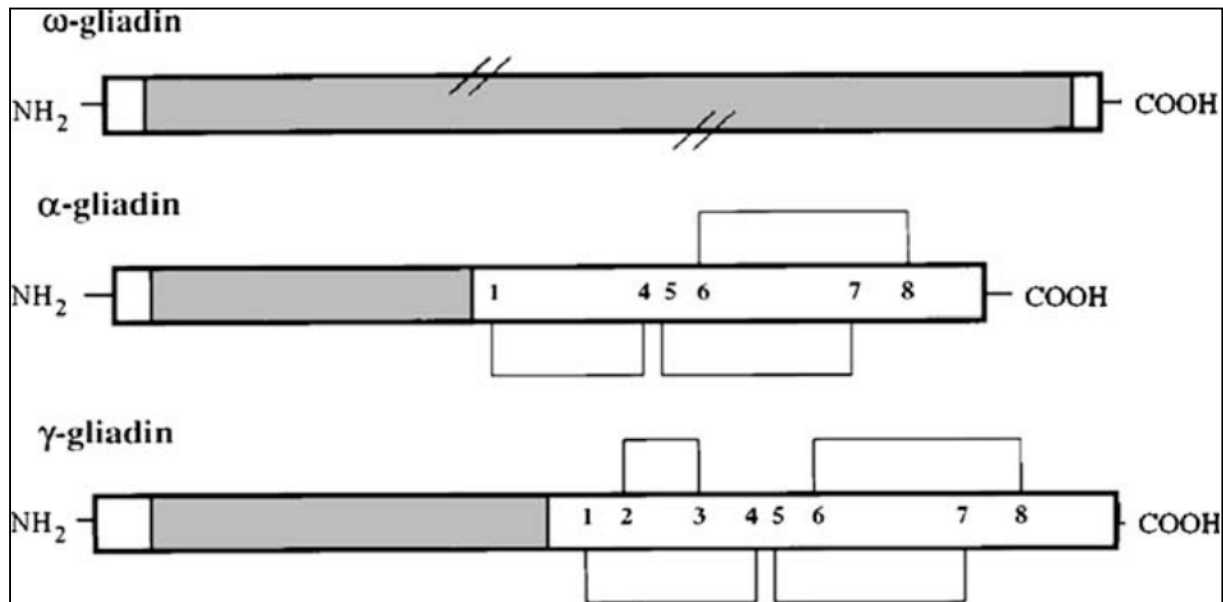


Figure 07. Schéma représentatif des ponts S-S dans les différentes classes des sous unité gliadine (d'après JOYE et *al.*, 2009).

Les α et γ gliadines renferment respectivement trois et quatre ponts disulfures grâce aux résidus cystéines. Ces derniers sont totalement engagés dans la formation de liaisons S-S, ce qui rend ces protéines capables de former que des ponts disulfures intramoléculaires. A cause de leur pauvreté en cystéine, les ω gliadines sont incapables de participer à la formation du gluten par l'établissement des ponts disulfures (LINDSAY *et al.*, 1999).

L'assemblage de ces protéines monomériques (gliadines) se fait principalement par des liaisons hydrogènes par rapport aux interactions hydrophobes (FEILLET, 2000).

Grâce à sa teneur élevée en résidus cystéines, les gluténines ont une grande aptitude à s'associer principalement par des liaisons disulfures. Le positionnement de ces résidus donne aux gluténines leur capacité de former des ponts disulfures intra et intermoléculaires, engendrant alors leur polymérisation (LINDSAY *et al.*, 1999). L'agrégation des gluténines s'établie par des interactions hydrophobes, grâce aux résidus des acides aminés non polaires (phénylalanine, valine, leucine, isoleucine, et méthionine) (KOHLENER *et al.*, 1993 ; ZHOU *et al.*, 2014). Dans le tableau 01 nous représentons les natures des liaisons pouvant exister entre les protéines de la pâte ainsi que les différents agents de leur rupture selon FEILLET (2000).

Tableau 01 : Nature des liaisons entre les protéines de la pâte (FEILLET, 2000).

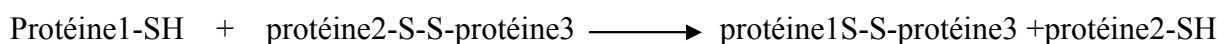
Dénomination des liaisons et des interactions	Nature	Exemple	Agent de rupture
Covalentes	Mise en commun d'électrons entre atomes liés	Liaison peptidiques Liaisons disulfures	Protéases Réducteurs
Ioniques	Attraction entre charges électriques opposées	Groupement acides et basiques chargés	Eau, pH acide, force ionique élevée.
Hydrogènes	Attraction entre atome hydrogène et un atome électronégatif	Acide glutamique sous forme amidée, acide aminé non polaire	Eau, urée, solvant polaire, élévation de la température
hydrophobes	Agrégation des groupements non polaires	Alanine, isoleucine, valine, phénylalanine	Solvant apolaire Détergents Baisse de température

III. Evolution des caractéristiques rhéologiques en fonction des interactions moléculaire au cours de la formation de la pâte

La farine doit sa réactivité à la capacité des molécules qui la composent (protéines du gluten, pentosanes et lipides, et à moindre degré l'amidon) à former des nouvelles liaisons en présence d'eau et à en rompre l'anciennes (FEILLET, 2000).

Au cours de la formation de la pâte, l'hydratation et l'énergie mécanique induisent un changement de la configuration structurale des protéines de la farine, favorisant, grâce à la fonctionnalité de ses acides aminés, la formation d'un réseau du gluten par l'établissement à la fois d'interactions chimiques covalentes (S-S) et non covalentes (interactions hydrophobes et hydrogènes) (AÏT KADDOUR et *al.*, 2007). Ces liaisons ont un rôle déterminant dans la structuration ainsi que le comportement rhéologique du réseau glutineux et par conséquent du devenir de la pâte (PERESSINI et *al.*, 2008).

BLOKSMA (1975) a proposé que l'élasticité et le comportement visqueux du gluten représentent l'effet rhéologique des liaisons disulfures qui est le résultat de la rupture et la reformation des ponts disulfure, à travers l'oxydation des groupements SH libres et la réduction des ponts S-S préexistants dans la farine selon la réaction suivante :



Ceci montre donc comment se forme le gluten par l'établissement des liaisons S-S intermoléculaires.

PERESSINI et *al.* (2008) montrent, par observation à travers la Microscopie Confocale à Balayage Laser (MCBL), l'effet significatif des ponts disulfures dans le maintien et la continuité du réseau du gluten autour des granules de l'amidon. Où ils ont additionné, à la pâte, un agent inhibiteur de la formation des liaisons S-S au cours de la préparation de la pâte. Ils ont remarqué une diminution de nombre des liaisons et la présence des zones de rupture au niveau du réseau du gluten en présence de cet agent inhibiteur (figure 08).

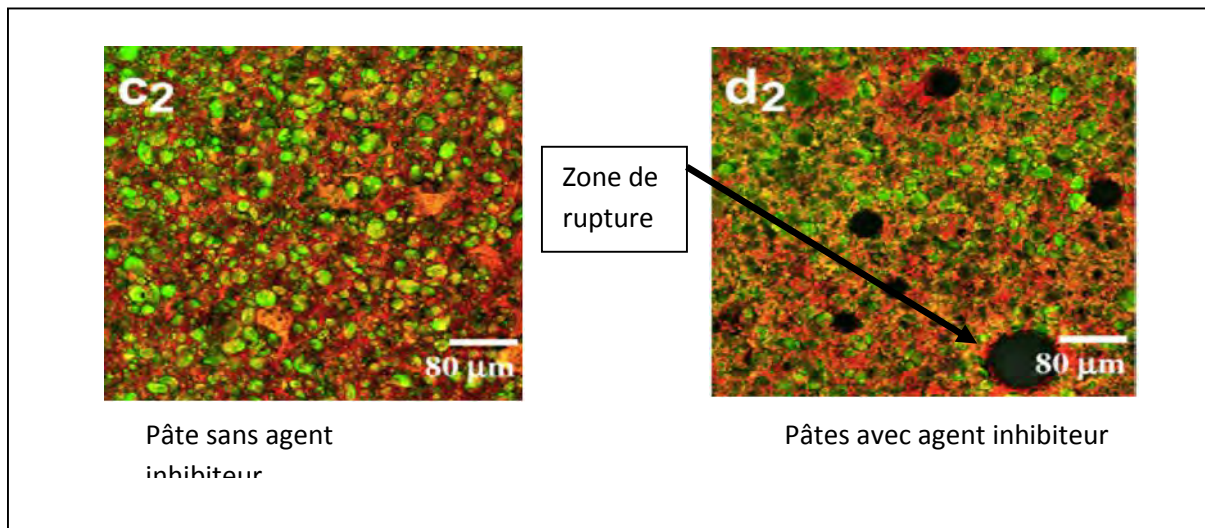


Figure 08 : Image MCBL montre l'effet des pont S-S dans le maintien de l'homogénéité du réseau de gluten au sein de la pâte (PERESSINI *et al.* 2008).

Les interactions non covalentes comme les liens hydrogènes et les forces hydrophobes peuvent aussi jouer un effet significatif (POTUS *et al.*, 1992).

Une preuve décrite le rôle des liens hydrogènes a été apportée en remplaçant l'eau (H_2O) du pétrissage par de l'eau deutériée (D_2O). Dans ces conditions la pâte devient plus ferme. Par contre, l'apport de l'urée, connue par sa capacité à rompre les liaisons hydrogène, affaiblit sa consistance (FEUILLET, 2000).

Dès que la farine est hydratée, les acides aminés hydrophobes, qui se trouvent dans la composition des protéines du gluten s'assemblent pour minimiser leur contact avec le milieu hydrophile, provoquant alors leur agrégation par les interactions hydrophobes. Ces dernières sont aussi impliquées dans le lien entre les lipides et les protéines du gluten. La qualité de la pâte serait d'autant meilleure que les protéines forment davantage des liaisons hydrophobes (FEUILLET, 2000).

MCCANN *et al.* (2009) montrent que les lipides libres se lient avec les gluténines et les gliadines par des liaisons hydrogènes et des interactions hydrophobes, et que ces interactions participent à la stabilisation de structure alvéolaire durant la panification.

Le nombre des forces ioniques dans une pâte à blé est généralement considéré faible à cause de la faible proportion en acides aminés qui contiennent des groupements ionisables (LINDSAY *et al.*, 1999).

IV. Méthodes d'étude des interactions moléculaires

Une multitude des de méthodes notamment physiques, existent pour l'étude et l'appréciation des interactions moléculaires. Parmi ces méthodes on trouve les méthodes spectroscopiques (UV, IR, fluorescence), le microcalorimétrie, la résonance magnétique nucléaire (RMN), etc..... (CHEVREUX, 2005).

En plus des méthodes physiques, des méthodes chimiques sont aussi mise en place dans l'appréciation des interactions moléculaires à base d'agent dissociant (LEFEBVER-CASES *et al.*, 1998).

1. Méthodes chimiques d'estimation des interactions moléculaires

L'une de ces méthodes est basée sur la dissociation des interactions moléculaires par l'utilisation des agents dissociant spécifique pour la rupture de chaque type d'interaction. Cette idée n'a été pratiquement réalisée que dans le cas des gels laitiers par LEFEBVRE-CASES *et al.* (1998). En fonction des types d'interactions existantes dans la pâte les agents dissociant les plus utilisés sont, le SDS pour les interactions hydrophobes, le β mercapto-éthanol pour les ponts disulfures, l'acide acétique pour les interactions ioniques et l'urée pour les interactions hydrogènes.

1.1. Sodium dodécylsulfate (SDS)

Il s'agit d'un détergent anionique qui provoque la rupture des interactions hydrophobes. Les molécules de l' SDS sont principalement liées avec les groupements polaires et non polaires des extrémités des protéines, induisant une répulsion électrostatique intramoléculaire et donc une rupture compétitive des interactions hydrophobes (STRYER *et al.*, (2003). Il est important de noter que la fixation des molécules de l' SDS peut entraîner une élimination indirecte des liens hydrogène (MARKUS *et al.*, 1963).

1.2. β -mercapto-éthanol

C'est un agent réducteur destiné à la rupture des liaisons covalentes de type S-S. son mécanisme d'action repose sur une réaction d'oxydoréduction, où pour la réduction d'une liaison S-S, deux molécules de β -mercapto-éthanol portent chacune un groupement SH s'oxydent. Comme illustre la réaction suivante (figure 09) :

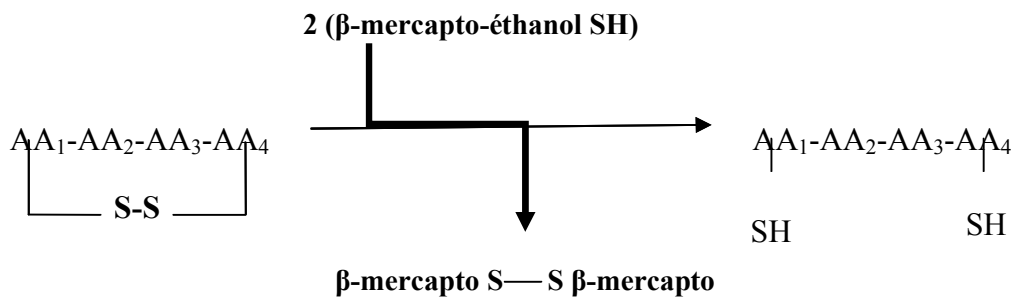


Figure 09. Schéma représentatif du mécanisme de la réduction des ponts disulfures par le β-mercapto-éthanol (AA : acide aminée).

1.3. Acide acétique

C'est un acide organique faible dont la formule chimique est « CH_3COO^- , H^+ ». Il est utilisé comme un agent dissociant des interactions ioniques, où il contribue grâce aux anions CH_3COO^- et des cations H^+ à la neutralisation des charges positives et négatives des groupements ionisables de la pâte.

1.4. Urée

Grâce à sa composition chimique, l'urée ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) représente une capacité particulière à établir des interactions hydrogènes fortes avec les polypeptides des protéines, provoquant alors la dissociation du milieu où elle agit par la rupture des interactions hydrogènes (NOZAKI et *al.*, 1963). Le mode d'action de l'urée n'est pas encore bien connu (STRYER et *al.*, (2003).

Chapitre III : PANIFICATION : PROSESSUS ET CARACTERISATION DE SES PRODUITS

I. Processus de la panification

Le pain est le résultat de la cuisson d'une pâte pétrie et fermentée. Les trois étapes essentielles de la panification sont respectivement : le pétrissage de la farine, eau, levure, sel, sucre, gras, et d'autres ingrédients, la fermentation, et la cuisson (DOBRASZCZYK *et al.*, 2003).

1. Pétrissage

C'est le processus le plus important, il est considéré comme l'étape clé permettant la fabrication d'une pâte lisse, homogène, tenace, et viscoélastique (MILLAR, 2006). Durant cette étape, la pâte est soumise à des forces intenses d'extension, de compressions et de cisaillement (FEILLET, 2000). La pâte va subir à la fois une déformation rotationnelle et élongationnelle ainsi qu'une rupture (JONGEN *et al.*, 2003).

Le pétrissage assure trois fonctions essentielles :

L'homogénéisation où il permet la distribution uniforme et le contact intime des différents ingrédients de la pâte notamment les particules de la farine et l'eau, se qui favorise l'augmentation de la dissolution et l'hydratation des constituants de cette dernière, en particulier les protéines de la farine (MARTIN *et al.*, 2004, MEHTA *et al.*, 2009).

Le développement mécanique d'un réseau du **gluten** homogène au sien de quel les granules de l'amidon sont dispersées (DON *et al.*, 2005, MEHTA *et al.*, 2009). Cette structure sera d'une part à la base des propriétés rhéologiques de la pâte, et responsable de la capacité de la rétention gazeuse ainsi que la stabilité des alvéoles du gaz d'autre part (MARTIN *et al.* 2004).

L'aération de la pâte par l'incorporation de l'air au sein de la pâte sous forme des micro-nucléi sphériques, La présence de ces microbulles d'air permet la diffusion du gaz carbonique produit par les levures au cours de la fermentation, se qui favorise la bonne structuration alvéolaire de la mie du pain (MEHTA *et al.*, 2009, PAREYT *et al.*, 2011).

Selon BROCKER *et al.* (2011) le réseau tridimensionnel est formé après un certain temps de repos qui suit le pétrissage. Ce réseau est le responsable du comportement viscoélastique et la

réretention gazeuse dans la pâte. La formation de la pâte correspond à la liaison des particules de la farine par l'intermédiaire de deux phases continus, un réseau de gluten hydraté et une couche d'eau enrobe tous les colloïdes de la pâte.

2. Fermentation

La fermentation a lieu après l'installation de la plate forme structurale de la pâte, et l'établissement de toutes les conditions nécessaires à la bonne conduite de cette étape à savoir le réseau du gluten et les noyaux alvéolaires (BROCKER *et al.*, 2011).

Pendant la fermentation, la levure contribue à la conversion du glucose en gaz carbonique et en acides organiques et des molécules volatiles. Ces derniers vont participer à l'élaboration du goût et de l'arôme du produit fini (FEILLET, 2000). Alors que le gaz carbonique, qui se produit en premier, diffuse dans la phase aqueuse de la pâte, le surplus du gaz va s'accumuler et emprisonner dans les alvéoles qui se forment préalablement durant le pétrissage, ce qui fait le levé de la pâte (DELCOUR et HOSENEY, 2010).

3. Cuisson

La cuisson consiste à fixer la structure de la pâte, préalablement établie au cours du pétrissage et la fermentation, par leur exposition à une haute température (BALAJI, 1991). Au cours de l'étape de la cuisson, une série de transformations physiques, chimiques et biochimiques se produisent simultanément aboutissant au pain. Les principales transformations sont l'expansion de volume du produit, la perte d'eau par évaporation, la formation d'une structure alvéolaire plus ou moins développée, la dénaturation des protéines (diminution de solubilité due à l'agrégation des protéines par le renforcement des interactions avec l'augmentation de la température de la cuisson), la gélatinisation de l'amidon, la réaction de Maillard (brunissement non enzymatique) responsable de la couleur et de l'odeur du produit fini et puis tout ce qui concerne la formation de la croûte (MONDAL *et al.*, 2008).

II. Caractérisation des produits de la panification

1. Les propriétés rhéologiques de la pâte

La rhéologie est l'étude de l'écoulement et la déformation d'un matériel. Généralement, pour déterminer le comportement rhéologique de la pâte, cette dernière doit subir, pendant un temps fixe, une certaine déformation. La valeur de la déformation mesurée

indique les paramètres rhéologiques de la pâte à savoir la rigidité (dureté, fermeté), viscosité, ténacité, élasticité, et l'extensibilité etc..... (DOBRSZCZYK et *al.*, 2003).

L'étude rhéologique permet d'obtenir une description quantitative des propriétés mécaniques de la pâte, obtenir une information sur sa la structure moléculaire et sa composition chimique, ainsi de caractériser et simuler la performance des processus de sa fabrication.

Parmi les céréales, la farine de blé est la seul qui a une bonne aptitude de formé une pâte avec un réseau viscoélastique tridimensionnel lorsqu'elle est pétri avec l'eau. Selon FEILLET (2000) la pâte associe les propriétés élastiques d'un solide et visqueuses d'un liquide en raison d'une structure interne très particulière où les chaines protéique de la pâte se comportent comme des ressorts et confèrent à celle-ci ses propriétés viscoélastiques. Ces caractéristiques rhéologiques traduisent les résultats de l'évolution structurelle de la pâte au cours des différents stades de sa préparation. Ils sont considérés d'une part comme des indicateurs de la qualité de la pâte et du produit fini, et de la performance des différents stades du processus de panification d'autre part,

2. Relation entre les processus de panification et la rhéologie

La plus part des études sur la pâte montrent une corrélation entre les processus de pétrissage, la rhéologie et la performance de la cuisson. En effet, les plus importantes évolutions rhéologiques au sien du réseau du gluten sont acquises durant le pétrissage. Ces évolutions ont une très grande influence sur la qualité du produit fini (volume du pain et texture) (DOBRSZCZYK et *al.*, 2003).

2.1. Relation entre le pétrissage et la rhéologie

La pâte doit être suffisamment visqueuse pour empêcher l'ascension des petites bulles à l'arrêt du pétrissage (stabilité de la pâte) et être extensible sur un large domaine de temps pour qu'il y ait déformation sans rupture (extensibilité de la pâte) (BLOKSMA, 1990a). Cette propriété d'extensibilité correspond à la capacité de la pâte, entourant les bulles gazeuses, à s'étirer sans rupture durant les étapes postérieures au pétrissage. Cette conclusion est montrée par les résultats des études de KHATKAR et SCHOFIELD (2002a) qui indiquent une corrélation très importante ($r=0.73$) entre le volume du pain et l'élasticité du gluten et de la pâte.

2.2. Relation entre la fermentation et la rhéologie

La viscosité de la pâte élevée en sortie pétrissage, agit comme nous l'avons souligné précédemment dans le retardement des phénomènes de crémage et d'agrégation des bulles gazeuses (VAN VLIET *et al.*, 1992). La faible extensibilité entraîne des ruptures précoces des membranes des cellules gazeuses, qui causent une diminution de la rétention gazeuse (GAN *et al.*, 1990). Cette propriété d'extensibilité est étroitement liée à l'étape de fermentation. Certains auteurs ont observé que la résistance à l'extension pour les pâtes fermentées augmente dans le temps (BLOKSMA, 1990a). D'autres auteurs soulignent le contraire (HOSENEY *et al.*, 1979 ; CHARGELEGUE *et al.*, 1994).

2.3. Relation entre la cuisson et la rhéologie

Les transformations hydrothermiques subies par l'amidon et le gluten sont à l'origine de l'évolution des propriétés rhéologiques de la pâte en cours de la cuisson. Leurs actions se situent dans la même plage de température rendant la séparation de leurs effets difficile. L'exemple de l'évolution de la viscosité de la pâte à pain en cours de cuisson le confirme. Dès le début de la cuisson et jusqu'à une température d'environ 60°C, la viscosité diminue pour atteindre un minimum. L'agitation thermique en est responsable pour une majeure partie. Dans cette zone de température, le gonflement progressif des grains d'amidon et le début de coagulation du réseau de gluten tridimensionnel sont probablement à l'origine de l'augmentation rapide de la valeur de la viscosité (LASSOUED, 2005).

3. Méthodes de mesure des propriétés rhéologique de la pâte

Dans l'industrie des céréales, il existe une multitude des méthodes empiriques de l'évaluation des propriétés rhéologiques de la pâte et de prédire la qualité de celle-ci ainsi que de sa matière première, à savoir le Pénétromètre, Texuromètre, Consistomètre, Viscosimètre, Amylographe, Farinographe, Mixographe, Extensigraphe, et Alvéographe (DOBRASZCZYK *et al.*, 2003).

3.1. Estimation de la valeur boulangère par l'Alvéographe Chopin

L'appréciation de la valeur boulangère par l'alvéographe se base sur une extension biaxiale où l'échantillon soumis à une force d'extension selon deux axes perpendiculaires dans un même plan se qui entraîne leur gonflement et la formation d'un ballon sphérique (DOBRASZCZYK *et al.*, 2003). L'avantage majeur de ce test c'est qu'il entraîne une

déformation étroitement similaire à celle subi par la pâte sous l'effet de l'expansion gazeuse des alvéoles pendant les étapes de la fermentation et la cuisson. L'Alvéographe Chopin permet donc la détermination de la force du gluten d'une pâte par la mesure de la force nécessaire à gonfler et à assurer la rupture de la bulle de pâte. Les utilisations des farines peuvent être déterminées selon les résultats des caractères alvéographiques (figure 08).

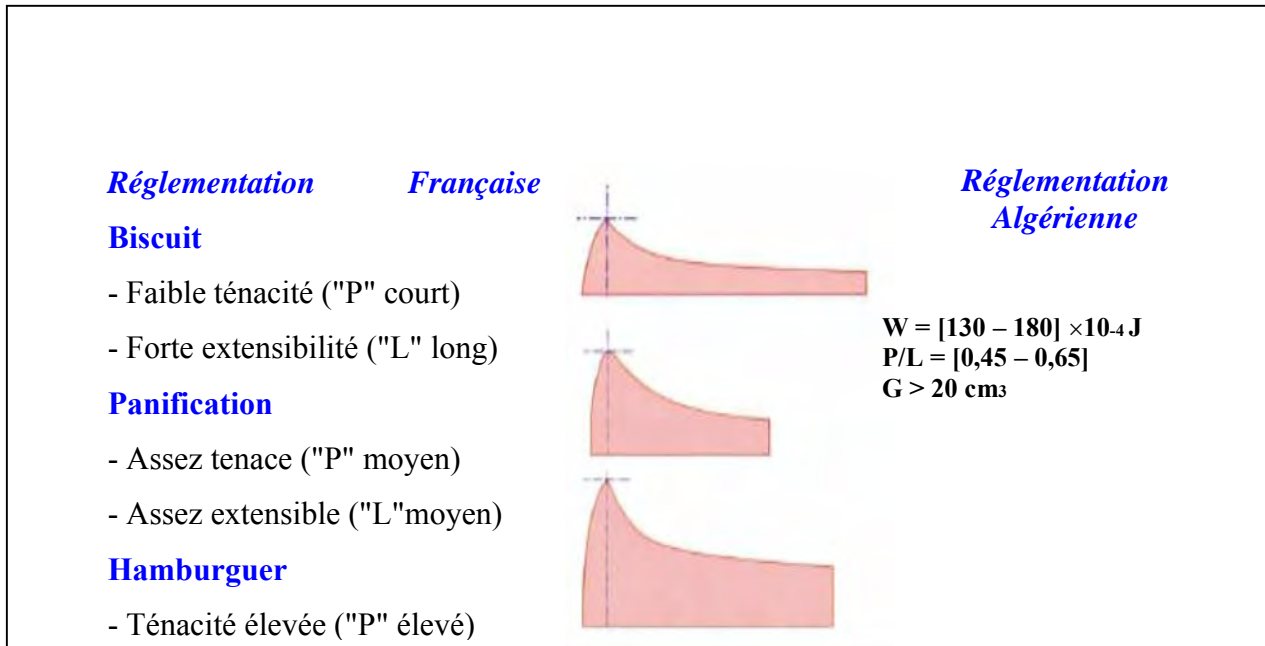


Figure 10. Interprétation des résultats de l'Alvéographe Chopin selon les réglementations Française (GUINET et GODON 1994) et Algérienne (J.O.R.A. 1991)

Selon la forme de la courbe, il est possible de préjuger de la ténacité et l'extensibilité d'une pâte. Plus le rapport P/L est élevé (courbe plus haute que longue (Figure 09a) plus la farine sera tenace et forte. Par contre, si ce rapport est plus faible (courbe plus longue que haute (Figure 09b), la farine sera extensible. Le W quant à lui, peut être identique dans ces deux cas, ce qui nous laisse dire que ce paramètre à lui seul ne permet pas de préjuger du comportement futur d'une farine (NAEGA, 2005).

