

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE 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 :
Série :

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Alimentaires

Option : Biochimie et Technologie Alimentaire

*Mise au point d'une technique pour le suivi des
cinétiques de fermentation de pâtes boulangères avec
et sans gluten*

Présenté par:

BOUREKOUA Hayat

Devant le Jury :

Président :	AGLI A.	Prof.	INATAA-UC1
Promoteur :	ZIDOUNE M.N.	Prof.	INATAA-UC1
Co-promoteur:	BENATALLAH L.	M.C.	INATAA-UC1
Examineurs :	OULAMARA H.	M.C.	INATAA-UC1
	BEKHOUCHE F.	M.C.	INATAA-UC1

Année universitaire 2012-2013

Remerciements

Je rends grâce à Dieu, le miséricordieux, le tout puissant, pour ce miracle appelé vie, que sa lumière nous guide vers lui, et que son nom soit l'élixir de nos peines et douleurs.

*Tout d'abord, je tiens à remercier 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 m'avoir donné la chance de travailler sous sa direction, pour m'avoir dirigée tout au long de la réalisation de ce travail, pour ses encouragements mais surtout pour son générosité dans le travail, qu'il trouve en ces mots toute ma gratitude.*

*Mes remerciements les plus distingués à Madame **BENATALLAH Leila** pour son esprit scientifique, ses précieux conseils et ses encouragements. Son intérêt à mon sujet de mémoire, et ses précieuses et clairvoyantes orientations.*

Mes remerciements sont adressés aux membres du Jury qui ont pris sur leur temps et ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail :

*Mr le professeur **AGLI** qui m'a fait l'honneur de présider ce Jury*

*Mr le professeur **BEKHOUCHE** qui a eu l'amabilité de participer à ce Jury*

*Mme **OULAMARA** qui a bien voulu examiner ce travail*

*Je tiens à remercier Mlle **BOULEMKAHEL Souad**, **KAHEL Farida**, **NAMOUS Hadjer**, **SMILI Hanane**, **SENOUSSI Asma**, **FALEK Wahiba**, Messieurs **ZIKIOU Abedallah**, **BELBELDI Abdessalem** pour leur aide inestimable, mais aussi pour leur amitié précieuse, qu'ils trouvent ici les plus sincères marques d'affection.*

*Je remercie également Mlle **DIB Ahlam**, Messieurs **CHEMACH Loucif**, **BOUASSLA Abdallah**, **BENASALEM Adel** et **GOMRI Mohammed Amine** pour leurs conseils et leur disponibilité.*

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

*Enfin, Merci à **Ma famille**...et surtout à ma mère, elle qui continue de croire en moi malgré toutes les difficultés et tous les obstacles.*

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1. Fermentation panaire.....	3
1. Définition et mécanisme de la fermentation.....	3
2. Rôle du pétrissage dans la formation des alvéoles gazeuses.....	3
3. Expansion gazeuse.....	4
4. Stabilité de la phase gazeuse.....	6
4.1. Existence d'un film interfacial.....	6
4.2. Rôle des constituants de la pâte dans la stabilisation de la phase gazeuse.....	7
4.3. Rôle des propriétés rhéologiques dans la stabilisation de la phase gazeuse.....	8
5. Rôle de la fermentation panaire.....	9
6. Types de la fermentation panaire	9
6.1. Fermentation au levain.....	9
6.2. Fermentation à la levure boulangère.....	10
7. Influence de différents facteurs sur l'activité fermentative.....	10
Chapitre 2. Techniques de l'évaluation de la fermentation panaire.....	13
1. Méthodes basées sur la mesure du gonflement d'un pâton : Pousse BERLINOISE.....	13
2. Méthodes basées sur la mesure de la pression résultante du dégagement du gaz carbonique : Manomètre de BLISH et SANDSTEDT.....	13
3. Méthodes mesurant le volume de gaz carbonique dégagé.....	14
3.1. Fermentomètre de BURROWS et HARRISON.....	14
3.2. Fermentographe SJA.....	14
3.3. Fermentographe BRABENDER.....	14
3.4. Zymotachygraphe.....	15
3.5. Rhéofermentomètre CHOPIN.....	16
4. Méthodes basées sur la mesure de la densité de la pâte	16
4.1. Technique décrite par CAMPBELL <i>et al.</i> 2001	17
4.2. Technique décrite par CHIOTELLIS et CAMPBELL (2003).....	17
5. Méthodes basées sur le suivi de la fermentation d'un pâton par utilisation d'onde acoustique .	18
6. Méthodes basées sur le suivi de la fermentation de la pâte par imagerie	19

6.1. Technique de suivie de la fermentation par imagerie RMN	19
6.2. Technique de suivi de la fermentation par imagerie numérique.....	20
6.3. Technique de suivi de fermentation par micro-tomographie à rayon X.....	21
7. Evaluation de la fermentation des pâtes sans gluten	22
Chapitre 3. Caractérisation de la structure alvéolaire par analyse d'image.....	23
1. Analyse d'image	23
1.1. Morphologie mathématique	23
1.2. Analyse de texture	24
2. Acquisition et analyse d'image des produits alvéolés	24
3. Granulométrie par morphologie mathématique	26
 MATERIEL ET METHODES	
I. Matières premières	28
1. Farine de blé tendre.....	28
2. Ingrédients exempts de gluten.....	28
2.1. Farine du riz.....	28
2.2. Farine de féverole	28
3. Autres ingrédients.....	29
II. Formulation sans gluten	29
III. Caractérisation technologique et rhéologique des farines.....	29
1. Détermination de l'humidité des farines.....	29
2. Détermination de la quantité d'eau à ajouter dans les farines (taux d'hydratation).....	31
3. Détermination de la teneur en gluten.....	32
4. Détermination de l'activité alpha-amylasique.....	34
5. Caractérisation rhéologique des farines par l'Alvéographe Chopin.....	35
IV. Suivi de cinétiques de fermentation des pâtes.....	37
1. pâtes à base de blé tendre.....	38
2. pâtes sans gluten.....	38
3. Détermination du volume et de l'expansion des pâtes	40
V. Caractérisation de la structure alvéolaire des pâtons par analyse morphologique mathématique.....	41
1. Granulométrie en niveau de gris.....	41
2. Traitement des images.....	42
3. Classification des courbes granulométriques par Analyse en Composante Principale (ACP).....	46
VI. Analyse statistique.....	47

RESULTATS ET DISCUSSION

I. Caractérisation technologique et rhéologique des farines.....	48
1. Teneur en eau.....	48
2. Teneur en gluten.....	48
3. Activité alpha-amylasique.....	49
4. Propriétés rhéologique des farines par l'alvéographe Chopin.....	48
4.1. Indice de gonflement « G »	50
4.2. Rapport de configuration « P/L ».....	51
4.3. Travail de déformation « W »	51
II. Suivi de cinétiques de fermentation de pâtes	52
III. Caractérisation texturale des pâtes fermentées et classification par ACP.....	54
1. Caractérisation texturale des pâtes fermentées	54
2. classification par Analyse en Composante Principale (ACP)	57
3. classification par ACP des courbes granulométrique des textures obtenues par imagerie numérique.....	58
4. Conclusions et validation de la technique de suivi des cinétiques de fermentation des pâtons fermentés congelés et lyophilisés.....	59
 CONCLUSION ET PERSPECTIVES	 61
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 63
 ANNEXES	
 RESUMES	

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composante Principale

CCD : Charge Coupled Device

CIM : Centre d'Imagerie Médical

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

FRF : Formule Riz-Féverole

GH: Gluten Humide

GI: Gluten Index

GS: Gluten Sec

ICC : Association Internationale de Chimie Céréalière

IRM : Imagerie à Résonance Magnétique

LNTA : Laboratoire de Nutrition et Technologies Alimentaires

RMN : Résonance Magnétique Nucléaire

TEPA : Technologie et Elaboration des Produits Alimentaire

TIFF: Tagged Image File Format

VS : Volume Spécifique

XRT : X Ray Tomography

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1. Représentation schématique des mécanismes de (1) diffusion du CO ₂ ; (2) diffusion de l'eau liquide ; (3) évapo-condensation et (4) expansion des gaz.....	5
Figure 2. Structure du réseau de gluten (x 150-Coloration orange acridine).	6
Figure 3. Observation en microscopie électronique à balayage d'une pâte à pain à différents stades de fermentation (a) 15 min, (b) 40 min : les flèches montrent les trous dans les parois de la pâte	7
Figure 4. Courbes obtenues au Zymotachygraphe chopin pour deux levures différentes	16
Figure 5. Schéma de l'installation de mesure le volume d'imperméabilisation de la pâte	18
Figure 6. Dispositif acoustique de basse fréquence pour surveiller la fermentation de la pâte	19
Figure 7. Sections IRM de pâte à pain pour t=20 min, 1h, 2h de gauche à droite.....	20
Figure 8 : Dispositif caméra numérique et étuve.....	20
Figure 9. Images obtenues à différents temps de fermentation par micro-tomographie par rayon X pour cinq formules différentes (taille de l'image Ø= 5mm, résolution 5µm).....	21
Figure 10. Dessiccateur contenant les nacelles.....	30
Figure 11. Appareil pour le dosage du gluten	33
Figure 12. Présentation du Falling Number.....	35
Figure 13. Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre faite sur l'Alvéographe Chopin.....	37
Figure 14. Diagramme montrant les différentes voies d'acheminement de nos pâtes.....	39
Figure 15. Principe de codage des intensités des niveaux de gris d'une image monochrome sous la forme d'un tableau chiffré.....	42
Figure 16. Exemple d'application d'étapes d'érosion et de dilatation de taille 5, 10 et 25 sur la région d'intérêt d'un pâton congelé et lyophilisé.....	44
Figure 17. Courbe de décroissance de la somme des niveaux de gris selon les étapes de dilatations et d'érosions	45

Figure 18. Courbe de texture granulométrique en niveaux de gris.....	46
Figure 19. Cinétique d'expansion gazeuse (Exp p.cent) de deux farines de blé tendre et de la formule sans gluten FRF.....	52
Figure 20. Courbes granulométriques de cinétique à base de farine de blé tendre 1.....	55
Figure 21. Courbes granulométriques de cinétique à base de farine de blé tendre 2....	55
Figure 22. Courbes granulométriques de cinétique à base d'une formule sans gluten FRF.....	56
Figure 23. Carte de ressemblances issue de l'analyse en composantes principales sur les courbes granulométriques de texture de trois types de farines (images scannées)...	57
Figure 24. Carte de ressemblances issue de l'analyse en composantes principales sur les courbes granulométriques de texture de trois types de farines (images numériques).	59

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1. Etude comparée de fermentation panaire.....	10
Tableau 2. Quantités d'eau à ajouter pour le suivi des cinétiques de fermentation et pour les essais à l'Alvéographe Chopin	32
Tableau 3. Caractérisation technologique des farines de blé tendre 1 et 2 ainsi que de la FRF.....	48
Tableau 4. Caractérisation alvéographique des farines de blé tendre et de la formule sans gluten	50

Introduction

Quand un mélange eau-farine est développé en pâte, le gluten forme un réseau viscoélastique capable de piéger les bulles et de retenir le CO₂ (PEIGHAMBARDOUS *et al.*, 2010). Pour les pâtes sans gluten, la rétention gazeuse nécessite la présence d'un hydrocolloïde comme substitut du gluten (TORBICA *et al.*, 2010).

La fermentation anaérobie est une étape spécifique aux produits de panification, elle a un rôle principal d'enrichir la pâte en dioxyde de carbone. Elle provoque une perte en matière totale entre 2 et 3% par transformation des sucres en alcool et en gaz carbonique accumulé dans le réseau protéique formé principalement de gluten, provoquant la croissance et la coalescence des alvéoles, ce qui se traduit par une augmentation du volume de la pâte (LASSOUED, 2005).

La fermentation est une étape essentielle du processus de panification pour établir la structure alvéolaire du pain. Elle a été caractérisée essentiellement par la mesure du taux d'expansion et de la production du CO₂. Pour cette dernière, plusieurs appareils ont été inventés. Nous citerons le fermentomètre de BURROWS et HARRISON (GODON et LOISEL, 1984), les fermentographes SJA (DUBOIS, 1983) et BRABENDER (GODON et LOISEL, 1984), le zymatochygraphe (DUBOIS, 1983) et le rhéofermentomètre Chopin (KTENIOUDAKI *et al.*, 2010). Le suivi des changements de la structure interne des pâtes fermentées en trois dimensions (3D) a été approché par microscopie à balayage électronique (HE et HOSENEY, 1991).

Le suivi des cinétiques de fermentation pourrait être un outil d'investigation intéressant pour bien comprendre les mécanismes de croissance et de coalescence des alvéoles. Des méthodes d'analyse ont été développées dans ce contexte : SCANLON et ZGHALI (2001), ont proposé le classement qualitatif et la notation d'un jury d'experts pour la description de la structure alvéolaire. Par ailleurs, ceci reste subjectif et peu précis. LASSOUED(2005) a utilisé l'analyse de la morphologie mathématique pour la caractérisation des pains français. Quand, BABIN *et al.* (2006), ils ont utilisé la tomographie par rayons X pour suivre la fermentation à travers des images en trois dimensions (3D). Cette technique est intéressante car, elle permet la visualisation de la structure interne des échantillons de pâtes construites à partir d'une série de coupes à des angles différents. Récemment, des méthodes d'étude non destructives basées sur l'imagerie par Résonance Magnétique Nucléaire (IRM) ont été appliquées au pain et à la pâte pour en optimiser la formulation, et la mise en œuvre. Les images obtenues ont permis la détermination de la structure cellulaire et le suivi de la fermentation (ISHIDA *et al.*, 2001).

Cependant, cette technique reste chère et nécessite un matériel spécifique et un personnel qualifié.

Une première étude sur le suivi de cinétiques de fermentation de pâtes sans gluten a été entreprise au Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.) dans le cadre d'un doctorat en sciences alimentaires (BENATALLAH, 2009). Cette technique basée sur le suivi des cinétiques de fermentation de pâtons sans gluten congelés dans de l'azote liquide puis lyophilisés présentait néanmoins certaines insuffisances. La principale était la fragilité des pâtons séchés lors de leur découpe. Notre investigation constitue une suite de ce premier travail où nous essayerons d'améliorer et de mettre au point cette technique par utilisation d'un scanner médical à rayon X pour la confirmation des premiers résultats. Pour cela, nous avons fixé les objectifs suivants :

1. Suivi des cinétiques de fermentation par lyophilisation et fixation de la structure par de l'azote liquide sur deux farines de blé tendre et sur des produits sans gluten ;
2. Prise de vue des cinétiques par scanner médical et par appareil photo numérique sur des pâtes avec et sans gluten ;
3. Comparaison des deux techniques par analyse morphologique mathématique et classification des structures par ACP.

Partie Bibliographique

Chapitre 1. Fermentation panaire

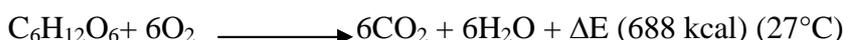
1. Définition et mécanisme de la fermentation

La fermentation, étape spécifique aux produits de panification, a pour rôle d'enrichir la pâte en dioxyde de carbone. Elle provoque une perte en matière totale (de l'ordre de 2 à 3%) par transformation des sucres en alcool et acide carbonique (CHARGELEGUE *et al.*, 1994).

La fermentation est engendrée par l'action des ferments sur les sucres présents dans la pâte qui les transforment en alcool et en gaz carbonique, avec production d'énergie (CALVEL, 1984).

Les ferments peuvent être apportés par le levain naturel « *Saccaromyces minor* » que l'on rencontre dans la nature et par la levure biologique de boulangerie « *Saccaromyces cerevisiae* » qui est fabriquée industriellement (CALVEL, 1984).

Selon CHARGELEGUE *et al.* (1994), l'oxygène introduit au cours du pétrissage permet à la levure boulangère d'établir un métabolisme de type respiratoire :



En fin de pétrissage, tout l'oxygène introduit est consommé par la levure dont le métabolisme s'oriente alors vers la fermentation alcoolique :



La fermentation s'effectue en trois étapes principales : le pointage en masse, l'apprêt et s'achève en début de cuisson. Elle doit être parfaitement contrôlée par le boulanger. Un manque ou un excès de fermentation a des conséquences sur la qualité du pain (LANGRAF, 2002).

2. Rôle du pétrissage dans la formation des alvéoles gazeuses

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

Le pétrissage consiste à appliquer une force mécanique afin d'assurer l'homogénéisation des différents ingrédients (PEIGHAMBARDoust *et al.*, 2010). Le mouvement des bras du pétrin entraîne, simultanément à l'homogénéisation, l'incorporation d'air dans la pâte sous forme de nucléi sphériques de petite taille (10 à 100µm) (HOSENEY *et al.*, 1979).

Au cours du pétrissage, les particules de farines s'hydratent, de l'air est incorporé à la pâte, une partie se dissout dans la phase aqueuse de celle-ci, l'autre se rassemble au sein de micro-bulles gazeuses. Des micro-alvéoles d'air apparaissent et se répartissent de manière aléatoire au sein de la pâte en formation. Ces micro-alvéoles sont indispensables, elles constituent les noyaux des futures alvéoles de la mie (FEILLET, 2000). L'oxydation des acides aminés soufrés des protéines entraîne la création des ponts disulfures (liaisons covalentes) intra et inter moléculaires qui associent les constituants de la pâte (MEREDITH, 1964).

La forme des alvéoles est une caractéristique importante de la qualité, le volume et la forme finale du pain, la structure aérée de pain est principalement développée au cours de la fermentation par l'expansion de vide formé par l'aire piégé au cours du pétrissage en même temps que la formation du réseau de gluten. (MARSH, 1992; CAUVAIN *et al.*, 1999).

La taille des alvéoles est principalement dépendante du type de pétrissage et de l'absorption d'énergie, dans lequel prend également compte la rhéologie de la pâte (MILLS *et al.*, 2006).

Le pétrissage d'une pâte à pain sous vide (densité = 1,25) ou non (densité = 1,15) montre que la fraction gazeuse introduite occupe 8% du volume total d'une pâte en fin de pétrissage à pression atmosphérique (BAKER et MIZE, 1941), et elle est variée selon le processus du pétrissage et la formulation de la pâte, et peut atteindre jusqu'à 20% dans les cas spécifiques. Le volume relatif, défini comme le rapport du volume de pâte total par le volume de pâte sans gaz, est un indicateur du taux d'aération de la pâte. En fin de pétrissage, il serait de l'ordre de 1,1 (BLOKSMA, 1990b ; VAN VLIET *et al.*, 1992).

3. Expansion gazeuse

Dans un processus typique de fermentation, la libération du CO₂ permet la nucléation, la croissance puis la coalescence de bulles dans la pâte (GUESSASMA, 2007).

Les bulles gazeuses qui sont déjà formées au cours du pétrissage, continuent à se développer et à retenir le gaz à l'intérieur (MILLS *et al.*, 2006). La fermentation provoque des changements de la structure cellulaire de la pâte et par conséquent, les propriétés de texture du pain en augmentant la taille des cellules gazeuses dans celle-ci avec de l'anhydride carbonique (GUILLERMO *et al.*, 2009). La stabilité et la croissance de ces

bulles de gaz détermineront le volume de pain final aussi bien que la texture du produit cuit au four (HE et HOSENEY, 1991).

D'après FEILLET (2000), une partie de gaz carbonique résultant de la fermentation des sucres par les levures se dissout dans l'eau ajoutée à la farine, le reste se dégage dans l'atmosphère. Lorsque la concentration de ce gaz dissout atteint un maximum dans la phase fluide à une température donnée, on assiste d'une part, à une diffusion du gaz vers les alvéoles préexistantes, provoquant l'expansion de ces cellules, qui vont continuer de s'expanser avec l'augmentation de la production de CO_2 et d'autre part, à une diffusion vers l'extérieur due à la porosité de la pâte (figure 1) (ROUSSEL et CHIRON, 2003).

Le développement de la pâte est possible si la pression de ces gaz augmente dans celle-ci, à condition que la structure gluténique soit apte à retenir les alvéoles gazeuses (JEANTET *et al.*, 2007).

D'après ROUSSEL et CHIRON (2003), l'expansion gazeuse dépend d'une part, de la pression atmosphérique lorsque celle-ci diminue, le développement de la pâte augmente et d'autre part, de la température, l'homogénéité de celle-ci dans la pâte pendant tout le processus de panification est aussi un facteur de régularité de la déformation, donc la structure de la mie. La pression nécessaire à l'expansion des alvéoles est d'autant plus élevée que celle-ci sont de faible dimension (FEILLET, 2000).

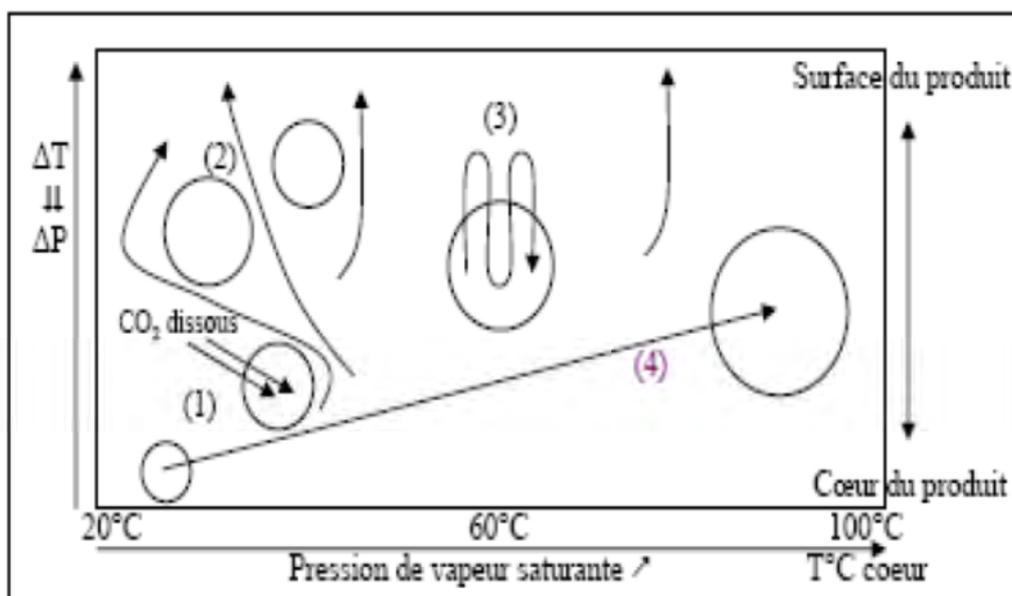


Figure 1. Représentation schématique des mécanismes de (1) diffusion du CO_2 ; (2) diffusion de l'eau liquide ; (3) évapo-condensation et (4) expansion des gaz (LOSTIE *et al.*, 2002).

4. Stabilité de la phase gazeuse

Plusieurs facteurs joueraient un rôle primordial dans la stabilisation de la phase gazeuse au cours de la fermentation. Ces paramètres influenceraient principalement la stabilité du film à l'interface air-matrice continue (figure 2). Il s'agit essentiellement des constituants majeurs de la farine (protéines, lipides, amidon et pentosanes) ainsi que d'autres additifs en panification tels que les émulsifiants.

