

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE CONSTANTINE 1**

**INSTITUT DE LA NUTRITION, DE L'ALIMENTATION ET DES  
TECHNOLOGIES AGRO-ALIMENTAIRES**

**I.N.A.T.A.A.**

N° d'ordre :

N° de série :

## **Mémoire**

Présenté pour obtention du diplôme de MAGISTER en Sciences Alimentaires

Option : Biochimie et Technologies Alimentaires

Par

**FALEK Wahiba**

**Fabrication de pain à partir de pâte pré-fermentée et congelée**

Soutenu le, / /2013

**Devant le Jury :**

<b>Présidente :</b>	Mme BARKAT M.	Pr.	I.N.A.T.A.A. Université Constantine 1
<b>Rapporteur :</b>	Mr AGLI A.	Pr.	I.N.A.T.A.A. Université Constantine 1
<b>Examineurs :</b>	Mr BOUDJELLAL A.	M.C.A.	I.N.A.T.A.A. Université Constantine 1
	Mme OULAMARA H.	M.C.A.	I.N.A.T.A.A. Université Constantine 1

## REMERCIEMENTS

Ce travail est pour nous l'occasion d'exprimer notre reconnaissance à celles et ceux qui ont permis sa réalisation et qui ont accepté de le juger

En premier lieu, nos remerciements s'adressent à notre directeur de recherche, monsieur Abdel-Nacer AGLI, pour la confiance qu'il nous a accordé en acceptant d'encadrer ce travail. Pour ses multiples conseils, ses encouragements avec la plus grande bienveillance et pour toutes les heures qu'il a consacré à diriger cette recherche. Nous lui sommes très reconnaissants pour sa grande compétence, disponibilité et son respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je lui ai adressés.

Madame BARKAT Malika, professeur à l'INATAA, pour l'honneur qu'elle nous a fait en présidant le jury de cette soutenance. Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de notre profonde et respectueuse gratitude.

Nous sommes très sensibles à l'honneur que nous a fait Monsieur Abdelghani BOUDJELLAL, maître de conférences et Directeur de l'I.N.A.T.A.A., d'avoir bien voulu siéger au jury de soutenance, qu'il trouve ici nos plus vifs remerciements.

Mes sincères remerciements vont à Madame Hayet OULAMARA, maître de conférence à l'INATAA et Directrice du Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.), pour tous ses conseils et ses encouragements tout au long de la réalisation de ce travail, et de nous avoir honorée par sa participation au jury de ce travail.

J'exprime mes profonds remerciements à Monsieur Adel BENSALAM, maître assistant pour son aide, collaboration et amitié durant la réalisation de ce travail.

Je remercie en particulier monsieur lyess HAMITOUCH chef service de laboratoire centrale d'ERAD Constantine pour son accueil et son aide dans la réalisation des analyses physicochimiques de notre farine.

Remerciements à tous les personnels administratifs de l'I.N.A.T.A.A., pour la dimension humaine inestimable qu'ils ont manifestée à mon égard.