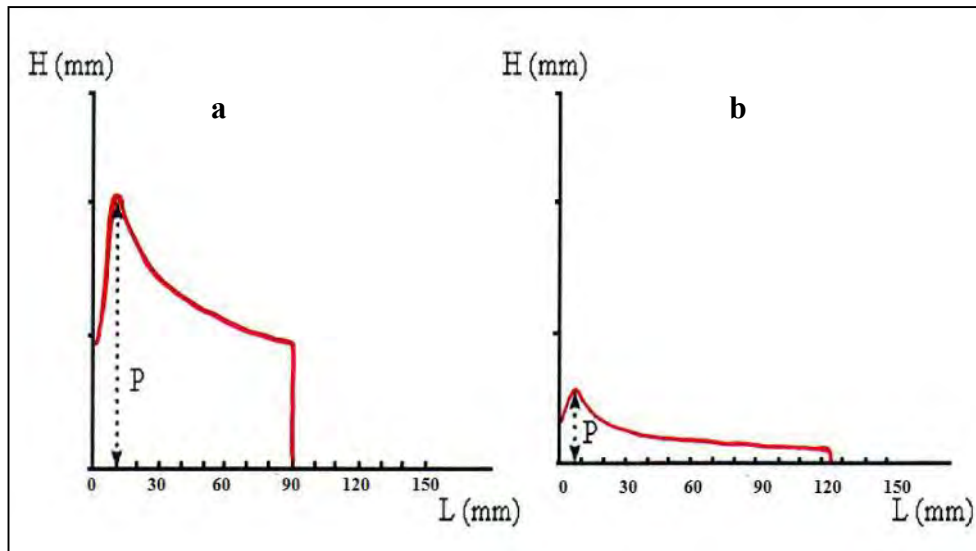


Figure 09. Alvéogrammes de deux pâtes à base de blé dur : (a) : pâte forte, (b) : pâte faible (NAEGA 2005). **2. Qualité des produits de panification**

La qualité du produit de la panification se repose essentiellement sur deux critères, le volume spécifique du pain et la structure alvéolaire de la mie (BENATALLAH, 2009).

2.1. La structure alvéolaire de la mie

La structure alvéolaire est assurée par l'accumulation du gaz carbonique dans le réseau protéique formé principalement de gluten. L'évaluation de la structure alvéolaire des produits de panification se base sur plusieurs critères tels que la taille et la forme des alvéoles ainsi que l'épaisseur de leurs parois (KAMMAN, 1970). Les méthodes classiques de notation par des experts permettent des classements qualitatifs et subjectifs de la texture (SCANLON et ZGHAL, 2001). L'analyse de texture, permet de quantifier cette structure alvéolaire à travers la distribution spatiale. Avec le développement des outils informatiques et des techniques optiques, plusieurs études par analyse d'image ont permis d'avancer sur la caractérisation de la structure alvéolaire (LASSOUED, 2005).

CHAPITRE I. MATERIEL ET METHODES

I. Matières premières

Le choix des matières premières se fait dans le cadre de la réalisation d'une classification des pâtes boulangères de différentes qualités selon une méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires établies entre les différents constituants de la pâte au cours de sa préparation. Les matières premières nécessaires pour acquies cet objectif sont les suivantes :

1. Farine de blé tendre

La farine de blé tendre (*Triticum aestivum*) est destinée à la fabrication de la pâte boulangère témoin avec gluten. Ce type de farine est choisi pour son aptitude idéale à la panification (FEILLET, 2000).

Dans ce travail deux types de farines de blé tendre ont été utilisés, à savoir la farine de blé tendre type 1 (FBT1) a été achetée sur le marché, conditionnée dans des sacs en papier de 1 kg. Le prélèvement se fait à partir du même lot pour éviter l'influence des changements des conditions de la fabrication. La farine de blé tendre type 2 (FBT2) est prélevée directement de la chaîne de fabrication avant son stockage, et conditionnée dans des sacs en papier de 2 kg.

2. Ingrédients exempts de gluten

Le choix de ces ingrédients se fait sur la base de la formule destinée à la panification sans gluten proposée par BENATALLAH(2009) et qui donne l'aptitude panifiable la plus proche de celle de la farine de blé tendre (farine témoin). Il s'agit d'un mélange de la mouture de riz-fèverole avec une proportion 2/1.

2.1. Riz

C'est du riz (*Oryza sativa*) blanc, long et étuvé de la marque indienne Basmati. Celui-ci est acheté sous forme des grains intacts et conditionné dans des sacs de 1 kg.

2.2. Fèverole

La fèverole (*Vicia faba L.*) est achetée décortiquée, dégermée et partiellement broyée, ensachée dans des sacs de 250 kg. Celle ci est d'origine Egyptienne.

2.3. Mouture des grains et préparation des farines

Les grains de riz et de la fèverole sont broyés à l'aide d'un broyeur à meules de la marque UMA Rouïba-Algérie de type MG E3. Le broyat de ces grains est tamisé manuellement à l'aide d'un tamis de 200 μ m de diamètre. Le tamisage sert à l'obtention d'une farine avec une granulométrie repend aux exigences de la panification (diamètre < 212 μ m). Après cette opération, les farines du riz et de la fèverole sont alors stockées dans des sacs en fibres synthétique dans un endroit frais et sec.

3. Autres ingrédients

3.1. Eau d'hydratation

L'eau utilisée dans ce travail est de l'eau distillée avec un pH de 6,5 à 6,9 obtenus à partir d'un distillateur de marque SCOTSMAN.

3.2. Levure boulangère

Il s'agit de la levure boulangère *Saccharomyces serevisiae* de la marque Saf-instant sile saffe France, lyophilisée conditionnée en paquet de 500g.

3.3. Sel

Le sel utilisé dans notre travail est un sel fin de cuisine iodé, de la marque ENA sel.

II. Méthodes

1. Caractérisation physicochimique des matières premières

La détermination de la composition chimique des matières premières est très intéressante dans notre travail. En effet les composants de la farine sont les éléments responsables de l'établissement des différents types d'interactions moléculaires durant le développement de la pâte boulangère. Une différence entre les teneurs de ces composants pourrait influencer les interactions au sein de ces pâtes.

1.1. Teneur en eau et en extrait sec

a. Principe

La détermination de la teneur en eau est basée sur la mesure de la perte en poids après une dessiccation, selon la norme NFV03-707(FEILLET, 2000).

b. Mode opératoire

La dessiccation des farines a été effectuée dans une étuve isotherme de la marque MEMERET. Une prise d'essai de $5 \pm 0,001$ g est séchée à 130°C pendant 2 heures de temps comptées à partir du moment où la température de l'étuve est de nouveau comprise entre 130 et 133°C . En opérant rapidement, les échantillons sont retirés de l'étuve et placés dans le dessiccateur. Dès que ces échantillons sont refroidis à la température de laboratoire, sont ensuite pesés à 1 mg près. L'opération est répétée jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

c. Expression des résultats

Le taux d'humidité (H) est exprimé en gramme pour 100g du produit humide :

$$H = (M_0 - M_1) / M_0 \times 100$$

M_1 : la masse en g du résidu après séchage ;

M_0 : la masse en g de la prise d'essai avant séchage.

L'extrait sec (ES) est exprimé par la relation suivante :

$$ES = 100 - H$$

1.2. Teneur en cendres

a. Principe

Les cendres totales sont obtenues par différence de la pesée de l'échantillon avant et après l'incinération dans un four à moufle (AFNOR, 1991).

b. Mode opératoire

La technique de dosage est celle décrite par la norme AFNOR NFV03-760 de décembre 1990 (AFNOR, 1991). Une prise d'essai de $3 \pm 0,001$ g est incinérée dans un four à

moufle à une température de $500 \pm 10^\circ\text{C}$. La combustion se continue jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

c. Expression des résultats

Le taux des cendres totales (C) est exprimé en gramme pour 100 g sur la base de la matière sèche :

$$C = M_1 \times 100 / M_0 \times (100/100-H)$$

C : taux des cendres ;

M_0 : masse en g de la prise d'essai ;

M_1 : masse en g de résidu après incinération;

$100/100-H$: facteur pour rapporter le taux des cendres sur la base sèche ;

H : l'humidité de l'échantillon en pourcentage.

1.3. Teneur en protéines totales

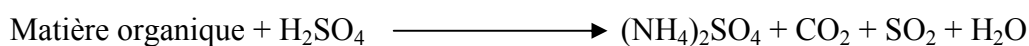
La teneur en protéines totales est déterminée selon la norme AFNOR NFV 03-050 de septembre 1970 (FEILLET, 2000) par la méthode KJELDHAL. Selon la norme AFNOR NFV03-050 de septembre 1970 (AFNOR, 1991) le coefficient de conversion de l'azote en protéines totales est de 6,25 pour les farines de blé tendre et 5,7 pour les farines du riz et la fève.

a. Principe

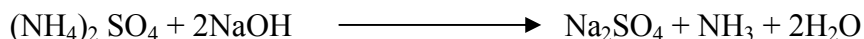
Le principe consiste à minéraliser l'azote de la matière organique par l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur. L'azote minéralisé se trouve alors sous forme de sulfate d'ammonium qui sera déplacé de son sel par la lessive de la soude. L'ammoniac produit est titré par de l'acide sulfurique 0,01N.

b. Mode opératoire

La méthode de KJELDHAL comporte essentiellement trois étapes. De l'acide sulfurique (96%, $d = 1,84$) concentré oxyde et détruit la matière organique à chaud. L'azote organique se minéralise (AUDIGIE et *al.*, 1984) selon la réaction suivante :



Le sulfate d'ammonium obtenu est alors déplacé de son sel par de la lessive de la soude. Comme il est montré par la réaction ci-dessous :



L'ammoniac libéré est déplacé par les vapeurs de l'eau de la distillation. Le distillat est récupéré dans un volume connu d'acide borique (4 %). Il se forme alors du borate d'ammonium. Ce dernier est titré par de l'acide sulfurique 0,01 N en présence de l'indicateur coloré (rouge de méthyle) (LECOQ 1965b). La titration s'achève au virage du milieu du jaune vers le rose.

c. Expression des résultats

La teneur en azote total (A) est exprimée en gramme pour 100 g de la matière sèche :

$$A = (\text{N} \times 14 \times \text{D} \times \text{V} / 1000 \times \text{M}_0) \times 100 \times (100 / 100 - \text{H})$$

Où :

N : Normalité de l'acide titrant ;

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

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

D : Coefficient de dilution de l'échantillon ;

M₀ : masse en g de la prise d'essai ;

100/100-H : facteur pour rapporter la teneur en azote sur la base sèche ;

H : l'humidité de l'échantillon en pourcentage.

1.4. Teneur en lipides libres

a. Principe

L'extraction des lipides libres se fait par leur solubilisation dans un solvant organique.

b. Mode opératoire

L'analyse est effectuée, selon le protocole SOXLET, à l'aide d'un appareil SOXTEC system HT de la marque TECATOR.

Un échantillon de $3 \pm 0,001\text{g}$ est pesé directement dans les cartouches (creusets). Ces dernières sont ensuite positionnées dans l'unité de l'extraction en les émergeant dans des

nacelles contenant 50 ml du solvant (hexane) pour la récupération de la matière lipidique extraite. L'extraction se fait à 140°C durant 2 heures. A la fin de l'extraction les nacelles contenant les lipides récupérés sont alors pesées. La différence de poids correspond à la teneur en lipides de l'échantillon.

c. Expression des résultats

La teneur en lipides (Li) est exprimée en gramme pour 100g de la matière sèche :

$$Li = M_1/M_0 \times 100 \times (100/100-H)$$

Où :

M_1 : masse en g des lipides extraits ;

M_0 : masse en g de la prise d'essai initiale ;

$100/100-H$: facteur pour rapporter la teneur des lipides sur la base sèche ;

H : l'humidité de l'échantillon en pourcentage.

1.5. Distribution granulométrique des farines

Selon la norme CODEXE SATN 152 (1995) l'appellation farine désigne tout broyat de granulométrie inférieur à 212µm.

a. Principe

La détermination de la distribution granulométrique consiste à faire passer un échantillon de la farine à travers une série des tamis sous l'action d'une force de vibration.

b. Mode opératoire

Un échantillon de 100g de la farine est déposé au sommet d'une série de cinq tamis superposés et placés en ordre décroissant en ouverture de mailles (200µm, 150µm, 125µm, 100µm et 75µm). La distribution granulométrique de l'échantillon est effectuée sous l'effet des mouvements vibrationnels animés à l'aide d'une tamiseuse de laboratoire de la marque RETSCH AS 200 (Allemagne). Les fractions retenues par les tamis sont récupérées, peser et rapporter sur la quantité de l'échantillon totale.

c. Expression des résultats

La distribution granulométrique (DG) est exprimée en pourcentage du produit brut :

$$DG = (M_1/M_0) \times 100$$

M_1 : la masse en g de refus ;

M_0 : la masse en g de la prise d'essai.

2. Mise au point d'une méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires dans la pâte boulangère

La mise au point de la méthode de la dissociation chimique consiste à faire rompre les interactions moléculaires établies entre les constituants de la pâte après un pétrissage optimal suivi par un temps de repos convenable en mettant cette pâte en contact d'une solution contenant un agent dissociant spécifique à chaque type de liaisons. Notre hypothèse repose sur la rupture des liaisons d'un constituant entraînant alors son isolement de la charpente de la pâte et son passage vers la solution de la dissociation soit sous forme soluble ou insoluble. En se basant sur ça, des essais ont été réalisées afin de :

- Choisir les agents dissociant à tester ;
- Créer le mode opératoire à suivre pour l'estimation des différentes dissociations chimiques dans la pâte;
- Assurer la répétabilité du mode opératoire établi pour chaque type d'agent dissociant utilisé.

La validation de notre méthode repose sur son application dans un test de classification de trois types de pâtes boulangères deux à base du blé tendre et une sans gluten selon les évolutions de leurs taux de dissociation obtenus en fonction des concentrations de chaque agent dissociant, et la comparaison de cette classification avec celle établie par des méthodes conventionnelles (Alvéographe Chopin, test de panification).

2.1. Choix des agents dissociant

Le choix des agents dissociant se fait principalement en fonction de la nature des interactions qu'ils visent à les rompre et ce, en se référant à des travaux antérieurs. Sachant qu'ils n'ont jamais été testés sur les pâtes boulangères, des essais ont été réalisés par la suite

pour vérifier l'effet dissociant de chaque agent choisi. L'estimation de cet effet a été approchée par la mesure de l'extrait sec libéré après la dissociation.

2.1.1. Agents dissociant des interactions hydrophobes

Généralement, les détergents sont les agents les plus utilisés pour la dissociation des interactions hydrophobes, grâce à leur caractère tensioactif. Le Sodium dodécylsulfate (SDS) est le détergent anionique le plus employé dans les recherches scientifiques à raison de ses caractéristiques structurales, ce qui le spécifie des autres détergents. En effet il n'entraîne pas la perturbation des résultats lors du dosage des protéines par les méthodes spectroscopiques.

Des travaux antérieurs ont utilisé le SDS et justifier son effet dissociant. A savoir, l'utilisation du SDS pour la rupture des interactions hydrophobes, au sein des structures protéiques les plus évoluées, dans la technique d'électrophorèse en conditions dénaturantes décrite par LAMMNL I *et al.*, (1970). STRYER *et al.*, (2003) l'ont aussi utilisé pour la même raison.

Il est également utilisé par LEFEBVER-CASES *et al.*, (1998) pour l'estimation des interactions hydrophobes dans les gels laitiers. WANG *et al.*, (2003), WANG *et al.*, (2007) l'ont aussi utilisé pour l'extraction des macros polymères de gluténine à partir de la farine de blé tendre.

Les résultats des essais que nous avons réalisés, montrent l'effet dissociant du SDS sur les pâtes boulangères.

2.1.2. Agents dissociant des ponts disulfures (S-S)

La dissociation des liaisons S-S se fait par leur réduction (STRYER *et al.*, 2003). L'agent dissociant fréquemment utilisé pour la réduction des ponts disulfures est le β mercapto-éthanol.

Cet agent est le plus utilisé dans la technique d'électrophorèse selon la méthode de LEMMNELI *et al.* (1970) pour l'obtention de la structure primaire des protéines. Pour cette même raison, il est choisi par STRYER *et al.*, (2003). Le β mercapto-éthanol a également été utilisé par GOESAERT *et al.*, (2005) pour l'extraction des sous unités de gluténine.

LIAO *et al.*, (2011) ont aussi estimé les liaisons S-S dans les agrégats des protéines du gluten par l'usage du β mercapto-éthanol.

Le seul substituant du β mercapto-éthanol, pour cet objectif, est le dithiolthreitol (DTT) (LAGRAIN *et al.*, 2006 ; WANG *et al.*, 2008).

Grace à sa disponibilité, le β mercapto-éthanol est l'agent dissociant que nous avons sélectionné pour l'estimation des ponts disulfures dans les pâtes boulangères. Les résultats des essais réalisés montrent l'effet dissociant de cet agent ce qui justifie notre choix.

2.1.3. Agents dissociant des liens hydrogènes

L'urée et le chlorure de guandine sont considérés comme des agents dissociant destinés à la rupture des liaisons hydrogènes (STRYER *et al.*, 2003).

Dans notre travail on a été choisi l'urée. Ce choix s'est fait en partant de son utilisation comme agent dissociant pour l'estimation des liaisons hydrogènes dans les gels laitiers par la méthode décrite par LEFEBVER-CASES *et al.*(1998), et dans les agrégats protéiques selon LIAO *et al.*, (2011). STRYER *et al.*, (2003), l'ont également utilisé pour la rupture des liaisons hydrogènes présentes dans la structure secondaire, tertiaire, et quaternaire des protéines. La disponibilité de l'urée est la deuxième raison de ce choix.

En plus de ces travaux antérieurs, des essais ont été réalisés à fin de vérifier l'effet dissociant de l'urée dans les pâtes boulangères. Les résultats obtenus confirment cet effet, ce qui nous a permis de justifier notre choix.

2.1.4. Agents dissociant des interactions ioniques

Le pH acide est une condition nécessaire pour la rupture des interactions ioniques (FEILLET, 2000). Pour cela, tous les acides méritent d'être testés dans notre travail pour l'estimation des interactions ioniques dans les pâtes boulangères. Une étude bibliographique (DUMAS *et al.*, 2007), nous a permis de sélectionner trois acides, à savoir l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide citrique et l'acide acétique.

Des essais préliminaires ont été réalisés pour justifier les effets dissociant de ces trois acides. A partir des résultats de ces essais, on remarque que la forme des pâtes qui ont été mises en contact avec l'acide chlorhydrique reste intacte, et que ces pâtes développent une

coloration violette foncé, qui est probablement le résultat des modifications biochimique des constituants de la pâte par le Hcl. Ces remarques nous menons de juger que l'effet de l'Hcl ne répand pas à notre objectif. Cependant, l'acide citrique ne montre aucun effet sur les pâtes pétries. Les résultats concernant l'acide acétique indiquent que cet agent avoir un effet dissociant sur les pâtes boulangères.

Les utilisations antérieures de l'acide acétique montrent également notre choix. En effet, le pH acide apporté cet agent est utilisé pour la fragmentation des protéines du gluten (GUPTA *et al.*, 1990), et aussi pour l'extraction des protéines de la farine de blé tendre par précipitation (ZHOU *et al.*, 2014). Cet agent est alors exploité pour l'élimination de la matière non protéique dans le cas de l'extraction des protéines selon la méthode décrite par MOOR et STIEN cité par DUMAS *et al.* (2007).

En fonction des types d'interactions existantes dans la pâte boulangère quatre agents dissociant ont été alors choisis (tableau 02).

Tableau 02 : Agents dissociant et types d'interaction visée (* MCCANN *et al.*, 2009, LIAO *et al.*, 2011)

Type d'interaction	Agent dissociant choisi
Interaction hydrophobe	Sodium dodécylsulfate (SDS)
Ponts disulfures	β mercapto-ethanol
Liaisons ioniques*	Acide acétique*
Liens hydrogènes	Urée

2.2. Mise au point d'un mode opératoire pour l'estimation des différents types de dissociation de la pâte boulangère

La mise au point du mode opératoire consiste d'une part, à tester les différentes formes de pâtes, les modes et les durées de contact avec l'agent dissociant permettant l'obtention des meilleures dissociations. D'autre part, nous visons à tracer les évolutions des taux de dissociation en fonction des concentrations en agents dissociant à fin de délimité les domaines de faisabilité de chaque agent dissociant pour établir une classification des pâtes boulangères de différentes qualité.

2.2.1. La préparation de la pâte

Notre travail repose sur la classification des pâtes boulangères par la méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires. Pour ce type de pâtes, tous les ingrédients (farine (100g), sel (2g), levure (2g), eau distillée(x ml)) sont pétris pendant 15 min à une vitesse de 200 tours/min. Après 5 min de repos, les pâtes sont subies un deuxième pétrissage de 15 min à 200 tours/min. La teneur en eau (x ml) ajoutée à la de farine a été déterminée sur la base des essais préliminaires, où nous avons choisi la teneur en eau permettant l'obtention des meilleurs volumes spécifiques.

Une fois pétrie, la pâte est ensuite divisée à des pâtons de 10 g. Ces derniers sont roulés sous forme de petites boulettes subissant ensuite un repos de 20 min. Ce repos est très indispensable pour que les pâtons acquièrent leurs caractéristiques rhéologiques optimales où l'établissement des différents types d'interactions est au maximum (BERLAND, 1993).

2.2. 2. Choix de la forme de la pâte, mode et temps de contact avec l'agent dissociant

Après le repos, ces pâtons sont laminés à fin d'obtenir des disques de 8 cm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur. Le laminage a pour objectif d'augmenter la surface de contact avec la solution de dissociation et de faciliter la pénétration des molécules de l'agent dissociant à l'intérieur de l'échantillon. Ces disques sont alors divisés à des petites lamelles de 5cm², mais à cause de colmatage de ces lamelles, nous avons préféré de mettre ces disques entiers en contact avec les solutions de dissociation.

Durant la mise en contact des disques de pâtons avec les solutions de dissociation sans agitation, nous avons remarqué que ces disques sont colmatés sur la paroi des érlenmeyers. Afin d'éviter ce phénomène de colmatage ainsi que d'augmenter l'effet de l'agent dissociant, en favorisant le contact de ses molécules avec le type d'interaction ciblé, nous avons testé différentes technique de mélange. A savoir l'agitateur magnétique, le mélangeur à trois bras et la plaque d'agitation. D'après les essais réalisés, nous avons constaté d'une part que l'agitateur magnétique et le mélangeur entraînent une destruction presque complète de la structure des pâtons (figure 12), et que leurs résultats obtenus ne sont pas répétables, d'autre part.



Figure 12. Image représentative de l'effet du mélangeur sur les disques de pâtons.

Le mode de mélange que nous avons choisi est celui fait à l'aide de la plaque d'agitation à une vitesse de 50 tours/min. cet outil permet d'une part de favoriser le contact intime de la pâte avec les molécules de l'agent dissociant et de minimiser l'influence de l'agitation sur sa structure, d'autre part. Ce type d'agitation modérée permettrait de récupérer les constituants libérés de la pâte et mettre en contact, à nouveau, les molécules de l'agent dissociant avec ses interactions ciblées.

Les disques de pâtons doivent être totalement immergés dans la solution de dissociation pour que le contact soit uniforme. Le volume de la solution de dissociation convenable permettant au minimum l'immersion de ces disques est de 30ml.

Nous également visons à choisir un temps de contact minimal permettant l'obtention d'une meilleure dissociation. Après le suivi de l'évolution la matière sèche libérée au cours de la dissociation en fonction du temps, nous avons déduit qu'un contact de 30 min de SDS, du β mercapto-éthanol et de l'acide acétique avec les pâtons permet l'obtention d'une dissociation convenable. Alors que dans le cas de l'urée, la dissociation n'a été appréciée qu'après 1 heure de contact.

2.2.3. Choix des concentrations des agents dissociant

Vu l'absence des études antérieurs décrivant le phénomène de la dissociation chimique des interactions moléculaires dans les pâtes boulangères, les solutions de dissociation sont utilisées aux différentes concentrations à fin de tracer les évolutions de la dissociation en fonction des différentes concentrations en agents dissociant. Ces évolutions sont utilisées pour la délimitation des domaines de faisabilité de chaque agent dissociant choisi.

Le choix des concentrations en agents dissociant se fait d'une part sur la base des études antérieures, et en fonction des résultats des essais réalisés d'autre part.

Les concentrations en SDS et en β mercapto-éthanol ont été choisies sur la base des études, respectivement, des interactions hydrophobes et des ponts disulfures dans les agrégats protéiques (LIAO *et al.*, 2011). Les résultats de nos essais nous permettent de vérifier ce choix.

Les concentrations en urée et en acide acétique ont été choisies seulement sur la base des résultats de nos essais. Une gamme de concentrations allant de 0,001 à 10M a été testée pour l'urée et de 0 à 100% pour l'acide acétique.

Une préparation témoin avec l'eau distillée doit être réalisée pour faire éliminer l'effet d'agitation ainsi que celui des molécules d'eau qui entrent dans la préparation des solutions de dissociation. Le tableau 03 résume les concentrations choisies pour les quatre agents dissociant.

Tableau 03. Concentrations à tester des différents agents dissociant.

Agents dissociant	Concentration choisie						
	1	2	4	5	6	8	10
SDS (%)							
Urée (M)	0,001	0,004	0,008	0,01	0,04	0,08	0,1
β mercapto-éthanol(M)	0,01	0,04	0,08	0,1	0,4	0,8	1
Acide acétique (%)	10	20	30	40	50	60	80

2.2. 4. Choix des techniques de séparation des phases

Après le contact de la pâte avec les agents dissociant, les molécules qui étaient préalablement liées dans la pâte (phase solide) sont isolées et libérées dans la phase liquide (solution de dissociation), soit sous forme soluble dans la solution, soit insoluble formant donc des dispersions.

La séparation des phases consiste à faire entrer toutes les constituants libérées de la pâte, qu'elle soit solubles ou insolubles, dans la phase liquide. Selon cet objectif, nous avons estimé que la technique convenable pour cette séparation est la filtration. Pour assurer le

passage de tous les constituants libérés de la pâte, les filtres utilisés doivent avoir une porosité supérieure à la taille des granules d'amidon (1-100 μ m) parce que ce dernier est le constituant ayant la plus grande taille. Le diamètre des pores du filtre utilisé est de 1mm.

2.2.5. Estimation de la dissociation

a. Principe

Dans notre travail nous visons d'estimer les interactions établis entre tous les constituants de la pâte. Pour cela, l'estimation de l'effet dissociant des agents choisis se fait par la détermination quantitative de la matière sèche présente dans le filtrat.

b. Mode opératoire

La détermination quantitative de la matière sèche libérée dans le filtrat pour chaque agent dissociant se fait par la dessiccation du filtrat récupéré à une température de 105°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

c. Expression des résultats

L'estimation quantitative de la dissociation chimique des pâtes boulangères est évaluée par le taux de dissociation (TD) qui est défini comme le rapport entre la teneur de la matière sèche libérée et la teneur de la matière sèche initiale. Ce taux est exprimé par gramme de la matière sèche libérée pour 100 de la matière sèche totale, selon la formule suivante :

$$\text{TD (\%)} = (\text{MSL} / \text{MSI}) \times 100$$

Où : $\text{MSL} = \text{MST} - \text{MSAD}$

$\text{MSI} = \text{MF} + \text{MS} + \text{ML}$

Or :

MSL : Matière sèche en g libérée de la pâte ;

MST : Matière sèche totale en g du filtrat ;

MSAD : Matière sèche en g de l'agent dissociant;

MF : Masse sèche en g de la farine;

MS : Masse sèche en g du sel;

ML : Masse sèche en g de la levure.