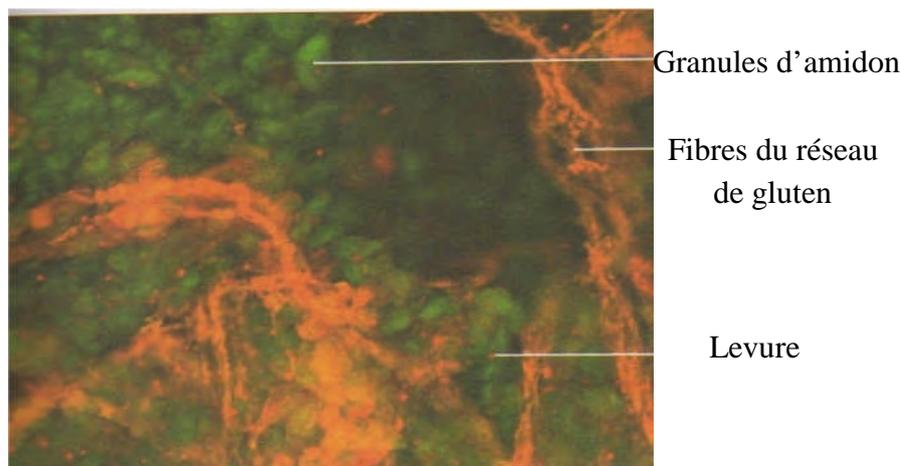


Figure 2. Structure du réseau de gluten (x 150-Coloration orange acridine).
(BRANGER *et al.*, 2007).

4.1. Existence d'un film interfacial

Les gaz sont retenus dans la pâte dès la mise en place du réseau protéique mais le gluten ne suffit pas, à lui seul, à assurer une bonne rétention du CO₂. Des observations de pâtes panifiables à différents stades de fermentation par microscopie électronique à balayage (figure 3) montrent l'apparition de trous dans la matrice continue amidon/protéines entourant les bulles gazeuses dès 15 min de fermentation. Ces trous augmentent au fur et à mesure de la production de CO₂ pour former des interconnexions entre les bulles gazeuses qui occupent jusqu'à 80% du volume total en fin de fermentation. Ces interconnexions n'existaient pas en tant que tels dans la pâte (GAN *et al.*, 1990). Les auteurs indiquent qu'en fin de pétrissage, les parois des alvéoles sont recouvertes d'un film liquide contenant des molécules tensioactives; en cas de rupture de la matrice protéique sous l'effet de la pression de gaz carbonique, le film constitue une barrière imperméable aux gaz et s'oppose à leur échappement (FEILLET, 2000).

D'après CHIOTELLIS et CAMPBELL (2003), Le film liquide assure le maintien de gaz dans les cellules même lorsque les discontinuités se forment dans la matrice amidon/gluten, aussi bien qu'il empêche la coalescence. D'un tel postulat il pourrait être prévu que les propriétés et la composition extérieures de ce film liquide rayant les cellules de gaz jouerait un rôle important dans la détermination de la distribution de grandeurs des cellules gazeuses en pain et par conséquent la structure de la mie (MILLS *et al.*, 2006).

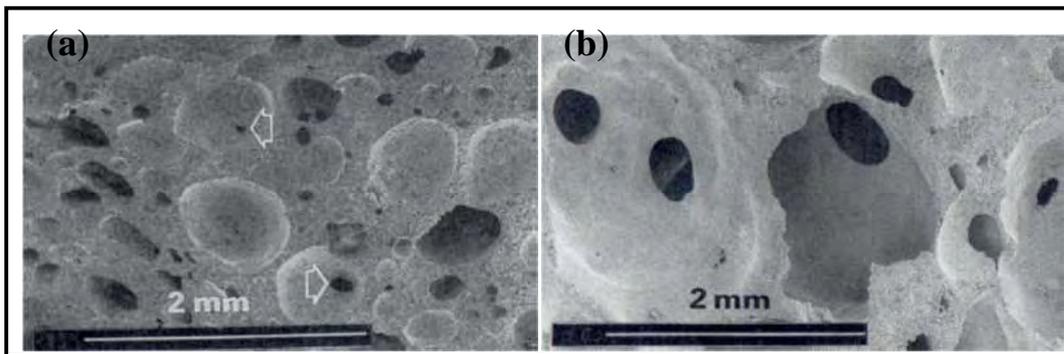


Figure 3. Observation en microscopie électronique à balayage d'une pâte à pain à différents stades de fermentation (a) 15 min, (b) 40 min : les flèches montrent les trous dans les parois de la pâte (GAN *et al.*, 1990).

4.2. Rôle des constituants de la pâte dans la stabilisation de la phase gazeuse

Divers constituants de la pâte jouent un rôle primordial dans la stabilisation de la phase gazeuse à travers la stabilisation du film interfacial gaz/matrice continue :

• Protéines

Les protéines jouent un rôle important en rétention gazeuse. GAN *et al.* (1995) proposent un mécanisme de diminution de la tension de surface par la formation d'un film via des complexes d'interaction intermoléculaire: le contact avec l'eau, au cours du pétrissage, entraîne l'hydratation et l'adsorption des protéines qui se déplient alors facilement à l'interface air/matrice continue. Cet état provoquerait la rigidification partielle de l'interface et sa stabilisation.

Les pentosanes solubles exercent également une action positive. Ils limitent la diffusion du CO₂ en augmentant la viscosité du film liquide qui tapisse les alvéoles. Plus la pâte est visqueuse, plus l'incorporation des gaz est difficile, mais meilleur est la rétention gazeuse (la vitesse de migration des gaz est inversement proportionnelle à la viscosité du milieu). Par contre, des fragments de parois (pentosanes insolubles), peuvent interrompre

le film de gluten et nuire ainsi la continuité de la pâte en induisant des zones de fragilité au niveau des parois des alvéoles gazeuses (GUINET et GODON, 1994).

• Lipides

Les lipides endogènes de la farine ont un rôle mitigé dans la rétention gazeuse. En effet, les lipides apolaires, et plus précisément les acides gras libres, semblent diminuer les performances de rétention gazeuse d'une pâte (MAC RITCHIE et GRAS, 1973 ; DE STEPHANIS et PONTE, 1976), alors qu'il a été démontré que les lipides polaires, au contraire, améliorent ces performances (MAC RITCHIE et GRAS, 1973). Les lipides polaires ont un rôle d'agent lubrifiant et tensio-actif, en association avec le gluten et l'amidon par des liaisons hydrogènes créées lors du pétrissage (VIERLING, 2003). Ils stabilisent les structures d'interface entre l'eau et les gaz par leur capacité à stabiliser la paroi des alvéoles (FEILLET, 2000).

• Grains d'amidon

Les protéines de gluten (gluténines et gliadines) sont insolubles dans l'eau, ces protéines se fixent par affinité sur les granules d'amidon. Cette association protéine/amidon donne une élasticité à la pâte suffisante pour retenir le CO₂ produit par fermentation (BRANGER *et al.*, 2007).

Sur la base d'un modèle mathématique, VAN VLIET *et al.* (1992) avancent que la présence de grains d'amidon dont les dimensions sont plus importantes que l'épaisseur du film de pâte étiré peut provoquer sa fragilisation locale. Pour les films de pâte dont l'épaisseur est plus grande que le diamètre des grains d'amidon, la tension de surface permettrait leur stabilisation.

• Eau

La teneur en eau de la pâte joue également un rôle important ; les gaz ne sont retenus dans la pâte qu'à un maximum de 35% à 45% d'eau. Le volume des pains s'accroît linéairement avec la teneur en eau dans cet intervalle (FEILLET, 2000).

4.3. Rôle des propriétés rhéologiques dans la stabilisation de la phase gazeuse

• Viscosité

La viscosité de la pâte élevée en sortie pétrissage, agit dans le retardement des phénomènes de crémage et d'agrégation des bulles gazeuses (VAN VLIET *et al.*, 1992).

- **Extensibilité**

Des ruptures précoces des membranes des cellules gazeuses, qui causent une diminution de la rétention gazeuse, peuvent être dues à une insuffisance d'extensibilité de la phase continue où elles baignent (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 au contraire des pâtes non fermentées (HALTON, 1949).

- **Propriétés rhéodurcissantes**

Sont définies comme une augmentation de la contrainte plus importante que la déformation subie par le film de pâte étiré lors du grossissement des cellules gazeuses. Elles permettraient l'accroissement de la stabilité de ce film au cours de l'extension biaxiale en évitant la rupture précoce des zones les plus minces et donc le phénomène de coalescence (VAN VLIET *et al.*, 1992).

5. Rôle de la fermentation panaire

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

En fin de fermentation, la pâte doit contenir un important volume gazeux (volume relatif entre 4 et 5) et être encore capable de retenir ce gaz au cours des premières étapes de la cuisson grâce à ses propriétés rhéologiques (BLOKSMA, 1990 ; VAN VLIET *et al.*, 1992).

6. Types de la fermentation panaire

6.1. Fermentation au levain

Afin de fabriquer le levain, une petite quantité de pâte est prélevée sur l'une des fournées du jour et laissée reposer plus de 12 heures en ajoutant régulièrement de la farine et de l'eau. Le gonflement de la pâte est assuré par la flore du levain constituée précisément d'un mélange de bactéries acidifiantes (lactiques et acétiques) et de levures (FREDOT, 2005).

6.2. Fermentation à la levure boulangère

La levure de boulangerie est un agent de fermentation plus facile à utiliser que le levain, car il est produit industriellement. Ce sont des champignons microscopiques unicellulaires appelés « *Saccaromyce cerevisiae* » qui servent à ensemercer le pain (FREDOT, 2005).

Les levures ont pour rôle technologique essentiel d'assurer la fermentation alcoolique en produisant massivement le gaz carbonique assurant la levée de la pâte (MONTEL *et al.*, 2005).

Tableau 1. Etude comparée de fermentation panaire (BRANGER *et al.*, 2007).

Paramètres	Fermentation à dominance levurienne	Fermentation mixte (levain)
Température de fermentation	10 à 22°C	25 à 30°C
Produits synthétisés	Acide lactique (0,02%) et acétique	Acide lactique (0,6%) et acétique (0,3%)
Masse volumique	<0,2	0,22 à 0,3
Caractéristique du produit	Pain moins aromatique, son rassissement plus rapide, temps de fabrication plus court	Pain fixe moins d'eau et durcit moins vite.les acides produits sont précurseurs d'arômes et modifient légèrement la texture
Ferments commerciaux utilisés	<i>S. cerevisiae</i>	<i>S.cerevisiae</i> <i>Lb brevis</i> <i>Lb fermentum</i>

7. Influence de différents facteurs sur l'activité fermentative

D'après FEILLET (2000), la force fermentaire des levures est déterminée en mesurant la quantité de gaz carbonique, dégagé d'une pâte en un temps donné et dans des conditions standardisées.

Les facteurs suivants permettent à la levure d'assurer une fermentation régulière :

- **Incidence de la température**

C'est le paramètre le plus important concernant la vitesse de production de CO₂ dans la pâte. L'activation thermique des systèmes enzymatiques de la levure augmente la fermentation et ainsi, le volume de gaz carbonique libéré (BOURGEOIS, 1989 ; VIERLING, 2003). Par exemple, dans une plage de température entre 20 et 40°C, une élévation de la température de la pâte de 1°C entraîne une augmentation de la vitesse de fermentation de 8 à 12% selon le type de levure (CHARGELEGUE *et al.*, 1994).

- **Incidence du pH**

Selon FEILLET (2000), la production de gaz carbonique a pour effet la levée de la pâte et ainsi la diminution de son pH. Le pH interne d'une cellule de levure est de l'ordre de 5,6 à 5,8 et varie peu. Comme les systèmes enzymatiques impliqués dans le métabolisme de *S. cerevisiae* sont dans leurs ensembles intracellulaires, ceci explique pourquoi la levure est très tolérante à la variation de pH du milieu, dans des limites comprises entre 2 et 8. Pour des pH compris entre 4 et 6, l'activité fermentative de la levure est à son optimum (CHARGELEGUE *et al.*, 1994).

- **Incidence de la teneur en eau**

L'hydratation de l'amidon favorise l'action des amylases de la farine afin de produire le maltose nécessaire au travail de la levure (VIERLING, 2003). La teneur en eau d'une pâte normalement développée est comprise entre 40 et 46%, elle croît avec la teneur en protéine de la farine et le taux d'endommagement de l'amidon. En dessous de 35 %, la pâte ne se forme pas ; vers 50 %, elle devient très difficile à manipuler et au-delà, elle reste fluide (FEILLET, 2000).

- **Incidence de la pression osmotique**

L'activité fermentative est influencée par l'augmentation de la pression osmotique liée à la concentration en sucres et à des phénomènes de régulation propres à la levure (CLEMENT, 1983). La pression osmotique dépend essentiellement des propriétés de sucre et de sel utilisées. Elle peut être très élevée jusqu'à 35 à 100 atm. (CHARGELEGUE *et al.*, 1994).

- **Incidence de la dose de levure**

À une température donnée, la vitesse de fermentation est fonction de la dose de levure utilisée (CHARGELEGUE *et al.*, 1994). En boulangerie, les levures sont incorporées à des doses égales à 2% du poids de la farine. Elles produisent du gaz carbonique, qui provoque l'expansion de la pâte au cours de la fermentation (FEILLET, 2000). L'élévation de la dose de levure permet d'accélérer la levée de la pâte (BOURGEOIS, 1989). Cependant, lorsqu'elle augmente au-delà de 5% dans la pâte, il y a une légère diminution de l'activité fermentaire (CLEMENT, 1983).

En conclusion, l'évolution des propriétés de la pâte (phase gazeuse et continue) au cours de, l'étape de fermentation est largement dépendante des conditions opératoires : composition de la pâte, durée et température...Toutefois, en fin de fermentation, la pâte doit contenir un important volume gazeux (volume relatif entre 4 et 5) et être encore capable de retenir ce gaz au cours des premières étapes de la cuisson grâce à ses propriétés rhéologiques (BLOKSMA 1990a ; VAN VLIET *et al.*, 1992).

Chapitre 2. Techniques de l'évaluation de la fermentation panaire

Beaucoup d'études sont réalisées par utilisation de techniques bidimensionnel (2D) et 3D, pour suivre le développement des alvéoles pendant la fermentation et la cuisson, ainsi que la structure alvéolaires des pâtons.

Le développement des alvéoles donc dans la pâte a été la plupart du temps exécuté en utilisant des technologies très complexes (formation image par résonance magnétique pour produire des images 2D ; Tomographie de rayon X pour la visualisation 3D). De telles techniques sont très chères et lentes, ce qui rend nécessaire d'utiliser certains méthodes plus simples et peu coûteuses (FOIS *et al.*, 2012).

1. Méthodes basées sur la mesure du gonflement d'un pâton : Pousse BERLINOISE

C'est la méthode la plus ancienne, on fait un pâton et on mesure au bout d'un temps donné la hauteur qu'il atteint dans une éprouvette graduée ou le temps nécessaire pour atteindre une hauteur donnée.

Le contrôleur de pousse de CALVEL est un petit récipient cylindrique de 120 ml environ gradué, coiffé d'un couvercle percé au centre pour laisser passer et guider une petite tige ayant à sa base un disque. Il permet d'apprécier le temps nécessaire à un pâton pour atteindre un certain développement et également à quel moment on observe une retombé de la pâte.

Cette méthode décrite par le professeur BURE citée par GODON et LOISEL(1984) consiste à placer une quantité de pâte dans un moule à l'intérieur d'une étuve réglée à 35°C, ce moule contient un repère qui délimite un volume donné (760 cm³), noter le temps mis par la pâte pour atteindre ce repère, faire plusieurs pousses successives et noter à chaque fois le temps. Les pousses correspondantes donc au temps nécessaire à la levure pour dégager un volume donné de CO₂.

2. Méthodes basées sur la mesure de la pression résultante du dégagement du gaz carbonique : Manomètre de BLISH et SANDSTEDT

C'est une méthode basée sur la mesure de la pression résultante du dégagement du CO₂ dans une enceinte étanche. Elle consiste à placer un pâton dans une enceinte hermétique en communication avec un manomètre, elle est placée dans un bain thermostaté.

Les relevés de variation de pression au cours du temps permettent de suivre la production de CO₂ (GODON et LOISEL, 1984).

3. Méthodes basées sur la mesure de volume de gaz carbonique dégagé

3.1. Fermentomètre de BURROWS et HARRISON

Cette méthode a été décrite par BURROWS et HARRISON en 1959. D'après GODON et LOISEL (1984), le principe de cet appareil est la détermination de l'activité fermentative des levures au sein d'une pâte, en mesurant le dégagement gazeux produit.

Le fermentomètre est muni d'un bain marie généralement réglé à 30°C, 12 flacons en verre de 200 ml à col large spécialement conçu pour la fermentation, en plus 12 burettes à une capacité de 100 ml pour la mesure du gaz carbonique.

Les lectures obtenues sont finalement ramenées à 20°C et 760 mm de mercure, en se référant à une table de correction et en utilisant la température prise au moment de la lecture et la pression atmosphérique correspondante.

3.2. Fermentographe SJA

C'est un appareil qui sert à mesurer le temps de fermentation nécessaire pour que le volume de CO₂ dégagé par un pâton atteigne 450 ml.

Selon DUBOIS (1983), cette méthode consiste à introduire un pâton dans la chambre de fermentation, qui est en communication avec une cloche de gaz, cette dernière flotte dans un bain d'huile de paraffine à l'intérieur d'un cylindre. La chambre et la cloche sont entourées d'un manteau d'eau thermostatée à 30°C.

L'essai se fait comme suit : aussitôt la production gazeuse amorcée, l'air refoulé et par la suite le gaz carbonique est introduit dans la cloche à gaz. Celle-ci s'élève et le stylet dessine une courbe sur le tambour enregistreur en mouvement, on obtient donc le volume de CO₂ dégagé pendant la fermentation.

3.3. Fermentographe BRABENDER

C'est un appareil qui permet de mesurer le dégagement de CO₂ pendant la fermentation de la pâte. Le principe de fonctionnement de Fermentograph est basé sur la mesure de développement d'un morceau de pâte pendant la fermentation due à la formation de l'anhydride carbonique (CO₂).

Un morceau de pâte d'un poids bien défini est versé dans une vessie en caoutchouc qui est immergé dans un bain d'eau à température contrôlée (30°C). La cloche support est reliée à un système d'enregistrement graphique.

Le changement du volume dû à la formation de CO₂ cause une augmentation de volume de la vessie qui est mesurée comme perte dans le poids à l'aide d'un ressort de mesure et enregistré sur une ligne mécanique enregistreuse, de cette façon on obtient le volume de gaz carbonique produit (KRASILOVA, 2010).

3.4. Zymotachygraphe

Marcel CHOPIN a conçu le Zymotachygraphe qui permet de déterminer le dégagement total de CO₂ et celui retenu par la pâte. Une cuve étanche dont la température est entre 20 et 45°C reçoit la masse de pâte contenant la levure. Un système de jeu de valves électroniques permet :

La mesure directe de la pression durant 2 heures et 30 minutes. A la fin de cette période, la cuve est remise à la pression atmosphérique. Cette technique permet de mesurer la vitesse de dégagement du CO₂.

La mesure de la pression dans la cuve après mise en contact de l'atmosphère interne avec un corps absorbant le CO₂ (KOH ou NaOH) qui indique aussi la vitesse de dégagement. La différence entre les 2 pressions enregistrées est directement reliée à la quantité de gaz ayant traversé les parois de la masse en fermentation (DUBOIS, 1983).

La figure 4 montre une courbe classique de Zymotachygraphe.

L'enveloppe A représente le dégagement total de CO₂, l'enveloppe B représente la quantité de CO₂ retenu dans la pâte, la différence à chaque instant représente la perméabilité de celle-ci.

Le coefficient de rétention de la pâte R s'exprime par

$$R = S_2/S_1 \times 100$$

Où :

S₁ : surface totale (enveloppe A) ;

S₂ : surface CO₂ retenue (enveloppe B).

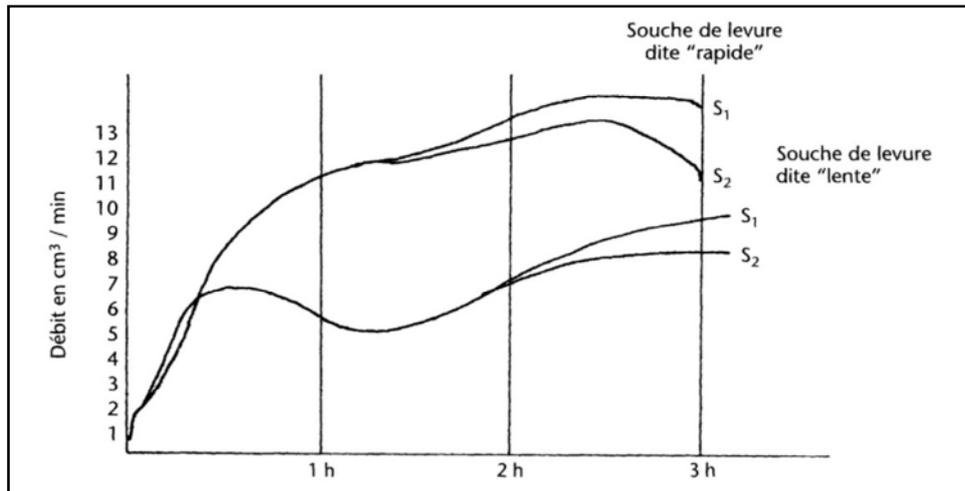


Figure 4. Courbes obtenues au Zymotachygraphe chopin pour deux levures différentes (GODON et LOISEL, 1984).

3.5. Rhéofermentomètre CHOPIN

C'est une évolution récente du Zymotachygraphe qui permettrait d'apprécier en plus la tolérance des pâtes à la fermentation, il permet d'enregistrer le volume de CO₂ dégagé et de faire des mesures rhéologiques sur la pâte.

Un morceau de pâte (315g) est placé dans le panier du rhéofermentomètre et un piston avec un poids de 2 kg est placé en haut de celui-ci, la température maintenue à 28.5°C et la durée de l'essai est de 3 heures.

Le résultat est obtenu sous forme d'une courbe représentant la hauteur de la pâte en fonction du temps, qui donne une indication sur le volume de CO₂ produit (KTENIOUDAKI *et al.*, 2010).

4. Méthodes basées sur la mesure de la densité de la pâte

Les mesures dynamiques de la densité de pâte ont été appliquées pour surveiller le taux de production de gaz carbonique pendant la fermentation et sa division entre la phase liquide et les bulles en pâte de pain.

Quelques méthodes laissent estimer la production de gaz pendant la fermentation à l'aide non seulement des dispositifs tels que le Risograph ou le Rheofermentometer (Chopin, Tripette et Renaud, France) décrit par CZUCHAJOWSKA et POMERANZ (1993), mais également des dispositifs spécifiques ont été développés (CHEVALLIER *et al.*, 2010).

4.1. Technique décrite par CAMPBELL *et al.* (2001)

La technique est basée sur le suivi du taux d'expansion d'un morceau de pâte pendant la fermentation. Le système de mesure de densité est constitué d'un bécher revêtu relié à un bain marie, et une balance. Une double tasse, équipée d'un chapeau anti flottation, a été utilisée pour peser les deux échantillons, l'un qui est dans l'air et l'autre qui est immergé dans le xylène. Le chapeau a été utilisé pour empêcher la pâte de se lever une fois que sa densité devenait moins que cela du xylène. Un ordinateur a relié à travers son port parallèle à la balance a enregistré le poids changeant de morceau de la pâte immergé.

Après mélange, 8g de la pâte a été pesé sur la tasse supérieure de la double tasse. Plus tard, l'échantillon a été placé sur la tasse inférieure, et le chapeau a été ajusté. Alors l'échantillon était immergé dans le xylène, et l'ordinateur a commencé à enregistrer les lectures chaque 10 seconde pendant 1 heures. (CHIOTELLIS et CAMPBELL, 2003).

4.2. Technique décrite par CHIOTELLIS et CAMPBELL (2003)

Selon CHIOTELLIS et CAMPBELL (2003), les mesures dynamiques de la densité de pâte estiment le taux de production de CO₂ par la levure qui est due à la perte de ce CO₂ dans le xylène et l'atmosphère. Ainsi, une mesure directe de volume de la pâte est le résultat de la production de CO₂ pendant l'imperméabilité a effectuée en utilisant un appareil de mesure simple montré dans la figure 5.