## **DEDICACES**

À mes parents que j'aime plus que tout au monde

À mes frères Karim, Lamine et Rida

À ma très chère Sœur Sihem

À tous mes amis

À mes enseignants

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>RAPPORT BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>1. PANIFICATION .....</b>	<b>3</b>
1.1. Rôle des principaux constituants de la farine en panification.....	3
1.1.1. Protéines totales et protéines solubles dans l'eau et les solutions salées.....	3
1.1.2. Protéines de gluten .....	4
1.1.3. Amidon.....	5
1.1.4. Pentosanes.....	5
1.1.5. Les lipides.....	7
1.2. Technologie de panification.....	7
1.2.1. Le pétrissage.....	8
1.2.2. Fermentation.....	9
1.2.3. Cuisson.....	11
<b>2. LA CONGELATION DES ALIMENTS.....</b>	<b>12</b>
2.1. Généralités .....	12
2.2. Principe de la congélation.....	12
2.3. Etapes de congélation d'aliment .....	13
2.4. Calcul du temps de congélation.....	15
2.5. Conséquences de la congélation sur les aliments.....	15
2.6. Décongélation.....	17
<b>3. EFFET DE LA CONGELATION SUR LA PATE A PAIN.....</b>	<b>18</b>
3.1. Influence de la congélation de la pate sur l'amidon.....	18
3.2. Perte de poids de la pate a pain.....	19
3.3. affaiblissement de la pate.....	19
3.4. effet de la congélation sur le gluten.....	19
3.5. Fermentation.....	20
3.6. Les cristaux de glace dans les pâtes congelées.....	21
3.7. Aspect de pain .....	21
3.8. Volume du pain .....	22
3.9. Cuisson directe.....	22
3.10. Décongélation a température ambiante 20 °C.....	23
3.11. Rapport de forme (H/L).....	23
3.12. Fermeté de la mie .....	23
<b>MATERIEL ET METHODES</b>	
<b>1. MATIERES PREMIERES .....</b>	<b>25</b>
1.1. Farine.....	25
1.2. Eau, sel et levure.....	25
<b>2. CARACTERISATION DE LA FARINE.....</b>	<b>25</b>
2.1. Teneur en eau.....	25
2.2. Teneur en cendres.....	26
2.3. Protéines totale.....	27
2.4. Granulométrie.....	28
2.5. Teneur en gluten.....	28
2.6. Acidité.....	29
2.7. Caractérisation plastique de la farine par l'Alvéographe Chopin.....	30

2.8. Paramètres et protocole de panification.....	32
2.8.1. Protocole de panification.....	33
2.8.2. Indicateurs des paramètres optima .....	33
2.8.3. Variation des taux d'hydratation et durée de pétrissage.....	33
2.8.4. Durée de fermentation.....	36
<b>3. PROTOCOLE DE FABRICATION DE PAIN TEMOIN.....</b>	<b>36</b>
3.1. Essais préliminaires du pétrin.....	40
3.1.1. Vitesse du pétrin .....	40
3.1.2. Choix des vitesses à mettre en œuvre.....	41
3.2. Frassage .....	41
3.3. Pétrissage .....	41
3.4. Fermentation.....	42
3.5. Cuisson.....	43
<b>4. FABRICATION DE PAIN A PARTIR DE PATE FERMENTEE CONGELEE.....</b>	<b>44</b>
4.1. Congélation de la pâte fermentée crue.....	44
4.2. Décongélation de la pâte fermentée façonnée.....	44
4.2.1. Contrôle et suivi de la décongélation.....	46
4.2.2. Evaluation du test de panification.....	48
<b>5. FERMENTATION DE LA PATE LORS ET APRES DECONGELATION.....</b>	<b>49</b>
5.1. Dispositif de mesure et procédé.....	49
5.2. Courbes de fermentation de la pâte décongelée.....	51
<b>6. ANALYSES DES DONNEES.....</b>	<b>53</b>

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

<b>1. CARACTERISATION DE LA FARINE.....</b>	<b>54</b>
1.1. Teneur en eau.....	54
1.2. Teneur en cendres totales.....	54
1.3. Protéines.....	55
1.4. Taux de gluten et sa caractérisation.....	55
1.5. Acidité.....	56
1.6. Granulométrie.....	56
1.7. Caractérisation plastique de la farine par l'Alvéographe Chopin.....	56
<b>2. TESTS DE PANIFICATION DU PAIN TEMOIN.....</b>	<b>59</b>
2.1. Essais préliminaires.....	59
2.1.1. Taux des ingrédients .....	59
2.1.2. Taux d'hydratation.....	59
2.1.3. Temps de pétrissage.....	60
2.1.4. Autolyse.....	60
2.1.5. Type de fermentation.....	61
2.2. Paramètres de panification du témoin.....	63
2.2.1. Effet des taux d'hydratation.....	63
2.2.2. Effet de la durée de pétrissage.....	67
2.2.3. Effet de la durée de fermentation.....	68
2.2.4. Relation et description globale des paramètres de panification par Analyse en Composants Principales (ACP).....	72
2.2.5. Recherche des couples optima.....	76
2.2.6. Recherche de la durée de fermentation.....	79