Le taux de dissociation obtenu pour l'eau distillée doit être éliminé à ceux des agents dissociant. Des observations qualitatives de l'aspect de la pâte après le contact sont aussi prises en considération entant qu'indicateurs de l'effet dissociant des agents choisis. Toutes les étapes et les paramètres choisis pour notre méthode sont récapitulés dans la figure 10.

2.3. Application de la méthode de dissociation pour la classification des pâtes boulangères de différentes qualités

L'objectif de notre travail est de faire classer les pâtes boulangères de différentes qualités en fonction de leurs interactions moléculaires en se basant sur la méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires impliquées dans la constitution de ces pâtes. Pour cela, la validation de notre méthode repose sur un test de classification des pâtes boulangères de différentes qualités et la comparaison de cette classification avec une autre établie par des méthodes conventionnelles (Alvéographe Chopin, test de panification).

a. Principe

La validation de notre méthode consiste à faire classer trois types de pâtes, deux à base de blé tendre et une sans gluten, en utilisant les intervalles de concentration délimités pour chaque agent dissociant. Ces pâtes sont préalablement classées par des tests de références (Alvéographe Chopin, test de panification). L'obtention de la même classification permet la validation de notre méthode.

b. Mode opératoire

Trois types de pâtes boulangères ont été testés. Pâtes à base de la farine de blé tendre type 1 (PBT1), pâtes à base de la farine de blé tendre de type 2 (PBT2) et pâtes sans gluten (PSG). Chacune de ces pâtes boulangères a été dissociée, dans les domaines de faisabilité de chaque agent dissociant, tout en suivant le mode opératoire établi (figure 13) pour la méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires.

c. Expression des résultats

Les résultats de la classification sont exprimés sous forme des courbes représentantes des évolutions des taux de dissociations des trois types de pâtes en fonction des concentrations en agents dissociant.

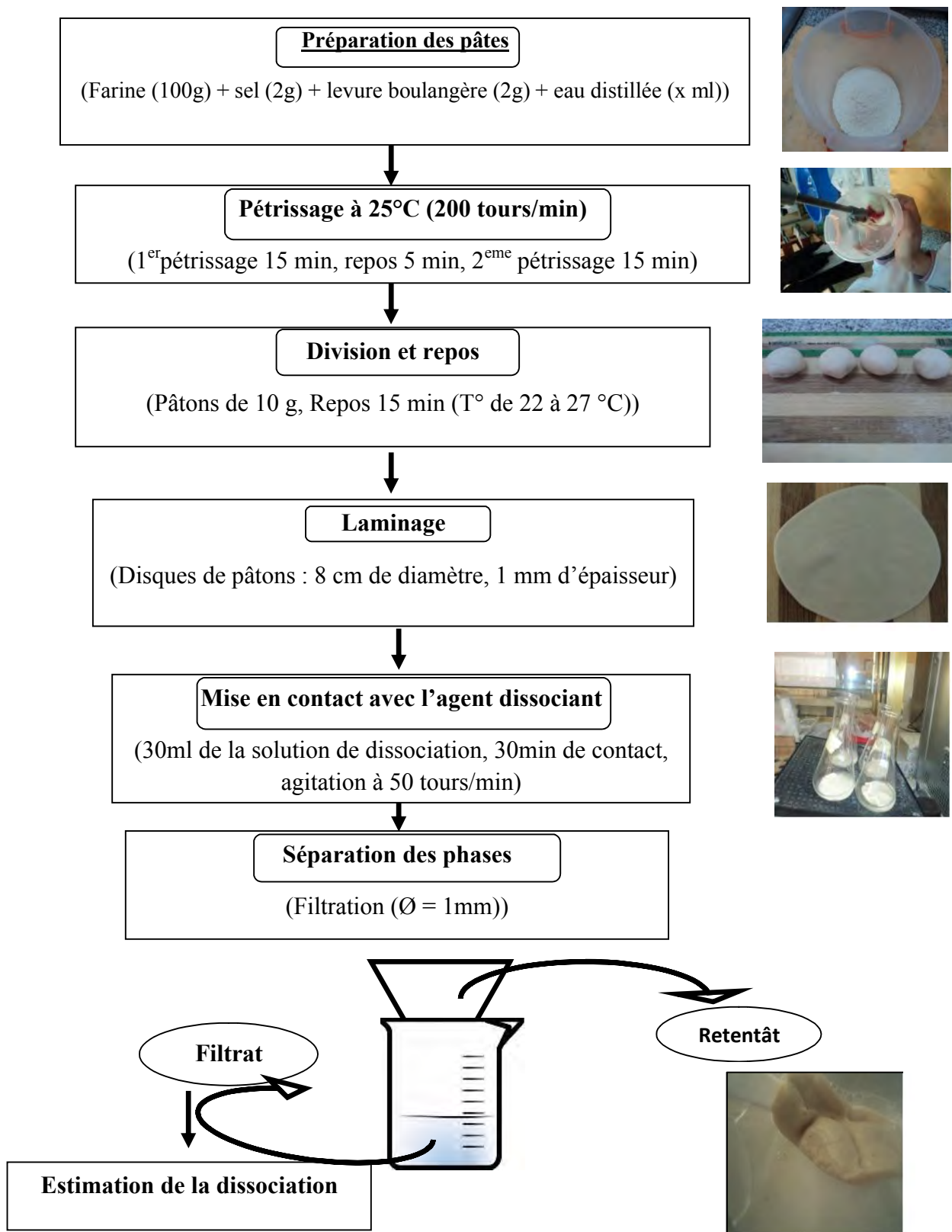


Figure 13. Diagramme récapitulatif des étapes du mode opératoire de la méthode d'approche des interactions moléculaire au sein de la pâte boulangère.

3. Caractérisation des pâtes par des méthodes conventionnelles

La qualité du produit fini de la panification est étroitement liée aux propriétés rhéologiques et technologiques de la pâte boulangère. Ceux-ci représentent les résultats des modifications physicochimiques qui subissent les différents constituants de la farine au cours du processus de la panification FEILLET (2000). CAUVAIN (2003) estime que ces propriétés des pâtes boulangères dépendent principalement des interactions moléculaires établies entre les constituants de la farine.

Caractériser une pâte, il s'agit d'évaluer sa qualité boulangère à travers l'appréciation de ses caractéristiques physiques (propriétés rhéologiques par alvéographe Chopin) et la détermination de la qualité des produits de panification (volume spécifique du pain et structure alvéolaire de la mie par le test de panification). Cette caractérisation a pour objectif de faire classer les trois types de pâtes boulangères utilisées dans notre travail (PBT1, PBT2 et PSG). Cette classification est considérée comme une référence à la quelle seront comparés les résultats de la discrimination établie par notre méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires, à fin de la valider.

3.1. Caractérisation des pâtes boulangères par Alvéographe Chopin

La détermination des propriétés rhéologiques (la viscoélasticité) d'un matériau consiste à mesurer sa déformation et/ou sa vitesse de déformation en fonction de la contrainte à laquelle il est soumis (FEILLET, 2000).

Les qualités rhéologiques notamment alvéographiques sont profondément liées avec la qualité du produit fini. Celles-ci traduisent l'aptitude d'une farine à former une structure apte à donner un produit fini de certaines qualités, à travers l'établissement des interactions moléculaires entre ses constituants (FEILLET, 2000). C'est pour cette raison, les différents types des pâtes ont été caractérisées puis classées à l'aide de l'alvéographe Chopin

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un alvéographe Chopin de la marque « Alvéographe NG Consistographe », au niveau de Laboratoire de la Nutrition et de Technologies Alimentaires (L.N.T.A.).

a. Principe

Le principe de ce test repose sur l'appréciation de la résistance à la déformation d'un disque de pâte pétrie soumis à une extension biaxiale. L'intérêt de cette mesure réside dans la similitude de déformation observée avec celle qui s'exercent au cours de la formation et de l'expansion des alvéoles de gaz au sein de la pâte pendant la fermentation, sous la pression de gaz carbonique (FEILLET, 2000). Il mesure donc la force boulangère à une hydratation constante.

b. Mode opératoire

b1. Calcule de la teneur en eau ajoutée à la farine

- Pâte à base de blé tendre

Selon la norme NF ISO 5530-4, la quantité d'eau à ajoutée doit correspondre à 50 g d'eau pour 100 g de la farine donne une valeur de l'humidité de 15%, soit 125g d'eau ajoutée pour 250g de la farine de blé tendre.

La quantité de l'eau utilisée est indiquée par une burette spéciale graduée en pourcentage de la teneur en eau à ajoutée en fonction de l'humidité de la farine. Ces valeurs sont mentionnées dans un tableau présenté dans le manuel de l'appareil.

- Formule exempte de gluten

Le taux d'hydratation est déterminé à partir des essais préliminaires à l'alvéographe Chopin ayant données des alvéogrammes les plus proches à ceux de la pâte à base de blé tendre. En se basant aussi sur les études effectuées au niveau de laboratoire L.N.T.A. sur les formules exemptes de gluten (riz/fèverole) par BENATALLAH (2009) qui montre que le taux d'hydratation qui donne les alvéogrammes les plus acceptables est de 88,64 g pour 100g de la farine.

b 2. Préparation des pâtes à tester

Trois échantillons ont été testés dans notre travail, deux sont à base du blé tendre des marques différentes. La troisième est celle préparée à la base des ingrédients sans gluten (formule riz-fèverole 2/1).

Mélanger et homogénéiser 250g de l'échantillon de la farine avant l'essai au moyen d'un tamis très ouvert. L'échantillon à tester doit être à la température de laboratoire entre 18 et 22°C.

Pour l'étude des propriétés rhéologiques les pâtes ont été préparées sans levure selon le protocole de la norme ISO 553-4 (GHRAIRIA, 2010). Celles-ci sont pétries dans le pétrin alvéographe Chopin selon les conditions (pétrissage 8 min à 55 tours/min). Après leur extraction, elles ont laminées 7 fois à l'aide d'un rouleau par des mouvements de va et vient, sur un plateau rectangulaire. Ces pâtes sont lubrifiées avec de l'huile de paraffine au cours de toutes les étapes de l'essai. A l'aide de l'emporte pièce, 5 pâtons sont ensuite découpés et sont laissées reposer (20 min à 25°C) dans la chambre de repos de l'alvéographe Chopin.

b3. Mesures alvéographiques

Chaque éprouvette de pâte est testée individuellement. L'alvéographe Chopin utilisé insuffle l'air sous une certaine pression à l'intérieur de la pâte. Celle-ci se gonfle et prend la forme d'une bulle qui va grossir jusqu'au l'éclatement. Le temps d'extension et de la résistance à la rupture de la bulle varie d'un échantillon à un autre.

La pression à l'intérieur de la bulle de pâte est enregistrée comme une courbe sur l'écran du réglage de l'alvéographe « Alvéolink » qui permet de la visualisation, en temps réel, des courbes alvéographiques. Une courbe moyenne est tracée à partir des enregistrements de 5 pâtons.

c. Expression des résultats

Les résultats sont mesurés et calculés à partir de cinq courbes obtenus à l'Alvéolink. Toutefois, si l'une entre elles s'écarte notablement des quatre autres, en particulier à la suite d'une rupture prématurée de la bulle, il n'en sera pas tenu en compte dans l'expression des résultats (figure 14).

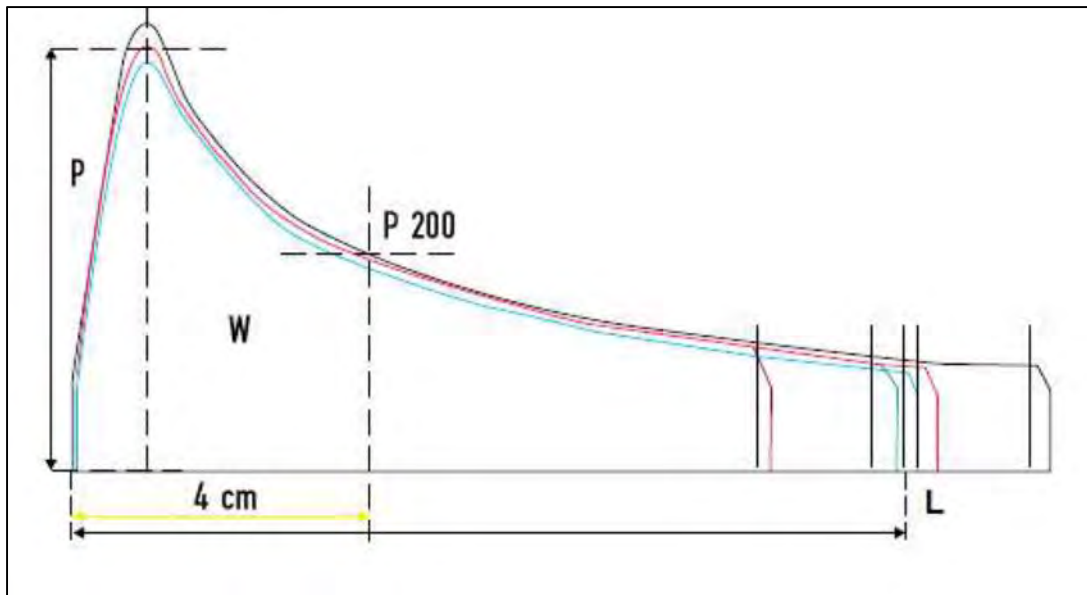


Figure 14. Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre faite sur l'Alvéographe Chopin (DELFRATE 2005).

La lecture d'un alvéogramme se fait à travers les paramètres suivants :

Surpression maximale « P » : la moyenne des ordonnées maximales mesurée en mm et multiplier par 1,1 représente la valeur de la pression maximale qui est en relation avec la résistance de la pâte à la déformation ; « **la ténacité** ».

Abscisse moyenne à la rupture « L » : l'abscisse à la rupture de chaque courbe est mesurée en mm sur la ligne de zéro, à partir de l'origine des courbes jusqu'au point correspondant perpendiculairement à la chute nette de la pression due à la rupture de la bulle. La moyenne des abscisses à la rupture des courbes représente l'**extensibilité** de la pâte.

Indice de gonflement G : représente la moyenne des indices de gonflement lus sur l'abaque de gonflement et correspond aux abscisses de rupture L :

$$G = 2,226 \times \sqrt{L}$$

Travail de déformation « W » : le travail de déformation de la pâte rapporté à un gramme de la pâte, il est évalué en 10^{-4} joule. Il se calcule de la façon suivante :

$$W = 1,32 \times (V/L) \times S$$

Où :

V : volume d'air insufflé en mm^3 ,

L : abscisse moyenne de la rupture, en mm,

S : la surface de la courbe, en cm^2 .

Le rapport P/L : ce rapport est conventionnellement appelé « rapport de la configuration » de la courbe ou rapport de la ténacité au gonflement, représente l'équilibre entre la ténacité et l'extensibilité de la pâte.

Indice d'élasticité « Ie » : c'est le rapport entre la mesure en mm H₂O dans la bulle après avoir insufflé sous le pâton un volume d'air de 200 cm³, qui correspond à une longueur L de 40 mm ou à un gonflement G de 14,1, et le P maximal de la courbe (Ie est toujours inférieur à 100%) :

$$Ie = P_{200}/P \text{ max}$$

II.3.2. Caractérisation des pâtes par test de panification

Selon CALVEL (1980) « La valeur boulangère représente les aptitudes d'un blé ou d'une farine à donner du beau et du bon pain ». Le volume spécifique (V_{sp}) et la structure alvéolaire de la mie sont des caractères de référence de la qualité de la pâte (MONDAL et DATTA, 2008). En effet ces caractères traduisent essentiellement le niveau de la structuration interne de la pâte, résultant du développement des différents types des interactions au cours de la procédure de préparation. Il s'agit donc de distinguer entre les niveaux de la structuration des trois types des pâtes à travers la détermination du volume spécifique du produit fini et la structure alvéolaire de sa mie.

Le test de panification a été réalisé au niveau de laboratoire de la nutrition et de la technologie alimentaire (L.N.T.A.).

a. Principe

Le test de panification consiste à préparer des pains, à base des trois types de farines, qui seront caractérisés par leurs volumes spécifiques et la structure alvéolaire de leurs mies.

b. Mode opératoire

La farine (250g), le sel (5g) et la levure (5g) ont été pétris avec 66 ml d'eau distillée pour 100g des farines de blé tendre et 115 ml pour 100g de la formule sans gluten. Le taux d'hydratation est fixé selon des essais préliminaires.

Le pétrissage se fait à l'aide d'un mélangeur à trois bras (de la marque HEIDOLPH) à une vitesse de 200 tours/min, pendant deux temps de pétrissage de 15 min qui sont séparés

par 5 min de repos. A la sortie du pétrissage, 210 g de la pâte ont été prélevés, fractionner et façonner en trois pâtons de 70 g, puis déposés dans des moules, en TEFALE PROFLEXE, sans couvercle. Les moules sont alors placés dans une étuve de fermentation (de la marque MEMMERET) réglée à 38°C pendant 45 min en présence de la buée pour éviter la fissuration de la surface des pâtons. Les tests de la cuisson des échantillons sont ensuite réalisés dans un four à pâtissier ventilé à une température de 250°C, en présence également de la bouée, la cuisson est alors continuée jusqu'à l'obtention d'une croûte colorée. A la fin de la cuisson, les pains sont démoulés, placer sur une grille et laisser se refroidir à la température ambiante, puis se caractériser.

c. Expression des résultats

La caractérisation des pains après cuisson repose sur la mesure des volumes spécifiques (cm^3/g) des pains, et la description de la structure alvéolaire des mies.

3.2.1. Mesure du volume spécifique

a. Principe

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

b. Mode opératoire

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

c. Expression des résultats

Le volume spécifique (V_{sp}) du pain est exprimé en cm^3/g . il s'agit d'un rapport du volume (V) de pain par sa masse (M).

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

3.2.2. Caractérisation de la structure alvéolaire des pains obtenus par analyse morphologique mathématique

L'organisation alvéolaire de la mie est considérée comme un bon indicateur de la qualité de l'architecture structurale de la pâte (degré d'enchevêtrement du gluten). Celle-ci est en relation étroitement stricte avec l'organisation intermoléculaire des constituants de la pâte qui est le résultat de l'établissement des différents types des interactions moléculaires (PERESSINI *et al.*, 2008).

L'objectif de l'analyse de la texture est la quantification de la distribution spatiale ainsi que les variations locales de niveaux de gris. La présence de petites alvéoles provoque des variations de niveaux de gris plus fréquentes que les grandes alvéoles ce qui induit une texture visuelle plus fine. Parmi les méthodes disponibles, nous avons retenu l'analyse granulométrique en niveaux de gris issue du domaine de la morphologie mathématique (SOILLE, 2003) car elle interprète directement la taille et la forme des objets observés.

a. Principe

L'analyse granulométrique par morphologie mathématique a été développée à l'Ecole des Mines de Paris (SERRA, 1982). Son intérêt pour l'analyse de la taille des alvéoles des pains a été montré par LASSOUAD (2005).

Le principe de base de la morphologie mathématique est de transformer l'image à travers d'un masque de géométrie connue appelé élément structurant que l'on déplace de façon à ce que son origine passe par toutes les positions de l'image. La taille et la forme de cet élément sont choisies pour mettre en évidence certaines caractéristiques de l'image. Les transformations de base sont l'érosion et la dilatation. L'érosion consiste à donner au pixel central la valeur minimale observée dans la fenêtre définie par l'élément structurant et la dilatation la valeur maximale. Les effets respectifs sont de diminuer et d'augmenter la taille des objets clairs (DEVAUX *et al.*, 2009).

b. Mode opératoire

Après leur refroidissement, les pains obtenus sont découpés au milieu par une lame fine. La prise d'image se fait à l'aide d'un scanner de type (EPSON scan). Les tranches du

pain sont placées au centre du scanner et sont recouvertes d'une boîte noire à fin d'optimiser le contraste entre le fond noir et les tranches claires. Les images sont prises avec une résolution de 600 dpi. Elles sont enregistrées en format TIFF non compressé. Le traitement d'image se fait par le logiciel *Granulomorphogui* qui est une interface graphique développée sous *Matlab*.

c. Expression des résultats

Le traitement des images comporte les étapes suivantes :

1. Conversion des images en niveau de gris

Toutes les images doivent être converties en niveaux de gris "échelle 8", cette opération est obtenu sous *imageJ*. Chaque image est codée sous forme d'un tableau de chiffres correspondant aux niveaux de gris des pixels qui la constituent (Figure 15). Une image pixélisée est constituée de petits éléments de forme carrée appelés pixels. Dans le cas des images monochromes, chacun des pixels possède sa propre teinte de niveau de gris qui sera codée informatiquement.

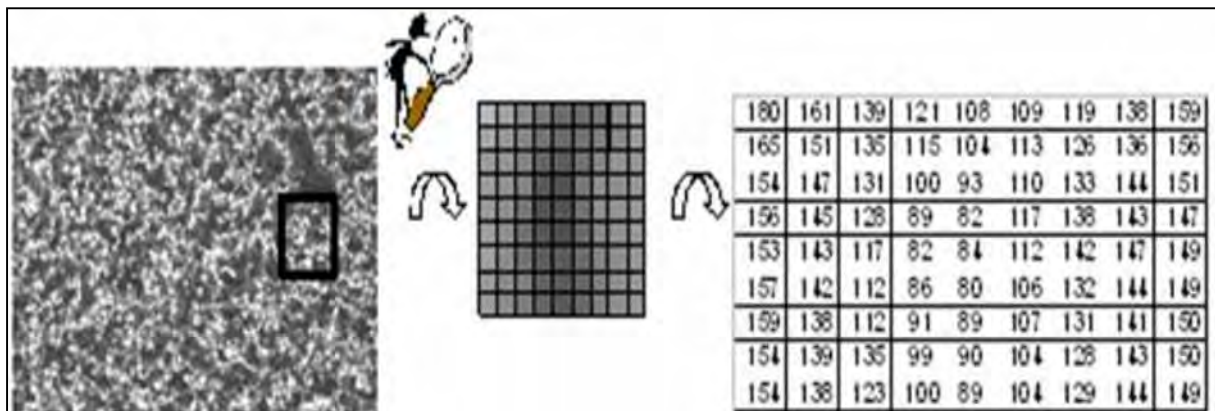


Figure 15. Principe de codage des intensités des niveaux de gris d'une image monochrome sous la forme d'un tableau chiffré (LASSOUED, 2005).

2. Sélection de la région d'intérêt

L'analyse granulométrique ne doit porter que sur la mie, appelée région d'intérêt. Les régions d'intérêt peuvent être déterminées manuellement lorsque le nombre d'images n'est pas trop important. Des procédures automatiques doivent être développées pour les grandes collections d'images.

3. Choix de l'élément structurant

Les éléments structurant usuels sont le carré et la ligne. Le carré est caractérisé par la taille de son côté et la ligne par sa longueur et son orientation. Les alvéoles sont presque toutes fermées en utilisant un élément carré alors que très peu d'entre elles sont fermées en utilisant l'élément linéaire horizontal de même taille. En pratique, les éléments structurants carrés permettent d'analyser les petites dimensions et c'est la raison pour laquelle on l'a choisi dans cette analyse (DEVAUX *et al.*, 2009).

4. Erosion et dilatation

n étapes d'érosions sont appliquées à la zone sélectionnée de l'image. Le niveau de gris total diminue après l'application de chaque étape d'érosion, et les parois des alvéoles se modifient. Pareillement, n étapes de dilatations sont appliquées à la même région d'intérêt. Ces opérations modifient les alvéoles de la mie suite à l'augmentation du niveau de gris total de l'image. Le nombre d'étapes d'érosion et de dilatation est choisi en fonction de la texture des pâtons et de la résolution de l'image. En général, il correspond à la disparition complète de la texture ou d'objets dans l'image.

Il est possible de déduire des informations quantitatives sur la texture des images de mies (de type granulométrique) à partir de l'évolution de la somme des niveaux de gris à chaque étape d'érosion et de dilatation. La somme des niveaux de gris à chaque i ème étape de transformation correspond au volume de l'image V_i . Ce volume est fonction de la présence d'objets sombres (alvéoles) et clairs (parois) de l'image. L'évolution de V_i (figure 16) est fonction du nombre d'objets, de leurs dimensions et aussi de leur niveau de gris. C'est donc simultanément une caractéristique des distributions de taille et des niveaux de gris des objets d'une image.

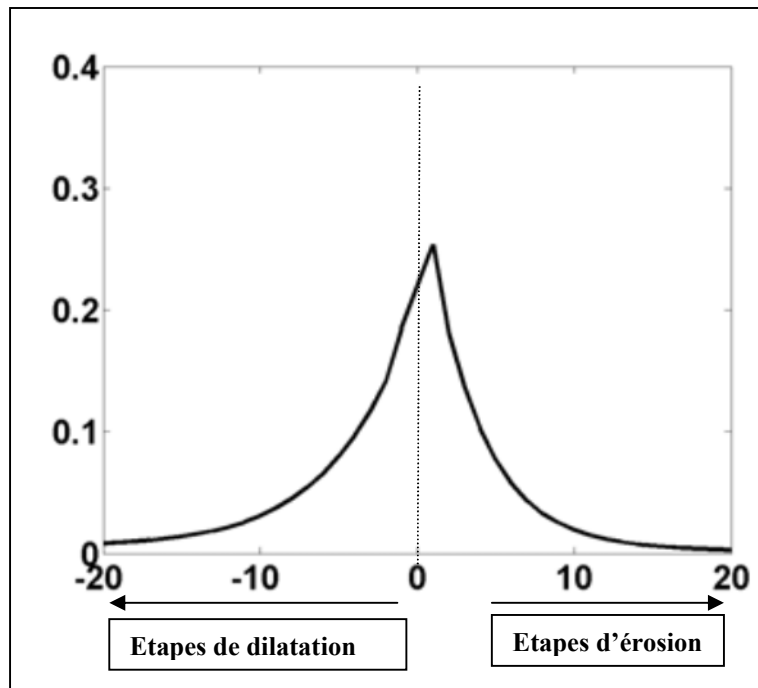


Figure 16. Courbe de texture granulométrique en niveaux de gris (LASSOUED, 2005).

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

$$g_i = (V_i - V_f / V_0 - V_f) \times 100$$

Où

V₀ : est le volume (somme des niveaux de gris) de l'image initiale

V_f : est le volume de l'image à la n ème étape d'érosion ou de dilatation

V_i : est le volume de l'image à l' i ème étape d'érosion ou de dilatation

g_i : est le volume normé de l'image à la i ème étape d'érosion ou de dilatation (LASSOUAD, 2005).

3.3. Caractérisation des pâtes par la détermination du gluten sec et humide

a. Principe

Le dosage du gluten repose sur son solubilité dans l'eau salée et sur son agglomération lors du malaxage sous un courant d'eau (SAYASLAN, 2004 cité dans MARCHETTI *et al.*, 2012).

b. Mode opératoire

Peser 25g de la farine de blé tendre ou de la formule sans gluten puis les verser dans un récipient, aux quels on ajoute environ 12 à 13 ml d'eau distillée. Former une pâte homogène qui au bout de deux à trois minutes de pétrissage ne doit pas adhérer aux parois du récipient. Après 15 min de repos, cette pâte est pétrie dans la main pour la transformer en un pâton homogène s'étirant parfaitement. Ce pâton est Malaxé sous un filet d'eau en le comprimant légèrement, où en le plaçant au dessus d'un tamis destiné à retenir les fragments du gluten qui sont entraînés, pour les récupérer (l'amidon est donc éliminer alors que le gluten se soude peut à peut à lui-même). Lorsque le gluten forme une masse homogène le débit d'eau est accru pour réaliser le lavage jusqu'à l'obtention d'une eau de lavage transparente. Le gluten est alors essoré en le comprimant fortement à plusieurs reprises entre les paumes des mains que l'on a pris soin d'essuyer, jusqu'à ce qu'il adhère à la main. En fin, on pèse rapidement le gluten humide.