Un petit morceau de pâte (5 g) a été arrondi et placé à l'intérieur d'un flacon hermétique, qui est recouvert dans un bain marie à une température constante. Le flacon est relié par l'intermédiaire de la tuyauterie à un cylindre gradué inversé (250 cc) pour rassembler le CO₂ produit. Pour éviter n'importe quelle dissolution de CO₂ dans l'eau, cette eau dans le bêcheur était acidifié à un pH de 2. La température du bain marie a été gardée constante à 40 °C pour imiter le processus d'imperméabilisation de la pâte. La quantité du gaz produit a été rapportée en tant que centimètres cubiques (cm³) pour la pâte de 5 g. Le volume de gaz a été enregistré toutes les 5 mn. L'essai dure 180 mn (PEIGHAMBARDOUST *et al.*, 2010).

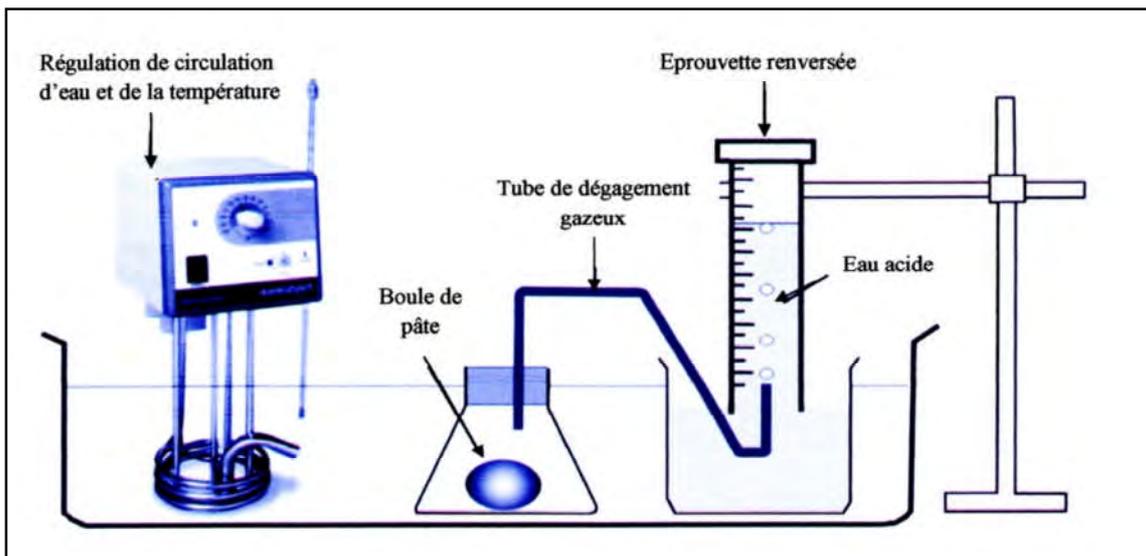


Figure 5. Schéma de l'installation de mesure le volume d'imperméabilisation de la pâte (PEIGHAMBARDOUST *et al.*, 2010).

5. Méthodes basées sur le suivi de la fermentation d'un pâton par utilisation d'onde acoustique

Il est montré que les ondes acoustiques à basses fréquences peuvent être utilisées pour suivre l'évolution de la fraction vide de la pâte en évolution, ce qui permet de donner des informations sur les changements dans la structure de la pâte au cours de la fermentation.

Un appareil de mesure a été conçu (figure 6), par lequel il est possible de surveiller d'une façon non-destructive, la cinétique de la fermentation de la pâte de pain.

Un petit morceau de la pâte (4 g) destiné aux mesures ultrasoniques est placé entre deux plaques acryliques de 3 cm d'épaisseur. La pâte a été écrasée lentement et l'expansion de la pâte lors de la fermentation est limitée à la direction radiale seulement, les deux plaques ont été fixées. Les plaques serrées ont ensuite été placés dans la chambre de fermentation.

La vitesse des ultrasons a été mesurée en utilisant un Générateur = récepteur PUNDIT, avec une paire de transducteurs longitudinaux ayant une fréquence de fonctionnement nominale de 50 khz, Les formes d'onde détectée ont été envoyées vers un ordinateur pour une analyse ultérieure. La vitesse des ultrasons est calculée ensuite en fonction du temps de fermentation (SKAF *et al.*, 2009).

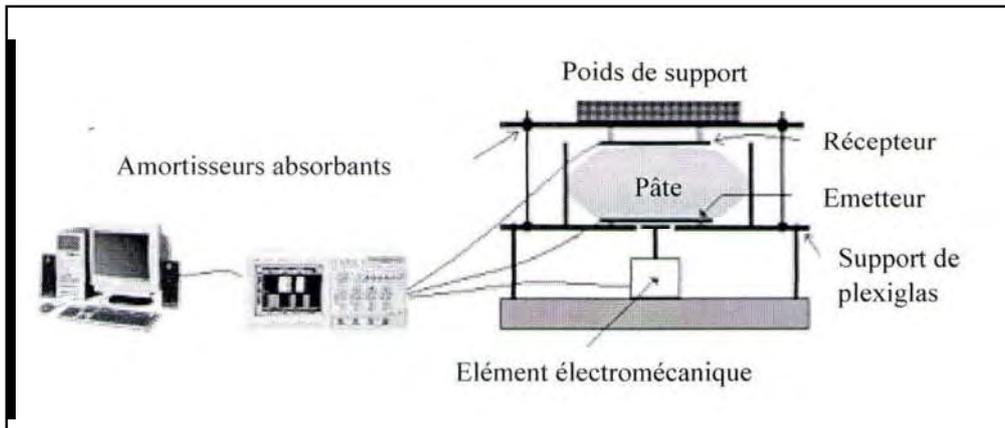


Figure 6. Dispositif acoustique de basse fréquence pour surveiller la fermentation de la pâte à pain (SKAF *et al.*, 2009).

6. Méthodes basées sur le suivi de la fermentation de la pâte par imagerie

6.1. Technique de suivie de la fermentation par imagerie RMN

L'imagerie RMN permet de caractériser l'alvéolation de la pâte, dont le lien avec le rhéo-durcissement est interprété par la croissance et la coalescence des bulles de gaz.

Des échantillons de pâte (10g) sont confectionnés avec un Mixograph, par ajout de la quantité d'eau nécessaire pour atteindre 45% en base totale.

Le suivi de l'alvéolation de la pâte est réalisé sur un micro Imageur Bruker AMX400 avec un champ de 9,4T. Les résolutions spatiale et temporelle, qui résultent d'un compromis expérimental, sont respectivement $117 \times 117 \times 500 \mu\text{m}$ et 8,5min. 3g de pâte levurée (2,5%) sont disposés dans un tube (\emptyset , L= 15, 90 mm) pour un temps de fermentation de 2h. L'analyse par morphologie mathématique (fermeture) des images 2D digitalisées conduit à des distributions de taille (fractions surfaciques d'alvéoles), tout en évitant toute opération subjective de segmentation (ROUILLE *et al.*, 2003).

Les bulles de CO_2 produit au cours de la fermentation sont matérialisées par des zones sombres (niveau de gris faible) alors que celles plus claires (niveau de gris élevé) indiquent la présence d'eau dans la matrice, composée de grains d'amidon suspendu dans un réseau de gluten. Initialement, juste après pétrissage, la texture est assez homogène, la taille maximale des bulles est assez proche de $100 \mu\text{m}$. Pour un temps de 1h, la somme des niveaux de gris décroît et celles-ci deviennent perceptibles, et leur taille peut atteindre 3 mm en fin de fermentation (Figure 7). Leur accroissement, lié à l'activité de la levure, est dû à la pression interne de CO_2 mais également à la coalescence (DELLA VALLE *et al.*, 2003).

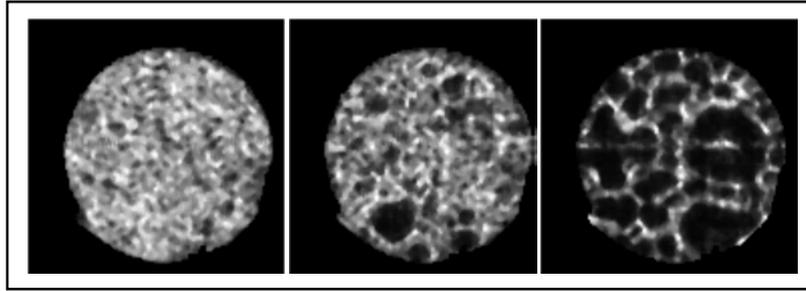


Figure 7. Sections IRM de pâte à pain pour $t=20$ min, 1h, 2h de gauche à droite (DELLA VALLE *et al.*, 2003).

6.2. Technique de suivi de la fermentation par imagerie numérique

Le principe de la technique est basé sur le prélèvement d'un morceau de pâte (30 g) après le pétrissage et le placé immédiatement dans une étuve à température et humidité contrôlées, fermée par une porte transparente. L'expansion du pâton due à la fermentation est filmée avec une caméra numérique placée face à l'étuve, et fixée sur un pied, comme le montre la figure.

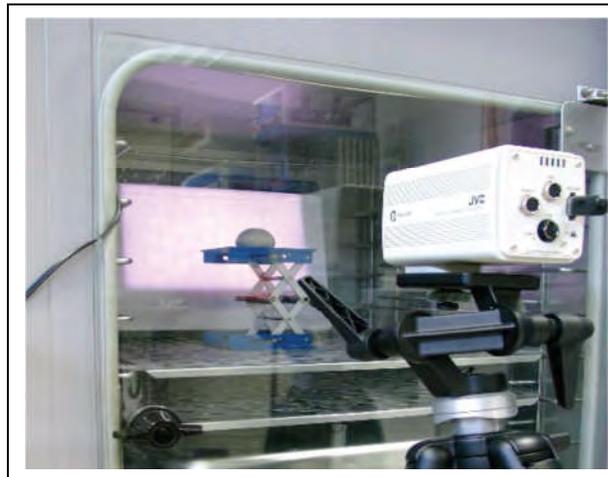


Figure 8. Dispositif caméra numérique et étuve (REGURRE *et al.*, 2009).

Les pâtons ont une masse de 30 g \pm 0,1g. La température dans l'étuve est de 27°C \pm 0,3°C et l'hygrométrie 70 % \pm 3 %. La durée totale de la fermentation est de 240 mn avec une acquisition d'image toutes les 5 minutes (REGURRE *et al.*, 2009).

Pour comparer les résultats macroscopiques et microscopiques, la porosité de la pâte est calculée au cours du temps. Elle est obtenue à partir de la mesure du volume de la pâte mesuré en cours de fermentation $V(t)$:

$$P(t) = 1 - M_p / V_t \cdot \rho_s$$

Avec :

M_p = masse du pâton et ρ_s = masse volumique de la pâte non alvéolée (REGURRE *et al.*, 2009).

6.3. Technique de suivi de fermentation par micro-tomographie à rayon X

Des pâtes à pain à différentes compositions sont préparées et étudiées par micro-tomographie par rayon X (XRT), avec haute résolution ($5\mu\text{m}$). La tomographie par rayons X permet d'obtenir des images en trois dimensions (3D) à une échelle micrométrique à partir d'un échantillon sans le modifier. C'est une technique qui donne une image 3D de la structure interne construite à partir d'une série de coupes faite par radiographie à rayons X à des angles différents, cette structure a été suivie pendant l'étape de la fermentation par analyse d'image, cette dernière a permis de déterminer la porosité, la taille des alvéoles ainsi que l'épaisseur de leurs parois.

Comme la montre la figure obtenue par micro-tomographie (figure 9), la structure alvéolaire est différente selon la composition des pâtes, les bulles de CO_2 produit au cours de la fermentation sont matérialisées par des zones sombres, alors que celles plus claires indiquent la présence d'eau dans la matrice, composée de graines d'amidon, suspendu dans un réseau (TURBIN-ORGER *et al.*, 2012).

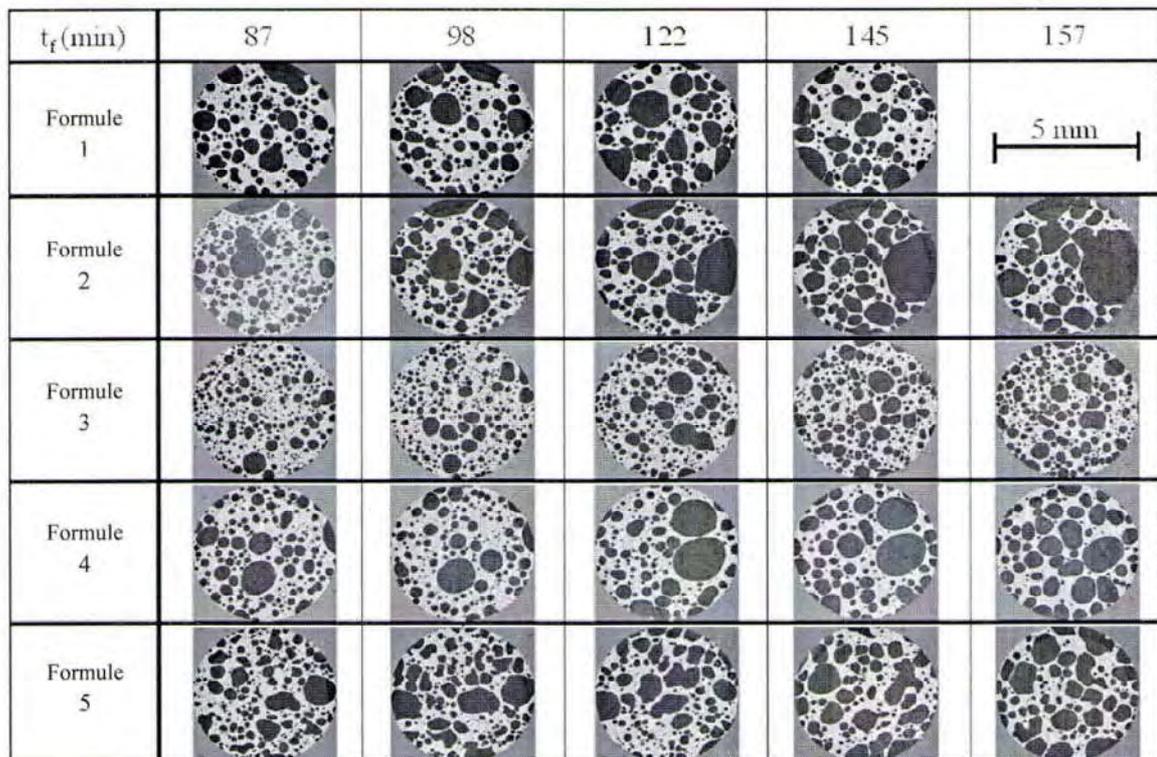


Figure 9. Images obtenues à différents temps de fermentation par micro-tomographie par rayon X pour cinq formules différentes (taille de l'image $\varnothing = 5\text{mm}$, résolution $5\mu\text{m}$) (TURBIN-ORGER *et al.*, 2012).

7. Evaluation de la fermentation des pâtes sans gluten

L'utilisation de la farine dans un test de mesure introduit un certain nombre de facteurs difficiles à maîtriser, du fait de la variation des qualités d'un lot à l'autre. Les variables les plus importantes introduites par la farine sont la qualité du gluten, la quantité de sucres fermentescibles préexistants et son activité amylolytique. SCHULTZ (1972) a proposé pour essayer d'avoir des tests reproductibles d'utiliser des pâtes à base d'amidon de maïs et de caroube et de sucres fermentescibles, ce qui permet de mesurer l'activité de la levure vis-à-vis de différents sucres (SCHULTZ, 1972). Dans le cadre d'une chaîne d'analyses organisée en 1976 par le groupe de travail n° 30 de l'association internationale de Chimie Céréalière (ICC), il a été observé que la qualité de la farine de maïs et de la caroube introduisait des variations importantes. Cette méthode proposée par SCHULTZ nous semble être essentiellement intéressante dans le cadre de travaux de recherches pour mesurer l'activité d'une levure vis-à-vis de chaque sucre pris séparément.

L'utilisation de la farine de froment est en fait la seule solution qui conduise à des mesures pratiquement exploitables (GODON et LOISEL, 1984).

Chapitre 3. Caractérisation de la structure alvéolaire par analyse d'image

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).

1. Analyse d'image

L'analyse d'image a pour objectif la description aussi complète que possible des caractéristiques d'une image, mais une image est constituée d'objets. Pour extraire des informations quantitatives de ces objets (nombre de cellules d'une certaine taille), ou une reconnaissance de forme (utile si les caractéristiques morphologiques de l'image sont liées aux propriétés de l'objet), plusieurs attitudes sont possibles : adopter une démarche relativement passive en déterminant tous les paramètres relatifs à cette image, ou alors se contenter de quelques paramètres suffisants à caractériser l'image. L'analyse d'image trouve des applications dans de nombreux domaines : sciences des matériaux, sciences de la vie, géologie (DROOGENBROECK, 1994).

1.1. Morphologie mathématique

La morphologie mathématique se définit comme un ensemble de procédures de transformations non linéaires des images, par la translation d'un masque appelé élément structurant (taille et forme définies) sur l'ensemble d'une image. Par convention, un élément structurant carré de $(2n+1)$ pixels de côté est dit de taille n . Le pixel central de ce masque est appelé pixel de référence et sa valeur est modifiée lors des translations, en fonction de la valeur de ses voisins dans l'élément structurant. Parmi les opérations de base, on cite l'érosion et la dilatation. L'érosion fait correspondre au pixel central la valeur minimum des niveaux de gris de ses voisins dans l'élément structurant. La dilatation est l'opération duale, c'est-à-dire qu'elle fait correspondre au pixel central la valeur maximum des niveaux de gris de ses voisins dans l'élément structurant (COSTER et CHERMANT, 1985 ; SOILLE, 2003).

1.2. Analyse de texture

Il faut considérer que l'analyse de texture est différente de l'analyse dite d'image, qui consiste à caractériser la taille et la forme des particules. Analyser une texture signifie chercher et quantifier les corrélations et relations entre les niveaux de gris des pixels en fonction de la distance qui les sépare. Ces relations ne sont pas toujours faciles à interpréter (OLIVIER, 2010).

2. Acquisition et analyse d'image des produits alvéolés

L'analyse d'images est considérée comme méthode objective et est devenu presque la norme dans l'évaluation des miettes de pain dans les dernières décennies (ZAYAS, 1993; CHTIQUI *et al.*, 1996; MAGDIC, 1999).

Un nombre massif d'étude existe déjà sur l'analyse d'image indique que cette dernière est un outil utile pour quantifier des caractéristiques de la mie de pain telles que la taille des alvéoles, la distribution de taille des alvéoles, la fraction de vide et le facteur de forme et même le volume du produit fini tandis que très peu de rapports sont publiés sur l'évolution des alvéoles pendant la fermentation. Les études sur les changements dans la structure de pâte à pain pendant la fabrication du pain par application de la technique d'analyse d'image gagne un intérêt pour la littérature (ROMANO *et al.*, 2013).

Les moyens d'acquisition d'images en 2D : appareils photos, scanners et caméras, permettent d'obtenir des images contrastées mais rarement exemptes des perturbations dues aux bruits du fond (SAPIRSTEIN *et al.*, 1994). L'imagerie par résonance magnétique a aussi servi pour l'acquisition d'images. Elle présente l'avantage de récupérer des sections 2D à partir des images 3D exemptes de perturbations de fond et avec une très haute résolution (100 μm) (NAITO *et al.*, 2003). Même si la plupart de ces techniques d'acquisition permettent l'obtention d'images en couleur, les mesures en analyse d'image, citées dans la littérature, ont été réalisées sur des images binaires ou des images en niveaux de gris. La binarisation oppose les alvéoles (noires) aux parois (blanches), alors qu'une image en niveaux de gris est une distribution spatiale dans laquelle chaque pixel est associé à l'intensité de son niveau de gris.

La structure est évaluée par acquisition d'images (photographie d'échantillons en taille réelle ou en observation par microscopie photoniques ou électroniques). L'information recueillie peut être traitée à l'aide de techniques d'analyse d'images. Il est par exemple possible de caractériser une structure alvéolaire en quantifiant la distribution

en taille et en orientation des alvéoles et leur forme. Cette méthode a été appliquée à des extrudés et à la mie de pain (GODON et LOISEL, 1997).

La première étude d'analyse de texture sur du pain a été effectuée par BERTRAND *et al.* (1992). Elle a porté sur la différenciation de la structure alvéolaire de pains formulés avec 7 types de surfactants. Une méthode mathématique basée sur la transformation de Haar à deux dimensions a été utilisée. L'acquisition de 20 tranches de mie (5 cm x 5 cm) pour chaque formulation a été effectuée avec une caméra CCD. Les images ont été classées sur une carte sur laquelle le facteur 1 est corrélé à l'épaisseur des parois entre les alvéoles et le second à la taille des alvéoles (BERTRAND *et al.*, 1992). L'équipe de SAPIRSTEIN (1994) a développé un logiciel d'analyse d'images (langage C) pour différencier des mies de pains fabriquées avec différentes teneurs en oxydants (bromate de potassium et acide ascorbique). Une étape de segmentation par seuillage a été intégrée au début du traitement d'image : les informations issues de l'image brute, réparties sur une échelle de niveaux de gris allant de 0 (noir) à 255 (blanc), sont condensées par le choix d'un seuil permettant de réduire les niveaux de gris considérés.

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

L'interconnexion des alvéoles et la complexité de la structure de la mie sont probablement à l'origine des surestimations de certains paramètres de texture. La segmentation ensemble donc pas une étape satisfaisante dans le cas des produits céréaliers alvéolaires. Une autre approche se basant sur la morphologie mathématique a été utilisée pour la caractérisation de la structure alvéolaire des biscuits extrudés (SMOLARZ *et al.*, 1989) et du pain Français (ROUILLE *et al.*, 2005). Cette approche a été appliquée avec succès pour la différenciation de mies de pains fabriqués avec des farines reconstituées à

différentes teneurs en fraction soluble. Les auteurs ont montré que plus la fraction soluble ajoutée est importante, moins le nombre de petites cellules est important avec des parois entre les bulles très épaisses ($> 1,24$ mm). Le classement des structures alvéolaires par une analyse en composantes principales permet d'expliquer plus de 80% des différences observées selon l'axe principal 1, qui est directement relié à la taille des bulles gazeuses (ROUILLE *et al.*, 2005).

3. Granulométrie par morphologie mathématique

La granulométrie est l'étude de la distribution statistique des tailles de particules.

Cette discipline s'inspire de l'analyse granulométrique à base de tamisages successifs employée en géologie. Elle consiste à faire passer des éléments de matière finis ou fractionnés au travers de mailles calibrées de tamis. Les tamis sont superposés par tailles de mailles croissantes (plus large en haut et plus fin en bas). On mesure la quantité de matière retenue sur chaque tamis. Cette méthode de mesure est :

- Anti-extensive : car ce qui est retenu par un tamis ne peut être qu'un sous-échantillon de l'échantillon d'entrée.
- Croissante : car si on tamise seulement une partie P d'un échantillon E, on obtient un sous-échantillon de ce que l'on aurait obtenu en tamisant E.

Idempotente car tamiser deux fois le même échantillon par le même tamis donne le même résultat. (OLIVIER, 2010).

- **Relation entre tamisages successifs et filtre morphologique**

L'ouverture morphologique (érosion suivie par une dilatation), est anti-extensive, croissante et idempotente. On a donc un parfait parallèle entre ces deux méthodes que l'on peut expliquer intuitivement de la façon suivante : le filtrage d'une image par ouverture morphologique fait disparaître les objets qui sont plus petits que l'élément structurant, et ne modifie que légèrement les objets plus grand.

Nous pouvons donc remplacer les tamis par une succession d'ouvertures morphologiques. Le calibre des mailles est remplacé par la taille et la forme de l'élément structurant. (OLIVIER, 2010).