<b>3. FABRICATION DE PAIN A PARTIR DE PATE CRUE FERMENTEE ET CONGELEE.....</b>	<b>83</b>
3.1. Effet des temps du pointage, de l'apprêt et de la décongélation sur (M/V) et (H/L).....	83
3.1.1. Effet de Pt, App et Dng sur la masse volumique (M/V).....	85
3.1.2. Effet de Pt, App et Dng sur le rapport de forme H/L.....	87
3.1.3. Synthèse sur l'effet des facteurs sur M/V et H/L.....	90
3.2. Recherche de la durée de fermentation.....	91
3.2.1. Recherche du couple Pt/App optima pour le mode de cuisson directe.....	91
3.2.2. Recherche du couple Pt/App optimum, décongélation à 5 °C.....	94
3.2.3. Recherche du couple Pt/App optimum, décongélation à 25 °C.....	97
3.2.4. Recherche du couple Pt/App optimum, décongélation à 40 °C.....	101
3.2.5. Durée de fermentation optimum des pains de pâte congelée.....	104
3.3. Classement du témoin et des meilleurs pains de pâte congelée.....	106
<b>4. FERMENTATION AU COURS DE LA DECONGELATION.....</b>	<b>107</b>
4.1. Courbe de l'évolution de la fermentation.....	107
4.1.1. Description des cinétiques.....	108
4.2. Vitesse de fermentation dans la phase ascendante.....	112
4.2.1. Vitesse de fermentation de la pâte décongelée à différents température.....	112
4.3. Variation de la vitesse de fermentation.....	113
4.3.1. Variation de la vitesse de fermentation de la pâte après décongélation à 5 °C.....	113
4.3.2. Variation de la vitesse de fermentation de la pâte après décongélation à 25 °C.....	114
4.3.3. Variation de la vitesse de fermentation de la pâte après décongélation à 40 °C.....	115
<b>CONCLUSIONS GENERALES .....</b>	<b>119</b>
<b>REFERENCES BIBLOGRAPHIQUES .....</b>	<b>121</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>131</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Intervalles des paramètres de panification suivant la littérature de 1965 à 2007.....	34
<b>Tableau 2.</b> Vitesse mesurées du pétrin Kenwood KM 02.....	41
<b>Tableau 3.</b> Teneur en eau en (p. cent) de la farine durant la durée expérimentale...	54
<b>Tableau 4.</b> Teneur en cendres (p. cent) durant la durée expérimentale.....	55
<b>Tableau 5.</b> Caractéristique de la farine.....	57
<b>Tableau 6.</b> Caractéristiques des pains suivant les temps d'autolyse.....	60
<b>Tableau 7.</b> Caractéristiques des pains obtenus de la fermentation unique.....	61
<b>Tableau 8.</b> Caractéristiques de la pâte en fonction de l'hydratation.....	63
<b>Tableau 9.</b> Caractéristiques des pains obtenus aux taux d'hydratation.....	65
<b>Tableau 10.</b> Caractéristiques de la pâte aux différents temps de pétrissage en minute.....	67
<b>Tableau 11.</b> Caractéristiques des pains aux différents temps de pétrissage.....	68
<b>Tableau 12.</b> Paramètres de la droite de Henry pour le rapport de forme H/L et la masse volumique M/V.....	70
<b>Tableau 13.</b> Analyse de la variance, réponse masse volumique (M/V).....	71
<b>Tableau 14.</b> Analyse de la variance, réponse rapport de forme (H/L).....	71
<b>Tableau 15.</b> Communautés basées sur le carré des corrélations ( $R^2$ ).....	72
<b>Tableau 16.</b> Valeurs propres.....	73
<b>Tableau 17.</b> Coefficients de corrélation entres paramètres.....	74
<b>Tableau 18.</b> Corrélation entre composant et variable.....	74
<b>Tableau 19.</b> Analyse de la variance, facteurs Pt et App, réponse H/L.....	76
<b>Tableau 20.</b> Analyse de la variance, facteurs Pt et App, réponse (M/V).....	78
<b>Tableau 21.</b> Couples Pt/App extraits des surfaces de réponses et caractéristiques des pains correspondants.....	79
<b>Tableau 22.</b> Masses volumiques (M/V) et rapports de forme (H/L) moyens en fonction des couples de fermentation Pt/App.....	81
<b>Tableau 23.</b> Classement des meilleurs pains en fonction des couples Pt/App.....	82
<b>Tableau 24.</b> Masses volumiques (M/V) et rapports de forme (H/L) moyennes en fonction des couples de fermentation en minute.....	83
<b>Tableau 25.</b> Analyse de la variance à trois facteurs, réponse masse volumique (M/V).....	86
<b>Tableau 26.</b> Comparaison multiple, entre les temps de pointages pour M/V, test Tukey.....	87
<b>Tableau 27.</b> Comparaison multiple, entre les temps des apprêts pour M/V, test de Tukey.....	87
<b>Tableau 28.</b> Analyse de la variance à trois facteurs, réponse H/L.....	88
<b>Tableau 29.</b> Comparaison multiple, entre les temps de pointages pour H/L, test de Tukey.....	89
<b>Tableau 30.</b> Comparaison multiple, entre les temps des apprêts pour H/L, test de Tukey.....	90
<b>Tableau 31.</b> Comparaison multiple, entre les modes de Dng pour H/L, test de Tukey.....	90
<b>Tableau 32.</b> Valeurs moyennes de M/V et H/L pour Cuisson directe et Dng. à 5 °C.....	92
<b>Tableau 33.</b> Classement des couples de la cuisson direct par apport au pain témoin.....	94