L'obtention du gluten sec se fait par le séchage du gluten humide à une température de 102°C, jusqu'à l'obtention d'un poids constant, après environ 18 heures.

c. Expression des résultats

Le gluten humide (GH) est s'exprimé en gramme pour 100g de la farine par :

$$\text{GH} = 100(M_h / 25)$$

Le gluten sec (GS) s'exprime en gramme pour 100g de la farine par :

$$\text{GS} = 100(M_s / 25)$$

Où :

M_h : masse en g du gluten humide ;

M_s : masse en g du gluten sec.

III. Analyse statistique

Dans ce travail les résultats sont exprimés en tant que moyenne \pm écart type. La saisie des résultats se fait dans l'Excel 2007 et le traitement des résultats se fait à l'aide de Excel stat (version 2009). Le test de classification se fait sur la base des résultats de la comparaison entre plusieurs moyennes, celle ci est effectuée par l'analyse de la variance (ANOVA). La modélisation mathématique des courbes a été obtenue par la recherche des fortes corrélations entre le modèle observé et le modèle théorique, à l'aide de l'Excel 2007. Le lien entre les résultats de notre méthode et celles des méthodes de référence s'est fait par le test de corrélation.

A fin de vérifier la répétabilité dans notre mode opératoire, chacun des résultats obtenus est issu de trois essais avec deux mesures pour chacun. La confirmation de la répétabilité de notre mode opératoire s'est faite par la vérification de l'homogénéité des résultats obtenus à chaque concentration pour tous les agents dissociant utilisés. Le test statistique utilisé est le **test de Cochran** (SCHIMMERLING *et al.*, 1998). Ce test repose sur le calcul du critère de Cochran $(C_e)_{cal}$ et de le comparer avec la valeur tabulée (C_t) obtenue sur la table de Cochran (Annexe 02). Pour ce test, les résultats sont homogènes si $(C_e)_{cal}$ est inférieur à C_t . en effet :

$$C_e = \delta^2 \max / \sum \delta^2$$

Où :

δ : Ecart type ;

$(C_e)_{cal}$: critère de Cochran calculé ;

C_t : valeur de Cochran tabulé.

Le niveau de significativité pour tous les tests statistiques réalisés est à 0,05.

CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Caractéristiques physico-chimiques des matières premières

1.1. Composition biochimique

Les composants chimiques de nos farines calculés en gramme pour 100g de la matière sèche, sont présentés dans le tableau 04.

Tableau 04. Composition biochimique des farines pour 100g de la matière sèche

n = 3	FBT 1	FBT 2	Riz	Fèverole	FSG
Humidité	14,08 ±0,34	15,79±0,11	10,74±0,18	12,68 ±0,10	12,03 ±0,13
Protéines totales	12,09 ±1,02	12,47 ± 0	11,92 ±1,03	25,03 ±4,19	16,29±2,08
Lipides libres	0,95 ±0,11	0,98 ±0,04	0,53 ±0,07	1,76 ±0,21	0,94 ±0,12
Cendres	0,94 ±0,25	1,24± 0,66	1,02 ±0,18	2,96 ±0,03	1,14 ±0,20
Glucides totaux*	86 ,02	85,31	86,53	70,25	81,10

*Glucides totaux obtenues par différence, n : nombre d'essais, FSG : Formule sans gluten (2/3 (p/p) riz et 1/3 (p/p) fèverole), FBT1: farine blé tendre type 1, FBT2 : farine blé tendre type 2.

1.1.1. Teneur en eau

La teneur en eau (humidité) est un facteur déterminant de la qualité des farines sur le plan hygiénique car elle influe sur leur préservation au cours de stockage. Sur le plan technologique, elle est utile, d'une part pour calculer les teneurs des autres composants sur une base sèche, et d'autre part pour déterminer la quantité d'eau à ajouter pour la réalisation des tests technologiques nécessitant des teneurs en eau finales constante (tests alvéographiques, tests de panification) (FEILLET, 2000).

Toutes les farines utilisées dans notre travail ont des teneurs en eau se situent entre 10,74 et 15,79%, qui sont inférieur à la limite de 16% exigée pour assurer leur bonne conservation (CHENE, 2001).

La farine de blé tendre FBT1 a une teneur en eau de $14,08 \pm 0,34\%$. Cette valeur est intégrée dans l'intervalle de $[13 - 15,5]\%$ donné par GRANDVOINET et PRATX (1994) pour les farines boulangères. Cependant les teneurs en eau pour les autres types de farines ne sont pas incluses dans cette intervalle, en effet la farine FBT2 donne une teneur en eau de $15,79 \pm 0,11\%$ supérieure à 15%, cela pourrait être expliqué par les exigences du moulin fabricant, alors que celle de la farine FSG ($12,08 \pm 0,13\%$) est inférieure à 13%.

1.1.2. Teneur en protéines totaux

Dans le cas des farines destinées à la panification, les protéines jouent un rôle primordial dans la détermination de la qualité du produit fini à travers leur intervention capitale dans la structuration de ces produits (MARCHETTI *et al.*, 2012). L'importance de la teneur en protéines est étroitement liée à l'aptitude du gluten de produire une pâte avec des caractéristiques rhéologiques désirées (KTENIOUDAKI *et al.*, 2010).

Les deux types des farines de blé tendre FBT1 et FBT2 représentent des teneurs voisines en protéines qui sont respectivement de $12,09 \pm 1,02$ et de $12,47 \pm 0\%$, supérieures à 7% ($N \times 6,25$) qui est le minimum recommandé par la norme CODEX STAN 154-1985 (Rév. 1-1995). Ces teneurs sont proches à celles exigées en panification française (entre 12,5 et 13,5%), et bien positionnées dans l'intervalle de $[11 - 14]\%$ donné par MAILHOT et PATTON (1988) pour que les farines aient une bonne aptitude à la panification.

La farine du riz, qui est à la base de la formule sans gluten, donne la plus faible teneur en protéines ($11,92 \pm 1,03\%$) par rapport à celles des farines de blé tendre. Toute fois, ce taux reste plus élevé que les résultats trouvés par BENATLLAH (2009) (7,9%), GHRAIRIA (2011) (7,24%), et NAMOUS (2013) (7,72%).

La teneur en protéines de la farine de la fève (25,03±4,19%) est la plus importante parmi les autres farines. Elle est bien située dans l'intervalle $[23 - 38,1]\%$ donné par la FAO (1982) et CUQ et LEYNAUD (1992). Cette valeur est plus faible que celles prouvées par BENATALLAH (2009) et GHRAIRIA (2011) qui ont atteints 30%. Les différences observées pourraient être expliquées par l'utilisation de variétés différentes.

Les résultats de la formule FSG obtenus par le calcul 2/3 riz et 1/3 fève montrent une amélioration de 1,36% de la teneur en protéines pour atteindre $16,29 \pm 2,08\%$. Cette

augmentation semble améliorer la balance en acides aminées de la farine du riz, d'où l'objectif principal de la supplémentation céréale-légumes secs (BENATALLAH, 2009).

1.1.3. Teneur en lipides libres

Comme tous les composants de la farine, les lipides, et en particulier, les lipides libres jouent un rôle important dans le développement de la qualité rhéologique de la pâte et donc technologique du pain (GOESAERT *et al.*, 2005).

Les farines de blé tendre FBT1 et FBT2 donnent presque les mêmes quantités des lipides libres qui sont respectivement de $0,95 \pm 0,11\%$ et de $0,98 \pm 0,04\%$. La farine du riz contient le taux le plus faible des lipides libres avec $0,53 \pm 0,07\%$. La farine de la fèveole donne quand à elle, la teneur la plus importante en lipides libres avec $1,76 \pm 0,21\%$. Ces valeurs sont bien situées dans les intervalles apportées par la FAO (1982) et ATWELL (2001) qui sont de 1 à 2% pour les farines de blé tendre, de 0,3 à 0,5% pour la farine du riz, et de 1,5 à 2% pour la farine de la fèveole. La supplémentation de la farine du riz-fèveole a permis l'obtention d'un taux de lipides libres de $0,94 \pm 0,12\%$.

Quelque soit la nature de la matière première étudiée, les faibles teneurs lipidiques favoriserait le bon stockage de nos farines.

1.1.4. Teneur en cendres

La teneur en cendres est considérée comme un critère de choix des farines car elle nous renseigne sur leur richesse en enveloppes (JEANTET *et al.*, 2007).

La farine de blé tendre FBT2 représente une teneur en cendres ($1,24 \pm 0,66\%$) supérieure à celle de la farine de blé tendre FBT1 ($0,94 \pm 0,25\%$). Nos valeurs restent supérieures à celles données par BOUDREAU et MENARD (1992) qui préconisent des teneurs en cendres pour les farines panifiables inférieures à 0,6%. Cette différence pourrait être expliquée par la performance d'extraction des moulins.

La farine du riz contient une teneur en cendres de $1,02 \pm 0,18\%$ et qui est proche à celle de la farine du blé tendre FBT2. La farine de la fèveole quand à elle, se caractérise par la teneur la plus élevée ($2,96 \pm 0,03\%$) par rapport aux autres types de farines. Les fortes teneurs en cendres observées dans la farine de fèveole pourraient être expliquée par un manque

d'épuration des matières premières d'une part, et aux variétés utilisées d'autre part (CUQ et LEYNAD-ROUAUD, 1992).

Pour la farine du riz, les faibles teneurs en cendres pourraient être dues aux traitements préalables de décorticage et de blanchiment.

1.2. Distribution granulométrique des farines

Selon FEILLET (2000) la dénomination farine concerne les particules de l'amande friable qui ont des tailles allant de 30 à 200 μ m. La détermination de la distribution granulométrique des farines permet d'avoir une idée sur la finesse des particules, sachant que celles-ci jouent un rôle important dans la vitesse d'hydratation et la quantité d'eau absorbée (COLAS et THARRAULT, 1997).

Les résultats obtenus pour les farines utilisées dans notre travail sont récapitulés dans le tableau 05.

Tableau 05. Distribution granulométrique des farines en gramme pour 100g de la farine

Ouverture de mailles (μ m)	FBT1	FBT2	Riz	Fèverole	FSG
> 200	4,80 \pm 0,65	2,73 \pm 1,39	3,33 \pm 1,86	3,05 \pm 2,38	3,24
[200-150[	15,84 \pm 0,43	34,89 \pm 1,42	36,19 \pm 4,82	18,78 \pm 0,93	24,58
[150-125[	25,71 \pm 0,37	32,69 \pm 1,59	19,34 \pm 2,55	34,61 \pm 4,40	29,52
[125-100[	20,44 \pm 2,25	17,08 \pm 0,79	16,26 \pm 1,36	22,86 \pm 4,26	20,66
[100-75[	27,55 \pm 2,79	10,41 \pm 2,16	18,15 \pm 4,70	17,01 \pm 5,99	17,39
<75	3,74 \pm 0,31	1,35 \pm 0,26	4,37 \pm 1,68	1,54 \pm 1,94	2,48
Total	98,08	99,15	97,64	97,85	97,87

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

Toutes les farines utilisées donnent plus de 90% de ses particules ayant des dimensions incluses dans l'intervalle] 200 -75] μ m. La farine qui contient la fraction granulométrique inférieure à 200 μ m la plus importante est FBT2 (99,15%), suivi par FBT1(98,08%), puis FSG (97,87%).

Les fractions granulométriques modales pour FBT1, FBT2, FSG sont respectivement : [100-75[μm avec $27,55 \pm 2,79\%$, [200-150[μm avec $34,89 \pm 1,42\%$, et [150-125[μm avec $29,52\%$. On note une hétérogénéité dans la répartition granulométrique des farines étudiées.

D'après les résultats obtenus pour la caractérisation physico-chimique, on peut conclure que les deux types des farines de blé tendre (FBT1, FBT2) ne représentent pas des différences significatives en ce qui concerne leur composition biochimique.

Les résultats obtenus, pour la formulation des ingrédients sans gluten (FSG), montrent l'effet avantageux de la supplémentation riz-fèverole dans l'amélioration compositionnelle comparativement aux farines témoins (blé tendre). A l'exception, de la teneur en protéines qui est plus importante pour la farine FSG que pour les farines du blé tendre.

Par rapport à la distribution granulométrique, on peut constater que ces trois types de farines présentent une hétérogénéité de la répartition granulométrique.

2. Caractéristiques rhéologiques et technologiques des pâtes

La caractérisation rhéologique ainsi que technologique d'une pâte consiste à estimer la tendance d'une farine à mettre en place certaines caractéristiques (extensibilité, élasticité, ténacité, structure alvéolaire, volume spécifique). Ces dernières sont considérées comme les réponses de la fonctionnalité des constituants de cette farine, qui repose sur l'établissement des interactions moléculaires (CAUVAIN, 2003). Sur la base de ces caractéristiques se fait la classification ainsi que la destination des farines suivant les exigences de leurs utilisations (FEUILLET, 2000).

2.1. Propriétés rhéologiques des pâtes par l'alvéographe Chopin

La caractérisation d'une pâte par l'alvéographe Chopin est une indication de son comportement rhéologique durant son développement.

Les résultats de la caractérisation de nos pâtes sont mentionnés dans le tableau 06, et les alvéogrammes obtenus pour chaque type de farine sont mentionnés dans l'annexe I.

Tableau 06. Caractérisation rhéologique des pâtes par l'Alvéographe Chopin

Caractéristiques rhéologiques	FBT1	FBT2	FSG	Normes algériennes	Normes françaises
W ($\times 10^{-4}$ J)	168	145	3,59	[130 à 180]	[200 à 220]
P/L	4,47	0,98	2,25	[0,45 à 0,65]	[0,5 à 0,7]
G (cm ³)	12,2	18,1	5,45	>20	[20 à 24]

G : Indice de gonflement (cm³), **P/L** : Rapport de configuration (ténacité/extensibilité), **W** : Travail de déformation (J).

2.1.1. Rapport de configuration « P/L »

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

Les pâtes formées à base FBT1 représentent un rapport de configuration de 4,47. Ce rapport est nettement plus élevé que les exigences de panification algériennes (J.O.R.A. 1991) [0,45 - 0,65], françaises [0,5 - 0,7] (GUINET et GODON, 1994), et de l'association Italienne du commerce des céréales pour une farine supérieure de panification [0,8 - 1,2] ainsi qu'une farine de courante de panification [0,7 à 1,2] (BORASIO, 1997).

Les pâtes de FBT2 ont un rapport de configuration (P/L) de 0,98. Cette valeur malgré qu'elle soit supérieure aux seuils fixés par les normes algériennes et françaises, elle permet de classer ce type de farine comme excellente pour la panification selon les chiffres apportées par LIU *et al.* (1996) qui varient de 0,8 à 2, ainsi que ceux fixées par l'association Italienne du commerce des céréales pour les farines supérieures de panification (0,8 à 1,2) (BORASIO, 1997). Cette valeur est aussi incluse dans l'intervalle [0,44 - 1,2] apporté par AIT KADDOUR *et al.*(2009) qui ont classé les farines panifiable selon leurs caractéristiques rhéologiques.

Selon DELFRATE et STEPHANE (2005), les farines qui ont un rapport P/L >1 donneront des pâtes trop tenaces, peu tolérantes au pétrissage, montrant une tendance à absorber beaucoup d'eau, ainsi qu'un faible gonflement. Contre des pâtes trop extensibles et difficiles à manier pour des rapports P/L faible < 0,3.

Le rapport de configuration des ingrédients sans gluten FSG de 2,25 est élevé comparativement à ceux du témoin FBT2 et des normes de panification algériennes (J.O.R.A. 1991) [0,45 - 0,65], et françaises [0,5 - 0,7] (GUINET et GODON, 1994). Cette valeur nous renseigne sur la forte ténacité et la faible extensibilité de ces pâtes.

2.1.2. Indice de gonflement « G »

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

Les valeurs des indices gonflement enregistrés pour les farines de blé tendre FBT1 et FBT2 sont respectivement 12,2 cm³ et 18,1 cm³. Ces valeurs sont inférieures à celles indiquées par les normes de panification algériennes (J.O.R.A. 1991) (>20 cm³) et françaises (GUINET et GODON, 1994) [20 - 24] cm³.

La valeur de gonflement des ingrédients sans gluten est de 5,45 cm³. Elle est inférieure à celle obtenus par BENATALLAH (2009) (8 cm³). En revanche, ces résultats sont nettement plus faibles comparativement à ceux du témoin de blé tendre et des normes algériennes (J.O.R.A. 1991) (>20 cm³) et françaises [20 - 24] cm³ de panification (GUINET et GODON, 1994).

2.1.3. Travail de déformation « W »

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

La farine du blé tendre FBT1 a un travail de déformation de 168×10⁻⁴ J, plus élevé que celui de la farine de blé tendre FBT2 qui est de 145×10⁻⁴J. Ces deux valeurs sont incluses dans les exigences de panification algériennes ([130 - 180] ×10⁻⁴J) (J.O.R.A. 1991), et de l'association Italienne du commerce des céréales ([140 - 170] ×10⁻⁴J) pour une farine courante de panification (BORASIO, 1997).

La farine de la formule sans gluten FSG présente une valeur du travail de déformation (W) de 3,29× 10⁻⁴J. Des résultats similaires ont été rapportés par BENATALLAH (2009) (13,8× 10⁻⁴J). Toutefois, ces résultats sont nettement faibles, et loin des valeurs du témoin de

blé tendre et des normes algériennes ($[130 - 180] \times 10^{-4}J$) (J.O.R.A. 1991) et françaises ($[200 - 220] \times 10^{-4}J$) de panification (GUINET et GODON, 1994).

2.2. Teneur en gluten sec et humide

La teneur en protéines totales n'est pas suffisante pour la caractérisation d'une pâte boulangère. Il est donc important de quantifier le gluten humide et sec, sachant que le gluten humide représente les protéines insolubles dans l'eau. Grâce à son extensibilité et élasticité, le gluten confère à la pâte ses caractéristiques rhéologiques, d'où l'importance de son dosage (MIRALBES, 2004). Les résultats obtenus pour le gluten humide et sec sont mentionnés dans le tableau 07.

Tableau 07. Teneurs en gluten humide et sec en gramme pour 100g de la farine

	FBT1	FBT2	FSG
GH	25,45±1,63	27,48±1,4	0
GS	9,00±0,49	8,85±0,28	0

GH: gluten humide ; **GS :** gluten sec.

Les teneurs en gluten sec pour les farines de blé tendre FBT1 et FBT2 sont respectivement 9 et 8,85%. Aucune différence significative n'a été notée pour les teneurs en gluten des farines de blé. Toutefois, ces valeurs demeurent dans les normes en gluten sec d'une farine panifiable (7 à 12) % (LECOQ, 1965).

2.3. Test de panification

L'essai de panification permet d'apprécier l'aptitude d'une farine à se transformer en pain de bonne qualité (FEILLET, 2000).

La qualité du pain est le résultat de l'évolution structurale que subit la pâte durant les différentes étapes de la panification, et qui sera stabilisée au cours de la cuisson (BALAJI, 1991). Cette qualité se repose essentiellement sur le volume spécifique du pain et la structure alvéolaire de la mie.

Dans ce travail, nous avons mesuré les volumes spécifiques des pains issus de trois farines étudiées et avons caractérisé leurs mies, et ce du point de vue structurel, dans le but

d'établir une classification de ces farines par des techniques conventionnelles aux quelles nous comparerons la classification que nous avons établie par les agents dissociant.

2.3.1. Volume spécifique

C'est le critère le plus important pour l'appréciation de la qualité du produit fini. Il donne des renseignements sur la capacité de rétention gazeuse d'une pâte, qui est proportionnelle au volume final du pain. Les résultats obtenus pour nos farines sont montrés dans la figure 17.

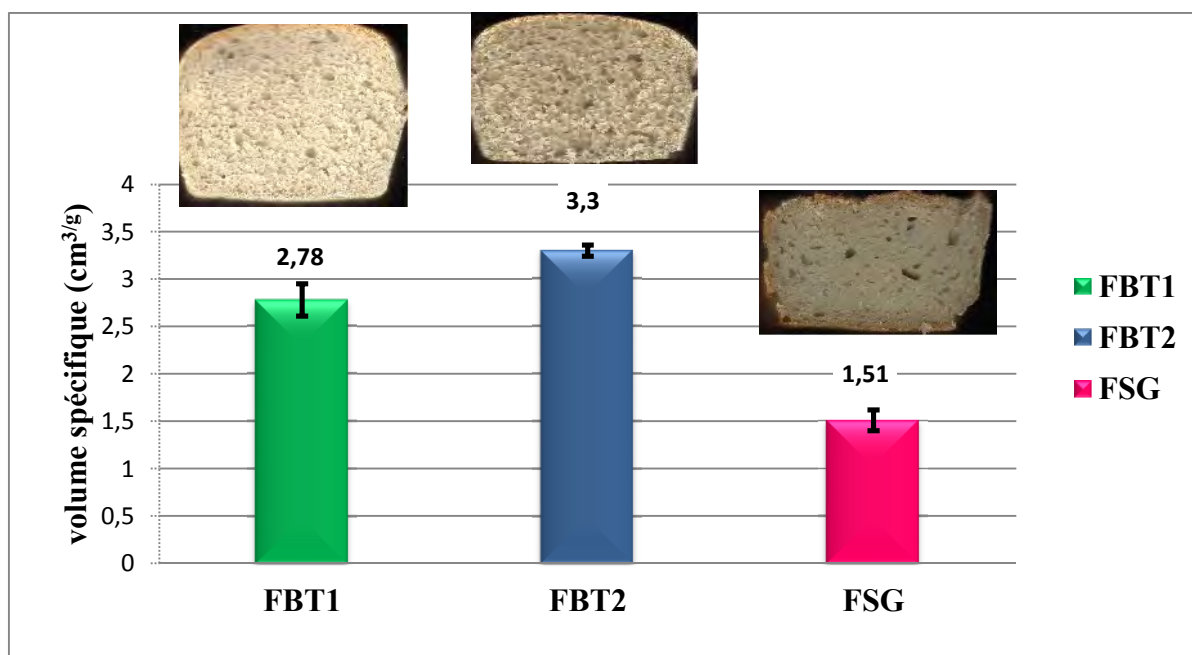


Figure 17. Volumes spécifique des pains (FBT1 : farine blé tendre type 1, FBT2 : farine blé tendre type 2, FSG : formule riz-fêverole).

Les résultats obtenus montrent des différences significatives ($p < 0,05$) entre les volumes spécifiques des trois échantillons de farines, où les pains à base de la farine du blé tendre FBT2 présentent le meilleur volume spécifique de $3,3 \text{ cm}^3/\text{g}$, suivi par celui de la farine du blé tendre FBT1 qui est de $2,78 \text{ cm}^3/\text{g}$, puis par celui de la farine de la formule FSG donnant un volume spécifique de $1,51 \text{ cm}^3/\text{g}$.

Malgré les teneurs en protéines élevées que nous avons notées pour la formule sans gluten FSG ($16,29 \pm 2,08\%$), contre respectivement $12,09 \pm 1,02$ et $12,47 \pm 0\%$ pour la FBT1 et FBT2, on observe des volumes spécifiques plus élevés pour ces dernières. Ceci pourrait être dû à la qualité des protéines, où on note la présence du gluten pour les farines du blé et son absence pour la FSG. En effet KAWAMURA-KONISHI *et al.*, (2013) montrent l'incapacité

des protéines du riz à former un réseau tridimensionnel viscoélastique semblable à celui du gluten, ce qui se traduit par une faible rétention gazeuse.

2.3.2. Propriétés texturales des mies par Analyse d'Image

L'alvéolage de la mie est le résultat d'une organisation supramoléculaire bien défini des constituants de la farine au sein de la pâte. Cette organisation est indispensable pour former et stabiliser les alvéoles gazeuses durant les étapes de la panification. Les caractéristiques de la mie à savoir, la taille et la distribution des alvéoles, l'épaisseur de leurs parois, sont aussi utilisées comme un critère de choix des produits de la panification (FEILLET, 2000).

Les propriétés texturales des pâtons fermentés avec et sans gluten sont étudiées. Le traitement des images issues du scanner est basé sur la morphologie mathématique. L'étude des variations de la somme des niveaux de gris lors de dilatation successive donne des informations de type granulométrique sur les alvéoles. L'opération duale, l'érosion, permet l'obtention de courbes de granulométrie en niveaux de gris des parois. Les courbes obtenues pour nos farines sont présentées dans la figure 18, où la partie droite de la figure décrit les variations de la taille des parois des alvéoles et la partie gauche la taille des alvéoles.

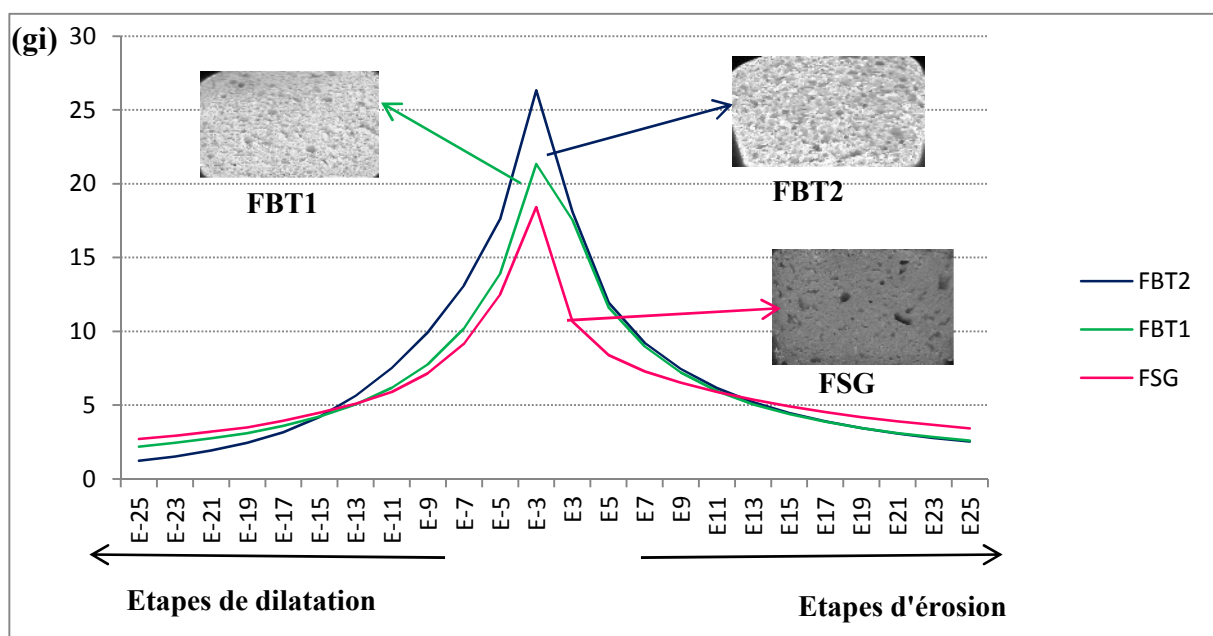


Figure 18. Courbes granulométriques en niveaux de gris des farines : blé tendre type 1 (FBT1), farine blé tendre type 2 (FBT2), formule sans gluten (FSG).