Il est possible de déduire des informations quantitatives sur la texture des images de mires (de type granulométrique) à partir de l'évolution de la somme des niveaux de gris à chaque étape d'érosion et de dilatation cette méthode a permis de calculer des courbes de

texture décrivant la distribution de taille des alvéoles et de leurs parois ainsi que la taille moyenne des alvéoles. La lecture de ces courbes n'étant pas directe, une classification par Analyse en Composantes Principales permet de révéler les variations de textures observées (LASSOUAD, 2005).

Matériel et Méthodes

La seconde partie de ce mémoire « Matériel et Méthodes" s'articule autour de quatre points :

- Le premier point fait état de la matière première utilisée au cours de ce travail ;
- Dans le deuxième point nous parlons de la formulation sans gluten ;
- Le troisième point s'intéresse aux méthodes de caractérisation mises en œuvre pour la caractérisation technologique des différentes farines permettant l'explication de certaines étapes de la manipulation ;
- Dans le quatrième point, des essais de suivi de cinétiques de fermentation des pâtes ont été effectués par une nouvelle technique, basée sur la congélation et la lyophilisation des pâtons, ce qui a permis de suivre le développement du volume des pâtes au cours de la phase de fermentation ;
- Le cinquième point porte sur l'évaluation de la structure alvéolaire de la pâte par analyse morphologique mathématique des images.

I. Matières premières

1. Farine de blé tendre

Deux types de farine de blé tendre (*Triticum aestivum*) sont utilisés pour la réalisation de ce travail. Ils proviennent chacun d'un lot. Ils achetés du commerce de variété inconnue et sont conditionnés dans des sacs en papier d'une contenance de cinq (05) kg.

Les types de farine ont une granulométrie inférieure à 200 μm et sont issus de deux minoteries différentes. La farine 1 est fabriquée le 07 avril 2012, la farine 2 le 03 mai 2012.

2. Ingrédients exempts de gluten

2.1. Farine du riz

La farine de riz utilisée provient d'un riz long blanchi (*Oryza sativa japonica*) d'origine Thaïlandaise de variété Basmati, ayant déjà été utilisée pour la réalisation des travaux au sein de l'équipe de recherche TEPA.

2.2. Farine de féverole

Dans nos panifications sans gluten, nous avons utilisé de la féverole (*Vicia faba minor*) appartenant à la variété Sidi Aich, celle-ci a été fournie par la chambre

d'agriculture de Constantine (Algérie). Au cours des travaux précédentes, elle est décortiquée et dégermée manuellement. Les graines sont réduits en farine d'une granulométrie répondant aux exigences de la panification, soit un diamètre de particules inférieur à 200 μ m.

3. Autres ingrédients

Lors de nos essais de panification, nous avons utilisé :

- La levure boulangère lyophilisée *Saccharomyces cerevisiae*, conditionnée en paquet de 500g, produite par Saf –instant sile saffe France est utilisé comme l'agent levant de la pâte.
- Le sel utilisé dans ce travail, est un sel fin ordinaire de cuisine, iodé, produit par l'Entreprise Nationale Algérienne du sel (l'E.N.A.sel).
- L'eau utilisée pour la formulation des pâtes est une eau distillée à pH de 5,9 \pm 0,1, obtenue par un distillateur SCOTSMAN.

II. Formulation sans gluten

Une formule à base de 2/3 riz et de 1/3 féverole a été utilisée dans ce travail pour la fabrication de pâtes boulangères sans gluten. Cette dernière a montré ses bonnes aptitudes technologiques en panification lors de travaux d'optimisation de pain sans gluten au sein de l'équipe TEPA (BENATALLAH, 2009).

III. Caractérisation technologique et rhéologique des farines

Ces analyses sont réalisées au niveau de l'unité de production AMOR BENAMOR, Wilaya de Ghelma.

1. Détermination de l'humidité des farines

Cette mesure est importante pour connaître la teneur en eau des farines afin de calculer la masse d'eau à ajouter dans les farines avant le pétrissage.

- **Principe**

La mesure de la teneur en eau est effectuée selon la méthode normalisée ISO / NA 1132-2007. Cette technique consiste à sécher le produit pendant 1h 30 min dans une étuve réglée à 130°C à pression atmosphérique jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

- **Mode opératoire**

Après le nettoyage des nacelles à l'aide d'un pinceau fourni avec l'appareil, celle-ci sont placés vides et ouvertes dans l'étuve (GEFRAN CHOPIN EM10, France), pendant 15minutes.

A la Sortie de l'étuve, les nacelles sont mises dans le dessiccateur (figure 10) contenant le gel de silice pendant 30 à 45minutes.

Dans une balance analytique de marque PRECISA (0,0001g), 5 g de farine est pesée. La capsule contenant la prise d'essai est entreposée dans l'étuve réglée à 130°C pendant 1h 30min. A la sortie de l'étuve, la capsule est mise dans un dessiccateur pour éviter l'absorption de l'humidité de l'air au cours de son refroidissement. Dès que la capsule est refroidie à la température du laboratoire (en général entre 30 et 45 minutes après mise en place dans le dessiccateur), la pesée est réalisée à une précision de 10^{-4} (couvercle compris).

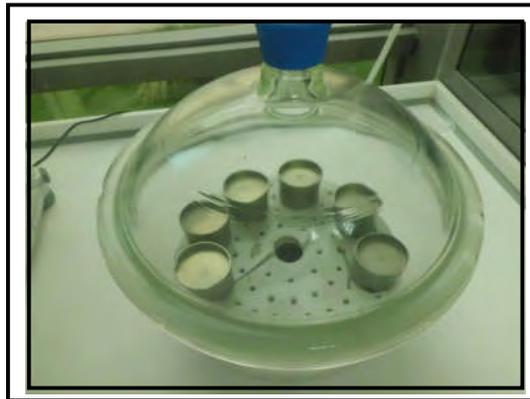


Figure 10. Dessiccateur contenant les nacelles

- **Expression des résultats**

La teneur en eau du produit est exprimée en pourcentage en masse, elle est égale à :

$$H = (M1-M2)/PE \times 100$$

D'où:

- M1: la masse en (g), de la nacelle vide et de son couvercle, et de la prise d'essai avant dessiccation.
- M2: la masse en (g), de la nacelle, de son couvercle et de la prise d'essai après le séchage
- PE : prise d'essai de farine (g).

2. Détermination de la quantité d'eau à ajouter dans les farines (taux d'hydratation)

D'après la norme ISO 5530-4 concernant les niveaux d'hydratation, la quantité d'eau à ajouter dans la farine pour la préparation de la pâte doit correspondre à 50 g d'eau pour 100 g de farine dont l'humidité est de 15 % (soit 125 g d'eau ajoutés à 250 g de farine de blé tendre), par ailleurs toutes les farines ne contiennent pas forcément 15% d'eau, ce qui nécessite donc l'ajustement de leurs taux d'hydratation.

➤ *Pour la farine de blé tendre*, la quantité d'eau à ajouter est calculée à partir de la teneur en eau finale de la pâte sachant que cette dernière est de 45g pour 100g de pâte (45 %). (TURBIN-ORGER *et al.*, 2012). La teneur en eau finale est exprimée par :

$$\text{Teneur en eau finale de la pâte} = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse totale}} \times 100$$

Où :

$$\text{Masse d'eau} = (H/100) \times \text{masse de la formule} + \text{MEA}$$

Avec :

MEA : masse d'eau à ajouter

$$\text{Masse totale} = \text{masse de la formule} + (\text{MF} \times [\text{Na Cl}]/100) + (\text{MF} \times [\text{levures}]/100) + \text{MEA}$$

Avec :

MF : la masse de la formule (g).

[Na Cl] et [levures] sont ajoutées à 2 p. cent chacune.

➤ *Pour les farines exemptes de gluten* (formule riz-Féverole), les taux d'hydratation ont été fixés sur la base d'essais préliminaires. Pour le suivi de cinétiques de fermentation la quantité d'eau choisie correspond aux meilleurs volumes spécifiques permettant toutefois une bonne machinabilité dans l'Alvéographe Chopin (tableau 2).

Tableau 2. Quantités d'eau à ajouter pour le suivi des cinétiques de fermentation et pour les essais à l'Alvéographe Chopin (g pour 100 g de farine ou de formule).

Farines ou formule	Masse d'eau à ajouter (g)
Témoin : Farine de blé tendre 1	59,65
Témoin : Farine de blé tendre 2	57,08
Formule sans gluten : Riz-Féverole	132

3. Détermination de la teneur en gluten

Cette analyse est réalisée seulement pour les deux types de farine de blé tendre. La détermination de la teneur en gluten et de sa qualité est faite par la méthode de référence au glutomatic.

- **Principe**

Le gluten est formé de la fraction insoluble dans l'eau des protéines contenues dans la farine.

Le dosage de gluten repose sur son insolubilité dans de l'eau salée. Le principe de la méthode repose sur la formation d'une pâte et son lavage par une solution saline pour en extraire le gluten. Plus les quantités extraites de gluten sont élevées, meilleur est la qualité de l'échantillon analysé. Le gluten est centrifugé sur une filière pour la détermination du gluten index. Le gluten obtenu après centrifugation est ensuite séché pour obtenir le gluten sec.

- **Mode opératoire**

- **Extraction mécanique du gluten**

Une prise d'essai de $10 \text{ g} \pm 0.01$ de farine est pesée et déposée dans un tamis en polyester ($88\mu\text{m}$). On ajoute une quantité de 4.8ml d'une solution de NaCl (2 p.cent) à l'aide d'une pipette. Le tamis est placé ensuite dans le glutomatic (figure 11). Les cycles de mélange et de lavage se déroulent automatiquement, suivant un programme standard : 20secondes de mélange – pétrissage et 5 minutes de lixiviation.

Quand le glutomatic s'arrête, le gluten est retiré sans déformation (KLEIJER, 2002).

➤ **Centrifugation du gluten**

La boule de gluten est récupérée et est placée sans division dans une cassette pour la centrifuger.

La centrifugation dure 30 secondes après l'arrêt du Glutomatic. Elle permet la récupération de deux parties de gluten. Une partie ayant traversé la filière. L'autre partie de gluten n'ayant pas traversé la filière est appelé gluten résiduel.

➤ **Détermination du gluten sec**

La boule de gluten humide est placée au centre de la plaque inferieure du Glutork afin de la sécher. Après 4minutes, la lampe de la minuterie du Glutork s'éteint pour indiquer la fin de la phase de séchage, le gluten sec est récupéré et pesé. Le poids multiplié par 10 donne le taux de gluten sec en p. cent. Les détails de la méthode sont décrits dans les standards ICC n° 107/1 (ICC, 2003).

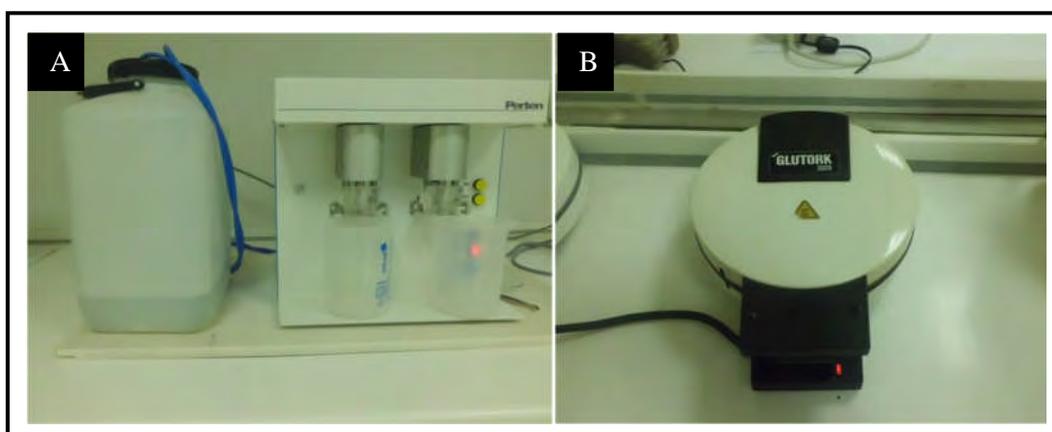


Figure 11. Appareil pour le dosage du gluten. **A.** Glotomatic. **B.** Glutork.

- **Expression des résultats**

$$\text{Gluten index} = \text{gluten résiduel (g)} \times 100 / \text{gluten total}$$

$$\text{Gluten humide} = \text{gluten total (g)} \times 100 / 10(\text{g})$$

$$\text{Gluten sec} = \text{gluten résiduel (g)} \times 100 / 10(\text{g})$$

$$\text{CH} = (\text{Gluten humide} - \text{Gluten sec}) \times 100 / \text{Gluten humide}$$

Où:

CH: Capacité d'hydratation

Gluten total: le passant +le refus du tamis de 88 μ m

Gluten résiduel : le refus du tamis de 88 μ m.

4. Détermination de l'activité alpha-amylasique

Certaines enzymes sont responsables de la dégradation de l'amidon et sont directement impliqués dans le processus de fermentation. Il est donc utile de pouvoir disposer d'information, quant à leur activité enzymatique. La méthode la plus courante s'appelle le temps de chute de Hagberg ou Falling Number.

- **Principe**

La technique repose sur l'état de viscosité d'un gel d'amidon, obtenu à partir de 7 g de farine additionnés de 25 ml d'eau. Ce mélange est introduit dans un tube à essai, plongé dans un bain-marie. On mesure, en seconde, le temps mis par un piston, pour tomber au fond de ce tube. En effet, il faut savoir qu'à environ 70°C, le mélange eau-amidon devient un gel (empois d'amidon). La résistance à la chute du piston est inversement proportionnelle à la dégradation de l'amidon (DEL FRATE et STEPHAN, 2005).

- **Mode opératoire**

L'analyse est effectuée par l'appareil du Falling Numbre (figure 12), appareil constitué principalement d'un bain marie porté à ébullition pendant tout l'essai, un réchaud électrique normalisé, un agitateur viscométrique et un tube à essai de précision.

A la température ambiante 22°C, une quantité de farine correspondante à un pourcentage d'humidité, selon le tableau de l'annexe 1, est mise dans un tube viscométrique contenant 25ml d'eau distillée, une agitation de 20 à 30 fois est nécessaire pour obtenir une suspension uniforme. L'agitateur viscométrique est utilisé pour faire descendre dans le tube les particules de farine, l'appareil peut effectuer automatiquement les diverses étapes de l'analyse:

- Après exactement 5 secondes, l'agitation commence à 02 agitations par seconde ;
- Après 60 secondes le moteur s'arrête en position haute et l'agitateur viscométrique est libéré automatiquement. Il descend alors par son propre poids dans la suspension.

- Après 62 secondes, le système électrique est prêt à s'arrêter dès que l'agitateur viscométrique à parcouru son trajet. Cela est mesuré à l'aide du contacteur du bloc de l'agitateur. Une lumière rouge et un indicateur sonore indiquent la fin de l'analyse. Le temps de chute Falling est lu directement sur le compteur.



Figure 12. Présentation du Falling Number.

- **Expression des résultats**

Un temps de chute égal ou inférieur à 150 secondes concédera avec une farine hyper diastasique. Auteur de 250 secondes la farine sera équilibrée, et au delà de 300 secondes, la farine est dite hypo diastasique. Le premier et le troisième type de farine peuvent être corrigés par addition d'acide ascorbique et de la farine de malt successivement.

5. Propriétés rhéologique des farines par l'alvéographe Chopin

Cette analyse est effectuée au niveau de l'unité de production commerciale, filiale « les Moulins Beni Haroun », wilaya de Mila.

- **Principe**

L'alvéographe Chopin est un moyen d'évaluation de la valeur boulangère des pâtes destinées à la panification et de mesurer leurs force et élasticité à travers leur expansion sous forme d'une bulle par insufflation d'air sous une pression donnée. Ce test fait l'objet de la norme NF ISO 5530-4, intitulée "Farine de blé tendre – Caractéristiques physiques des pâtes - Détermination des caractéristiques rhéologiques au moyen de l'alvéographe" (DEL FRATE et STEPHAN, 2005).

- **Mode opératoire**

La caractérisation des propriétés boulangères s'est faite sur trois types de pâtes. Les deux premières sont obtenues à partir des farines 1 et 2 de blé tendre et le troisième type de pâte est obtenu à partir d'ingrédients exempts de gluten.

L'alvéographe se compose de deux éléments indissociables : le pétrin et l'alvéographe lui-même. Dans le premier, on met 250 g de farine, puis dans une éprouvette liée à ce dernier, une quantité d'eau nécessaire pour la formation de la pâte est versée. La durée du pétrissage est de 8 min. Ce pétrin est pourvu d'un mode d'extraction pour la préparation des pâtons en vue du test alvéographique, ces derniers sont rangés pendant 15min dans une chambre de repos. Le deuxième compartiment est l'alvéographe lui-même, qui mesure l'extension d'une éprouvette de pâte qui, sous l'action d'une pression d'air se déforme en une bulle, ce mode d'extension reproduit la déformation de la pâte sous l'influence de la poussée gazeuse. Ces déformations sont enregistrées sur une courbe qui permet de chiffrer les éléments de la force boulangère des farines.

- **Expression des résultats**

La lecture d'un alvéogramme (Figure 13) se fait à travers les paramètres suivants (SAKR et HAJJ MOUSSA, 2007). :

"**W**" : Il vient du mot anglais "Work" et désigne le travail au sens physique du terme. Sa valeur est proportionnelle à la Surface (S) de la courbe obtenue selon l'équation suivante :

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

Cette grandeur exprime la force boulangère de la pâte.

"**P**" : Correspond à la pression maximale d'air insufflée nécessaire à la déformation et donc à l'obtention de la bulle de pâte. Il exprime la ténacité de celle-ci et est donné en mm sur l'axe des ordonnées de l'alvéogramme.

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

"**G**" : Se rapporte au gonflement de la pâte qui est exprimé en cm^3 . Il est donné par l'équation suivante :

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

"**P/L**" : Ce rapport appelé "rapport de configuration de la courbe" ou "rapport de ténacité au gonflement", représente l'équilibre entre la ténacité et l'extensibilité de la pâte.

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

$$Ie = (P200/P) \times 100$$

Où :

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

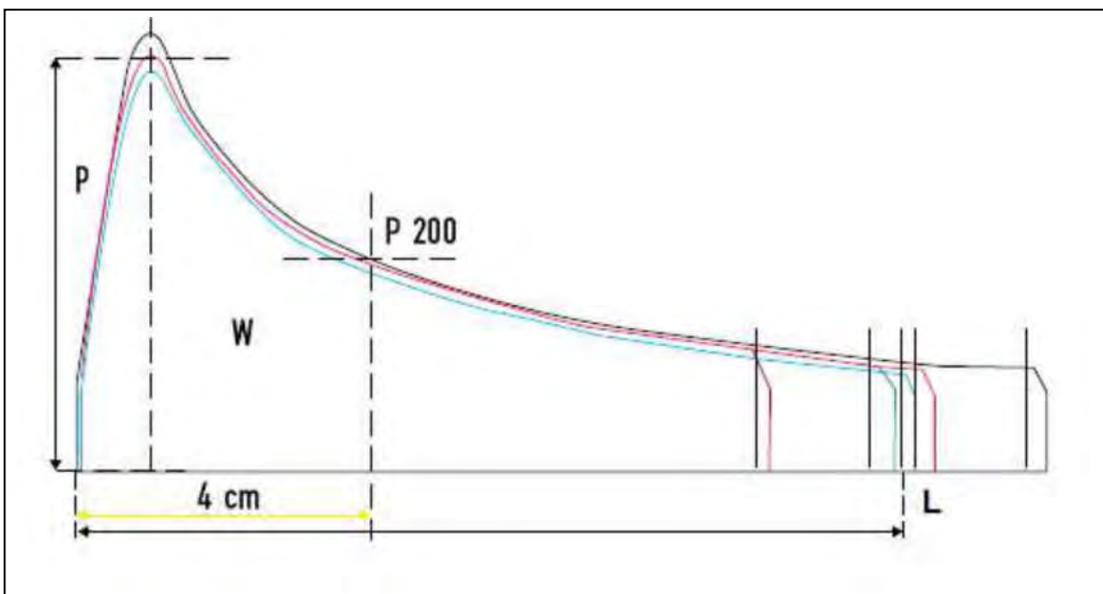


Figure 13. Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre faite sur l'Alvéographe Chopin (DEL FRATE et STEPHAN, 2005).

IV. Suivi de cinétiques de fermentation des pâtes

- **Principe**

Le suivi des cinétiques de fermentation de pâtes fermentées se fait dans un intervalle de temps de 0 à 150 min. à 38°C en présence de buée. Les échantillons de pâte fermentés sont congelés dans de l'azote liquide (-196°C), puis lyophilisés à -57°C sous une pression de 0.05 mbar pendant 15 heures. Une fois déshydratés, les pâtons congelés sont pris en vues par un scanner médical à rayon X puis découpés en deux pour les prises de vues par l'appareil photo numérique. Les différences d'expansion gazeuse sont mesurées et l'évolution de la structure alvéolaire est observée sur des prises de vues des pâtes

fermentées avec et sans gluten. La comparaison des résultats des deux techniques est alors réalisée.

- **Mode opératoire**

1. Pâtes à base blé tendre

A température ambiante (24°C), on ajoute à 100 g de farine de blé tendre, 2g de levure boulangère lyophilisée (*Saccharomyces cerevisiae*), 2g de sel et une quantité d'eau distillée déterminée au préalable. Les ingrédients sont pétris, en deux temps de 15 min chacun séparés par un repos de 5 min, par un pétrin de marque KENWOOD KM300 avec une vitesse de 80 tours/min. La température finale de la pâte est de 27±1°C.

400 g de la pâte est étalée dans un moule en cuivre (18x18 x1,2) cm³ à l'aide d'un rouleau en bois. Des moules cylindriques de 4 cm de diamètre et de 7,5 cm de hauteur sont utilisés, un moule est désigné pour chaque temps de fermentation (0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 min). Ces derniers sont utilisés pour prendre des volumes de pâtes de 15 cm³, et sont couverts à la base par du papier aluminium ensuite les moules sont mis dans l'étuve de fermentation de marque MEMMERT, à 38°C en présence de buée. Après l'écoulement de chaque temps de fermentation, les échantillons sont surgelés instantanément en les plongeant dans l'azote liquide à -196 °C, puis récupérés en vue de déterminer leurs volumes. Les pâtes utilisés pour le tracé des cinétiques de fermentation sont préservés 24 heures dans l'azote liquide, puis lyophilisés (ALPHA1-4 CHRIST) à (- 57°C), sous une pression de 0.05 mbar pendant 15 heures. Une fois déshydratés, les échantillons sont pris en vues par un scanner puis découpés en deux pour des prises de vues par un appareil photo numérique.

2. Pâtes sans gluten

Dans les mêmes conditions précédentes, la formule (2/1 : Riz /Féverole), l'eau et les autres ingrédients sont mélangés et pétris dans un mélangeur de marque HEIDOLPH, avec une vitesse de 200 tours/mn pendant 15 min. Après un temps de repos de 5 min, le deuxième pétrissage est effectué pendant 15min. Nous avons opté pour ce diagramme de fabrication car il donnait les meilleurs résultats de volume spécifiques en panification (figure 14), un emporte pièce demi- sphérique, est utilisée pour prendre un volume calculé connu (15 cm³) d'un échantillon de pâte. Le même mode opératoire (cité en III-1) pour les pâtes de blé tendre est entrepris pour le suivi des cinétiques de fermentation des pâtes sans gluten.