<b>Tableau 34.</b> Classement des couples obtenus à partir de pâte pré-fermentée, congelée et décongelée à 5 °C, par apport au pain témoin.....	97
<b>Tableau 35.</b> Valeurs moyennes de M/V et H/L, décongélation à 25 °C et 40 °C....	99
<b>Tableau 36.</b> Classement des couples obtenus à partir de pâte pré-fermentée, congelée et décongelée à 25 °C, par apport au pain témoin.....	101
<b>Tableau 37.</b> Classement des couples obtenus à partir de pâte pré-fermentée, congelée et décongelée à 40 °C, par apport au pain témoin.....	104
<b>Tableau 38.</b> Comparaison entre des durées de fermentation de témoin et des différents modes.....	104
<b>Tableau 39.</b> Notation de la qualité des pains des différents modes de décongélation de la pâte fermentée et congelée.....	107
<b>Tableau 40.</b> Durées (min) des phases des courbes de fermentation des pâtes suivant la température de décongélation.....	112
<b>Tableau 41.</b> Paramètres de la phase ascendante de la courbe de la fermentation $H = f(t)$ de la pâte décongelée à différents températures.....	113
<b>Tableau 42.</b> Variation des vitesses minimales et maximales, $dx/dt = f(t)$ , observés et théoriques des quartes pointages (Pt) études après leur décongélation à différents températures, dans la phase ascendante.....	114