Selon BOUREKOUA (2013), la hauteur des pics de la courbe granulométrique serait proportionnelle à une texture fine et un nombre important en alvéoles de petite taille. En fonction de ce critère, on déduit que la farine de blé tendre FBT2 a une aptitude importante à donner des pains avec des mies de texture fine et de nombre considérable des alvéoles de petite taille, suivi par la farine de blé tendre FBT1. Par ailleurs, les pains de la formule sans gluten FSG sont classés en troisième position, avec des alvéoles de grande taille ayant de paroi épaisses. GANDIKOTA et MACRITCHIE (2005) ont montré que la taille ainsi que les distributions alvéolaires sont étroitement liées avec les propriétés rhéologiques de la pâte et plus particulièrement avec la rhéologie de la matrice du gluten. Ce qui pourrait expliquer nos résultats.

3. Classification des pâtes boulangères sur la base de leurs propriétés rhéologiques et technologiques

Dans le but de valider notre méthode de classification des farines de différentes qualités par dissociation chimique des interactions moléculaires, il est indispensable de les classer d'abord par des méthodes conventionnelles se basant essentiellement sur les caractéristiques rhéologiques des pâtes par l'Alvéographe Chopain et le test de panification. L'obtention du même ordre de classification des farines permettrait la validation de notre nouvelle méthode étant qu'un outil simple et rapide de classification.

L'analyse de la variance (ANOVA) entre les paramètres rhéologiques (P/L, W, G), technologiques (volume spécifique), et texturales (volume normé de l'image « gi ») montre qu'il y a une différence significative ($p < 0,0001$) entre les qualités de nos pâtes.

Sur la base de ces résultats et en comparaison aux normes de panification ((J.O.R.A. 1991; GUINET et GODON, 1994; BORASIO, 1997) pour les paramètres rhéologiques, (FEILLET, 2000) pour les paramètres technologiques, et (LASSOUAD, 2005; BENTALLAH, 2009; BOUREKOUA, 2013) pour les propriétés texturales), nous pouvons déduire la classification suivante en partant de la pâte de la meilleure qualité : FBT2, FBT1, puis FSG.

4. Mise au point d'une méthode pour la classification de pâtes boulangères sur la base des interactions impliquées entre leurs constituants

Les farines panifiables sont classées selon leur aptitude à former des pains avec des volumes spécifiques importants et de structure alvéolaire convenable. Ces deux paramètres sont le résultat d'une organisation structurale établie par l'association des constituants de la farine hydratée sous l'action des forces du pétrissage. Cette association se fait grâce à des interactions chimiques. L'aptitude des composants de la farine à former ces liens est en relation directe avec leurs propriétés techno-fonctionnelles. C'est pour cette raison, que l'objet de ce travail est de classer les pâtes panifiables en fonction des différents types d'interactions moléculaires pouvant exister au sein des pâtes. C'est dans ce contexte, que nous avons testé plusieurs agents dissociant selon la nature de ces interactions

4.1. Choix et délimitation des domaines de faisabilité des agents dissociant

Le travail que nous avons effectué repose sur la dissociation chimique des interactions moléculaires existantes dans la pâte boulangère. Pour atteindre cet objectif, des essais ont été réalisées et les principaux résultats que nous avons obtenus sont :

- **Les agents dissociant** les plus appropriés pour chaque type d'interaction sont : le SDS pour les interactions hydrophobes, le β mercapto-éthanol pour les liaisons disulfures, l'acide acétique pour les interactions ioniques, et l'urée pour les liens hydrogènes.
- **Les meilleurs temps et formes de contact** ayant permis l'optimisation des taux de dissociation sont : la forme de disque de 8cm de diamètre et 1mm d'épaisseur mise en contact avec le SDS, le β mercapto-éthanol et l'acide acétique pendant 30min contre 1 heure pour l'urée.
- **La délimitation des intervalles de concentration** à vérifier pour chaque agent dissociant a fait ressortir ce qui suit : [0 - 10]% pour le SDS, [0 - 1] M pour le β mercapto-éthanol, [0 - 60]% pour l'acide acétique, et [0 - 0,01] M pour l'urée.

Pour le SDS au-delà de la concentration de 10%, nous avons observé une saturation de la solution de dissociation, et que les taux de dissociation sont inférieurs à ceux de l'eau distillée. Pour le β mercapto-éthanol, la concentration 1M permet d'entraîner une dissociation maximale de la pâte. L'effet dissociant de l'urée ne sera appréciable qu'à des concentrations inférieures à 0,1 M. À une concentration de 1M ou de 10M les taux de dissociation sont négatifs avec respectivement - 1,46% et - 4,5%. Ce résultat pourrait être expliqué le passage

des molécules de l'urée dans le filtrat, se qui masquerait son effet dissociant lors de la détermination quantitative au cours de la soustraction de quantité de cet agent à partir de la matière sèche totale libérée. En ce qui concerne l'acide acétique, le taux de dissociation à 80% est de 0%. C'est pour cette raison, nous avons délimité l'intervalle de concentration de cet agent à 60%.

En conclusion à cette partie nous récapitulons dans le tableau 08 les intervalles de concentration des agents dissociant à vérifier des différents agents dissociant choisis.

Tableau 08. Tableau récapitulatif des domaines de faisabilité des agents dissociant choisis

Agent dissociant	Intervalle de faisabilité à vérifier	Temps de contact
SDS	[0 - 10]%	30 min.
β mercapto-éthanol	[0 - 1] M	30 min.
Acide acétique	[0 - 60]%	30 min.
Urée	[0 - 0,1] M	1 heure

4.2. Estimation des taux de dissociation en fonction des concentrations en agents dissociant

Concernant cette partie, il est important de voir l'évolution de l'effet dissociant de chaque agent sur les pâtes boulangères vu l'absence de données décrivant ce phénomène dans la littérature. Pour cela, pour chaque agent dissociant, nous avons tracé l'évolution du taux de dissociation en gramme de la matière sèche dissociée pour 100g de la matière sèche initiale dans le domaine de faisabilité en concentration prédéfinie (tableau 08). L'objet de cette partie de notre étude est de délimiter les domaines de faisabilité finaux où les taux de dissociation sont au maximum à fin de les appliquer dans la classification des pâtes boulangères.

4.2.1. Cas des interactions hydrophobes

D'après les résultats des essais réalisés, l'agent dissociant choisi pour la rupture des interactions hydrophobes dans les pâtes boulangères est le SDS avec un intervalle de concentration de [0 - 10]%. Le contact est effectué durant 30min.

Les disques des pâtons mis en contact avec la solution de dissociation à différentes concentrations en SDS montrent l'appariation des ruptures de la structure continue des

surfaces des disques, et plus particulièrement au niveau des périphéries, comme il est montré dans la figure 19.

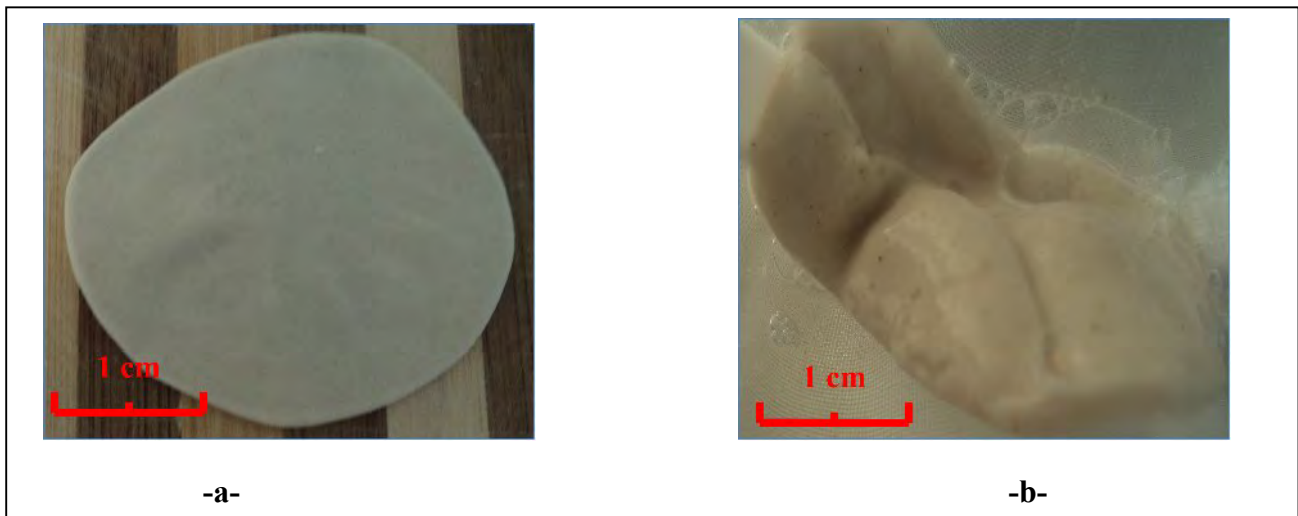


Figure 19. Image représentative de l'effet dissociant de SDS. a : disque de pâton laminé à l'état natif, b : disque de pâton après 30 min de contact avec une solution de 3% en SDS.

On observe aussi la diminution de l'épaisseur de ces disques par rapport ceux mis en contact avec l'eau distillée. On remarque que cet effet est proportionnel avec la concentration en SDS. D'après cette description qualitative on peut déduire que le SDS entraîne un effet dissociant des interactions hydrophobes dans la pâte boulangère.

Les résultats de l'estimation quantitative de l'effet dissociant du SDS sont illustrés dans la figure 20. Cette figure représente l'évolution des taux de dissociation de la pâte boulangère en fonction des concentrations en SDS.

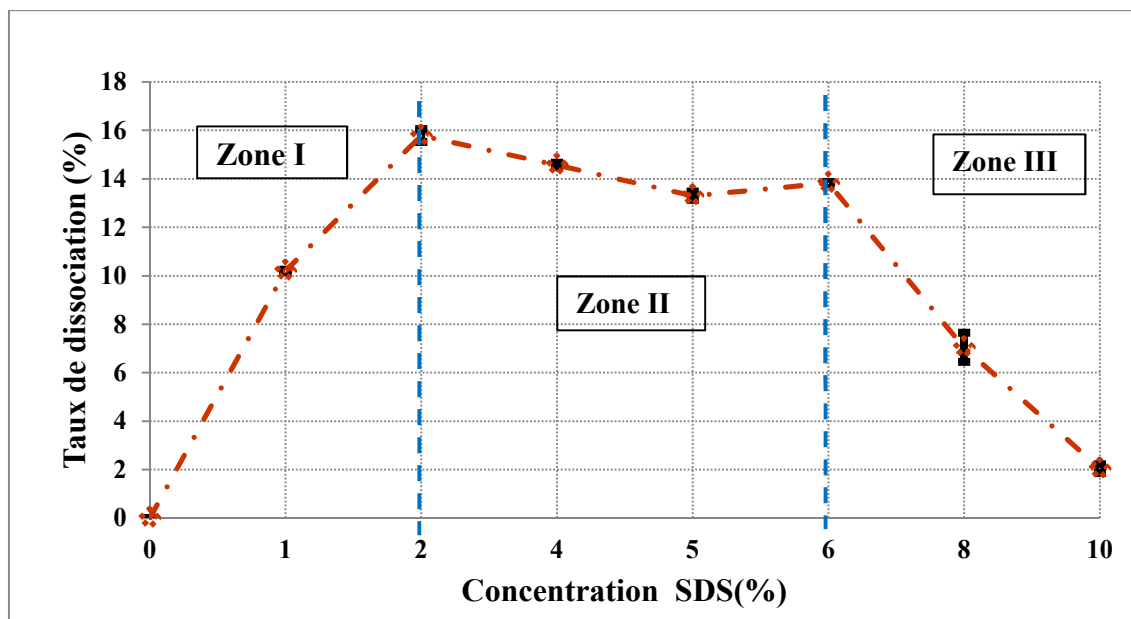


Figure 20. Evolution du taux de dissociation de la pâte en fonction de la concentration en SDS.

L'évolution de l'effet dissociant de l'SDS se divise en trois zones. La zone I de]0 - 2] % en SDS montre une augmentation proportionnelle et positive de l'effet dissociant du SDS. Un maximum de dissociation de 15,78% est noté à 2% en SDS. Cette phase se caractérise par une vitesse de dissociation importante (pente = 7,8).

La zone II se situe au sein de l'intervalle de concentration en SDS de] 2 - 6] %. Cette phase montre une stabilité de dissociation (pente= 0,002). Cette stabilisation se caractérise par un taux de dissociation moyen de 14%.

La troisième phase qui se limite dans l'intervalle] 6 - 10] % de SDS montre une chute des taux de dissociations jusqu'au 2,04% à 10% en SDS. Dans cette phase, nous constatons que les taux de dissociation sont inversement proportionnels avec les concentrations en SDS (pente= -2,74). Ceci pourrait être expliqué par la soustraction de la matière sèche du SDS à partir d'une quantité constante de la matière sèche libérée, ce qui indiquerait que l'effet dissociant du SDS se stabilise à une concentration de 6%. Cette indication a été confirmée par la description qualitative des pâtes. Par ailleurs, l'allure en cloche de cette évolution permet d'obtenir les mêmes taux de dissociation dans les intervalles de [0,1 - 1,5] % et de] 6 - 10] %.

Le choix de concentrations qui seront appliquées dans la classification des pâtes boulangères repose sur celles qui permettront de donner le maximum de dissociation. Pour le SDS l'intervalle choisi est de [0 - 4] %.

Des études sur l'estimation des interactions hydrophobes dans les gels laitiers ont montré une dissociation maximale de 80% à des concentrations en SDS allant de 0,1 à 1 % (BENYAHYA-KRID *et al.*, 2010, ZIKIOU, 2013). Cette forte dissociation observée pourrait être expliquée par la consistance fragile des gels laitiers comparativement à celle des pâtes boulangères, où nous avons trouvé au maximum 15,78% à 2% en SDS.

4.2.2. Cas des ponts disulfure (S-S)

D'après les résultats des essais réalisées le β mercapto-éthanol montre un effet dissociant des liaisons S-S dans un intervalle de concentration de [0 - 1]M durant un temps de contact de 30 min.

Lors de la mise en contact des disques de pâtons avec les solutions de dissociation on remarque qu'il y a une différence nettement significative entre l'effet de l'eau et celui du β mercapto-éthanol sur les pâtons. En effet, cet agent dissociant montrerait une forte dissociation de ces derniers par la destruction du réseau protéique (figure 21), entraînant alors la libération des autres composants de la pâte préalablement adhérents au squelette du gluten. Cet effet dissociant est apparu proportionnel à la concentration en β mercapto-éthanol.

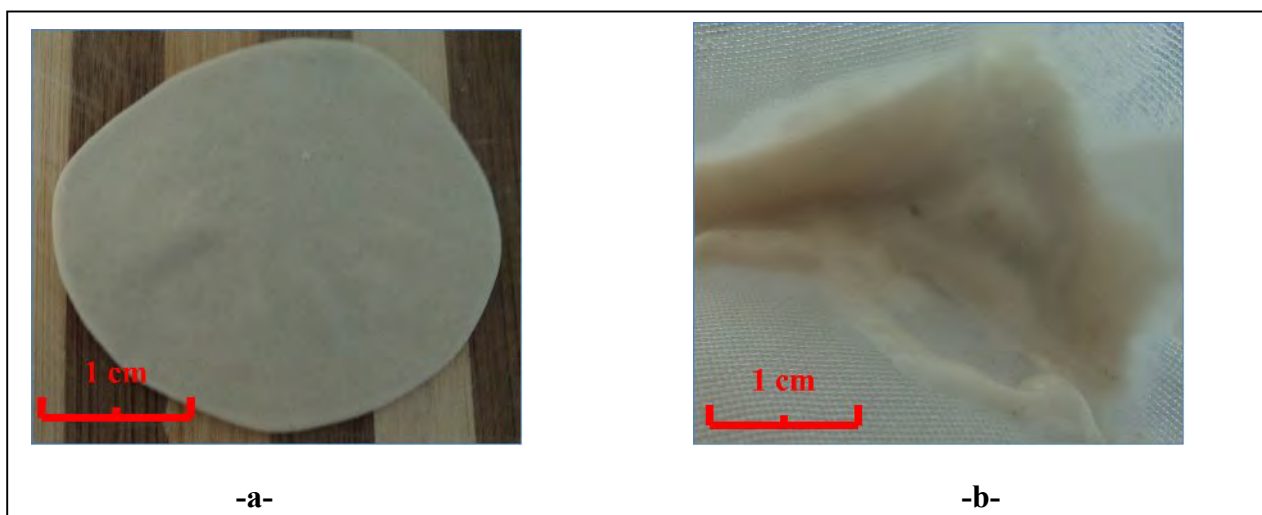


Figure 21. Image représentative de l'effet dissociant du β mercapto-éthanol. a : disque de pâte laminée à l'état natif, b : disque de pâte après 30 min de contact avec une solution de 0,8M en β mercapto-éthanol.

L'estimation quantitative de l'effet dissociant du β mercapto-éthanol est illustrée dans la figure 22. Cette figure représente l'évolution des taux de dissociation de la pâte en fonction des concentrations en β mercapto-éthanol.

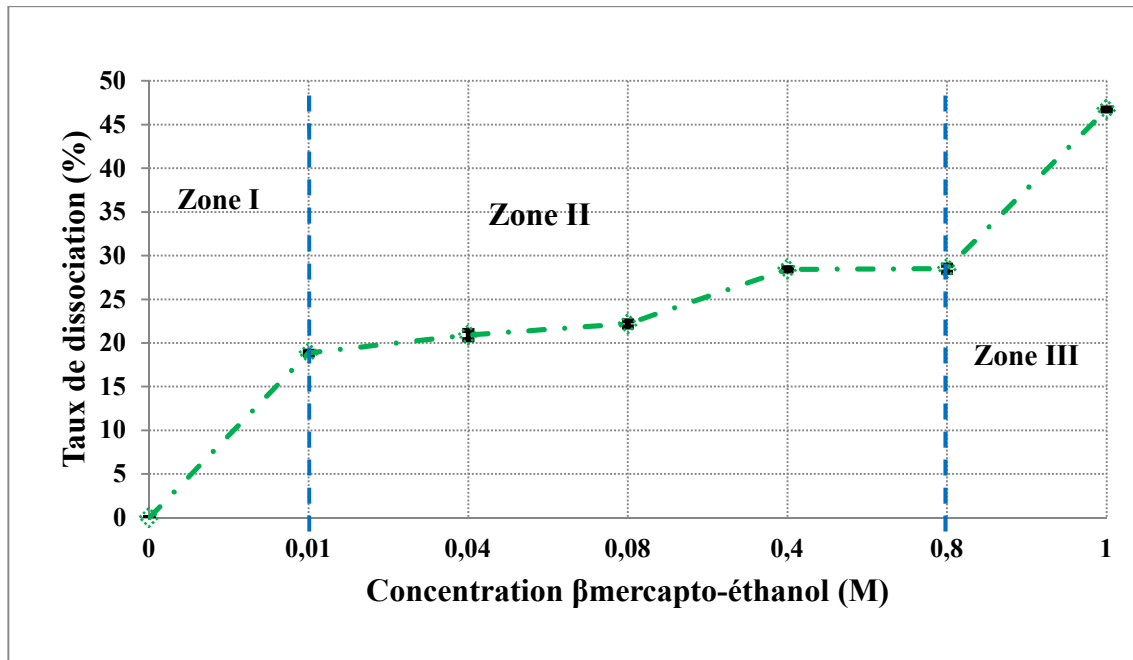


Figure 22. Evolution des taux de dissociation de la pâte en fonction des concentrations du β mercapto-éthanol.

Une observation analytique de cette courbe, nous a permis de diviser l'évolution de l'effet dissociant du β mercapto-éthanol en trois zones en fonction de la vitesse de dissociation, à savoir la zone I de $[0 - 0,01]M$, la zone II de $]0,01 - 0,8]M$, et la zone III de $]0,8 - 1]M$. Une comparaison entre les pentes moyennes de ces zones, nous a permis de constater que la vitesse de dissociation (pente = 1885) qui caractérise l'évolution de l'effet dissociant du β mercapto-éthanol dans la zone I est deux fois plus importante que celle de la zone III. Tandis que, l'évolution de cet effet dans la zone II montre la plus faible vitesse (pente = 16.1) que les deux autres zones. Au sein de ces trois zones, on remarque que les taux de dissociation obtenus pour notre pâte boulangère sont augmentés avec l'augmentation de la concentration en β mercapto-éthanol

D'une façon générale, le phénomène de l'évolution de la dissociation de notre pâte boulangère en fonction des concentrations en β mercapto-éthanol se caractérise par un maximum de dissociation de 46,73% à une concentration de 1M, et un minimum dissociation de 18,85% à une concentration de 0,01M en β mercapto-éthanol.

L'effet dissociant considérable de la β mercapto-éthanol pourrait être expliqué par le rôle déterminant des ponts disulfures dans le maintien des agrégats protéiques du gluten qui renferme au sein du quel les autres composants (PERESSINI *et al.*, 2008). LIAO *et al.*(2011)

montrent également l'importance de liaisons S-S dans la formation des agrégats des protéines du gluten.

En fonction de notre objectif qui repose sur la classification des pâtes boulangères de différentes qualités en fonction des évolutions de leurs taux de dissociation les plus importants, l'intervalle d'intérêt pour cet agent dissociant qui nous aide à acquérir cet objectif est de [0 - 1]M.

4.2.3. Cas des interactions ioniques

En se basant sur les résultats des essais préliminaires, l'agent dissociant choisi pour la dissociation des interactions ioniques est l'acide acétique dans un intervalle de concentration de [0 - 60]% avec un temps de contact de 30 min.

Après leur mise en contact avec les solutions d'acide acétique à différentes concentrations, les disques de pâtons présentent une certaine rigidité et perdre leur caractère élastique. On observe également qu'il y a formation d'une couche blanche plus ou moins dissociée sur toute la surface du disque, qui est à l'origine des fragments libérés (figure 23).

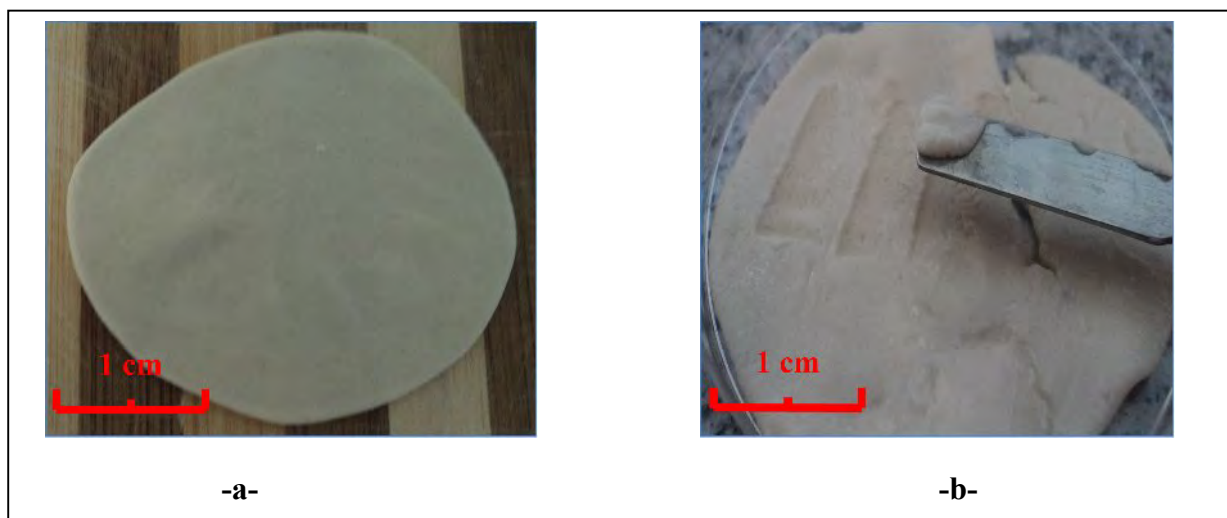


Figure 23. Image représentative de l'effet dissociant de l'acide acétique. a : disque de pâton laminé à l'état natif, b : disque de pâton après 30 min de contact avec une solution de 40% en acide acétique.

Ces observations permettant de dire que l'acide acétique a une dissociation grossière, probablement due aux distances existantes entre les sites d'action de cet agent dissociant. L'effet dissociant de l'acide acétique est proportionnel avec ses concentrations. Alors que le

diamètre des fragments est inversement proportionnel avec les concentrations de cet agent dissociant.

D'après cette description qualitative de l'action de dissociation de l'acide acétique sur les disques de pâtons, on peut déduire que cet agent dissociant peut être utilisé pour l'estimation des interactions ioniques dans la pâte boulangère.

L'estimation quantitative de l'effet dissociant se représente sous forme de l'évolution des taux de dissociation en fonction des concentrations en l'acide acétique, comme il est montré en figure 24.

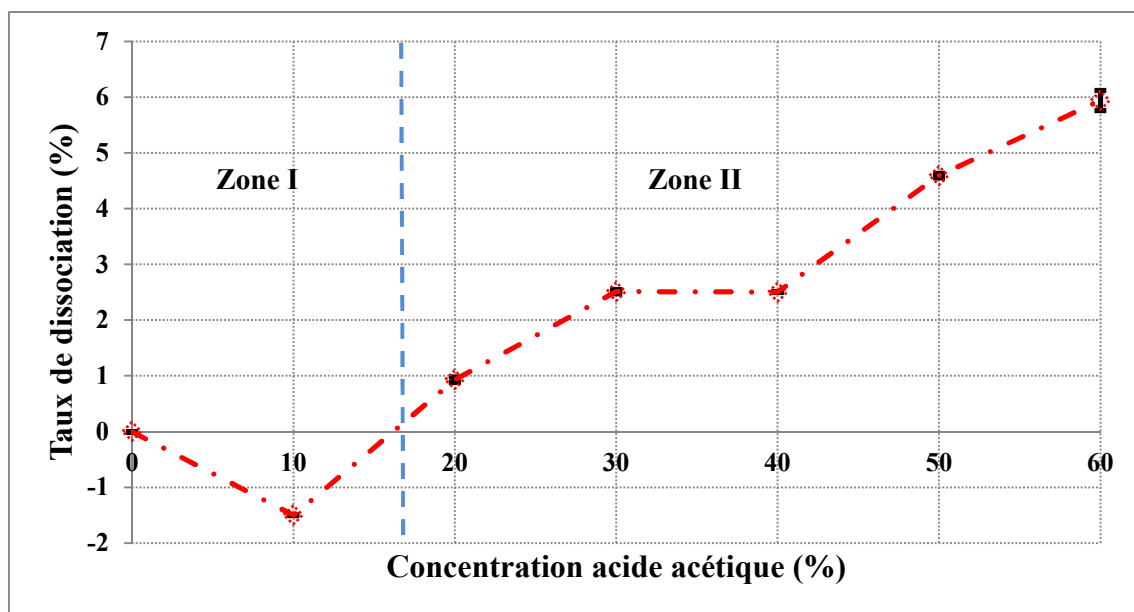


Figure 24. Evolution des taux de la dissociation en fonction des concentrations de l'acide acétique

D'après l'analyse de cette courbe, nous avons distingué deux zones de l'évolution de l'effet dissociant de l'acide acétique sur la pâte boulangère, à savoir la zone I, de [0 - 16]% en acide acétique, qui renferme les taux de dissociations négatifs, et la zone II, de]16 - 60]%, au sein du la quelle les taux de dissociations sont positifs.