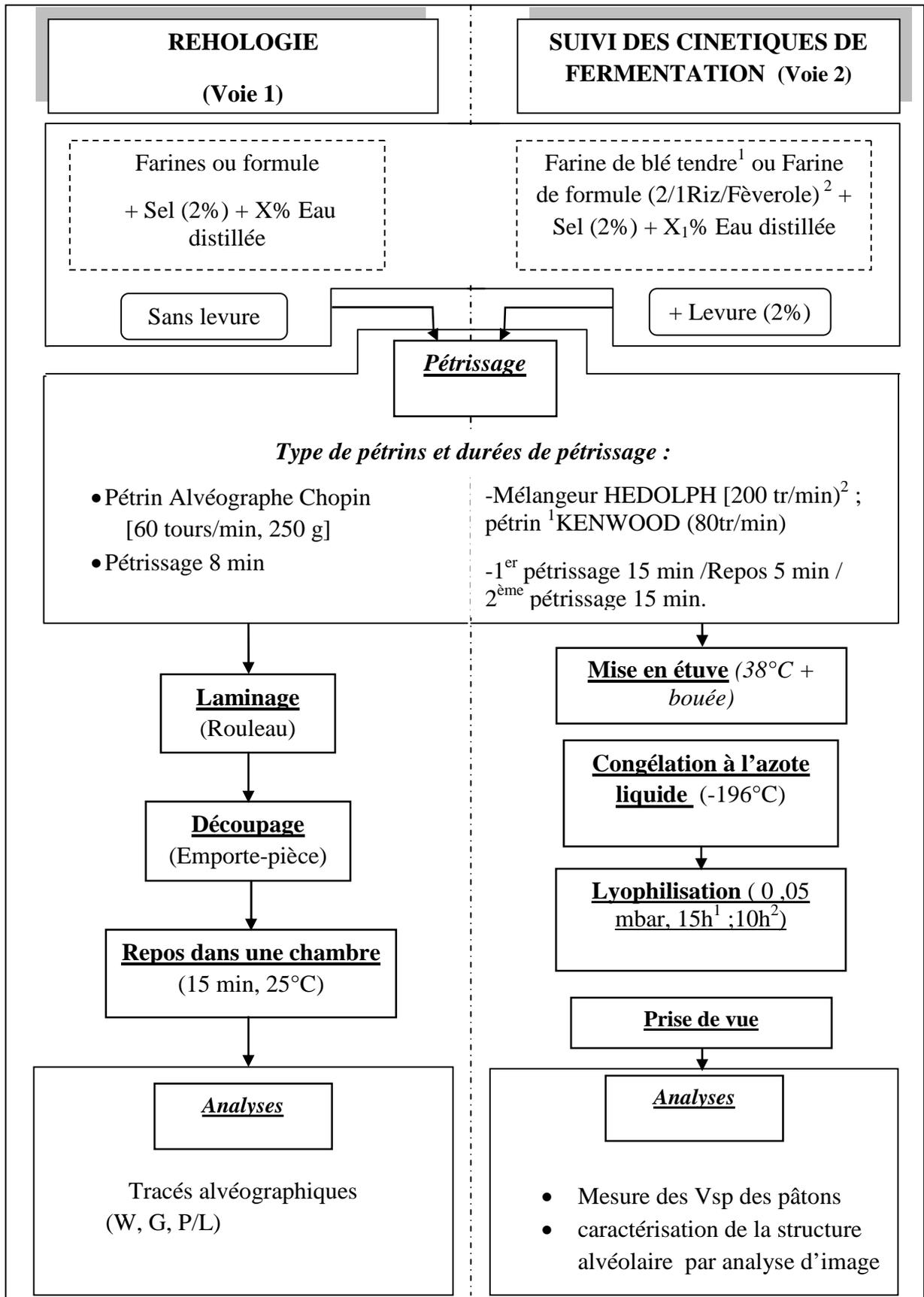


Figure 14. Diagramme montrant les différentes voies d'acheminement de nos pâtes.

3. Détermination du volume et de l'expansion des pâtes

- **Principe**

Le volume des pâtes est déterminé selon la méthode décrite par BENATALLAH (2009). La mesure se fait indirectement par déplacement de petites particules solides sphériques de volume spécifique connu dans le moule où la pâte est placée.

- **Mode opératoire**

Pour chaque temps de fermentation, le support cylindrique est plongé immédiatement dans de l'azote liquide (-196°C) pendant au moins 1 min afin de figer la structure de la pâte. Le moule est rempli à ras avec des grains sphériques de volume spécifique connu (0,72 cm³/g). Après arasement de la surface, le moule est vidé de son contenu en grains et ces derniers sont pesés. Le volume de la pâte est déterminé par la différence entre le volume moyen des moules et le volume des grains sphériques.

- **Expression des résultats**

Volume des grains sphériques est donné selon la formule suivante :

$$V_{gr} = V_S \times P$$

Où :

V_{gr}: volume des grains sphériques (cm³).

V_s : volume spécifique des grains (cm³/g).

P : poids des grains sphériques (g).

Le volume des pâtons est donné par la formule suivante:

$$V = V_{moy} - V_{gr}$$

Où :

V : volume de pâton (cm³).

V_{moy} : volume moyen des moules (cm³).

V_{gr} : volume des grains sphériques (cm³).

L'expansion gazeuse est donnée par la formule suivante :

$$\text{Exp \%} = [(V_i - V_0) \times 100] / V_0$$

Où :

V_0 : Volume d'une pâte fermenté avant fermentation, à temps $t = 0$ min (cm^3).

V_i : Volume de la même pâte mais congelée dans de l'azote liquide au temps de fermentation t_i .

V. Caractérisation de la structure alvéolaire des pâtons par analyse morphologique mathématique

L'analyse de texture a pour objectif 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. Il existe de nombreuses méthodes d'analyse de texture d'images (HARALICK, 1979; BHARATI *et al.*, 2004) basées sur le traitement du signal (transformée de Fourier, en ondelettes), sur des comptages statistiques (méthode de co-occurrences de niveaux de gris, longueur de plage), sur des mesures de résolution multiples (fractal, granulométrie par morphologie mathématique). Si beaucoup de méthodes sont performantes notamment pour classer les images, leur interprétation n'est pas toujours évidente. 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.

1. Granulométrie en niveaux de gris

- **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 au 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).

- **Mode opératoire**

Après déshydratation des échantillons par le lyophilisateur, ces derniers sont déplacés au niveau de centre d'imagerie médicale (CIM TAHER) Wilaya de Jijel pour la prise d'image par un scanner médical à rayon X (Scanner light Speed QX/I Hélicoïdal multi barrettes : 4 barrettes), (512×512 pixels). La cinétique d'une même farine est placée au centre du scanner, les images sont prises avec une résolution de 96 pouce par pixel (ppp).

Les échantillons sont ensuite découpés par la suite au milieu par une lame fine et sont destinés à être pris en vue par un appareil numérique (12 *Mega pixel*) afin de comparer ces résultats par ceux obtenus par le scanner.

Toutes les images 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*.

2. Traitement des images

Le traitement des images des pâtons fermentés comporte les étapes suivantes :

a. 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.

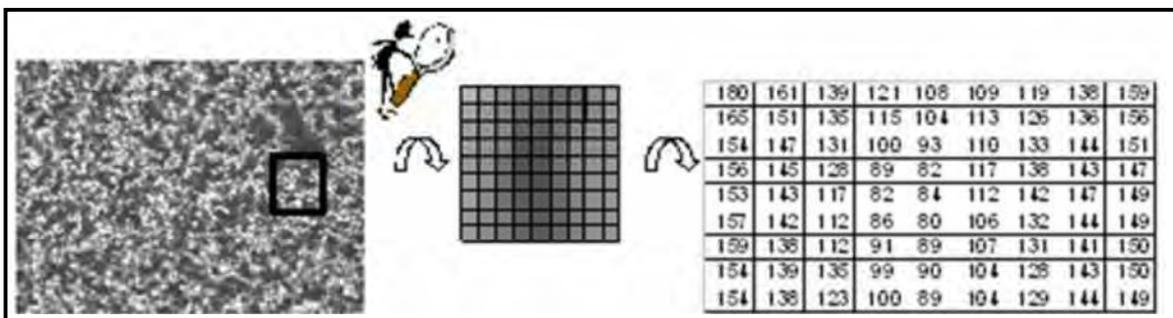


Figure 15. Principe de codage des intensités des niveaux de gris d'une image monochrome sous la forme d'un tableau chiffré (LASSOUED, 2005).

b. 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.

c. 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).

d. 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 (Figure 16) modifient les alvéoles de la mie suite à l'augmentant 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.

Pour les images numériques des pâtons et au bout de 25 étapes il ne reste presque plus d'alvéoles,

Contre 10 étapes seulement pour les images prise par scanner médical. Cette différence serait probablement due à la résolution des images de scanner qui est inférieur à celle des images numériques.

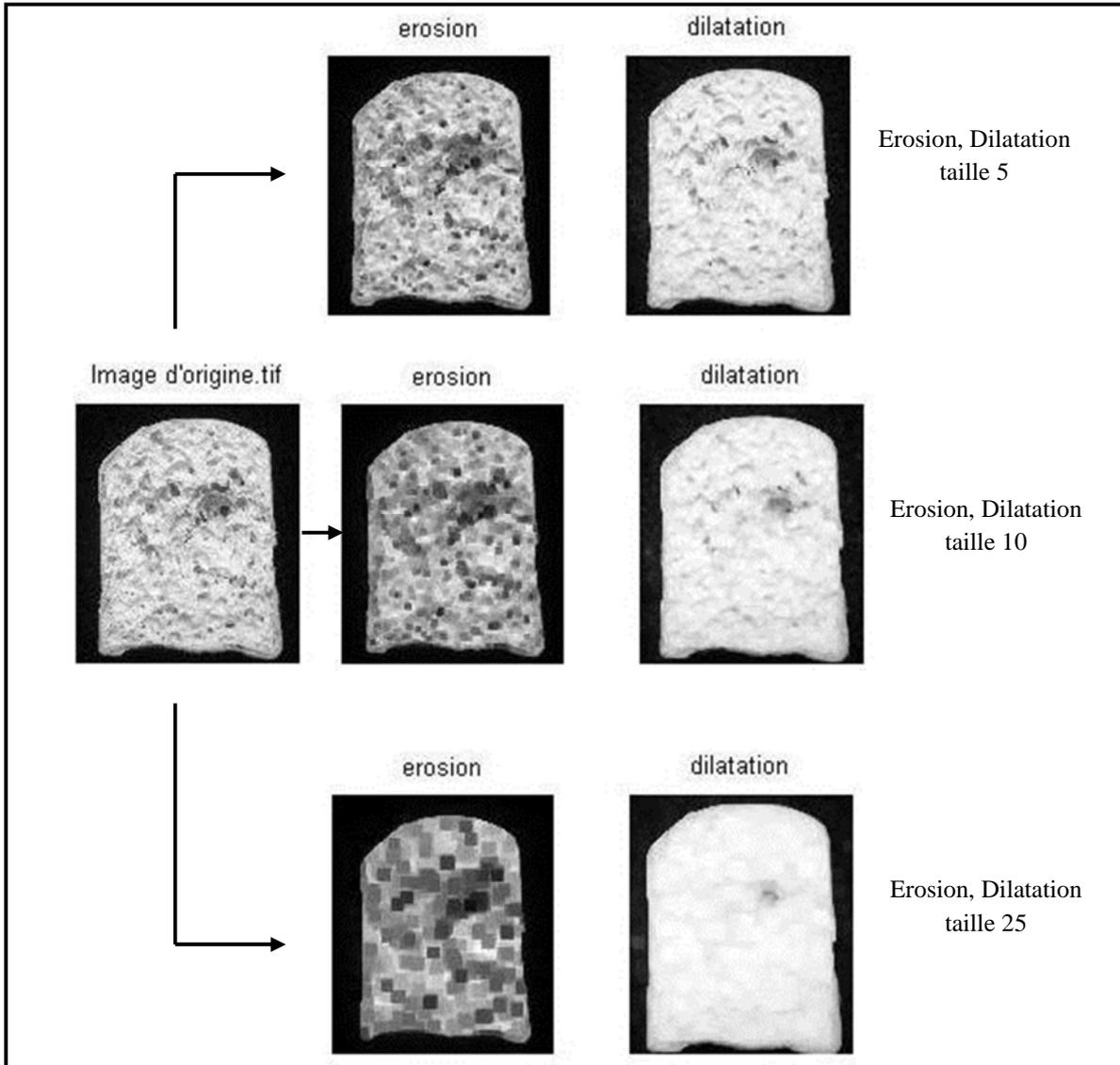


Figure 16. Exemple d'application d'étapes d'érosion et de dilatation de taille 5, 10 et 25 sur la région d'intérêt d'un pâton congelé et lyophilisé.

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 ième 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 17) 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.

La comparaison des courbes de texture de l'ensemble des images de mies scannées nécessite une étape de normalisation. Chacune des courbes dépend de la taille de la région

d'intérêt considérée ainsi que de la somme des niveaux de gris initiale correspondante. La normalisation de chacune des deux parties de la courbe associées respectivement aux n étapes d'érosion et aux n étapes de dilatation est effectuée selon la formule :

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

Où

V_0 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).

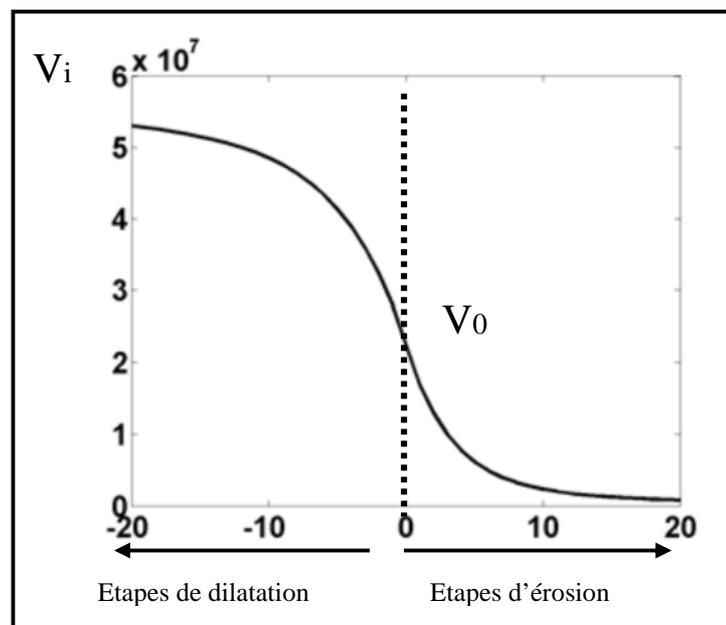


Figure 17. Courbe de décroissance de la somme des niveaux de gris selon les étapes de dilatations et d'érosions (LASSOUED, 2005).

La courbe de texture granulométrique normalisée (évolution de g_i en fonction des n étapes d'érosion et de dilatation) exprime en pourcentage relatif les variations d'intensité observées entre l'image initiale et la n ème étape de transformation (figure 18). La partie gauche de cette courbe correspond à l'analyse des alvéoles et la partie de droite à celle de s paroi.

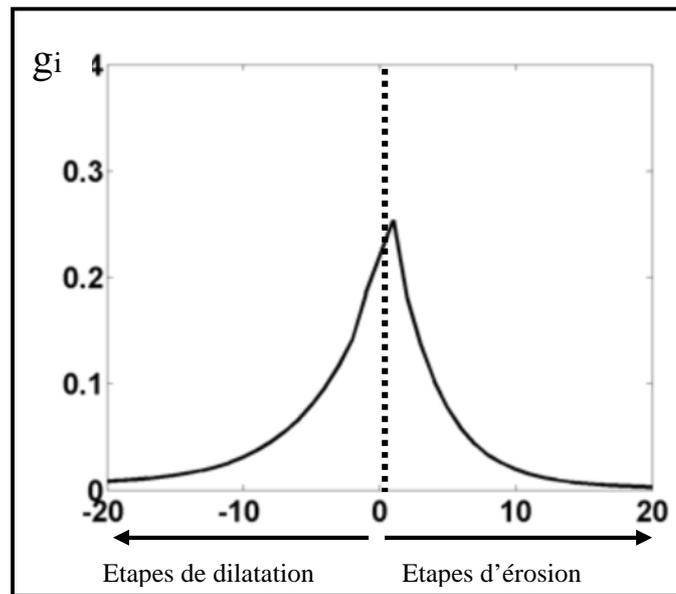


Figure 18. Courbe de texture granulométrique en niveaux de gris (LASSOUED, 2005).

3. Classification des courbes par Analyse en Composantes Principales

La classification des courbes de texture granulométrique en niveau de gris est réalisée par une technique d'analyse multidimensionnelle : l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode permet de décrire l'information contenue dans un tableau de données en tenant compte des corrélations existant entre-elles, ce tableau de p individus (p courbes correspondant aux p images de pâton) et n variables (n étapes de transformations) est initialement centré par la soustraction de l'individu moyen (courbe moyenne) à tous les autres individus. Les données de ce tableau sont résumées par un nombre de variables synthétiques non corrélées appelées Composantes Principales. Ces composantes correspondent à des combinaisons linéaires des variables d'origine

Il est possible de classer les courbes de texture granulométrique des niveaux de gris par l'Analyse en Composantes Principales (ACP) selon l'équation (SCHWARTZ, 1993 ; DANZART, 1998) :

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

Où :

x_{ik} : la valeur de la $kième$ variable observée pour l'individu i ; u_{kj} : la valeur du poids de la variable k dans la composante principale j ; c_{ij} : la valeur de la composante principale j pour le $ième$ individu.

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

VI. Analyse statistique

Le traitement statistique appliqué aux différents paramètres pour estimer : la moyenne arithmétique et l'écart type.

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

Deux analyses indépendantes ont été traitées à l'aide d'un logiciel statistique XLSTAT (2008). La première analyse permet de regrouper par la méthode de k-means les différentes cinétiques des pâtes fermentées. La deuxième analyse permet par la méthode d'analyse en composantes principales (ACP) de classer les courbes granulométriques en niveau de gris de deux cinétiques de farines de blé tendre et d'une cinétique de formule sans gluten (FRF), le seuil de signification a été fixé à 0,05).

Résultats et Discussion

I. Caractérisation technologique et rhéologique des farines

L'ensemble des résultats des analyses technologiques de nos farines 1 et 2 de blé tendre ainsi que de la formule Riz-Féverole sont reportés dans le tableau 3.

Tableau 3. Caractérisation technologique des farines de blé tendre 1 et 2 ainsi que de la FRF.

Farines	Humidité (%)	Gluten				Activité α -amylasique (sec)
		GH(%)	GS(%)	GI(%)	CH(%)	
FBT 1	13,96± 0,01	22,25±0,21	7,6±0,02	99±1,41	65,84±0,32	307±0,87
FBT 2	14,85± 0,05	22,15±1,62	7,45±0,21	96±2,82	66,30±1,52	327±1,2
FRF	10,53±0,05	-	-	-	-	526±0,1

FBT : Farine blé tendre ; FRF : Formule Riz-Féverole ; GH : Gluten humide ; GS : Gluten sec ; GI : Gluten index ; CH : Capacité d'hydratation.

1. Teneur en eau

Il est essentiel de connaître la teneur en eau, appelée aussi humidité pour les farines boulangères, elle doit être comprise entre 10 et 16 % (CHENE, 2001; CALVEL 1984 ; GRANDVOINNENT & PRATY, 1994 ; GHERAIRIA, 2011) Au-delà, il y a risque d'altération. Connaître la teneur en eau permet de réaliser certaines analyses pour lesquelles la méthode impose de travailler sur des pâtes à teneur en eau constante, quelle que soit la farine (exemple : Temps de chute) (DELFRATE et STEPHAN, 2005).

La teneur en eau moyenne de nos farines qui varie entre 10,53% et 14.85% ce qui permet de conclure leur bonne conservation.

2. Teneur en gluten

Une très grande partie des propriétés technologiques de la pâte peut être associée au gluten. Plusieurs auteurs ont souligné que la composition du gluten est un facteur déterminant de la force d'une farine. La quantité et la qualité de ce dernier sont responsables des propriétés viscoélastiques de la pâte (extensibilité et élasticité) (LECOQ, 1965).

Les teneurs en gluten sec respectifs des farines de blé 1 et 2 ($7,6\pm 0,02\%$) et ($7,45\pm 0,21\%$) sont proches. Toutefois, ces valeurs demeurent dans les normes en gluten sec d'une farine panifiable (7 à 12%) (LECOQ, 1965).

Les taux de gluten index des farines 1 et 2 sont respectivement ($99\pm 1,41\%$) et ($96\pm 2,82\%$), c'est un indice de bonne qualité de nos farines.

La capacité d'hydratation est en relation directe avec la qualité de la farine. Elle correspond à la quantité d'eau à ajouter. Elle est normalement comprise entre 62 et 65% et peut s'élever à 69% (LECOQ, 1965). La capacité d'hydratation de la farine 2 ($66,30\pm 1,52\%$) est supérieure aux valeurs données par LECOQ (1965) ainsi qu'à celle de la farine 1 ($65,84\pm 0,32\%$) qui est plus proche de la norme.

En conclusion le gluten de la farine 2 à une capacité d'hydratation relativement élevée à celui de la farine 1.

3. Activité alpha-amylasique

L'activité alpha amylasique rend compte le degré d'hydrolyse de l'amidon en sucre simples fermentescibles.

Le temps de chute de la farine 1 : ($307\pm 0,87\text{sec}$) et de la farine 2 : ($327\pm 1,2\text{sec}$) sont supérieur est admis dans la méthode du « Falling Number », restent conformes aux normes optimales pour la panification (200 à 300) rapportés par GODON et LOISEL (1997). Pour ces derniers une activité enzymatique optimale correspond à un indice de chute entre 200 et 300 seconde est primordiale pour l'obtention d'un pain de volume élevé et de mie homogène et appréciable. Cependant une présence excessive ou insuffisante de l'alpha amylase engendre la détérioration de la valeur boulangère, cas de la formule sans gluten qui présente un temps du chute de 500 sec, ce qui correspond à des farines dites hypo diastasiques, corrigable en panification par l'ajout de malt.

4. Caractérisation rhéologique des farines par l'Alvéographe Chopin

Les caractéristiques rhéologiques des farines de blé tendre 1 et 2 ainsi que la FRF ont été étudiées par l'Alvéographe Chopin (tableau 4). Le test d'alvéographe fournit des résultats qui sont couramment utilisés par les meuniers pour assurer un processus de transformation plus cohérent de la farine. L'alvéographe est bien adapté pour mesurer les caractéristiques de la pâte. Une farine avec une valeur P(ténacité) faible (force du gluten) est préférable pour les biscuits et autres produits de viennoiserie contre une farine avec des valeurs P élevées pour les pains (PAUL, 2004).

Tableau 4. Caractéristiques alvéographiques des farines de blé tendre et de la formule sans gluten

Farines	G (cm ³)	P/L	W (10 ⁻⁴) J
Farine de blé tendre 1	21,52±1,56	0,69±0,17	188,35±1,76
Farine de blé tendre 2	19,20±1,00	0,83±0,40	175,66±2,05
Formule sans gluten F.R.F	6±0	1,75±0,22	3,27±0,92
<i>Normes Algériennes de panification</i>	>20	[0,45 à 0,65]	[130 à 180]
<i>Normes Françaises de panification</i>	[20 à 24]	[0,5 à 0,7]	[200 à 220]

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

4.1. Indice de gonflement « G »

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

La valeur de gonflement de la farine témoin de blé tendre 1 (21,52±1,56 cm³) est conforme aux normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et Françaises de panification (GUINET et GODON, 1994) et à celles apportées par BERLAND et ROUSSEL (2000), qui varient entre 20 et 24 cm³ contre des valeurs pour la farine témoin de blé tendre 2 inférieurs aux normes Algériennes et Françaises ainsi que celles citées par BERLAND et ROUSSEL (2000).

La valeur moyenne de gonflement des ingrédients sans gluten (6±0) cm³ pour la formule Riz-Féverole est proche à celle obtenue par BENATALLAH (2009) qui est de (8 ± 0,01 cm³) et celles obtenus par GHERAIRIA (2011) (5,45±0,70cm³). Par ailleurs ces résultats sont nettement plus faibles à ceux des témoins de blé tendre (1 et 2) et des normes Algériennes (J.O.R.A. 1991) et Françaises de panification (GUINET et GODON, 1994).