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Schéma représentatif de la formation du réseau du gluten durant le pétrissage..	9
<b>Figure 2.</b> Courbe de congélation de l'eau et d'une solution diluée.....	14
<b>Figure 3.</b> Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre réalisé sur l'Alvéographe Chopin .....	31
<b>Figure 4.</b> Schéma général de panification du pain témoin avec la variation des intervalles des paramètres.....	35
<b>Figure 5.</b> Protocole de fabrication du pain témoin.....	39
<b>Figure 6.</b> Photographie du pétrin kenwood KM 02.....	40
<b>Figure 7.</b> Photographie de pâton fermenté.....	43
<b>Figure 8.</b> Photographie de four électrique (90 x 1020 x 420 mm).....	43
<b>Figure 9.</b> Etapes de fabrication du pain à partir de pâte fermentée et congelée.....	45
<b>Figure 10.</b> Panification, décongélation et cuisson de la pâte fermentée et congelée.....	47
<b>Figure 11.</b> Grille d'appréciation de la qualité du pain.....	50
<b>Figure 12.</b> Mesureur de pousse.....	51
<b>Figure 13.</b> Schéma de mesure de la fermentation après décongélation à 5 °C, 25 °C et 40 °C.....	52
<b>Figure 14.</b> Alvéogramme de farine témoin.....	58
<b>Figure 15.</b> Photographie de fermentation unique.....	62
<b>Figure 16.</b> Photographies de pâtes à différents taux d'hydratation de farine témoin.....	64
<b>Figure 17.</b> Photographie des sections du témoin à différents taux d'hydratation.....	66
<b>Figure 18.</b> Photographies des mies à différents temps de pétrissage.....	69
<b>Figure 19.</b> Droite de Henry pour la vérification de la normalité de la distribution de la masse volumique (M/V) en g/cm <sup>3</sup> .....	70
<b>Figure 20.</b> Cercle de corrélation .....	75
<b>Figure 21.</b> Représentation des individus sur le plan C <sub>1</sub> x C <sub>2</sub> .....	77
<b>Figure 22.</b> Les surfaces du réponse pour les masses volumiques M/V.....	80
<b>Figure 23.</b> Les surfaces du réponse pour les rapports de forme H/L.....	80
<b>Figure 24.</b> Photographie de pain témoin Pt/App 120/45.....	84
<b>Figure 25.</b> Photographie de pain obtenu à partir de la pâte fermentée Pt/App 60/15, congelée et cuite directement.....	95
<b>Figure 26.</b> Photographie de pain de la pâte fermentée Pt/App 90/15, congelée et décongélée à 5°C.....	98
<b>Figure 27.</b> Photographie de pain obtenu à partir de la pâte fermentée Pt/App 105/15, congelée et décongélée à 25°C.....	102
<b>Figure 28.</b> Photographie de pain obtenu à partir de la pâte fermentée Pt/App 105/15, congelée et décongélée à 40°C.....	105
<b>Figure 29.</b> Evolution de la hauteur (mm) de fermentation de la pâte décongélée à 5 °C en fonction de temps (min).....	109
<b>Figure 30.</b> Evolution de la hauteur (mm) de fermentation de la pâte décongélée à 25 °C en fonction de temps (min).....	110
<b>Figure 31.</b> Evolution de la hauteur (mm) de fermentation de la pâte décongélée à 40 °C en fonction de temps (min).....	111
<b>Figure 32.</b> Variation de vitesse théorique dx/dt (mm/min), de la de la pâte décongélée à 5 °C puis fermentée au cours de la phase ascendante, en fonction de temps (min).....	116
<b>Figure 33.</b> Variation de vitesse théorique dx/dt (mm/min), de la de la pâte décongélée à 25 °C puis fermentée au cours de la phase ascendante, en fonction de temps (min).....	117
<b>Figure 34.</b> Variation de vitesse théorique dx/dt (mm/min), de la de la pâte décongélée à 40 °C puis fermentée au cours de la phase ascendante, en fonction de temps (min).....	118



# *Introduction*

## INTRODUCTION

Le marché est demandeur de divers produits alimentaires à préparation et distribution rapide et flexible permettant une plus grande disponibilité pour le consommateur. Nous constatons aujourd'hui, dans les industries alimentaires, une fabrication en développement continu de produits finis ou semi-finis.

L'utilisation de pâtes a été d'un grand intérêt depuis les années soixante et elles sont maintenant largement utilisées dans les boulangeries industrielles (RÄSÄNEN 1998). A part quelques produits tels que les pâtes à pizza et autres gâteaux disponibles sur le marché des congelés prêts à la cuisson, en Algérie, ce type de fabrication est rare voire inexistant.