On peut subdiviser la zone I en deux sous zones. La zone 1 de [0 - 10]% en acide acétique, au sein de cette zone montre une évolution des taux de dissociation inversement proportionnelle avec les concentrations en acide acétique jusqu' à une valeur minimale du taux de dissociation de -1,5%, à 10% en cet agent. La sous zone 2 de]10 - 16]% montre une augmentation des taux de dissociation avec l'augmentation de la concentration en acide acétique, cette évolution se caractérise par une vitesse de dissociation (pente= 2,5) croissante.

Les taux de dissociation négatifs pourraient indiquer que l'effet dissociant de l'eau est supérieur à celui de l'acide acétique. L'explication de cette indication repose probablement sur l'importance du diamètre de fragments dissociés qui empêchent leur passage à travers les pores du filtre utilisé.

Dans la zone II de]16 - 60] % en acide acétique, nous suggérons d'une part qu'il y a une relation proportionnelle et positive entre les taux de dissociation et les concentrations en l'acide acétique. D'autre part, l'effet dissociant de cet agent ne serait appréciable qu'au-delà de 16% en acide acétique, se qui indique que cette concentration représente le seuil minimum de la perception de la dissociation. Cette zone se caractérise par une faible vitesse de dissociation. Ceci pourrait être expliqué par la faible participation des interactions ioniques dans le maintien de la structure de la pâte panifiable à cause de la faible proportion des acides aminés contenant des groupements ionisables (LINDSAY *et al.*, 1999).

L'effet dissociant de l'acide acétique se caractérise par un maximum de dissociation de 5,94% à une concentration de 60%, contre un minimum de 0% à 16% en acide acétique.

Les résultats obtenus nous a permis de déduire que l'acide acétique présente un effet dissociant maximal des interactions ioniques dans l'intervalle de concentration de [20% - 60%]. Se qui montre notre choix.

4.2.4. Cas des liens hydrogènes

Les liens hydrogènes contribuent comme tous autres types d'interaction dans l'établissement de la structure cohésive de la pâte. D'après les résultats des essais réalisés, l'urée est l'agent dissociant choisi pour la rupture des liens hydrogènes dans les pâtes boulangères avec un intervalle de concentration de [0 – 0,1] M et un temps de contact de 1 heure.

Après le contact des disques de pâtons avec les solutions à différentes concentrations en urée de [0,01M à 0,1M] on observe qu'il n'y a pas de différence significative entre l'aspect de ces disques et ceux qui sont mis en contact avec l'eau distillée (figure 25).

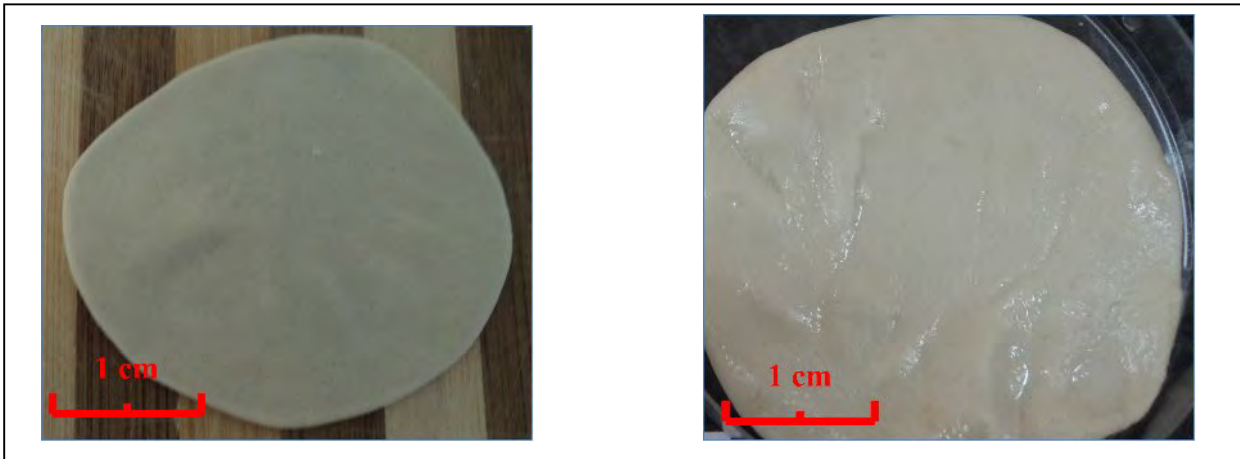


Figure 25. Image représentative de l'effet dissociant de l'urée. a : disque de pâton laminé à l'état natif, b : disque de pâton après 30 min de contact avec une solution de 0,8M en urée.

Les résultats de l'estimation quantitative de l'effet dissociant de l'urée sont illustrés dans la figure 26. Cette figure représente l'évolution des taux de dissociation de la pâte boulangère en fonction des concentrations en urée.

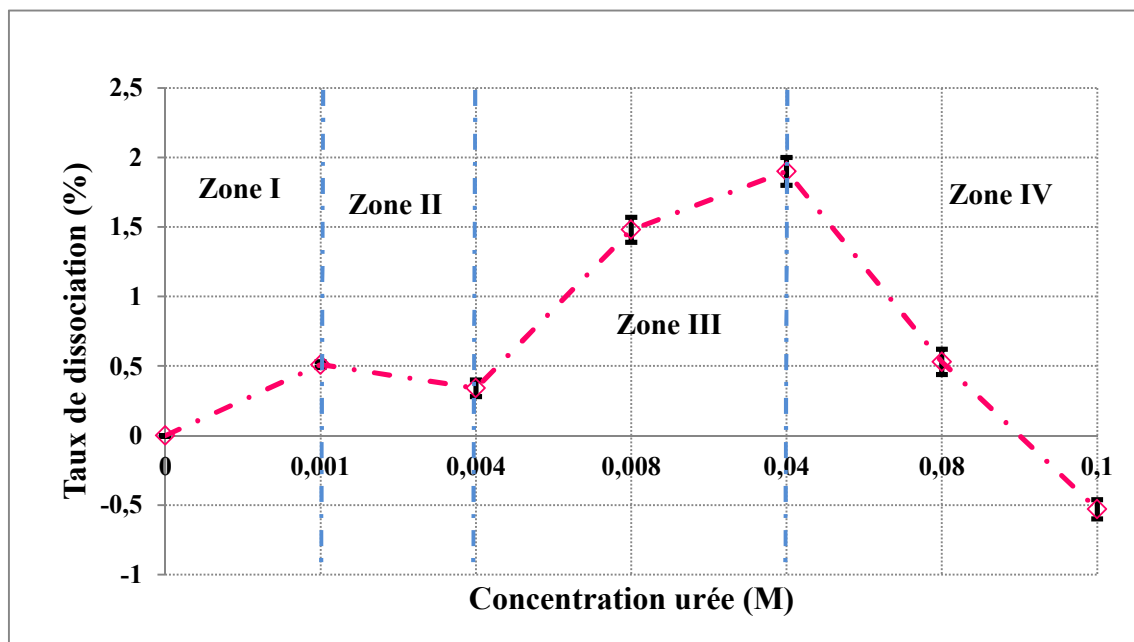


Figure 26. Evolution des taux de dissociation en fonction des concentrations de l'urée

L'analyse détaillée de cette courbe, nous a permis de distinguer quatre zones de l'évolution des taux de dissociation en fonction des concentrations en urée. A savoir, la zone I de $[0 - 0,001]$ M, la zone II de $] 0,001 - 0,004]$ M, la zone III de $] 0,004 - 0,04]$ M, et zone IV de $]0,04 - 0,1]$ M. Les zones I et III montrent une relation proportionnelle et positive entre les taux de dissociations et les concentrations en urée. Les vitesses de dissociation de la zone I (pente= 51) est importante que celle de la zone III (pente= 43,33). Par contre, es zones II et IV

montrent que les taux de dissociation sont inversement proportionnels avec les concentrations en urée, et que les vitesses des évolutions de l'effet dissociant de l'urée au sein de ces deux zones sont proches.

On observe que le taux de dissociation augmente de la valeur de 0,51% à 0,001M de l'urée jusqu'à une valeur maximale de 1,9% à une concentration de 0,04M. Au-delà de cette concentration, l'effet dissociant de l'urée se diminue jusqu'à une valeur minimale de -0,53% à 0,1M de l'urée. A cette concentration l'effet dissociant de l'eau distillée semble supérieur à celui de l'urée. Ceci pourrait être expliqué par la soustraction de la matière sèche de l'urée à partir d'une quantité constante de la matière sèche libérée.

D'une manière générale on suggère que l'urée n'entraîne pas un effet dissociant considérable sur la pâte boulangère. Ce ci est pourrait être expliqué d'une part par la présence des liens covalents de forte énergie comme les ponts S-S empêchant la libération des constituants de la pâte après la dissociation des liaisons hydrogènes. D'autre part, ce faible effet pourrait être du à l'utilisation des faibles concentrations en urée.

Des études sur l'estimation des liens hydrogène dans les gels laitiers montrent que l'urée entraîne un effet dissociant nettement plus important sur les gels laitiers que sur les pâtes panifiables. Cet effet peut atteindre un maximum de dissociation de 80% à 6M en urée (LEFEBVER-CASES *et al.*, 1998; ZIKIOU, 2013). Ceci pourrait être expliqué par l'utilisation des fortes concentrations ou par la faible consistance des gels laitiers comparablement à celui des pâtes boulangères.

L'intervalle de la concentration de l'urée choisi pour faire la classification des différents types des pâtes boulangères en fonction de leurs interactions hydrogènes est de [0,004 - 0,08] M. Ce choix se fait en fonction de l'importance de l'effet dissociant de cet agent.

En conclusion de cette partie, Les domaines de faisabilité à valider pour chaque agent dissociant à fin d'effectuer la classification des pâtes boulangères de différentes qualités sont récapitulés dans le tableau 09.

Tableau 09. Tableau récapitulatif des domaines de faisabilité à valider pour chaque agent dissociant

Agent dissociant	Domaines de faisabilité
SDS	[0 - 4]%
β mercapto-éthanol	[0 - 1]M
Acide acétique	[20 - 60]%
Urée	[0,004 – 0,08]M

4.3. Vérification de la répétabilité du mode opératoire établi

La réussite de notre technique de la classification des pâtes boulangères sur la base de la dissociation chimique des interactions moléculaires repose sur l'obtention des résultats fiables et répétables. La vérification de la répétabilité et l'homogénéité des résultats est effectuée par le test de Cochran.

Toutes les valeurs calculées de Cochran $(C_e)_{cal}$ (annexe 02) sont inférieures à celle tabulé ($C_t = 0,939$), ce qui conclue à la répétabilité de nos resultats.

4.4. Validation de la méthode par la classification des pâtes boulangères

Après la confirmation de l'effet dissociant des agents testés et la vérification de la répétabilité de notre mode opératoire, nous somme passé à l'étape de validation de notre méthode. Il s'agit donc de tester l'aptitude de cette méthode à discriminer des pâtes boulangères, préalablement différenciées par des tests conventionnels (alvéographe Chopin, test de panification), en suivant le mode opératoire établi avec les intervalles de concentration des agents dissociant délimités.

Les pâtes testées dans ce travail sont issus de trois farines de qualités différentes, à savoir pâte à base de la farine de blé tendre type 1 (PBT1), pâte à base de la farine de blé tendre type 2 (PBT2), et une pâte sans gluten (PSG).

4.4.1. Classification en fonction de la dissociation des interactions hydrophobes

La figure 27 montre l'évolution des taux de dissociation des trois types de pâtes en fonction des concentrations en SDS, pour l'intervalle des concentrations de 0 à 4%.

De façon globale, on note que les taux et les vitesses de dissociation dans la PBT2 sont plus importants que ceux de la PBT1 et de la pâte sans gluten ($P < 0,05$).

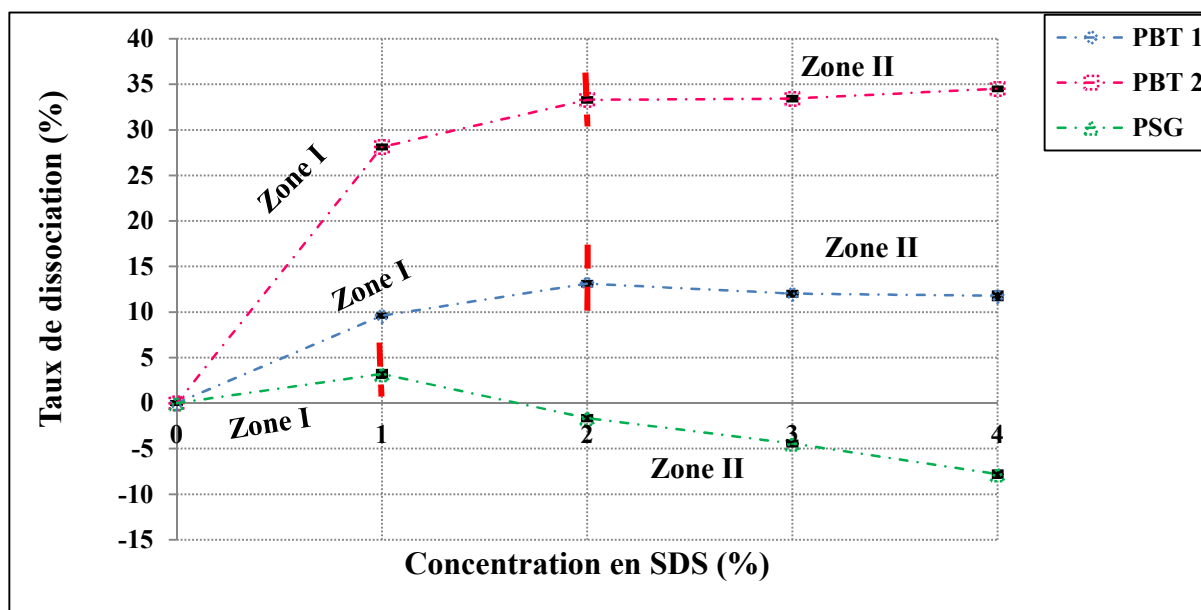


Figure 27. Classification des pâtes en fonction de l'effet dissociant du SDS. PBT1 : pâte issu de la farine de blé tendre type I, PBT2 : pâte formée par la farine du blé tendre type II, PSG : pâte sans gluten.

Pour les trois pâtes étudiées on peut diviser l'évolution du taux de dissociation pour les trois pâtes en deux zones.

La zone I pour les PBT2 et PBT1 sont variées entre 0 et 2% en SDS contre un intervalle plus limité pour les PSG, entre 0 et 1%. Dans cette première zone, les PBT2 se dissocient plus rapidement (pente= 28,13) que les PBT1 (pente= 9,6) et que les PSG (pente= 3,2) ($p < 0,001$). À 2% de SDS, un maximum de dissociation est noté pour la PBT2 (33,3% à 2% de SDS), pour la PBT1 (13,12% à 2% de SDS) et pour les PSG, ce maximum (3,2%) est noté à 1% de SDS.

La zone II pour les PBT2 et PBT1 varie entre 2 et 4% de SDS avec une stabilité dans les taux de dissociation. Pour les PSG, la zone II qui varie entre 1 et 4% en SDS se caractérise par une corrélation inversement proportionnelle entre les taux de dissociation (pente= -3,66). Ceci montre qu'au-delà de 1%, le SDS n'a plus d'effet dissociant dans les PSG. Ceci pourrait

être expliqué par le colmatage de filtres par les granules du riz et donc une rétention de matière sèche libérée dans le rétentât.

Les résultats obtenus permettent la discrimination entre les trois farines étudiées en fonction des interactions hydrophobes mise en place au cours de la préparation des pâtes. Ces interactions qui sont essentiellement établies entre les protéines, sont plus importantes dans la PBT2 que la PBT1. La meilleure qualité du gluten de la PBT2 pourrait expliquer cette classification. Par ailleurs, la nature différente des protéines des ingrédients sans gluten, se composent essentiellement de globulines et de glutélines (HUEBNER *et al.*, 1990) pourrait appuyer les faibles taux de dissociation.

4.4.2. Classification en fonction de la dissociation des liaisons S-S

Les évolutions des taux de dissociation de la matière sèche en fonction des concentrations en β mercapto-éthanol ($[0 - 1]$ M) des trois pâtes étudiées sont présentées dans la figure 28.

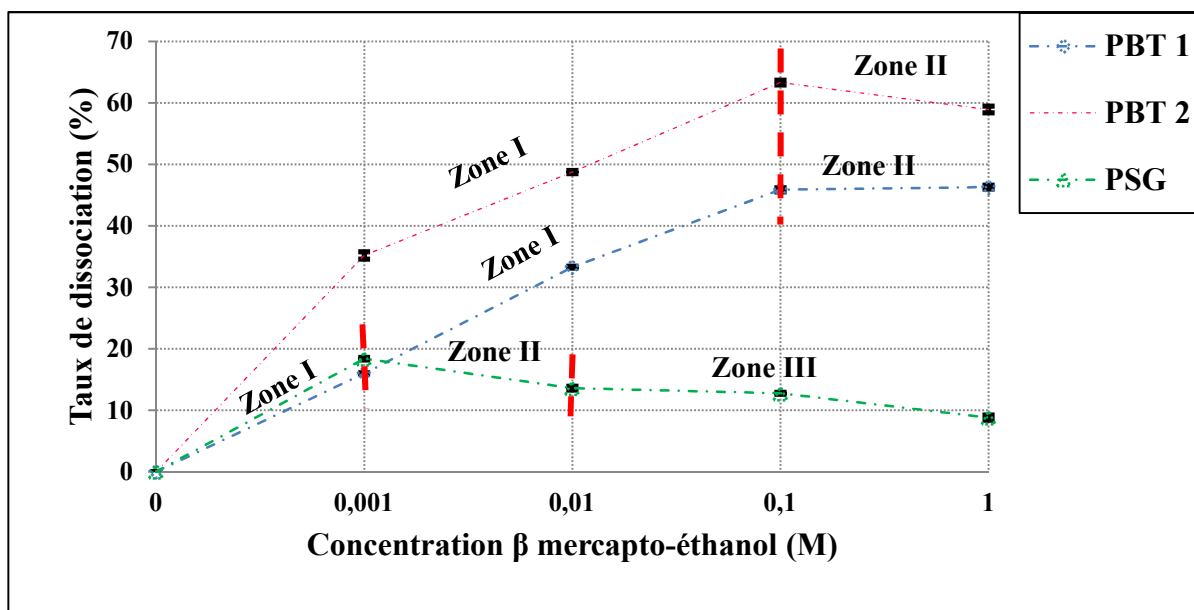


Figure 28. Classification des pâtes en fonction de la concentration de la β -mercapto-éthanol. PBT1 : pâte issu de la farine de blé tendre type 1, PBT2 : pâte formée par la farine du blé tendre type 2, PSG : pâte de la formule sans gluten.

On note deux zones d'évolution des taux de dissociation pour les PBT1 et 2 contre 3 zones pour les PSG.

La zone I pour les PBT 1 et 2 et la PSG se caractérise par une proportionnalité entre la quantité de la matière sèche dissociée et la concentration en β mercapto-éthanol. Cette première zone se délimite entre 0 et 0,1M pour les PBT 1 et 2, et entre 0 et 0,001M pour les PSG. Les PBT2 se dissocient significativement plus que les PBT1 puis PSG avec des taux maxima de dissociation respectifs de : 63,29%, 45,86% à 0,1M contre 18,38% pour PSG à 0,001M en β mercapto-éthanol ($p < 0,001$).

La zone II pour les PBT1 et 2 se situe entre 0,1 et 1M d'agent dissociant contre 0,001 et 1M pour les PSG. Alors que pour les deux pâtes à blé on note une stabilité de taux de dissociation, celui-ci est inversement proportionnel avec les concentrations en β mercapto-éthanol dans cette zone pour les PSG. Cette évolution négative pour les PSG montrant l'absence de l'effet dissociant pourrait être expliquée par le colmatage des matières premières dans le filtre, réduisant ainsi le passage de matières dissociées dans le filtrat.

Notre méthode de classification des pâtes par rapport aux ponts disulfures formés au cours du pétrissage montre que ceux-ci sont plus présents dans les PBT2, que les PBT1 et PSG.

Ces résultats pourraient être dus aux différences des degrés d'enchevêtrement dans les réseaux formant ces pâtes. Ces différences peuvent être expliquées par le nombre et l'emplacement des résidus cystéines qui entrent dans la composition des protéines de ces pâtes d'une part (LINDSAY *et al.*, 1999), et d'autre part les agents redox (les radicaux libres issus de l'oxydation des lipides) qui sont responsables des échanges entre les groupements SH libres et les ponts S-S lors de la formation de la pâte de l'autre part (LAGRAIN *et al.*, 2006). De plus KAWAMURA-KONISHI *et al.* (2013) montrent que les protéines du riz sont dépourvues de la capacité de la formation d'un réseau viscoélastique semblable à celui formé par les protéines du blé.

4.4.3. Classification en fonction de la dissociation des interactions ioniques

Malgré qu'elles soient minimes, les interactions ioniques ont un rôle important dans l'établissement de la configuration spatiale des pâtes, par les forces d'attraction et de répulsion qu'elles engendrent peuvent donc affecter la qualité de la pâte. L'étude de la différenciation entre les pâtes en fonction des interactions ioniques se fait à travers leur dissociation par l'acide acétique dans un intervalle de concentration de [20 - 60]%. Les

résultats obtenus sont représentés sous forme des courbes montrant l'évolution des taux de dissociation des pâtes en fonction des concentrations en acide acétique (figure 29).

Les évolutions des taux de dissociation de la matière sèche en fonction des concentrations en acide acétique montre deux zones de dissociation pour les PBT1 et 2 contre trois zones pour PSG.

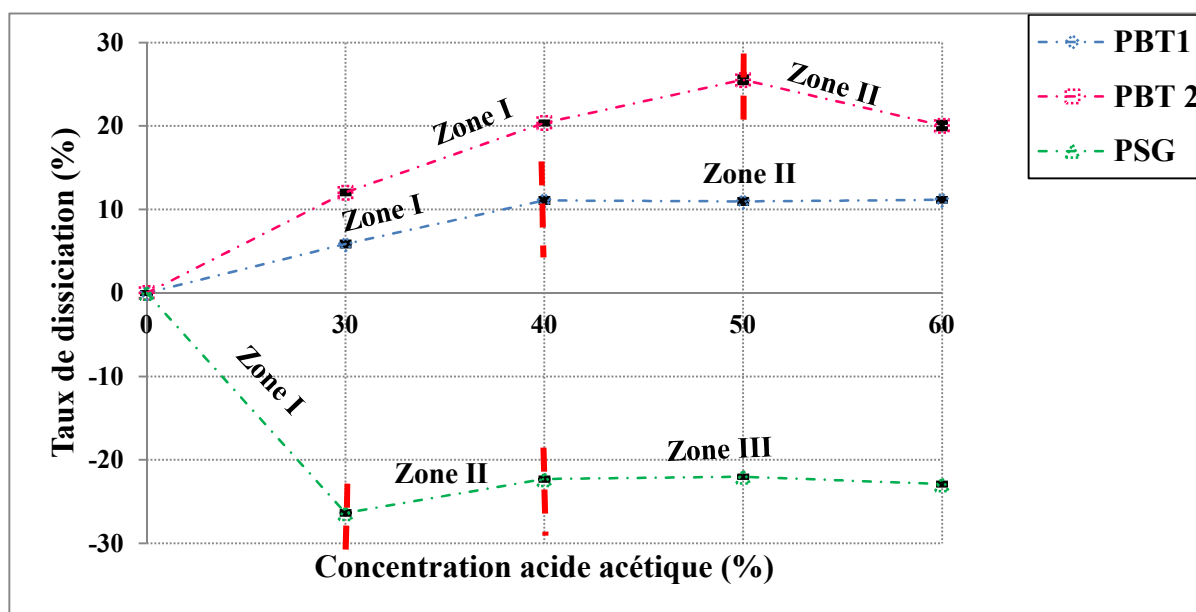


Figure 29. Classification des farines en fonction de la concentration de l'acide acétique. PBT1 : pâte issue de la farine de blé tendre type 1, PBT2 : pâte formée par la farine du blé tendre type 2, PSG : pâte de la formule sans gluten.

La zone I pour PBT1 et 2 se caractérise par une évolution concomitante entre les taux de dissociations et la concentration en acide acétique. Cette zone qui commence de 0 à 50% pour les PBT2 et de 0 à 40% pour les PBT1 montre des taux maxima de dissociation significativement différents ($p < 0,001$) respectivement 25,53 à 50% et 11,08% à 40% en agent dissociant. Pour les PSG, la zone I (de 0 à 30% d'acide acétique), se distingue par une évolution inversement proportionnelle entre les taux de dissociation et les concentrations de l'agent dissociant.

La zone 2 pour la PBT2 varie de 50 à 60% en acide acétique, de 40 à 60% pour la PBT1 et de 30 à 40% pour PSG. Cette zone qui se caractérise par une absence de dissociation pour la PBT2, une stabilisation de l'effet dissociant pour la PBT1 et une augmentation du taux de dissociation malgré les valeurs négatives observées. Une troisième zone entre 40 et 60% en agent dissociant montre une stabilité de l'évolution des taux de dissociation pour les PSG.

Après la mise en contact des disques de pâtons des PSG avec l'acide acétique, on observe qu'il n'y a pas de dissociation et que ces pâtons au contraire se raffermissent. Ceci nous a même de dire que l'acide acétique plutôt renforce la structure de la pâte et qu'il n'a donc pas un effet dissociant sur celle-ci. Ce phénomène pourrait être expliqué par la neutralisation des charges ioniques de même signe existantes dans la pâte, ce qui entraînerait l'élimination des forces de répulsion nécessaires pour le maintien de son organisation supramoléculaire (LEVAVASSEUR, 2007). Ce phénomène pourrait renforcer les autres types d'interactions, conduisant à l'assemblage des constituants de la pâte.

4.4.4. Classification en fonction de la dissociation des liaisons hydrogènes

Les évolutions des taux de dissociation de la matière sèche en fonction des concentrations en urée ($[0,004 - 0,08]M$), des trois pâtes étudiées (PBT1, PBT2 et PSG) sont présentées dans la figure 30.

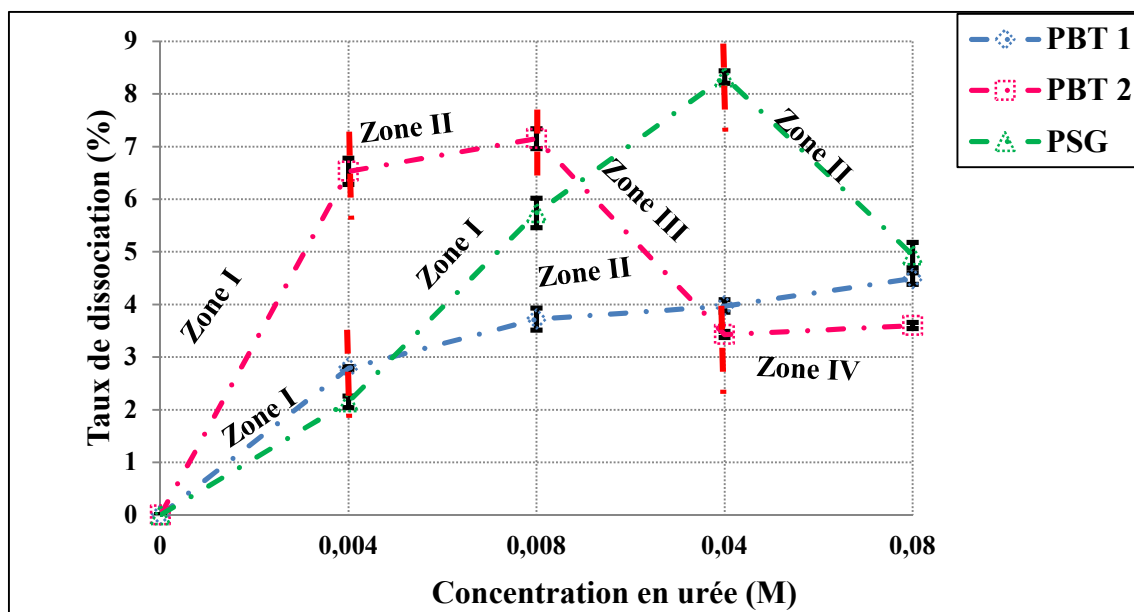


Figure 30. Classification des pâtes en fonction des concentrations de l'urée. PBT1 : pâte de blé tendre type 1, PBT2 : pâte du blé tendre type 2, FSG : pâte de la formule sans gluten.