4.2. Rapport de configuration « P/L »

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

Le rapport de configuration « P/L » enregistré pour la farine de blé tendre 1 est de $(0,69\pm 0,17)$ et celui de la farine 2 est de $(0,83\pm 0,40)$. D'après LIU *et al* (1996), notre farine témoin 2 pourrait orientée à la panification car son rapport de configuration se situe dans l'intervalle de $[0,8 \text{ à } 2]$. Cependant, elle reste supérieure à la gamme des valeurs des normes Algériennes (J.O.R.A. 1991) et Française de panification (GUINET et GODON, 1994) avec des P/L respectifs de $[0,45 \text{ à } 0,65]$ et de $[0,5 \text{ à } 0,7]$. La farine de blé tendre 1 serait plus adaptée à la panification.

Le rapport de configuration des ingrédients sans gluten qui est de $(1,75\pm 0,22)$ pour la FRF est trop élevé comparativement à ceux du témoin blé tendre et aux normes Algériennes (J.O.R.A. 1991) et Françaises de panification (GUINET et GODON, 1994), renseignant sur la forte ténacité et la faible extensibilité de ces pâtes.

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

4.3. 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 l'on ne tient pas compte des autres caractéristiques alvéographiques.

Le travail de déformation (W) de la farine de blé 1 ($188,35\pm 1,76.10^{-4}$ J) et de la farine 2 ($75,66\pm 2,05.10^{-4}$ J) se situent dans les limites fixées par les normes Algériennes (1991), à savoir 130 à 180 $.10^{-4}$ J pour des farines panifiables. Le travail enregistré pour nos farines s'avère encore plus insuffisant par rapport à l'intervalle recommandé par GUINET et GODON (1994), soulignant qu'une bonne valeur boulangère ne s'établit que lorsque le « W » est compris entre 200 et 220 $.10^{-4}$ J.

Les ingrédients sans gluten présentent une valeur du travail de déformation (W) de $(3,27\pm 0,92. 10^{-4}$ J). Des résultats similaires ont été rapportés par BENATALLAH, (2009) et GHERAIRIA, (2011). Toutefois, ces résultats sont loin des valeurs de nos témoins de

blé tendre ainsi que des normes Algériennes (J.O.R.A. 1991) et Françaises de panification (GUINET et GODON, 1994).

La prise en considération de toutes les données alvéographiques ainsi que des taux de gluten et ceux d'hydratation permettent de conclure que la farine 1 se prête mieux à la panification par rapport à la farine 2. Les deux types de farines de blé tendre se montrent nettement meilleures que la formule sans gluten étudiée.

II. Suivi de cinétiques de fermentation des pâtes

Dans cette partie de notre travail, nous présentons les cinétiques de fermentation exprimées par les évolutions des expansions gazeuses des pâtons au cours du temps.

Le suivi de l'expansion gazeuse des pâtes fermentées a été effectué par la méthode de surgélation dans l'azote liquide puis lyophilisation des pâtons que nous essayons de valider (figure 19). Cette technique permet non seulement le suivi des cinétiques de fermentation mais également d'observer l'évolution de la structure des pâtons au cours de cette étape.

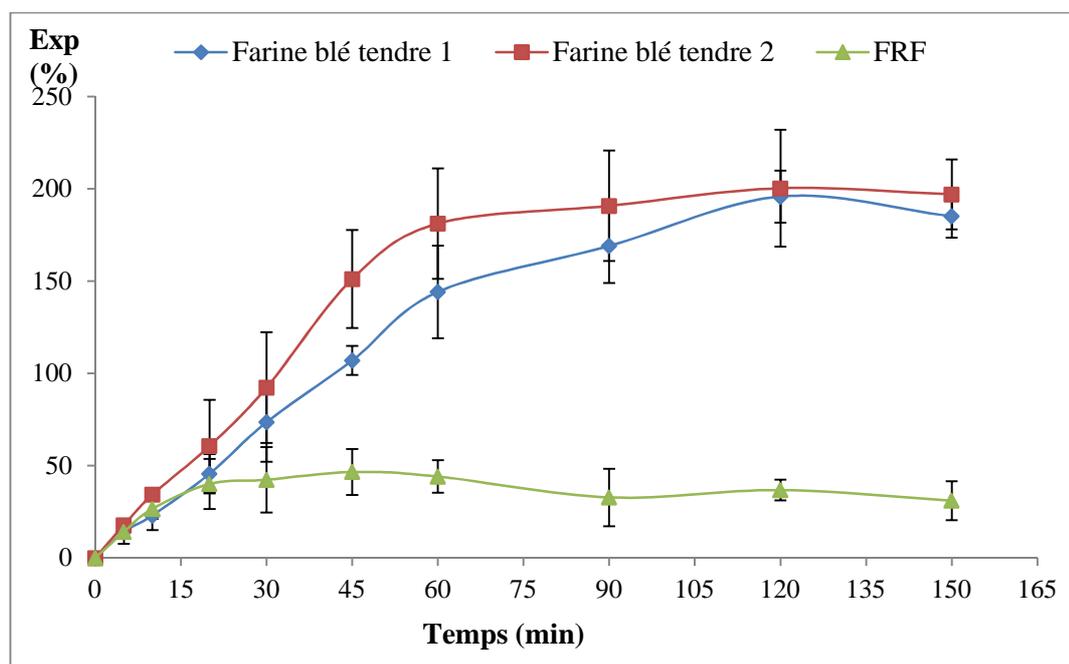


Figure 19. Cinétiques d'expansion gazeuse (Exp p.cent) de deux farines de blé tendre et de la formule sans gluten (FRF).

Les pâtes des témoins de blé tendre 1 et 2 s'expansent environ 3 fois plus que celles de la formule riz-féverole. Ces résultats renseignent sur la très faible rétention gazeuse des pâtes sans gluten avec une perméabilité au CO₂ plus importante. Ce phénomène serait

essentiellement attribué à l'absence d'une structure permettant la rétention des gaz de fermentation. (HUEBNER *et al.*, 1990 ; CUQ et LEYNAUDROUAUD, 1992).

L'optimum de fermentation de la FRF se situe à 45 min avec une expansion gazeuse de 44,05%, contre 195,79% et 200,28% à 120 min pour les farines de blé 1 et 2 respectivement.

Pour les cinétiques des farines de blé tendre 1 et 2, trois phases se distinguent :

- La première croissante et rapide entre 0 et 60 min, indique une forte production de CO₂ et une bonne rétention de celui-ci. A 60 min l'expansion atteint 144,11% pour la farine 1 et 181,13% pour la farine 2.
- Une deuxième phase toujours croissante de 60 à 120 min mais avec une pente plus faible s'expliquerait par l'épuisement du substrat et par conséquent par la faible production de CO₂, pour cette phase les expansions se situent entre 144,11 et 195,79% pour la farine 1 et entre 181,13% et 200,28% pour la farine 2.
- Une troisième phase de 120 à 150 min, qui se caractérise par une stabilisation générale de l'expansion jusqu'à la fin des cinétiques.

Au cours de la première phase, nous remarquons une production continue et intense en CO₂. Les levures s'adaptent rapidement à leur milieu et commencent la synthèse des enzymes nécessaires à la production de gaz carbonique à partir des sucres préexistants dans la pâte (glucose, saccharose) apportée par la farine (1 à 2%). Entre temps, l' α et la β amylases de la farine hydrolysent l'amidon en maltose. Ce dernier pénètre dans la levure où il est hydrolysé en glucose, qui va subir par la suite une glycolyse et une fermentation en produisant le CO₂ (FEILLET, 2000).

Pendant la deuxième phase, l'intensité de production de CO₂ se diminue mais reste toujours croissante, cela indique un début d'appauvrissement du milieu en éléments nutritifs nécessaires au développement. Dans ce cas, les levures prennent plus de temps pour produire le gaz CO₂. D'après ces résultats et au cours de la première et la deuxième phase on remarque que la farine de blé tendre 2 présente une meilleure évolution de l'expansion gazeuse par rapport à la farine de blé tendre 1. Ceci pourrait être dû à la différence de la composition biochimique des deux farines. D'après ALAIS *et al.* (2008), la richesse en sucre préexistants et en amidon endommagé favoriseraient l'activité fermentative des levures. La variété de blé utilisé pourrait également avoir une influence sur l'action de celles-ci.

Pendant la troisième phase on observe une stabilisation de l'expansion gazeuse. Avec le temps, la vitesse d'expansion est ralentie et la levée de la pâte tend vers une limite. Ce ralentissement résulte de la rupture de certaines membranes alvéolaires et de la diffusion du CO₂ à travers d'autres membranes devenues plus minces. Pour cela, l'ensemble de la pâte doit être bien structuré : elle doit être suffisamment extensible et élastique tout en présentant une certaine rigidité, capable d'assurer la stabilité des alvéoles enchâssées dans les mailles du réseau protéique et où le CO₂ s'accumule (DESS, 1998).

Pour la pâte de la formule Riz-Féverole, l'expansion passe par deux phases (figure 19). Une première ascendante de 0 à 45 min, avec un optimum d'expansion de 44,05 % et une deuxième relativement stable entre 45 à 150 min où nous constatons une chute des volumes de nos pâtons probablement en raison de la fragilité de leur structure alvéolaire.

III. Caractérisation texturale des pâtes fermentées et classification par ACP

1. Caractérisation texturale des pâtes fermentées

Les propriétés texturales des pâtons fermentés avec et sans gluten sont étudiées. Le traitement des images issues du scanner médical et de l'appareil photo numérique est basé sur la morphologie mathématique. L'étude des variations de la somme des niveaux de gris lors de dilatation successives 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.

Afin de comparer les courbes entre elles, il est nécessaire de procéder à leur normalisation par rapport à la taille des coupes de pâtons et de leurs intensités lumineuses. Les courbes granulométriques en niveaux de gris des pâtons fermentés de farines de blé 1 et 2 ainsi que de la FRF sont présentées respectivement sur les figures 20, 21, 22.

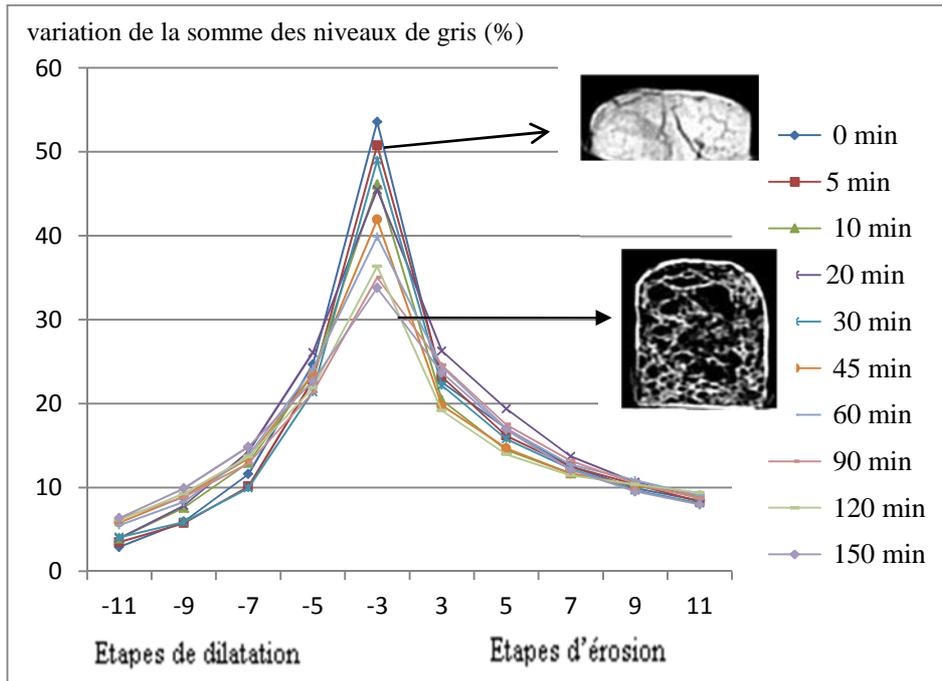


Figure 20. Courbes granulométriques de cinétique à base de farine de blé tendre 1

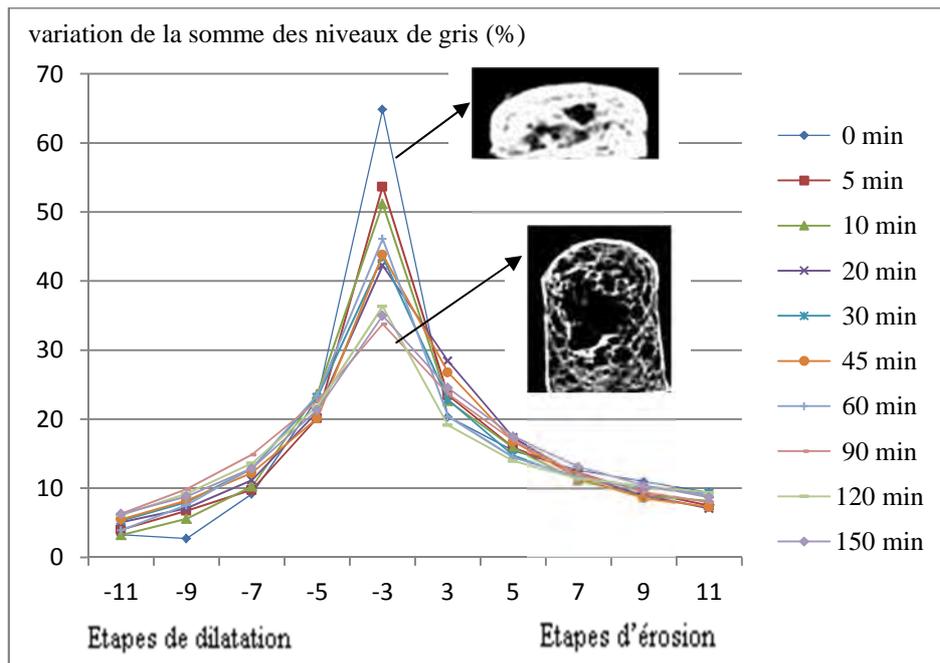


Figure 21. Courbes granulométriques de cinétique à base de farine de blé tendre 2

2. Classification par Analyse en Composante Principale (ACP)

Après avoir tracé les courbes granulométriques des niveaux de gris normalisés des farines de blé tendre 1 et 2 ainsi que de la FRF, nous avons procédé à une classification par ACP des pâtons sur les résultats obtenus par scanner médical (figure 23). Pour les deux ACP réalisées, nous avons choisi de travailler avec les deux composantes principales ayant expliqué la variabilité la plus élevée.

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) permet de classer les courbes granulométriques obtenues pour les images de pâtons traitées (figure 20). Nous avons choisi de retenir seulement les deux premières composantes principales du niveau 2 (CP1 et CP2) car elles expliquent plus de 86 % de la variance totale (CP1 : 57,17% et CP2 : 28,96%).

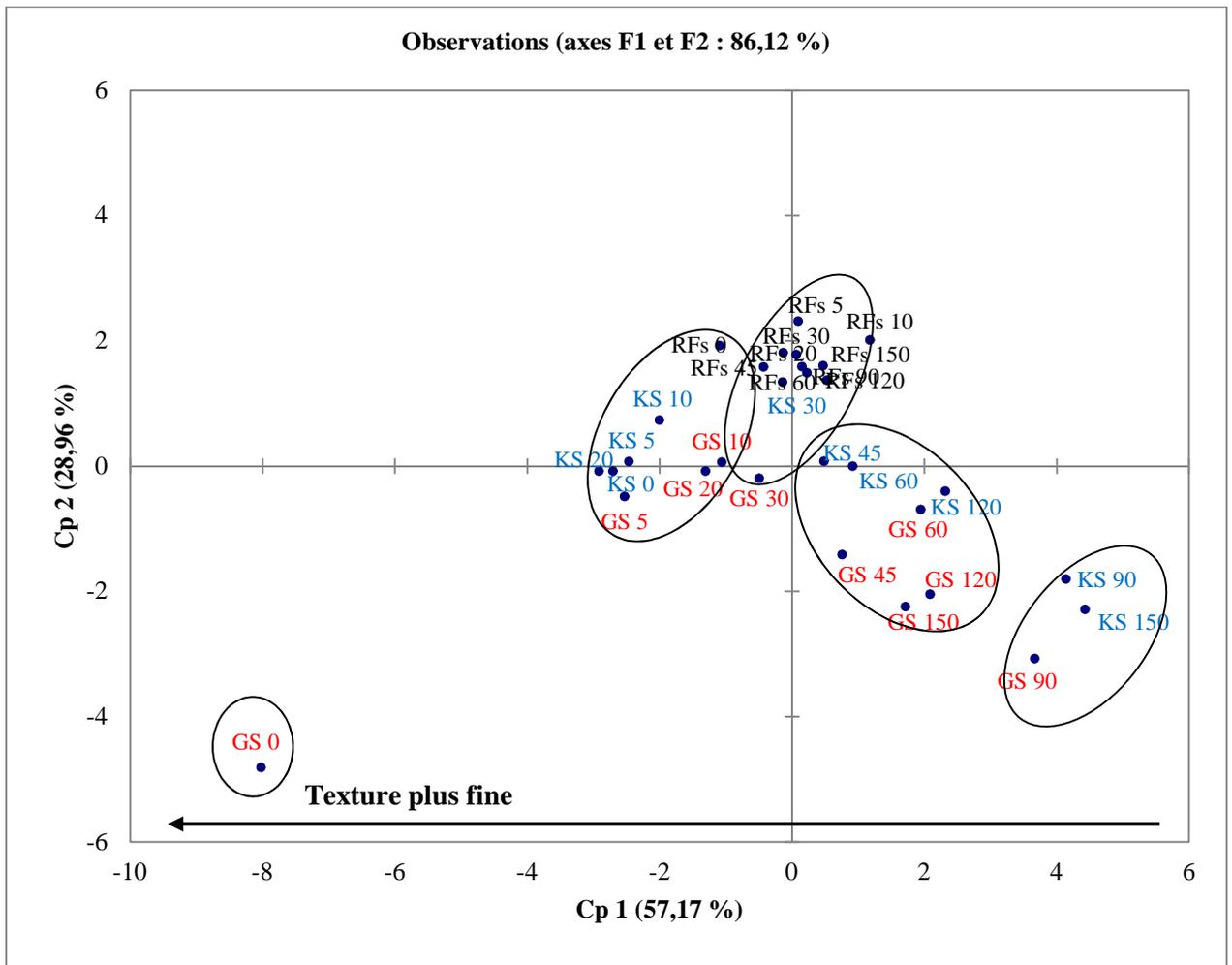


Figure 23. Carte de ressemblances issue de l'analyse en composantes principales sur les courbes granulométriques de texture de trois types de farines (images scannées). KS : pâtons scanné de blé tendre 1 ; GS : pâtons scanné de blé tendre 2 ; RFs : pâtons scanné de FRF.

Concernant le groupe d'images obtenu par scanner médical (figure 23), nous avons travaillé avec les deux premières composantes principales. La première composante principale (Cp1) permet de classer les pâtons selon le temps de fermentation. Cet axe sépare distinctement les pâtons des premiers temps de fermentation 0, 5, 10, 20 min, de ceux des temps avancés 30, 45, 60, 90, 120, 150 min. Cp1 (57,17%) et Cp2 (28,96%) expliqueraient plus de 86% de la variance totale.

Les cinétiques sans gluten sont mal représentées sur l'axe F1. Ils sont regroupés dans le même groupe selon la classification k-means ce qui indique l'absence de changement de la structure alvéolaire. Les pâtons ont donc presque tous la même texture quelque soit le temps de fermentation.

La seconde composante principale oppose les pâtons des cinétiques sans gluten à ceux à base de blé tendre (1 et 2) décrivant 21,96% de la variation totale. Elle permet la discrimination des textures en fonction de la composition biochimique des farines (présence ou l'absence du gluten). Les pâtons sans gluten se situent en haut de la carte contre ceux avec gluten en bas à l'exception des pâtons de la farine 1 aux temps de fermentation K5, K10, G10, K30.

3. Classification par ACP des courbes granulométriques des textures obtenues par imagerie numérique

Pour le groupe d'images obtenu par appareil photo numérique (figure 24) des mêmes échantillons de pâtons fermentés scannés, nous avons également travaillé avec les deux premières composantes principales Cp1 (47,62%) et Cp2 (29,83%), qui expliquaient plus de 77,45% de la variance totale. L'axe F1 sépare les cinétiques à base de farine de blé tendre selon la finesse, les pâtons de textures fines (à gauche de la carte) et les pâtons de textures plus aérées (à droite de la carte), (figure 24). Nous déduisons que la première composante principale décrit la finesse de la structure alvéolaire.

La deuxième composante principale Cp2 sépare les pâtons sans gluten en haut contre ceux de blé tendre en bas de la carte, à l'exception de quelque point de la formule Riz-Féverole aux temps 60 et 150 min.

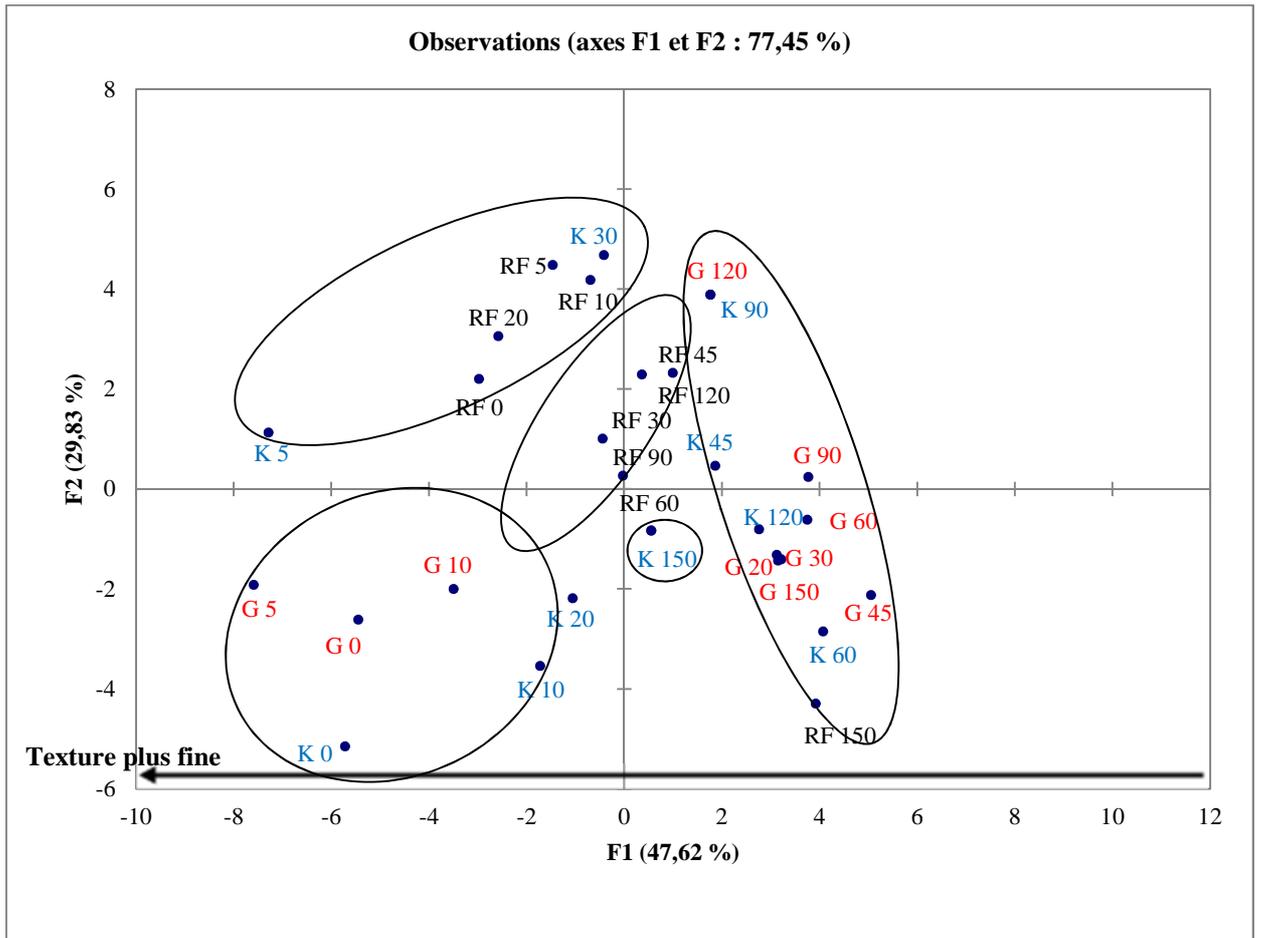


Figure 24. Carte de ressemblances de l'ACP sur les courbes granulométriques de texture de trois types de farines obtenues par appareil photo numérique. KS : pâtons scanné de blé tendre 1 ; GS : pâtons scanné de blé tendre 2 ; RFs : pâtons scanné de FRF.