De façon générale, on observe quatre zones de l'évolution des taux de dissociation pour PBT2, et deux zones pour la PBT1 et PSG.

La zone I pour les PBT1 et 2 passe respectivement par 0 et 0,004M d'urée contre un intervalle de 0 à 0,04M pour les PSG. Cette zone se caractérise par une évolution

proportionnelle entre les taux de dissociation et les concentrations en urée. Un maximum de dissociation de 8,32% à 0,04M en urée pour les PSG.

La zone II pour les PBT2 et 1 se caractérise par une diminution de dissociation avec des pentes respectives de 115 et 42,5. Cette zone varie de 0,004 et 0,008M pour PBT2 et entre 0,004 et 0,08M pour PBT1. Le maximum de dissociation est obtenu dans cette zone avec respectivement 7,15% à 0,008M et 4,49% à 0,08M. Pour les PSG, la zone II se caractérise par une corrélation inversement proportionnelle entre les concentrations en urée et les taux de dissociations entre 0,04 et 0,08M.

Les zones III et IV des PBT2 se situent respectivement entre les intervalles] 0,008 – 0,04]M et]0,04 – 0,08]M. au niveau de la zone III on observe une diminution de la dissociation dans ces pâtes passant d'un taux de dissociation de 7,15 à 3,43% pour rester stable ensuite dans la zone IV.

La zone permettant l'obtention de la même classification des pâtes est] 0,0015 – 0,004]M.

En conclusion, les intervalles ayant permis l'obtention du même classement des pâtes sont :

-] 0 - 2] % en SDS pour les interactions hydrophobes ;
-] 0,001 – 0,1] M en β mercapto-éthanol pour les liaisons S-S ;
-] 30 - 60] % en acide acétique pour les interactions ioniques ;
-] 0,0015 – 0,004] M en urée pour les liens hydrogènes.

A partir de ces résultats, nous pouvons dire que les taux de dissociation les plus élevés sont noté respectivement pour PBT2, PBT1 puis PSG.

5. Corrélation entre les propriétés technologiques et texturales et les taux de dissociation des différents agents dissociant

A fin de faire le lien entre les variations des taux de dissociation et les différentes concentrations en agents dissociant ainsi que les différents paramètres d'évaluation technologiques (volume spécifique, gluten sec et humide) et rhéologiques (test à alvéographe Chopin : W et P/L) de référence, une matrice de corrélation à été construite (tableau10). Les corrélations significatives au seuil de 5% sont montrées en gras.

Tableau 10 : Matrice de corrélation des propriétés technologiques et texturales avec les taux de dissociations des différents agents dissociant.

Variables	Vsp	GH	GS	W	P/L	SDS 1%	SDS2%	SDS3%	SDS4%	βmer 0,001M	βmer 0,01M	βmer 0,1M	βmer 1M	AC acét 30%	AC acét 40%	AC acét50%	AC acét 60%	urée 0,004M	urée 0,008M	urée 0,04M	urée 0,08M	
Vsp	1																					
GH	0,940	1																				
GS	0,958	0,996	1																			
W	0,907	0,991	0,978	1																		
P/L	0,026	0,320	0,243	0,427	1																	
SDS 1%	0,898	0,790	0,828	0,723	-0,272	1																
SDS2%	0,969	0,870	0,900	0,817	-0,150	0,951	1															
SDS3%	0,968	0,873	0,903	0,821	-0,149	0,974	0,994	1														
SDS4%	0,980	0,877	0,907	0,827	-0,130	0,919	0,984	0,977	1													
βmer 0,001M	0,630	0,396	0,462	0,301	-0,693	0,798	0,763	0,759	0,757	1												
βmer 0,01M	0,931	0,787	0,827	0,719	-0,311	0,968	0,975	0,979	0,969	0,855	1											
βmer 0,1M	0,948	0,832	0,874	0,776	-0,215	0,936	0,966	0,969	0,977	0,810	0,968	1										
βmer 1M	0,966	0,898	0,922	0,850	-0,039	0,872	0,957	0,941	0,949	0,611	0,902	0,912	1									
AC acét 30%	0,958	0,974	0,985	0,951	0,159	0,876	0,918	0,929	0,913	0,534	0,863	0,910	0,912	1								
AC acét 40%	0,987	0,968	0,981	0,940	0,103	0,888	0,950	0,953	0,947	0,568	0,900	0,923	0,957	0,987	1							
AC acét50%	0,990	0,943	0,962	0,902	0,008	0,926	0,969	0,974	0,964	0,623	0,934	0,939	0,971	0,969	0,992	1						
AC acét 60%	0,949	0,940	0,959	0,917	0,111	0,842	0,918	0,917	0,937	0,607	0,865	0,941	0,890	0,969	0,955	0,933	1					
urée 0,004M	0,585	0,439	0,507	0,378	-0,426	0,641	0,615	0,628	0,671	0,785	0,689	0,790	0,517	0,583	0,552	0,560	0,695	1				
urée 0,008M	0,018	-0,035	0,016	-0,083	-0,352	0,161	-0,017	0,042	0,066	0,278	0,133	0,203	-0,066	0,083	0,017	0,038	0,109	0,635	1			
urée 0,04M	-0,814	-0,823	-0,835	-0,810	-0,176	-0,613	-0,797	-0,753	-0,804	-0,480	-0,693	-0,789	-0,819	-0,824	-0,828	-0,782	-0,889	-0,546	0,163	1		
urée 0,08M	-0,582	-0,410	-0,469	-0,373	0,288	-0,469	-0,571	-0,545	-0,618	-0,527	-0,555	-0,684	-0,629	-0,496	-0,528	-0,535	-0,595	-0,729	-0,223	0,620	1	

SDS : sodium dodécylsulfate, β mer : β mercapto-éthanol, AC acét : acide acétique, Vsp : volume spécifique, GH : gluten humide, GS : gluten sec, W : travail de déformation, P/L : rapport de configuration

Globalement, des corrélations significatives et positives sont noté entre les concentrations en agents dissociant (SDS, β mercapto-éthanol, et l'acide acétique) et les paramètres technologiques (V_{sp} , GH, GS) et rhéologiques (W, P/L) utilisés pour la classification conventionnelle de nos pâtes. Ces résultats confirment que les propriétés technologiques et rhéologiques sont les résultats de l'évolution de la pâte au cours de sa préparation par l'intermédiaire des interactions moléculaires (FEILLET, 2000). Donc plus que, la pâte a l'aptitude de former le maximum des interactions hydrophobes, ioniques, et des liaisons disulfure, ses caractéristiques technologiques et rhéologiques sont meilleures.

Par ailleurs, pour les liaisons hydrogènes, seule la concentration de 0,04M en urée a montré une corrélation significative mais inversement proportionnelles aux paramètres plutôt technologiques que rhéologiques. Si on repart sur la figure 30 montrant l'évolution des taux de dissociation en fonction des concentrations en urée, on note que les taux de dissociation à 0,04M en urée les plus élevées sont ceux pour les PSG (8,32%) suivi de la pâte PBT1 (3,97%) puis de PBT2 (3,43%). A partir de toutes ces données, on peut conclure pour les liaisons hydrogènes, les taux de dissociations les plus faibles sont ceux qui caractérisent les meilleures pâtes. Selon FEILLET (2000), les liens hydrogènes sont responsables de la fermeté de la pâte.

En conclusion, les taux de dissociations permettant l'obtention des meilleurs pâtes sont les plus élevés pour le SDS, le β mercapto-éthanol, et l'acide acétique et les plus faibles pour l'urée, tout en restant dans les intervalles de concentrations délimités par l'expérimentation.

Le but de notre travail est la mise au point d'une méthode de classification des pâtes panifiables en se basant sur la dissociation chimique des interactions moléculaires.

A l'issu de ce travail, nous pouvons conclure ce qui suit :

La composition physicochimique des trois types de farines étudiées montre une teneur élevée en protéines totales pour la formule sans gluten ($16,29 \pm 2,08\%$) par rapport à celles des farines de blé tendre type 1 et 2 qui sont comparables, avec respectivement $12,09 \pm 1,02\%$ et $12,47 \pm 0\%$.

La farine qui contient la plus importante fraction granulométrique inférieure à $200\mu\text{m}$ est la farine de blé tendre type 2 (99,15%), suivie par la farine de blé tendre type 1 (98,08%) puis la formule sans gluten (97,87%).

Les caractéristiques rhéologiques (P/L, G et W) et technologiques (volume spécifique du pain et la structure alvéolaire de la mie) des pâtes étudiées sur la base des méthodes conventionnelles ont montré une meilleure aptitude à la panification de la farine de blé tendre type 2, suivi par la farine de blé tendre type 1, puis de la formule sans gluten. Ceci étant la classification de nos pâtes par les méthodes de référence.

La meilleure forme de pâtes permettant l'optimisation de la surface de contact avec l'agent dissociant est la présentation sous forme de disques de 8 cm de diamètre et 1 mm d'épaisseur. Les agents dissociant sélectionnés permettant la plus grande flexibilité de travail sont : le SDS pour les interactions hydrophobes, le β mercapto-éthanol pour les liaisons disulfures, l'acide acétique pour les interactions ioniques et l'urée pour les liens hydrogènes. Le temps optimal de contact est de 30 min pour le SDS, le β mercapto-éthanol et l'acide acétique, contre 1 heure pour l'urée. Les domaines de faisabilité délimités pour chaque agent dissociant sont : de [0 - 4] % pour le SDS, de [0 - 1] M pour le β mercapto-éthanol, de [20 - 60] % pour l'acide acétique et de [0 - 0,08] M pour l'urée. Le traçage des courbes décrivant l'évolution des taux de dissociation en fonction des concentrations en agents dissociant a montré des tendances de type polynomial pour le SDS ($y = -1,170x^2 + 10,43x - 7,498$, $r = 0,96$) et l'urée ($y = -0,058x^3 + 0,521x^2 - 0,946x + 0,528$, $r=0,99$), et de type linéaire pour le β mercapto-éthanol ($y = 5,95x - 0,204$, $r = 0,92$) ainsi que pour l'acide acétique ($y = 1,127x - 2,371$, $r=0,94$).

La méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires a permis la classification de nos pâtes boulangères en fonction des interactions hydrophobes, des liaisons disulfures, des interactions ioniques et des liens hydrogènes. Les intervalles ayant permis l'obtention du même classement des pâtes que celui des méthodes conventionnelles sont :]0 - 2] % en SDS pour les interactions hydrophobes,]0,001 - 0,1] M en β mercapto-éthanol pour les liaisons S-S,]30 - 60] % en acide acétique pour les interactions ioniques et]0,0015 - 0,004] M en urée pour les liens hydrogènes. A partir de ces résultats, nous pouvons dire que les taux de dissociations les plus élevés sont notés respectivement pour les pâtes de farine blé tendre type2, pâtes de farine blé tendre type1 puis pâtes sans gluten.

Les résultats obtenus par ces deux méthodes sont fortement et positivement corrélés pour le SDS, le β mercapto-éthanol et l'acide acétique. Cependant, seule la concentration de 0,04 M en urée a montré une corrélation significative mais inversement proportionnelle avec les paramètres de références. Les taux de dissociation permettant l'obtention des meilleures pâtes sont les plus élevés pour le SDS, le β mercapto-éthanol, et l'acide acétique et les plus faibles pour l'urée, tout en restant dans les intervalles délimitées par l'expérimentation.

La classification établie par notre méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires se fait dans le même ordre que celle obtenue par les méthodes conventionnelles, ce qui permet de valider notre méthode en tant qu'une technique simple, rapide, pratique et fiable.

Une pâte boulangère de bonne qualité doit présenter au minimum un taux de dissociation de 34,51% à 4% en SDS, de 63,29% à 0,1M en β mercapto-éthanol, de 25,53% à 50% d'acide acétique, et de 3,34% à 0,04M en urée.

Au terme de ce travail, notre étude mérite d'être complétée par :

- L'affinage de l'estimation de la dissociation moléculaire par des méthodes spectroscopiques telles que la spectrométrie infrarouge, en vue de l'appréciation de la qualité des interactions réellement touchées et d'expliquer certains phénomènes observés ;
- La substitution de l'urée pour l'estimation des liens hydrogènes par d'autres agents dissociant tels que le chlorure de guanidine;
- La généralisation de l'application de notre méthode pour les différents autres types de pâtes céréaliers (pastification, biscuiterie, viennoiserie ...).

Références bibliographiques

-A-

AILI W., LIYAN G., XIAOHUI L., YANZHEN Z., 2008. Characterization of two 1D-encoded gliadin subunits closely related to dough strength and pan bread-making quality in common wheat (*Triticum aestivum L.*). *Journal of Cereal Science* 47, pp528-535.

AFNOR., 1991. Contrôle de la qualité des produits alimentaires, céréales et produits céréaliers. AFNOR (3^{ème} ed), 359 p.

AIT KADDOUR A., BARRON C., ROBERT P., CUQ B., 2008. Physico-chemical description of bread dough mixing using two-dimensional near-infrared correlation spectroscopy and moving-window two-dimensional correlation spectroscopy. *Journal of Cereal Science* 48, pp10-19.

ALIAS CH., LINDEN G., MICLO L., 2008. Biochimie alimentaire 6^{ème} édition de l'abrégé. Snel grafic sa, Belgique. 260P.

ALVAREZ-JUBETE L., AUTY M., ARENDT E.K., GALLAGHER E., 2010. Baking properties and microstructure of pseudo-cereal flours in gluten-free bread formulations. *European Food Research and Technology* 230 (3), pp437-445.

ATWELL W.A., 2001. Wheat flour. Eagan press Minnesota, USA. P123.

AUDIGIE C., FIGARELLA J., ZONZAIN F., (1984). Manipulation d'analyses biochimiques. Doin. 1ère édition Paris, 274 P.

-B-

BALAJI N., 1991. Modelling of transient temperature distribution during bread baking by finite difference analysis. B.Tech Thesis, IIT, Kharagpur, India.

BELTON P. S., 1999. On the elasticity of wheat gluten. *Journal of Cereal Science* 29, pp103-107.

BENATALLAH LE. 2009. Couscous et pain sans gluten pour malades cœliaques: Aptitude technologique de formules à base de riz et de légumes secs. Thèse de Doctorat, Option Sciences Alimentaires, INATAA, Université Mentouri de Constantine. 173P.

BENYAHIA-KRID F.A., ATTIA H., ZIDOUNE M.N., 2010. Comparative study of milk coagulation with chicken pepsin or rennet: Interactions and microstructure. *J. of Agriculture, Biotechnology and Ecology* 3, pp 75-86.

BERLAND S., 1993. Etude rhéologique et calorimétrique de l'influence de traitements de congélation-décongélation sur les propriétés des pâtes de farine de blé. Répercussions en technologie boulangère. *Thèse de doctorat*. ENSIA, France.141P.

BLOKSMA A.H., 1990a. Rheology of the breadmaking process. *Cereal Foods World*. 35, pp 228-236.

BLOKSMA A.H., 1975. Thiol and disulfide groups in dough rheology. *Cereal Chemistry*. 52, pp170-183.

BORASIO E., 1997. Proceedings of the Grano Italia Symposium. Bologna. pp59-61.

BOUDREAU A., MENARD G., 1992. Le blé éléments fondamentaux et transformation. Donini johnson, Canada. 443 P.

BOYDELDIEU J., 1991. Production des grains oléagineux et protéagineux. Lavoisier tech et doc. Paris. 234p.

BULÉON A., COLONNA P., PLANCHOT V., BALL S., 1998. Starch granules: Structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 23, pp85-112.

-C-

CALVEL R., 1980. La boulangerie moderne. EYROLLES, 9ème Edition, Paris. 459 P.

CAUVAIN S., 2003. Breadmaking: an overview, in: S. Cauvain (Ed.), *Bread Making - Improving Quality*, CRC Press, Boca Raton, FL, US, pp. 8-27.

CHARGELEGUE A., GUINET R., NEYRENEUF O., ONNO B., POITRENAUD B., 1994. La fermentation, In: *La panification française*, Vol(528), EDS, Lavoisier-Apria, Tec et Doc, Paris. pp283-325.

CHENE, 2001. La farine. *Journal de l'ADRIANOR* 26, pp3-8.

CHEVREUX G., 2005. Etude des interactions moléculaires spécifiques par spectrométrie de masse : application à la chimie du vivant. Thèse de doctorat, Ecole doctorale des sciences chimiques moléculaires et supramoléculaires de Strasbourg, 204p.

CHUNG O.K., OHM J., RAM M., PARK S., HOWITTC., 2009. Wheat Lipids. In: KHAN K., SHEWRY P.R. (Eds.), Wheat: Chemistry and Technology, fourthed. AACC International, St. Paul, MN, USA. pp363-393.

CODEX ALIMENTARUS, 1995. Céréales, légumineuses, produits dérivées et protéines végétales, programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires, 2^{ème} édition, FAO/OMS, vol. 7, Rome.

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

COLAS A., THARRAULT J.F., GODON B., LOISEL W. LAVOISIER, 1997. Granulométrie des particules. In Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. Ed. Tec et Doc. Paris. pp42-49, 819P.

COURTIN C.M., ROELANTS A., DELCOUR J.A., 1999. Fractionation–reconstitution experiments provide insight into the role of endoxylanases in breadmaking. Journal of Agricultural and Food Chemistry 47, pp1870-1877.

CREIGHTON T.E., 1993. Physical interactions that determine the properties of proteins. In Proteins – Structure and molecular properties, Second edition; Creighton, T. E.; W. H. Freeman and Company: New York, USA. pp139-170.

CUQ J. L, LEYNAUD-ROUAUD C., DUPIN H., 1992. Les graines de légumineuses In: Alimentation et nutrition humaines. ESF éditeurs, Paris. P941-61.

-D-

DEL FFRATE R, STEPHAN C., 2005. Mieux connaitre la farine. Spécial Analyses. Supplément technique, I.N.B.P., Laboratoire d'Essais des Matériels et Produits Alimentaires (L.E.M.P.A.), Rouen, France 85, pp16.

DELCOUR J.A., HOSENEY R.C., 2010. Principles of Cereal Science and Technology, third edition. AACC International, Inc., St. Paul, MN, USA.

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

DOBRSZCZYK B.J., VINCENT J.F.V., 1999. Measurement of mechanical properties of food materials in relation to texture: the materials approach. In: Rosenthal, A.J., (Ed.), Food Texture: Measurement and Perception, Aspen Publishers, Maryland.

DOBRSZCZYKA B.J, MORGENSTERNB M.P., 2003. Rheology and the breadmaking process. Journal of Cereal Science 38, pp229-245.

DON C., LICHTENDONK W.J., PLIJTER J.J., VAN VLIET T., HAMER R.J., 2005. The effect of mixing on glutenin particle properties: aggregation factors that affect gluten function in dough. Journal of Cereal Science 41, pp 69-83.

DONALD A.M., WAIGH T.A., JENKINS P.J., GIDLEY M.J., DEBET M., SMITH A., 1997. Internal structure of starch granules revealed by scattering studies. In Frazier P.J., DONALD A.M., RICHMOND P. (EDS), Starch: structure and function. Cambridge: Royal Society of Chemistry, pp172-179.

DUMAS C., SAUL C., BENDER O., 2007. Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations. Agence française de sécurité sanitaire des aliments, 282P.

-E-

ELIASSON A., LARSSON K., 1993. Cereals in breadmaking. A molecular colloidal approach. New York, NY: Marcel Dekker.

ELIASSON A.C., GUDMUNDSSON M., 1996. Starch: Physicochemical and functional aspects. In ELIASSON A.C. (Ed.), Carbohydrates in food. New York, NY: Marcel Dekker, pp431-503.

-F-

FAO. 1982. Les grains de légumineuses dans l'alimentation humaine, 2^{ème} édition, Rome. 152 P.

FAVIER J. C., IRELAND-RIPERT J., TOQUE C., 1995. Répertoire Général des Aliments – Table de composition. CNEVA-CIQUAL-INRA. Lavoisier Tec et Doc. Paris. 897P.

FEILLET P. 2000. Le grain de blé composition et utilisation. INRA, Paris. 308P.

FRENCH D, WHISTLER R.L., MILLER J.N., PASCHAL E.F 1984. Organization of starch granules In. (Eds), Starch chemistry and technology (2nded.). New York, NY: Academic Press, pp 183-212.

-G-

GAN Z., ANGOLD R.E., WILLIAMS M.R., ELLIST P.R., VAUGHAN J.G., GALLIARD T., 1990. The microstructure and gas retention of bread dough. *Journal of Cereal Science* 12, pp 15-24.

GAN Z., ELLIS P.R., SCHOELD J.D., 1995. Gas cell stabilization and gas retention in wheat bread dough. *Journal of Cereal Science* 21, pp215-230.

GANDIKOTA S., MACRITCHIEA F., 2005. Expansion capacity of doughs: methodology and applications. *Journal of Cereal Science* 42, pp157-163.

GHRAIRIA N., 2010. Pain sans gluten pour malade cœliaque : aptitude technologique pour une formule riz-fêverole. Thèse de magister en sciences alimentaires, option technologies alimentaires, 101 P.

GOESAERT H, BRIJS K, VERAVERBEKE W.S., 2005. Laboratory of Food Chemistry, Katholieke Universiteit Leuven, Kasteelpark Arenberg 20, B-3000 Heverlee, Belgium. *Trends in Food Science & Technology* 16, pp 12-30.

GRANDVOINNET P., PRATX B., GUINET R., 1994. Farines et mixes in: panification française. Tec et doc, Paris, Vol 528, pp100-131.

GRUPPEN H., KOMELINK F.J.M., VORAGEN A.G.J., 1993. Water-unextractable cell wall material from wheat flour. In A structural model for arabinoxylans. *Journal of Cereal Science* 19, pp111-128.

GUIMARÃES P.E., Rice Breeding. In *Cereals – Handbook of Plants Breeding*. Vol. 3. Ed. CARENA J.M. Springer Science and Business Media, pp 99-126.

GUPTA., R.B., BEKES, F., GRAS, P.W., MACRITCHIE, F., 1990. Functionality of glutenin, gliadin and secalin fractions as measured by extensograph and mixograph. In: *Gluten Proteins*. Association of Cereal Research, Detmold, pp 550–559.

-H-

HETTY C.B., LUDOVICUS J.W.J., MARINUS J.M.S., INGRID M., ROB J.H., 2011. Dough quality of bread wheat lacking α -gliadins with celiac disease epitopes and addition of celiac-safe avenins to improve dough quality. *Journal of Cereal Science* 53, pp206-216.

HIZUKURI S., TAKEDA Y., YASUDA M., 1981. Multi-branched nature of amylase and the action of debranching enzymes. In Carbohydrate Research 94, pp205-213.

HO T.F., YIP W.C., 2001. Oral hydration solution. Rice water is cheap and effective. BMJ,3,323 (7320) 1068P.

HOSENEY R.C, HSU K.H., JUNGE R.C., 1979. A simple spread test to measure the rheological properties of fermenting dough. Cereal Chemistry 56, pp141-143.

HOSENEY R.C., 1984. Functional properties of pentosanes in baked foods. Food Technology 38, pp114-117.

HOSENEY R.C., 1994. Principles of cereal science and technology (2nded.). St.Paul, MN: Association of Cereal Chemists 81, pp 229-273.

HUBNER F.R., BIETZ J.A., WEBB B. D., JULIANO B.O., 1991. Rice cultivar identification by high-performance liquid chromatography of endosperm protéines. Cereal. Chem. 67, pp. 129 -135.

-J-

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

JEANTET R., CROGUENEC T., SCHUCK P., BRULE G., 2007. Science des aliments technologie des produits alimentaires. Édition TEC et DOC, Paris. pp143- 456.

JIRSA O., HRUSKOVA M., ŠVEC I., 2008. Near-infrared prediction of milling and baking parameters of wheat varieties. Journal of Food Engineering 87,pp 21–25.

JONGEN T.R.G, BRUSCHKE M.V, DEKKER J.G. 2003. Analysis of doughkneaders using numerical flow simulations. Cereal Chemistry80, pp383-389.

JOYE I.J., LAGRAIN B., DELCOUR J A., 2009. Endogenous redox agents and enzymes that affect protein network formation during breadmaking – A review. Journal of Cereal Science 50, pp1-10.

-K-

KAMMAN P.W., 1970. Factors affecting the grain and texture of white bread. The Bakers Digest, 44, pp34-38.

KARLSSON R., OLERED R., ELIASSON A.C., 1983. Changes in starch granule size distribution and starch gelatinization properties during development and maturation of wheat, barley and rye. *Starch/Stärke*, 35, pp335-340.

KAWAMURA-KONISHI Y., SHODA K., KOGA H., HONDA Y., 2013. Improvement in gluten-free rice bread quality by protease treatment. *Journal of Cereal Science* 58 , pp45-50.

KHATKAR B. S., BELL A.E., SCHOFIELD J. D., 1995. The dynamic rheological properties of glens and gluten sub-fractions from wheats of good and poor bread making quality. *Journal of Cereal Science* 22, pp29-44.

KHATKAR B.S., SCHOFIELD J.D., 2002a. Dynamic rheology of wheat flour dough. II. Assessment of dough strength and breadmaking quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82, pp 823-826.

KOHLER P., BELITZ H. D, WIESER H., 1993. Disulphide bonds in wheat gluten: further cystine peptides from high molecular weight (HMW) and low molecular weight (LMW) subunits of glutenin and from c-gliadins. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 196 (3), pp239-247.

KORUS J., JUSZCZAK L., ZIOBRO R., WITCZAK M., GRZELAK K., SOJKA M., 2012. Defatted strawberry and blackcurrant seeds as a functional ingredient of gluten-free bread. *Journal of Texture Studies* 43 (1), pp29-39.

KTENIOUDAKI A., BUTLER F., GALLAGHER E., 2010. Rheological properties and baking quality of wheat varieties from various geographical regions. *Journal of Cereal Science* pp1-7.

-L-

LAGRAIN B., BRIJS K., DELCOUR J.A., 2006. Impact of redox agents on the physico-chemistry of wheat gluten proteins during hydrothermal treatment. *Journal of Cereal Science* 44,pp 49–53

LAHLOU I., 1999. Caractéristiques de texture et propriétés tribologiques des systèmes alimentaires. Mémoire en vue de l'obtention d'un grade du maître ès science université Laval. 113P.

LAEMMLI U.K., 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature* 227, pp 680–685.

LASSOUED-OUALDI N., 2005. Structure alvéolaire des produits céréaliers de cuisson en lien avec les propriétés rhéologiques et thermiques de la pâte : Effet de la composition. Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires. THESE présentée pour obtenir le grade de Docteur Spécialité : Sciences Alimentaires. 163P.

LECOQ R., 1965. Manuel d'analyses alimentaires et d'expertises usuelles. tome 1. Edi DOIN. DEREN et CIE, Paris. 938 P.

LEFEBVRE-CASES E., GASTALDI E., VIDAL V., MARCHESSEAU S., 1988. Identification of Interactions Among Casein Gels Using Dissociating Chemical Agents. J Dairy Sci 81, pp932-938.

LEVAVASSEUR L., 2007. Suivi simultané de la consommation d'oxygène et de la consistance des pâtes de farine de blé à l'aide d'un pétrin instrumenté (le sitoxygraphe) : tentative d'explication biochimique et rhéologique. Application à l'ajout de laccases. Thèse de doctorat en sciences alimentaires. Ecole doctorale ABIES, université paris VII, 414P.

LIAO L., LIU T., ZHAO M., ZHAO H., CUI C., 2011. Aggregation behavior of wheat gluten during carboxylic acid deamidation upon hydrothermal treatment. Journal of Cereal Science 54, pp129-136.

LINDSAY M.P., TAMAS L., APPELS R., SKERRITT J.H., 1999. Direct Evidence that the Number and Location of Cysteine Residues Affect Glutenin Polymer Structure. J. Cereal Sci., in press.

LIU Y C, SHEPHER K.W, HOSENEY R.C. 1996. Improvement of durum wheat postamaking and bread making qualities. Cereal Chemistry 73, pp155-166.

LI VIGNI M., COCCHI M., 2013. Near infrared spectroscopy and multivariate analysis to evaluate wheat flour doughs leavening and bread properties. Analytica Chimica Acta 764, pp17– 23.

-M-

MAILHOT W.C., PATTON J.C., 1988. Criteria of flour quality. In: Pomeranz, Y. (Ed.), Wheat Chemistry and Technology, third ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, USA. Pp 69-88.

MARCHETTI L., CARDÓS M., CAMPAÑA L., FERRERO C., 2012. Effect of glens of different quality on dough characteristics and breadmaking performance. LWT - Food Science and Technology 46, pp 224-231.

- MARES D.J, STONE B.A. 1973a.** Studies on wheat endosperm. In. Chemical composition and ultrastructure of the cell walls. Australian Journal of Biological Sciences 26, pp793-812.
- MARKUS G., KARUSH F., 1957.** Structural effects of the interaction of human serum albumin with sodium dodecyl sulfate. J. Am. Chem. Soc 79, pp 3264-3269.
- MARTIN P. J., CHIN N. L., CAMPBELL G. M., MORRANT, C. J. 2004.** Aeration during bread dough mixing. III. Effect of scale-up. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C, Food and Bioproducts Processing 82, pp282–290.
- MCCANN T.H., SMALL D.M, BATEY I.L., WRIGLEY C.W., DAY L., 2009.** Protein-lipid interactions in gluten elucidated using acetic-acid fractionation. Food Chemistry 115, pp105-112.
- MEEHTA K.L, SCANLON M.G, SAPIRSTEIN H.D, PAGE J.H. 2009.** Ultrasonic investigation of the effect of vegetable shortening and mixing time on the mechanical properties of bread dough. Journal of Food Science 74,pp P455-461.
- MEUSER F., SUCKOW P., BLANSHARD J.M.V., FRAZIER P.J., GALLIARD T., 1986.** Non-starch polysaccharides. In: (EDS), Chemistry and physics of baking, London: The Royal Society of Chemistry, pp42-61.
- MEYER E.E, ROSENBERG K.J, ISRAELACHVILI J. 2006.** Recent progress in understanding hydrophobic interactions. PNAS 103, pp15739-15746.
- MICHNIEWICZ J., BILIADERIS C.G, BUSHUK W., 1991.** Effect of added pentosanes on some physical and technological characteristics of dough and gluten. Cereal Chemistry 68, pp252-258.
- MILLAR S., 2006.** Role of the dough mixing process in bread production. In: HELDMAN D.R. (ED.), Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering. Taylor et Francis Group, London, pp1-4.
- MINGWEI W., GIDEON O., TONVAN V., ROBERT J. 2003.** Interaction of water unextractable solids with gluten protein: effect on dough properties and gluten quality. Journal of Cereal Science 38, pp95-104.
- MIRALBES C., 2004.** Quality control in the milling industry using near infrared transmittance spectroscopy. Food Chemistry 88 (4), pp 621-628.

MONDAL A., DATTA A.K., 2008. Bread baking – a review. *Journal of Food Engineering* 86 (4), pp 465–474.

MONTEL G., LATTES A., HEUGHEBAERT M., 1979. Introduction à la chimie structurale. BORDAS, Paris.239P.

MOON M.H., GIDDINGS J.C., 1993.Rapid separation and measurement of particle size distribution of starch granules by sedimentation/steric field-flow fractionation. *Journal of Food Science* 58, pp1166-1171.

-N-

NAEGA S., 2005. Wheat and flour testing methods: A guide to understanding wheat and flour quality. Published by "Wheat Marketing Center, Inc". Portland, Oregon, USA. 71P.

NAMOUS H., 2013. Formulation d'une farine-biscuit de sevrage sans gluten à base de Riz, Maïs et Pois Chiche. Mémoire de magister, option biochimie et technologie alimentaire, INATAA, Université Mentouri de Constantine. 80P.

NOZAKI Y, TANFORD C. 1963. The solubility of amino acids and related compounds in aqueous urea solutions. *J. Biol. Chem*, 238, pp 4074-4081.

-O-

OSBORNE B.G., HENRY R.J., SOUTHAN M.D., 2007. Assessment of commercial milling potential of hard wheat by measurement of the rheological properties of whole grain. *Journal of Cereal Science* 45 (2), pp122-12.

-P-

PAREYT B., FINNIE S.M, PUTSEYS J A., DELCOUR J. A., 2011. Lipids in bread making: Sources, interactions, and impact on bread quality. *Journal of Cereal Science* 54, pp 266-279.

PARKER R., RING S.G., 2001.Aspects of the physical chemistry of starch. *Journal of Cereal Science* 34, pp 1-17.

PENA E., BERNARDOA A., SOLERB C., JOUVEA N., 2006. Do tyrosine crosslinks contribute to the formation of the gluten network in common wheat (*Triticum aestivum* L.) dough?. *Journal of Cereal Science*, 44, pp 144-153.

PERESSINI D., PEIGHAMBARDoust S.H., HAMER R.J., SENSIDOUNI A., VAN DER GOOT A.J. 2008. Effect of shear rate on microstructure and rheological properties of sheared wheat doughs. *Journal of Cereal Science* 48, pp 426-438.

-R-

RATTÉ G., 2013. Interaction entre un peptide de β -lactoglobuline bovine (β -lg f1-8) et les protéines du lactosérum Le cas de l' α -lactalbumine. Mémoire Maîtrise en sciences et technologie des aliments. 77P.

RENARD C., THERY S., 1998. Détermination des méthodes physicochimiques pour prédire la qualité biscuitière des blés français. *Industries des Céréales* 109, pp31–36.

-S-

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

Song Y., Zheng Q., 2007. Dynamic rheological properties of wheat flour dough and proteins. *Trends in Food Science and Technology* 18, pp132-138

SAYASLAN A., (2004). Wet-milling of wheat flour: industrial processes and smallscale test methods. *LWT-Food Science and Technology* 37, pp 499-515.

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

SCHIMMERLING P., SISSON J.C., ZAIDI A., 1988. Pratique des plans d'expériences. *Technique et documentation Lavoisier*, pp 61-438.

SERRA J., 1982. Image Analysis and Mathematical Morphology. London: Academic Press,610 P.

SHEWRY P.R., TATHAM A.S., 1997. Disulphide bonds in wheat gluten proteins. *Journal of Cereal Science* 25, pp 207-227.

SHEWRY P.R., HALFORD N.G., 2002. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany* 53, pp 947-958.

SHIBANUMA K., TAKEDA Y., HIZUKURI S., SHIBATA S., 1994. Molecular structures of some wheat starches. *Carbohydrate Polymers* 25, pp 111-116.

SINGH H., MACRITCHIE F., 2001. Application of polymer science to properties of gluten. *Journal of Cereal Science* 33, pp 231-243.

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

SROAN B., BEAN S., MACRITCHIE F., 2009. Mechanism of gas cell stabilization in breadmaking I, II. The primary gluten starch matrix. *Journal of Cereal Science* 49, pp 32-40, 41- 46.

STRYER L., BERG J.M., TYMOCZK J.L., 2003. *Biochimie. Flammation medicine-sciences (5^{eme} ed.)*, 792P.

-T-

TATHAM A.S., SHEWRY P.R., 1995. The S-poor Prolamins of Wheat, Barley and Rye. In *J. Cereal Sci.* 22,pp1-16.

TILLEY K.A., BENJAMIN R.E., BAGOROGOZA K.E., OKOT-KOTBER B.M., PRAKASH O., KWEN H., 2001. Tyrosine cross-links: Molecular basis of gluten structure and function. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49, pp 2627-2632.

TOUFEILI I., ISMAIL B., SHADAREVIAN S., BAALBAKI R., KHATKAR B. S., BELL A. E., 1999. The role of gluten proteins in the baking of Arabic bread. *Journal of Cereal Science* 30, P255-265.

-V-

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

VERAVERBEKE W.S., DELCOUR J.A., 2002. Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 42, pp179-208.

-W-

WANG M., OUDGENOEG G., VLIET T.V., HAMER R. J., 2003. Interaction of water unextractable solids with gluten protein: effect on dough properties and gluten quality. *Journal of Cereal Science* 38, pp 95–104.

WANG J., ZHAO M., ZHAO Q., 2007. Correlation of glutenin macropolymer with viscoelastic properties during dough mixing. *Journal of Cereal Science* 45, pp128–133.

WANG A., GAO L., LIA X., ZHANG Y., HE Z., XI X., ZHANG Y., YAN Y., 2008. Characterization of two 1D-encoded ω -gliadin subunits closely related to dough strength and pan bread-making quality in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Cereal Science* 47, pp528–535

WIESER H., 2007. Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiology* 24, pp 115-119.

WITCZAK M., KORUS J., ZIOBRO R., JUSZCZAK L., 2010. The effects of maltodextrins on gluten-free dough and quality of bread. *Journal of Food Engineering*, 96(2), pp 258-265.

-Y-

YASUKO K., KAZOU S, HIRONORI K, YUJI H., 2013. Improvement in gluten-free rice bread quality by protease treatment. *Journal of Cereal Science* 58, pp 45-50.

YIHU S., QIANG Z., 2007. Dynamic rheological properties of wheat flour dough and proteins. *Food Science & Technology* 18, pp132-138.

YUN Z., DAN Z., TIM J. F., YIXIN L., YU W., SATORU N., EIZO T., YONGQIANG C., 2014. Konjac glucomannan-induced changes in thiol/disulphide exchange and gluten conformation upon dough mixing. *Food Chemistry* 143, pp163-169.

-Z-

ZHOU Y., ZHAO D., FOSTER T.J., LIU Y., WANG Y., NIRASAWA S., TATSUMI E., CHENG Y., 2014. Konjac glucomannan induced changes in thiol/disulphide exchange and gluten conformation upon dough mixing. *Food Chemistry* 143, 163–169.

ZIKIOU A., 2013. La coagulation du lait par l'extrait des fleurs de cardon (*Cynara cardunculus*). Mémoire de magister, option biochimie et technologie alimentaire. I.N.A.T.A.A. université Constantine 1. 87P.

ZOBEL H.F., 1988. Starch crystaltrans formations and their industrial importance. *Starch/Starcke* 40, pp 1-7.

ANNEXE 01

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des valeurs de Cochrane calculées $(C_e)_{cal}$

agent dissociant	concentration	$(C_e)_{cal}$
SDS (%)	1	0,83
	2	0,72
	4	0,8
	5	0,78
	6	0,73
	8	0,65
	10	0,65
β mercapto-éthanol (M)	0,01	0,8
	0,04	0,68
	0,08	0,68
	0,4	0,59
	0,8	0,82
	1	0,8
Acide acétique (%)	10	0,4
	20	0,48
	30	0,73
	40	0,77
	50	0,87
	60	0,54
Urée (M)	0,001	0,57
	0,004	0,45
	0,008	0,69
	0,04	0,44
	0,08	0,72
	0,1	0,74

ANNEXE 02

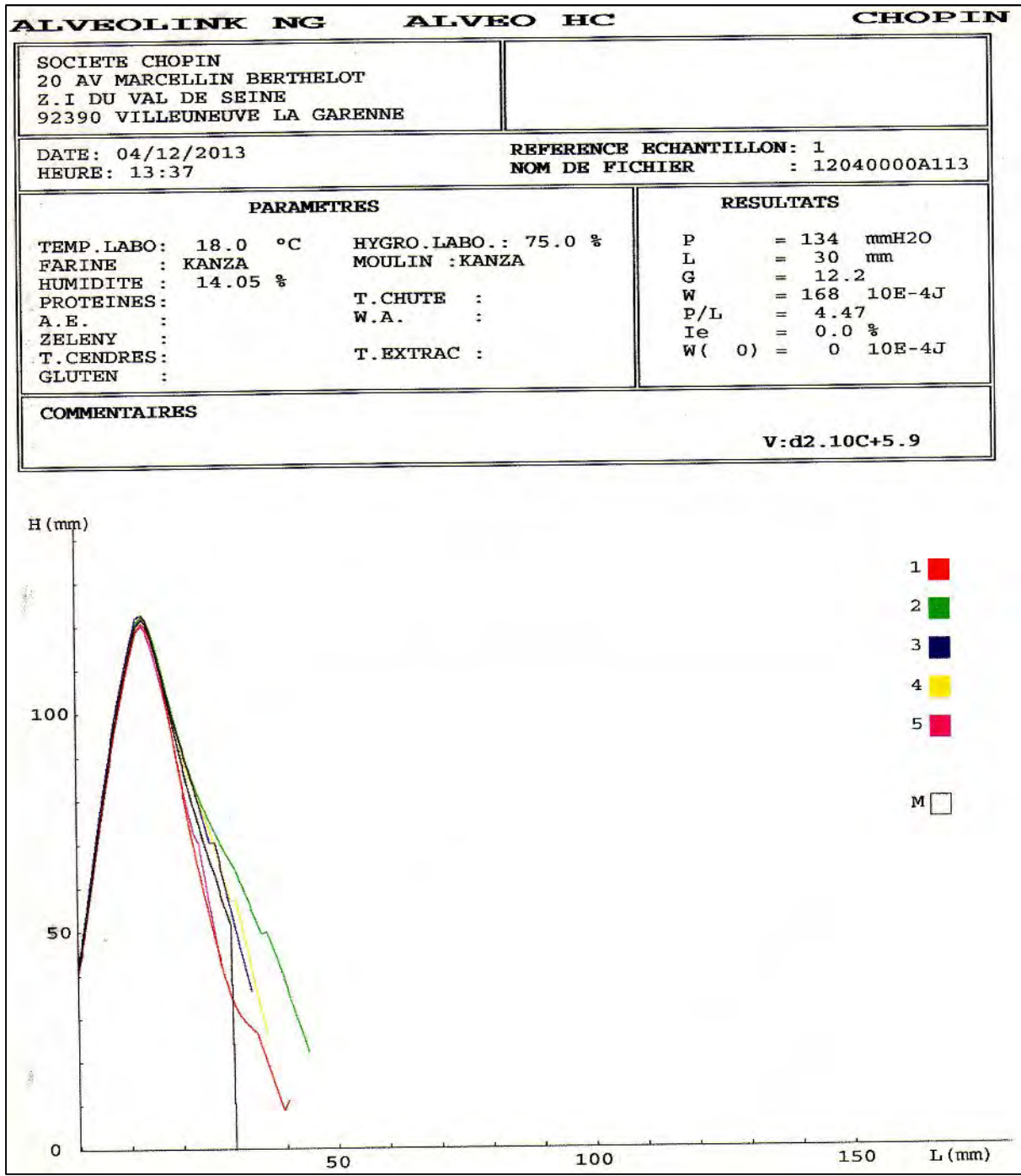


Figure 1 : Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre (FBT1) faite sur l'Alvéographe Chopin.

ALVEOLINK NG ALVEO HC		CHOPIN
SOCIETE CHOPIN 20 AV MARCELLIN BERTHELOT Z.I DU VAL DE SEINE 92390 VILLEUNEUVE LA GARENNE		AOUATIF
DATE: 26/01/2014 HEURE: 15:10		REFERENCE ECHANTILLON: AOUTEF NOM DE FICHER : 01260403A114
PARAMETRES TEMP.LABO: HYGRO.LABO.: FARINE : MOULIN :GRAREM HUMIDITE : 15.75 % PROTEINES: T.CHUTE : A.E. : W.A. : ZELENY : T.EXTRAC : T.CENDRES: : GLUTEN : :		RESULTATS P = 65 mmH2O L = 66 mm G = 18.1 W = 145 10E-4J P/L = 0.98 Ie = 47.9 % W(0) = 0 10E-4J
COMMENTAIRES <div style="text-align: right;">V:d2.10C+5.9</div>		

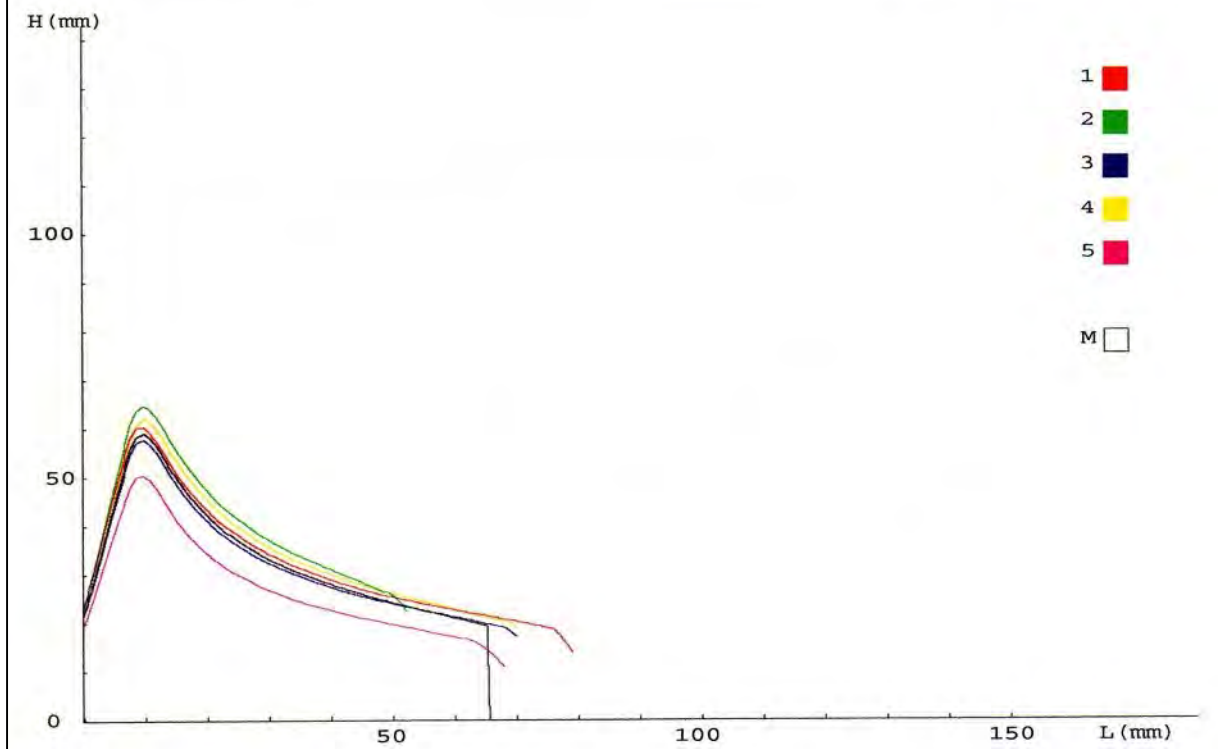


Figure 2 : Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre (FBT2) faite sur l'Alvéographe Chopin.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تطوير طريقة لتصنيف العجائن القابلة للخبز اعتمادا على التفكيك الكيميائي للروابط الجزئية.

التجارب التي قمنا سمحت لنا باختيار العامل المفكك الخاص بكل صنف من الروابط المتواجدة في العجائن الموجهة للخبز. كذلك قمنا بتحديد مجالات عمل هذه العوامل المفككة مع ترسيخ مختلف الشروط المؤدية الى تفكك محسوس . تقدير أثر التفكيك أجري عن طريق رسم منحنيات تمثل تطور نسبة التفكيك بدلالة تركيز العوامل المفككة. اعتمدنا على طريقة التفكيك الكيميائي من أجل تصنيف ثلاثة أنواع مختلفة من عجائن قابلة للخبز، اثنان منها من القمح اللين، وأخرى خالية من الغلوتين. النتائج المحصل عليها تمت مقارنتها مع ترتيب آخر قمنا به على أساس طرق مرجعية (الفيوغراف شوبان , وتجارب صناعة الخبز).

أحسن تشكيل للعجائن الذي سمح بتوسيع مساحة الملامسة مع العامل المفكك هو التشكيل على شكل قرص قطره 8 سم وسمكه 1مم. مجالات عمل العوامل المفككة المختارة التي سمحت بأحسن سهولة للعمل هي SDS: [0 - 4] % للتفاعلات الكارهة للماء, β - ماركابتو - إيثانول [0 - 1] M للروابط الكبريتية, حمض الأسيتيك [20 - 60] M للتفاعلات الشاردية ,و اليوريا [0 - 0,08] M للروابط الهيدروجينية. الوقت المثالي المحصل عليه هو 30 دقيقة لـ SDS, β ماركوبيتو إيثانول وحمض الاسيتيك ضد 1 ساعة لليوريا. طريقة التفكيك الكيميائي للتفاعلات الجزئية سمحت بتصنيف العجائن القابلة للخبز في نفس سياق الطريقة المرجعية وذلك بدلالة الروابط الكارهة للماء, الروابط الكبريتية, الأيونية والروابط الهيدروجينية. طريقة التفكيك الكيميائي للتفاعلات الجزئية سمحت بتصنيف العجائن القابلة للخبز بنفس الترتيب المحصل عليه باستعمال الطرق المرجعية في مجالات التراكيز التالية % [2 - 0] من الـ SDS, [0,1 - 0,001] M من β - ماركابتو - إيثانول % [30 - 60] من حمض الأسيتيك و [0,004 - 0,0015] M من اليوريا. هذه النتائج وضعت في المرتبة الأولى العجائن المصنوعة من القمح اللين صنف 2, متبوعة بالصنف 1 ، وفي آخر التصنيف الصيغة الخالية من الغلوتين.

في الختام نستطيع أن نصادق على الطريقة الجديدة لتصنيف العجائن القابلة للخبز وذلك باعتماد طريقة التفكيك الكيميائي للتفاعلات الجزئية كطريقة سهلة , سريعة , عملية وفعالة

الكلمات المفتاحية : عجينة معجونة , تفاعلات جزئية , عوامل مفككة , نسبة التفكيك .

Abstract

The objective of our work is the development of a method of classification of the pastes suitable for making bread while being based on the chemical dissociation of the molecular interactions.

Tests were carried out allowing the choice of the agents dissociating specific for each existing type of interaction within the pastes suitable for making bread. The delimitation of the fields of feasibility of these dissociating agents as well as the fixing of the various parameters leading to an appreciable dissociation of these interactions is carried out. The estimate of the dissociating effect was done by the tracing of the curves describing the evolution of the rates of dissociation according to the concentrations in dissociating agents. We applied the method of dissociation chemical for the classification of three pastes of various qualities bakers two containing control wheat and one without gluten. The results obtained are compared with the discrimination of these three pastes by conventional methods (Chopin Alveograph, test of bread making).

The best shape of pastes allowing the optimization of the surface of contact with the dissociating agent is the presentation in the form of discs with 8 cm diameter and 1 mm thickness. The selected dissociating agents allowing the greatest flexibility of work as their fields of feasibility are : the SDS of [0 - 4] % for the hydrophobic interactions, the β mercapto- ethanol of [0 - 1] M for the bonds disulphide, the acetic acid of [20 - 60] % for the ionic interactions and urea of [0 - 0,08] M for the bonds hydrogen. The optimal time of contact is 30 min for the SDS, the β mercapto- ethanol and the acetic acid, against 1 hour for urea. The method of dissociation chemical of the molecular interactions allowed the classification of our pastes bakers in the same order as the conventional methods according to the hydrophobic interactions in]0 - 2]% of SDS, of the bonds disulphide in]0,001 – 0,1]M of β mercapto- ethanol , the ionic interactions in]30 - 60]% of acetic acid and bonds hydrogen in]0,0015 – 0,004] of urea. The results obtained put in first position the pastes of the control wheat flour 2, followed by those of the control wheat flour 1 then gluten-free formula.

In conclusion we could validate the new method of the classification of the pastes suitable for making bread by the chemical dissociation of the molecular interactions, it is that a simple, fast, practical and reliable method.

Key words: kneaded paste, molecular interactions, agents dissociating, rate of dissociation.

Résumé

Le but de notre travail est la mise au point d'une méthode de classification des pâtes panifiables en se basant sur la dissociation chimique des interactions moléculaires.

Des essais ont été réalisés permettant le choix des agents dissociant spécifiques pour chaque type d'interaction existante au sein des pâtes panifiables. La délimitation des domaines de faisabilité ainsi que le choix de la forme de la pâte et le temps de contact avec ces agents dissociant est effectuée. L'estimation de l'effet dissociant s'est fait par le traçage des courbes décrivant l'évolution des taux de dissociation en fonction des concentrations en agents dissociant. Nous avons appliqué la méthode de dissociation chimique pour la classification de trois pâtes boulangères de différentes qualités deux à base de blé tendre et une sans gluten. Les résultats obtenus sont comparés avec la discrimination de ces trois pâtes par des méthodes conventionnelles (alvéographe Chopin, test de panification).

La meilleure forme de pâtes permettant l'optimisation de la surface de contact avec l'agent dissociant est la présentation sous forme de disques de 8 cm de diamètre et 1 mm d'épaisseur. Les agents dissociant sélectionnés permettant la plus grande flexibilité de travail ainsi que leurs domaines de faisabilité sont : le SDS [0 - 4] % pour les interactions hydrophobes, le β mercapto-éthanol [0 - 1] M pour les liaisons disulfures, l'acide acétique [20 - 60] % pour les interactions ioniques et l'urée [0 - 0,08] M pour les liens hydrogènes. Le temps optimal de contact est de 30 min pour le SDS, le β mercapto-éthanol et l'acide acétique, contre 1 heure pour l'urée. La méthode de dissociation chimique des interactions moléculaires a permis la classification de nos pâtes boulangères dans le même ordre de classement obtenu par des méthodes conventionnelles dans les intervalles de concentrations]0 - 2]% en SDS,]0,001 – 0,1] M en β mercapto-éthanol,]30 - 60]% en acide acétique et]0,0015 – 0,004] M en urée. A partir de ces résultats, les taux de dissociations les plus élevés sont notés respectivement pour pâte de blé tendre type 2, pâte blé tendre type1 puis pâte sans gluten.

En conclusion nous avons pu de valider la nouvelle méthode de la classification des pâtes panifiables par la dissociation chimique des interactions moléculaires, entant qu'une méthode simple, rapide, pratique et fiable.

Mots clé : pâte pétrie, interactions moléculaires, agents dissociant, taux de dissociation.