4. Conclusions et validation de la technique de suivi des cinétiques de fermentation des pâtons fermentés congelés et lyophilisé

La méthode d'analyse d'images proposée, basée sur la granulométrie en niveau de gris issue du domaine de la morphologie mathématique, a permis de calculer des courbes de texture décrivant la distribution de taille des alvéoles et de leurs parois selon les temps de fermentation. La lecture de ces courbes n'étant pas directe, une classification par Analyse en Composantes Principales a permis de révéler les variations de textures observées. La première composante principale classe les pâtons en fonction de leur finesse globale. La seconde composante décrit des variations des structures selon la composition biochimique des farines utilisées.

En conclusion l'absence de différences significatives entre la technique du suivi des cinétiques de fermentation par lyophilisation des pâtes obtenues par scanner médical ou par

appareil photo numérique, nous permet de valider cette dernière. Notre technique qui présente l'inconvénient de couper les pâtons, reste un outil scientifique simple et abordable par tous, contrairement à l'imagerie par scanner médical qui malgré qu'elle permet d'obtenir des images à partir d'un échantillon sans le modifier et donne des images de la structure interne construites à partir d'une série de coupes faite par radiographie à rayons X elle reste chère et pas à la porté de tous.

Conclusion et
perspectives

Le but de cette étude est la mise au point d'une technique de suivi des cinétiques de fermentation des pâtes boulangères, basée sur la congélation des pâtons dans de l'azote liquide puis lyophilisation.

A l'issue de ce travail, nos conclusions sont les suivantes :

La prise en considération des données alvéographiques, des taux de gluten et de l'activité alpha-amylasique des matériaux impliqués en panification a montré une meilleure aptitude à la panification de la farine 1, suivie de la farine 2 puis de la formule sans gluten.

La technique du suivi des cinétiques de fermentation par congélation et lyophilisation des pâtons a permis de tracer les cinétiques d'expansion gazeuse des pâtes fermentées. C'est la farine 2 qui s'expande plus avec une valeur finale à 150 min 197 % suivie de la farine 1 avec 195,94%, puis la formule sans gluten avec une expansion de 31,02 %.

L'optimum de fermentation des farines 1 et 2 de blé tendre se situe à 120 min, contre un optimum de 45 min pour la formule sans gluten.

L'allure des cinétiques de fermentation des farines 1 et 2 passe par trois phases. Une première croissante et rapide entre 0 à 60 min, une deuxième phase croissante avec une faible pente entre 60 à 120 min et une troisième qui tend à se stabiliser à partir de 120 min.

L'allure des cinétiques de fermentation de la formule Riz-Féverole présente cependant deux phases. Une première ascendante entre 0 et 45 min et une deuxième relativement stable entre 45 et 150 min.

La technique d'analyse d'image par morphologie mathématique des coupes de pâtons par scanner médical a permis la validation de celle où nous avons utilisé l'appareil photo numérique et ce à travers la cohérence des résultats des deux techniques sur les courbes granulométriques pour le même type de pâte :

- La structure la plus fine pour la formule sans gluten est obtenue avec un pic moyen de niveaux de gris et se situe à 5 min (40%), contre 30 min pour les structures les plus grossières (32%) ;
- La structure la plus fine pour les farines de blé tendre est observée avec un pic moyen des niveaux de gris à 0 min (65%) pour la farine 2 et 55% pour la farine 1 contre la plus grossière (35%) à 150 min pour la farine 1 et 2.

L'observation de deux axes sur la carte de ressemblance lors de la classification par l'Analyse en Composante Principale (ACP) des pâtons fermentés ainsi que le regroupement par k-means ont permis de faire ressortir un axe horizontal de finesse, croissante de gauche à droite et un axe vertical d'hétérogénéité croissante de bas en haut. Les pâtons sans gluten se trouvant regroupés en haut contre ceux de blé tendre en bas.

La technique de lyophilisation que nous avons utilisée dans notre étude nous a permis de figer la structure alvéolaire de nos pâtes boulangères. Malgré les basses pressions utilisées lors de la sublimation, nous avons pu garder l'intégralité de la structure des pâtons.

La technique d'acquisition d'images par scanner médical reste d'une part plus représentative que celle d'un appareil photo numérique par rapport au nombre élevé de coupes verticales obtenues et d'autre part par la préservation de la structure alvéolaire. Cependant elle reste chère et pas à la portée de tous, contrairement à la technique que nous proposons.

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

- La confirmation des résultats de classification des pâtons fermentés sur les mies de pains.
- L'extension de l'application de l'analyse morphologique mathématique en vue de les classer et de les caractériser à d'autres produits tels que les fromages et les couscous ;
- L'introduction de l'analyse d'image comme outil de caractérisation des produits alimentaires.

Références

Bibliographiques

"A"

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

"B"

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

BABIN P., DELLA VALLE G., CHIRON H., CLOETENS P., HOSZOWSKA J., PERNOT P., REGUERRE A.L., SALVO L., DENDIEVEL R. 2006. Fast X-ray tomography analysis of bubble growth and foam setting during breadmaking. *Journal of Cereal Science*, 43, 393-397.

BAKER J.C et MIZE M.D. 1941. The origin of the gas cell in bread dough. *Cereal Chemistry*, 18, 19-34.

BENATALLAH L. 2009. Couscous et pain sans gluten pour malades cœliaques : aptitude technologique de formules à base de riz et de légumes secs. *Thèse de Doctorat*. Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-alimentaires I.N.A.T.A.A.169 p

BERTRAND D., LE GUERNEVE C., MARION D., DEVAUX M.F et ROBERT P. 1992. Description of the textural appearance of bread crumb by video image analysis. *Cereal Chemistry*, 69, 257-261.

BHARATI M.H., JAY LIU J. et MACGREGOR J.F. 2004. Image texture analysis: methods and comparisons. *Chemometr Intell Lab*, 72, 57-71.

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

BLOKSMA A.H. 1990b. Dough structure, dough rheology, and baking quality. *Cereal Foods World*, 35, 237-244.

BOURGEOIS C. 1989. Microbiologie alimentaire, les fermentations alimentaires 2. Edit TEC et DOC, Lavoisier, pp 62-63.

BRANGER A., RICHER M.M., ROUSTEL S. 2007. Microchimie et alimentation. Edit Educagri, Paris, 343 p.

BURROWS S et HARRISON J.S. 1959. Routine method for determination of the activity of baker's yeast. *Journal of the Institute of Brewing*, 65, 39-45.

"C"

CAMPBELL G.M., HERRERO-SANCHEZ R., PAYO-RODRIGUEZ R. et MERCHAN M. L. 2001. Measurement of Dynamic Dough Density and Effect of Surfactants and Flour

Type on Aeration during Mixing and Gas Retention During Proofing. *Cereal Chemistry*, 78, 272-277.

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

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

CAUVAIN S.P., WHITWORTH M.B et ALAVA J.M. 1999. The evolution of bubble structure in bread doughs and its effect on bread structure. *In*: CAMPBELL G.M., WEBB C., PANDIELLA S.S. et NIRANJAN K., Bubbles in food (pp 85–93). St Paul: Eagan Press.

CHARGELEGUE A., GUINET R., NEYRENEUF O., ONNO B. et POITRENAUD B. 1994. La fermentation, *In*: La panification française, Vol. 528.

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

CHEVALLIER S., ZUNIGA R., LE-BAIL A. 2010. Assessment of Bread Dough Expansion during Fermentation. *Food Bioprocess Technol.* Springer.pp 1.

CHIOTELLIS E. et CAMBELL G.M. 2003. Proving of bread dough II, measurement of gas production and retention. *Food and Bioproducts Processing*.ELSEVIER,81, 207-216.

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

CLEMENT J. 1983. Fermentation panaiere, partie la levure de boulangerie : fabrication industrielle. Edit. APRIA, pp 15-31.

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

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

CUQ J. L. et LEYNAUD-ROUAUD C. 1992. Les graines de légumineuses *In* : DUPIN H., CUQ J. L., MALEWIAK M. L., LEYNAUD-ROUAUD C. et BERTHIER A. M. Alimentation et nutrition humaines. ESF éditeurs, Paris, pp 941-61.

CZUCHAJOWSKA Z. et POMERANZ Y. 1993. Gas formation and gas retention I. The system and methodology, *Cereal Foods World*, 38, 499-503.

"D"

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

DEL FRATE R. STEPHAN C. 2005. Mieux connaître 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 : 16 p.

DE STEPHANIS V.A. et PONTE J.G. 1976. Studies on the breadmaking properties of wheat-flour nonpolar lipids. *Cereal Chemistry*, 53, 636-642.

DELLA VALLE G., BONNY J.M., LEFEBVRE J., RENOU J.P., ROUILLE J. et VAN VLIET T. 2003. Propriétés rhéologiques de la pâte à pain et croissance de bulles suivie par imagerie RMN, en cours de fermentation. INRA Nantes, *Agrotechnology and Food Science*. pp 1-4.

DESS Q. 1998. La filière pain. Rapport des étudiants du Master Pro Qualimapa (USTL-Lille), 173 p.

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

DROOGENBROECK V. 1994. Traitement d'images numériques au moyen d'algorithmes utilisant la morphologie mathématique et la notion d'objet : application au codage. *Thèse de Doctorat*, université catholique de louvain, Ecole nationale supérieure des mines de paris, France, 23 p.

DUBOIS. 1983. Fermentation panaire partie contrôle de la Fermentation panaire. Edit APRIA, pp 71-92.

"F"

FEILLET P. 2000. Le grain de blé, composition et utilisation. Edit Institut national de la recherche agronomique INRA, paris, 308 p.

FOIS S., FADDA C., TONELLI R., SANNA M.,URGEGHE P.P., ROGGIO T et CATZEDDU P. 2012. Effects of the fermentation process on gas-cell size two-dimensional distribution and rheological characteristics of durum-wheat-based doughs. *Food Research International*. Edit. ELSEVIER, Italy, 194 p.

FREDOT E. 2005. Connaissance des aliments, bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique. Edit TEC et DOC, Lavoisier, pp 157 - 177.

"G"

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

GHERAIRIA N. 2011. Pain sans gluten pour malades coeliaques : aptitudes technologique d'une formule riz-fèverole. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister. Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-alimentaires (INATAA), 102 p

GODON B. et LOISEL W., 1997. Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. Edit. TEC et DOC, Lavoisier, pp 317-589.

GRANDVOINNENT et PRATY .1994. Farines et mixes .in : la panification française. Edit. Lavoisier-Apria, Tec et Doc, Paris, 534 p.

GUESSASMA S.2007. Approches de génération de structures alvéolaires et élasticité de produits céréaliers. INRA Unité Biopolymères Interactions Assemblages (BIA) Nantes 44316, France, pp 28.

GUILLERMO G., BELLIDO, MARTIN G., SCANLON, JOHN H. et PAGE S. 2009. Measurement of dough specific volume in chemically leavened dough system. *Journal of Cereal Science*. ELSEVEIR, pp 212-218.

GODON B et GUINET R. 1994. La panification française. Edit. Lavoisier-Apria, Tec et Doc, Paris, 534 p.

GODON B. et LOISEL W.1984. Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. Edit TEC et DOC, Lavoisier, pp 454 - 463.

"H"

HALTON P.1949. Significance of load-extension tests in assessing the baking quality of wheat flour doughs. *Cereal Chemistry*, 26, 24-45.

HARALICK R.M. 1979. Statistical and structural approaches to texture, proceedings IEEE, 67, 786-804.

HE H. et HOSENEY R.C. 1991. Gas retention of different cereal flours. *Cereal Chemistry* 68, 334–336.

HOSENEY R.C., HSU K.S. et JUNGE R.C. 1979. A simple spread test to measure the rheological properties of fermenting dough. *Cereal Chemistry*, 56, 141-143.

HUEBNER F. R., BIETZ J. A., WEBB B. D. et JULIANO B. O. 1990. Rice cultivar identification by high-performance liquid chromatography of endosperm proteins. *Cereal Chem.* 67, 129 – 135.

"I"

ICC. 2003. ICC Standard Methods. International Association for Cereal Science and Technology, Vienna.

ISHIDA N., TAKANO H., NAITO S., ISOBE K., UEMURA T., HAISHI T., KOSE T., KOIZUMI M. et KANO H. 2001. Architecture of baked breads depicted by a magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Imaging*. ELSEVEIR, Japon, 19, 867-874.

"J"

JEANTET R., CROGUENNEC T., SCHUCK P. et BRULE G. 2007. Sciences des aliments, vol 2. Edit. TEC et DOC, Lavoisier, paris, pp 144-189.

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

"K"

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

KLEIJER G. 2002. Sélection des variétés de blé pour la qualité boulangère. Station Fédérale de Recherches en Production Végétale de Changins. *Revue Suisse d'Agriculture*, 34, 253-259.

KRASILOVA J. 2010. Food Quality Testing with Brabender ® Test Instruments Brabender agencies all over the world. Edit. Brabender ® GmbH & Co. KG. Germany. 19 p.

KTENIOUDAKI A., BUTLER F. et GALLAGHER E. 2010. Rheological properties and baking quality of wheat varieties from various geographical regions. *Journal of Cereal Science*. Edit ELSEVEIR, pp 201.

"L"

LANGRAF F. 2002. Produits et procédés de panification. Edit. Technique de l'ingénieur, traité Agroalimentaire, Rouen, 7 p.

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

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

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

LEVAVASSEUR L. 2007. Suivi simultané de la consommation d'oxygène et de la consistance des pâtes de farine de blé à l'aide d'un pétrin instrumenté (le sitoxygraphe) :

tentative d'explication biochimique et rhéologique. Application à l'ajout de laccases. *Thèse de doctorat* .Agro. Paris Tech, France, 415 p.

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

LOSTIE M., PECZALSKI R., ANDRIEU J. et LAURENT M. 2002. Study of sponge cake batter baking process. Part I: Experimental data. *Journal of Food Engineering*, 51, 131-137.

"M"

MAC RITCHIE F. et GRAS P.W.1973. The role of flour lipids in baking. *Cereal Chemistry*, 50, 292-302.

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

MARSH D. 1992. Mixing and dough processing. *In: CAUVAIN S.P. and YOUNG L.S. Technology of breadmaking*,. London: Blackie Academic and Professional, pp 81–119.

MEREDITH P., 1964. A theory of gluten structure. *Cereal Science Today*, 9, 34,54.

MILLS E.N.C., SALT L.J., WILDE P.J., GEORGET D., WELLNER N. et SKEGS P.K.2006. Composition and surface properties of dough liquor. *Journal of Cereal Science*, ELSEVEIR, pp 284-292.

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

"N"

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

"O"

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

"P"

PAUL M.N. 2004. Wheat and flour testing methods: a guide to understanding wheat and flour quality. Wheat Marketing Center, Inc. Portland, Oregon USA. 37 p.

PEIGHAMBARDOUST S.H., FALLAH E., HAMER R.J. and VAN DER GOOT A.J. 2010. Aeration of bread dough influenced by different way of processing. *Journal of Cereal Science*, ELSEVIER, 51, 89-95.

"R"

REGUERRE A.L., CHIRON H., SHEHZAD A., DELLA VALLE G. 2009. Suivi de fermentation de la pâte à pain par imagerie. Edit INRA, pp 51 – 60.

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

ROUILLE J., DELLA VALLE G., DEVAUX M.F., MARION D. and DUBREIL L. 2003. Assessment by digital image analysis of French bread volume and crumb changes by modifications of minor flour components composition. *Cereal Chem.*, to be submitted, pp 5.

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

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

"S"

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

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

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

SCHULTZ A. 1972. Hefetriebbestimmungen in nationaler und internationaler Sicht. *Getreide Mehl und Brot*, 11,315-316.

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

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

SKAF A., NASSAR G., LEFEBVRE F., NONGAILLARD B. 2009. A new acoustic technique to monitor bread dough during the fermentation phase. *Journal of Food Engineering*. ELSEVIER, 93, 365–378.

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

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

"T"

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

TURBIN-ORGER A., BOLLER E., CHAUNIER L., CHIRON H., DELLA VALLE G., RÉGUERRE A.-L. 2012. Kinetics of bubble growth in wheat flour dough during proofing studied by computed X-ray micro-tomography. *Journal of Cereal Science*. ELSEVIER. france, 56,676-683.

"V"

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

"Z"

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

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

Annexes

The Falling Number Method

Correction of sample weight to 14% moisture basis

(ICC Standard No. 107/1, 1995 and AACC Method 56-81B, 1992)

The following table shows the required sample weight, at different moisture contents, corresponding to 7 g at 14% moisture - no change is made in the quantity of water used. For example at 13.4 % moisture the required sample weight is 6.95 grams.

Moisture Content (%)	Weight (g)	Moisture Content (%)	Weight (g)	Moisture Content (%)	Weight (g)
8.0	6.54	11.4	6.80	14.8	7.07
8.2	6.56	11.6	6.81	15.0	7.08
8.4	6.57	11.8	6.83	15.2	7.10
8.6	6.59	12.0	6.84	15.4	7.12
8.8	6.60	12.2	6.86	15.6	7.13
9.0	6.62	12.4	6.87	15.8	7.15
9.2	6.63	12.6	6.89	16.0	7.17
9.4	6.64	12.8	6.90	16.2	7.18
9.6	6.66	13.0	6.92	16.4	7.20
9.8	6.67	13.2	6.94	16.6	7.22
10.0	6.69	13.4	6.95	16.8	7.24
10.2	6.70	13.6	6.97	17.0	7.25
10.4	6.72	13.8	6.98	17.2	7.27
10.6	6.73	14.0	7.00	17.4	7.29
10.8	6.75	14.2	7.02	17.6	7.31
11.0	6.76	14.4	7.03	17.8	7.32
11.2	6.78	14.6	7.04		

NOTE: This refers to the moisture content of the sample after grinding, not the moisture content of the whole wheat. The moisture loss during grinding varies with the moisture content and is typically 5 - 10% over the 10 - 20% moisture range. The actual moisture basis used may vary according to national standards.

Perten

Figure 1 . Humidités pour différentes quantités de farine utilisées pour la détermination du temps de chute.

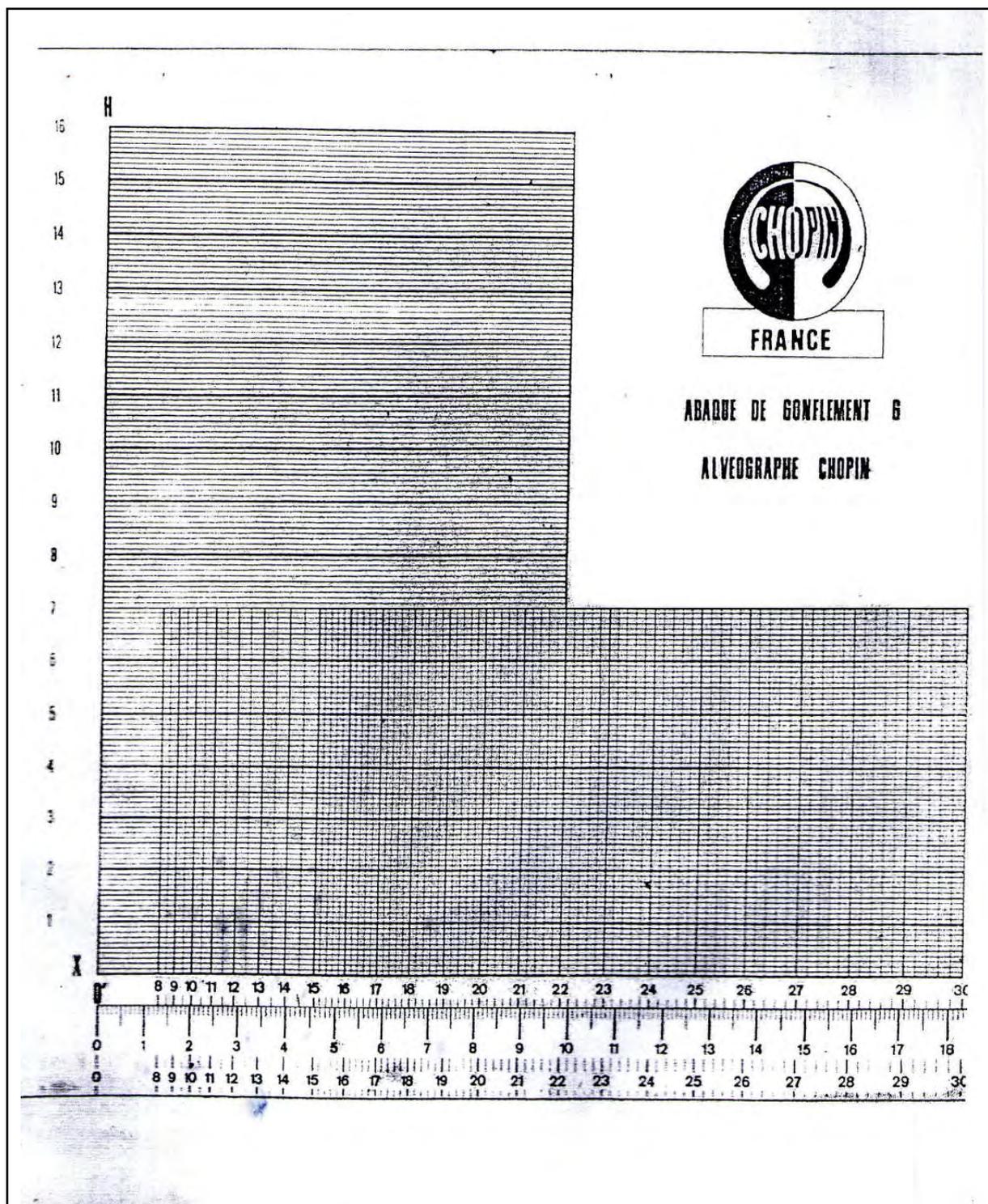


Figure 2. Abaque de gonflement G pour l'alvéographe Chopin.

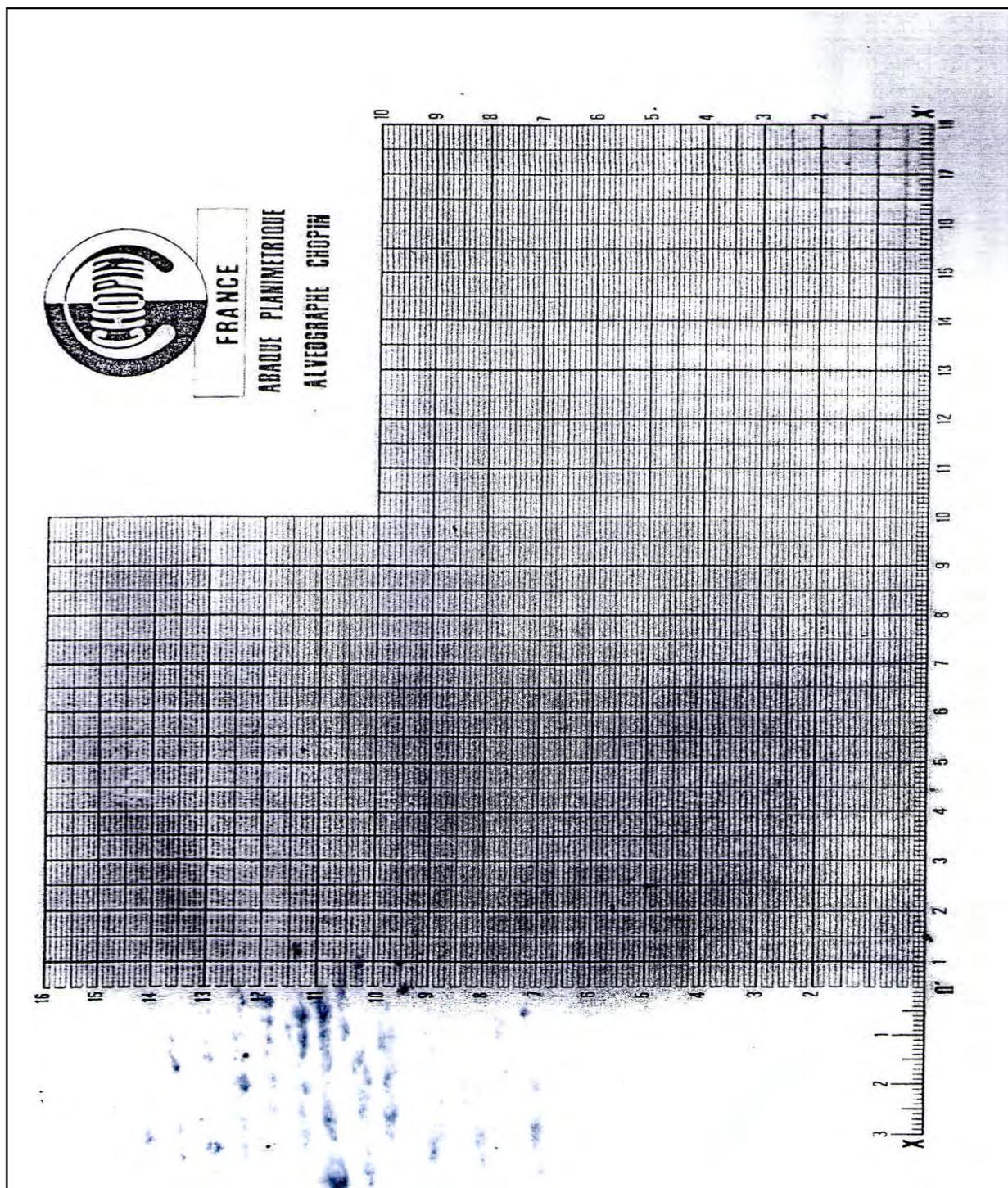


Figure 3. Abaque planimétrique pour l'alvéographe Chopin.

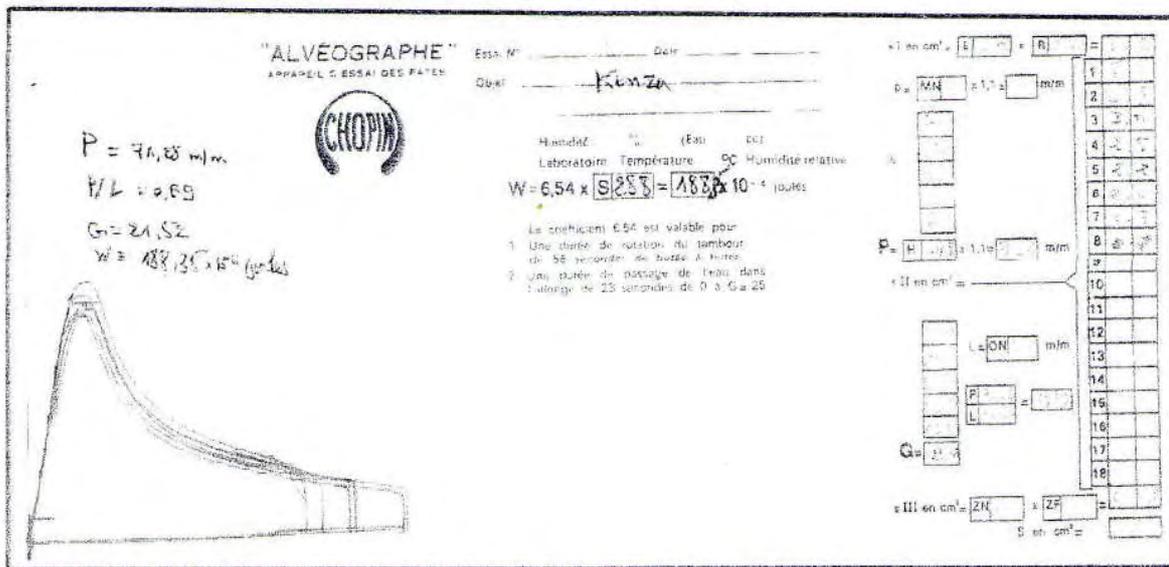


Figure 4. Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre (Farine 1) faite sur l'Alvéographe Chopin.

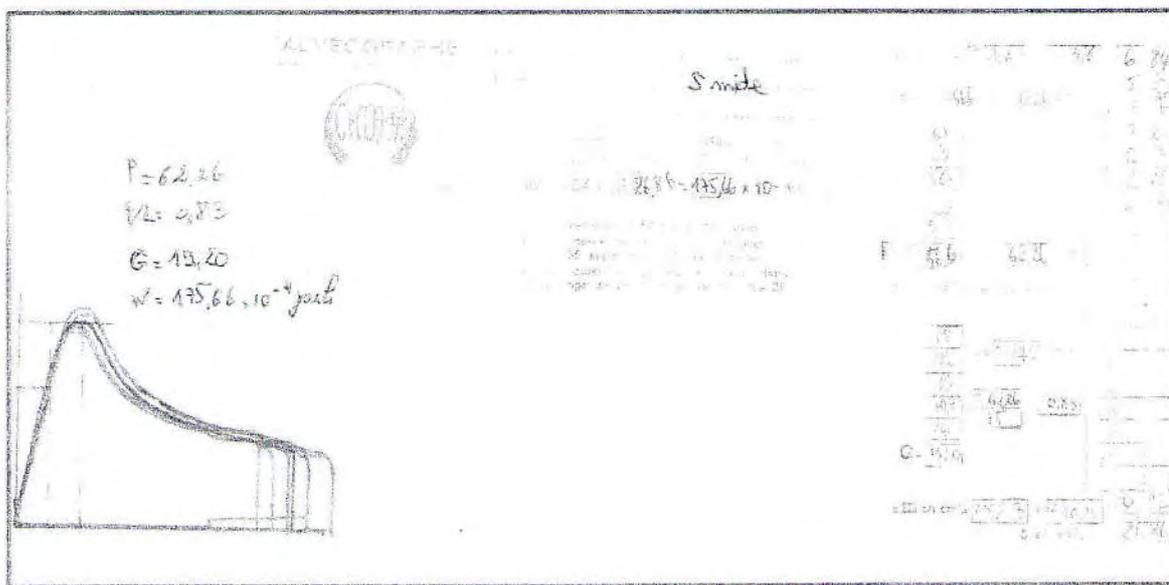


Figure 5. Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre (Farine2) faite sur l'Alvéographe Chopin.

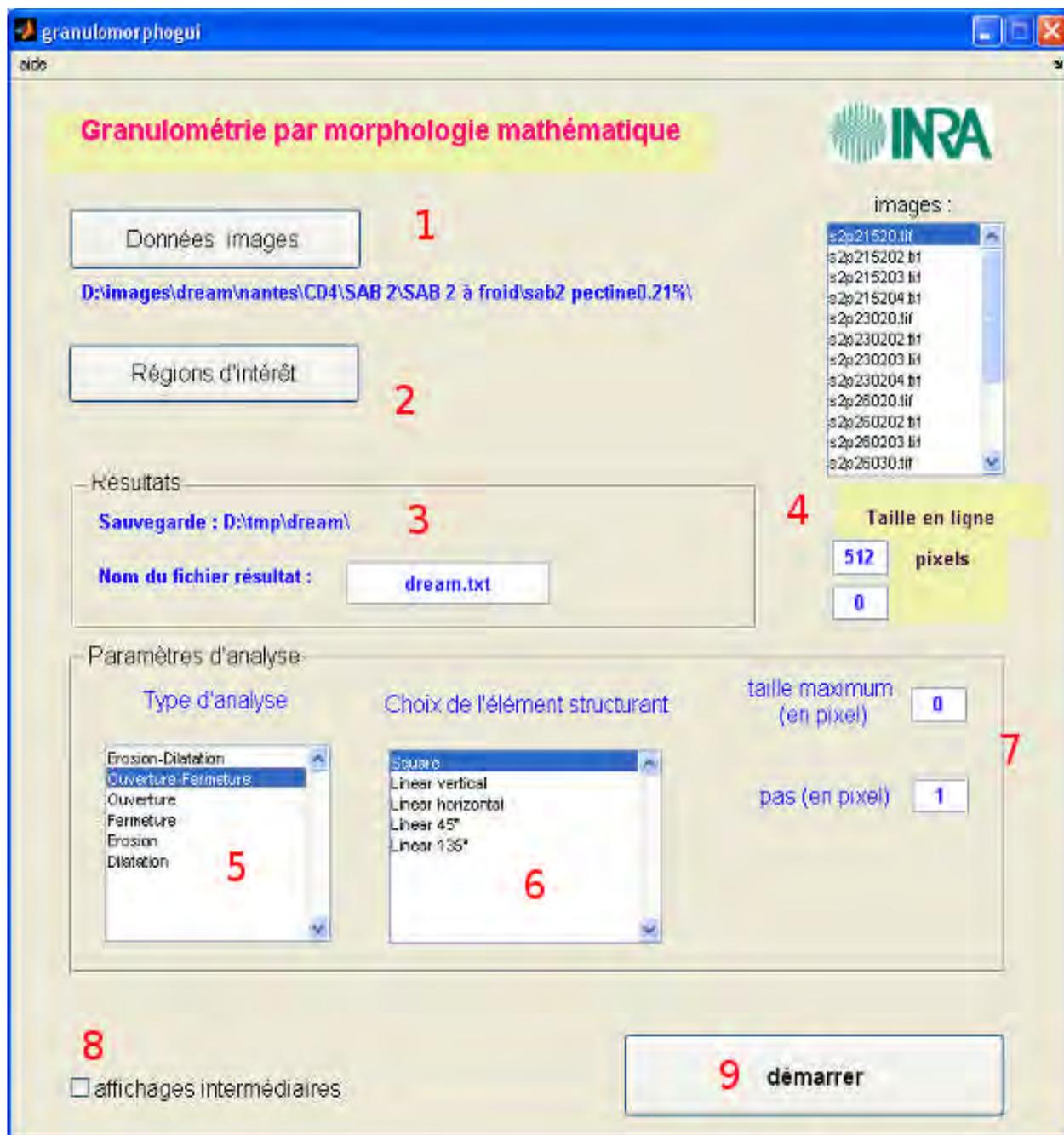


Figure 6. Exemple du programme granulomorphogui en cours d'utilisation.

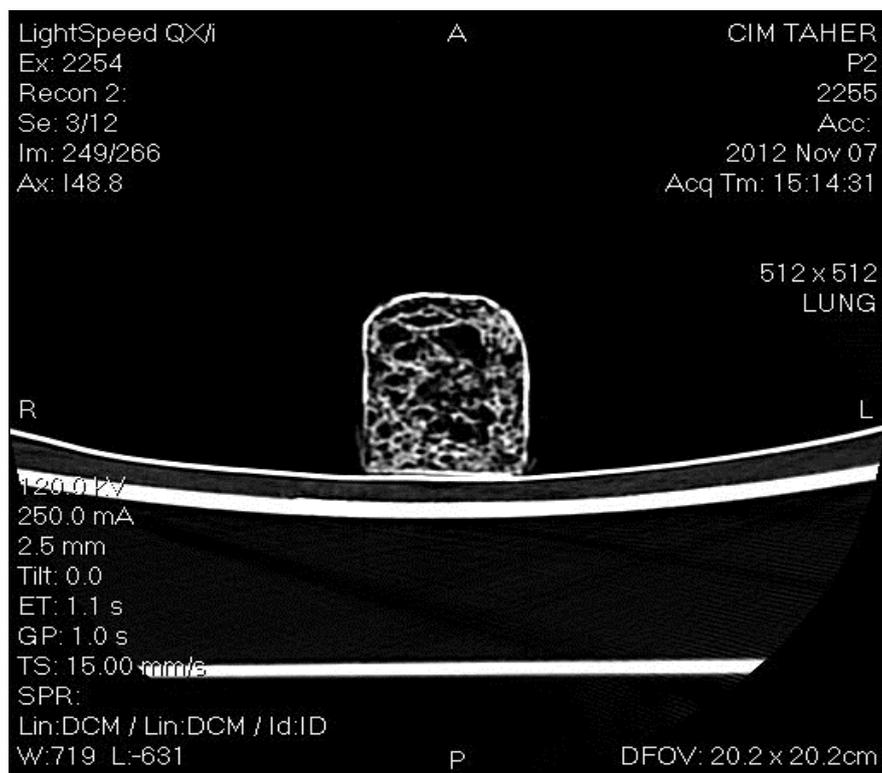


Figure 7. Exemple d'une image scannée par un scanner à rayon X (Farine 1 : fermentation à 150min).



Figure 8. Exemple d'une image prise par appareil photo numérique (12 Mega Pixel : Farine 1 : 150 min).

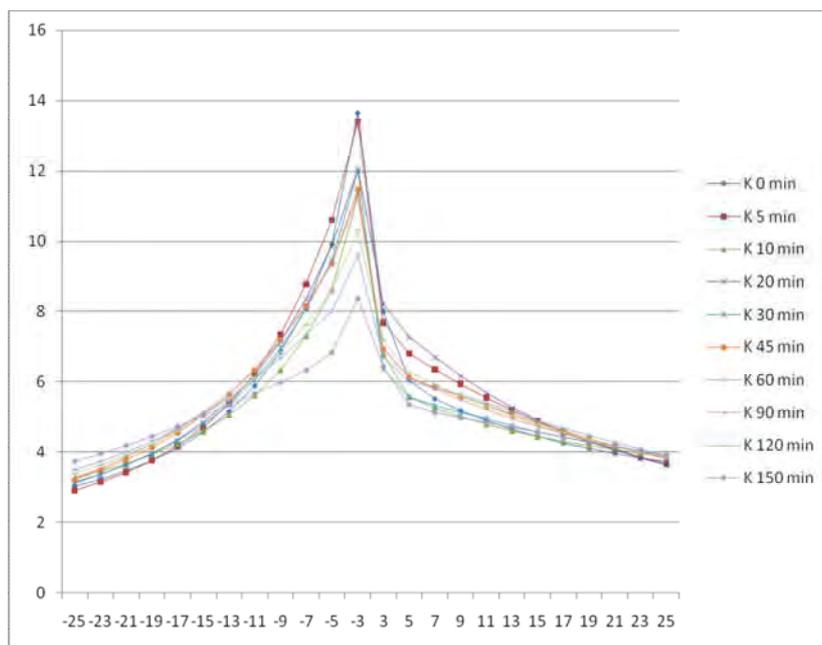


Figure 9. Courbes granulométriques des pâtons (structure obtenue par appareil photo numériques).pour la farine 1

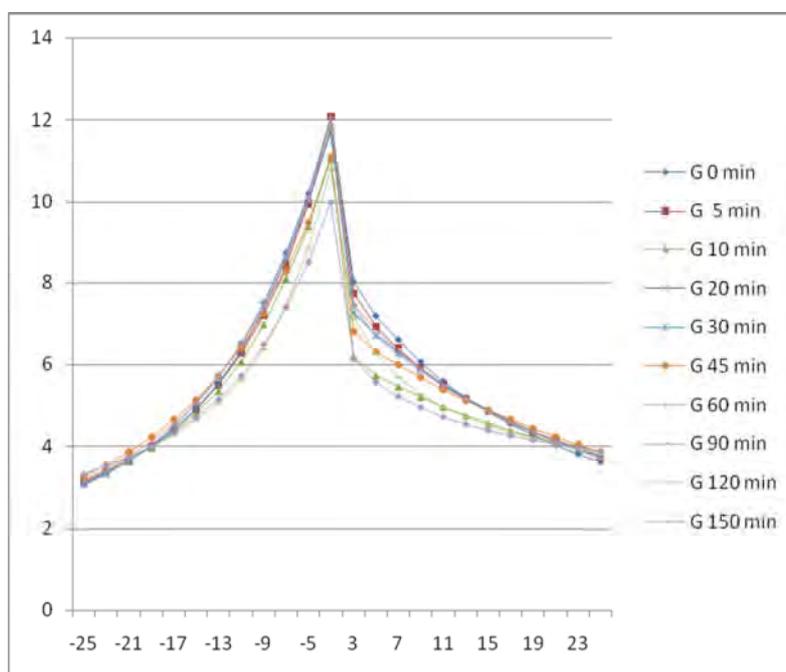


Figure 10. Courbes granulométriques des pâtons (structure obtenue par appareil photo numériques).pour la farine 1

Tableau 1. Résultat par classe des pâtons scannés (classification k-means).

Classe	1	2	3	4	5
Objets	10	5	2	5	8
Somme des poids	10	5	2	5	8
Variance intra-classe	33,237	33,467	18,482	31,141	57,346
Distance minimale au barycentre	2,350	1,618	3,040	2,059	2,670
Distance moyenne au barycentre	5,027	4,686	3,040	4,738	6,807
Distance maximale au barycentre	9,448	7,841	3,040	6,778	9,274
	RFS0 3	RFS120 3	GS0 3	GS10 3	GS45 3
	RFS5 3	GS20 3	GS5 3	KS 0 3	GS60 3
	RFS10 3	GS30 3		KS 5 3	GS90 3
	RFS20 3	KS 45 3		KS 10 3	GS120 3
	RFS30 3	KS 60 3		KS 20 3	GS150 3
	RFS45 3				KS 90 3
	RFS60 3				KS 120 3
	RFS90 3				KS 150 3
	RFS150 3				
	KS 30 3				

ملخص

هذه الدراسة قد تمت بهدف رصد تقنية لتتبع حركية تخمر العجائن المخمرة ، بناءً على تجميد العجائن وتجفيفها . تتبع حركية التخمر قد تم على عجائن مخمرة في الفترة ما بين 0 و 150 دقيقة في درجة حرارة 38 درجة مئوية. العجائن المخمرة تغمر في غاز النيتروجين , ثم تجفف (57 درجة مئوية, 0,05 م بار). الصور قد التقطت عبر ماسح ضوئي طبي وباستعمال آلة تصوير رقمية .حركية التوسع الغازي قد عينت ، الصور المحصل عليها قد تمت معالجتها بالتحليل المورفولوجي . المنحنيات الحبيبية للمستوى الرمادي قد عينت التصنيف قد تم باستعمال المكون الرئيسي. النتائج المحصل عليها قد أثبتت أن فريضة القمح اللين تتوسع حوالي 3 مرات اكثر من العجينة الخالية من الغلوتين التخمر الامثل لعجينة القمح اللين في زمن 120 دقيقة ، بتوسع غازي يصل إلى 195,79% لدقيق 1 و 28,200 % لدقيق 2. أما التخمر الامثل بالنسبة للعجينة الخالية من الغلوتين هو في 45 درجة بتوسع غازي 44,05% المنحنيات الحبيبية المستخرجة من تحليل الصور أثبتت أن العجائن في 0 دقيقة تكون الاكثر نعومة وفي 150 دقيقة تكون الأكثر تهوية بالنسبة لفريضة 1 و 2 أما بالنسبة للعجائن الخالية من الغلوتين ، فنجد عجينة 5 دقائق الأكثر نعومة و30 دقيقة الأكثر تهوية . المكون الرئيسي المكون الرئيسي صنف العجائن المخمرة على حسب النعومة والتغير في هيكله الخاليا . في الختام ومن خلال هذا العمل قد قمنا بالتحقق من صحة تقنية التجميد والتجفيف كأداة بسيطة لرصد حركية التخمر لمختلف المكونات المستعملة في المخبرة.

كلمات المفتاح: التخمر، حركية التخمر، تجفيف، هيكله الخاليا، التحليل المورفولوجي الرياضي .

Abstract

This study was led in the aim to set off a technique that enable to follow the fermentation kinetics of the fermented pastes, based on the congelation of the lumps in nitrogen liquidates then freeze-drying.

The Follow-up of fermentation kinetics is done on fermented pastes in a time interval from 0 to 150 min at 38°C. Samples of fermented pastes are preserved in liquid nitrogen, then freeze-dried (- 57°C, 0.05 mbar). The acquisition of the images of the cellular structures is obtained by the use of a medical scanner and by numerical camera. The kinetics of gas expansion is traced. The images obtained are treated by morphological analysis; the grading curves of the corresponding levels of gray are traced. A classification of the structures of the lumps is obtained by Analyze in Principal Components (ACP).

Obtained results showed that the common wheat paste witness expand approximately 3 times more than those of the rice-field bean formula (FRF), fermentation optimum for the common wheat witness is at 120 min with a gas expansion of 195, 79% for the flour1, and 200, 28% for the flour 2, against an fermentation optimum of the rice-field bean formula is at 45 min with a gas expansion of 44.05%.

The grading curves resulting from the image analysis allowed that the finest structure for the two flours of common wheat is at 0 min, and coarsest with 150 min. The finest structure with 5 min., 30 min. coarsest for the FRF.

A classification by ACP statistical test made possible to obtain classifications of the structures of the lumps fermented according to their smoothness or their heterogeneity.

In conclusion, and through this word, we could validate the paste congelation freeze-drying technique as a simple tool of following-up the expansion kinetics of materials of different bakers' qualities.

Key words: fermentation, kinetic fermentation, freeze-drying, cell structure, analysis morphological mathematics.

Résumé

Cette étude a été conduite dans le but de la mise au point d'une technique de suivi des cinétiques de fermentation des pâtes fermentées, basée sur la congélation des pâtons dans de l'azote liquide puis lyophilisation.

Le suivi des cinétiques de fermentation se fait sur des pâtes fermentées entre 0 et 150 min à 38°C. Les pâtons fermentés sont plongés dans l'azote liquide puis lyophilisés (-57°C, 0.05 mbar). L'acquisition des images des structures alvéolaires est obtenue d'une part par l'utilisation d'un scanner médical et d'autre part par un appareil photo numérique. Les cinétiques d'expansion gazeuse sont tracées. Les images obtenues sont traitées par analyse morphologique, les courbes granulométriques des niveaux de gris correspondantes sont tracées. Une classification des structures des pâtons est obtenue par Analyse en Composante Principale (ACP).

Nos résultats obtenus montrent que les pâtes du témoin de blé tendre s'expansent environ 3 fois plus que celles de la formule Riz-Féverole (FRF). L'optimum de fermentation pour les témoins de blé tendre est de 120 min avec une expansion gazeuse de 195,79% pour la farine 1 et 200,28% pour la farine 2, contre un optimum de 45 min pour la formule sans gluten avec une expansion de 44.05%.

Les courbes granulométriques issues de l'analyse d'image montrent que la structure la plus fine pour les deux farines de blé tendre 1 et 2 se situe à 0 min, contre 5 min pour la FRF et la plus grossière à 150 min pour les témoins blé tendre contre 30 min, pour la FRF.

L'ACP a permis d'obtenir un classement des structures des pâtons fermentés selon leur finesse et de leur hétérogénéité.

En conclusion nous avons pu valider la technique de congélation, lyophilisation des pâtes comme un outil simple, de suivi des cinétiques d'expansion des matériaux de qualités boulangères différentes.

Mots clés : fermentation, cinétiques fermentation, lyophilisation, structure alvéolaire, analyse morphologique mathématique.