Concernant le pain, une préparation prête à l'emploi serait économiquement intéressante. La fabrication de cette pâte à pain constituerait un segment rentable dans le cadre des PME. Les pâtons congelés sont livrés aux terminaux de cuisson qui assurent la décongélation et la cuisson sur le lieu de vente (LEMOTINE 1996). Nous estimons qu'une petite entreprise spécialisée dans la fabrication d'un pain prêt à la cuisson permettrait la multiplication de boulangeries ne nécessitant ni grand espace ni équipements autre qu'un four de moyenne capacité.

La fabrication de pain à partir de pâte congelée demande l'étude des paramètres qui s'écartent de la panification normale. La fermentation est unique ou biphasique avec pointage et apprêt. Les pâtes sont fermentées avant (préfermentées) ou après congélation. Ensuite, la congélation augmente la rétrogradation de l'amidon (RIBOTTAA 2003) ; la fermentation est diminuée par la perte de viabilité des levures et le réseau glutineux est altérée (RÄSÄNEN 1995). Le mode de décongélation du pâton avant cuisson affecte la qualité du pain.

Dans ce contexte, le but de notre travail est l'étude de la faisabilité de la fabrication du pain à partir de pâte préfermentée avant congélation. La préfermentation serait une solution pour la viabilité des levures et réduirait ainsi le temps de décongélation nécessaire dans le cas de la panification avec la pâte non fermentée

(BRUMMER et NEUMAN 1993). Nous déterminerons les paramètres technologiques répondant le mieux à ce type de panification. Pour atteindre ce but, les principaux objectifs de notre mémoire sont :

- Maitriser la panification normale du pain témoin en recherchant les paramètres optima adaptés à la farine utilisée : taux d'hydratation, vitesse et durée de pétrissage, durées des fermentations pointage et apprêt et cuisson.
- Préciser les paramètres optima de panification du pain à partir de pâte préfermentée et congelée
- Déterminer le mode de décongélation avant la cuisson du pâton de pâte congelée : décongélation et cuisson directement au four, décongélation lente à 5°C, à température ambiante 25 °C et à 40 °C à l'étuve.
- Etudier la cinétique d'expansion du volume de la pâte après décongélation.

*Rapport*  
*Bibliographique*

# RAPPORT BIBLIOGRAPHIQUE

## 1. PANIFICATION

### 1. 1. Rôle des principaux constituants de la farine en panification

La valeur boulangère d'une farine est due à l'interaction forte entre les constituants chimiques de nature divers.

#### 1. 1. 1. Protéines totales et protéines solubles dans l'eau et les solutions salées

Depuis longtemps le rôle des protéines en panification est étudié. FINNEY et BARMORE (1948) rapportaient qu'une augmentation de 1 p. cent de protéines produit une élévation de 40 à 75 cm<sup>3</sup> du volume du pain selon les variétés.

Selon ORTH et BUSHUK (1972), l'ensemble de la fraction gluténine et du résidu protéique ont un effet direct sur les performances de la panification. Le volume de la pâte par unité de protéines et le résidu protéique sont positivement corrélés.

GRAYBOSCH et al. (1993), ont montré que la teneur en protéines est le facteur qui contribue le plus à la force de la pâte et la qualité de pain. D'autre part, le volume du pain est gouverné par les facteurs qui déterminent le taux d'absorption d'eau et le de temps de pétrissage (ROLES et al. 1993).

Pour HOLAS et TIPPLES (1978), les pâtes de farines à teneurs en protéines élevées et à teneurs en amidon endommagé faibles sont dures et cassantes. Elles présentent de fortes caractéristiques au pétrissage, un important volume de la pâte et une forte absorption d'eau lors de la panification.

Cependant, selon POMERANZ (1983), les albumines et les globulines ne semblent pas être nécessaires à l'obtention d'un pain de volume convenable

### **1. 1. 2. Protéines de gluten**

Les protéines du gluten forment environ 85 p. cent des protéines totales (POMERANZ 1983). Outre les substances azotées, le gluten contient 8 p. cent de lipides et 2 p. cent de glucides riches en galactose formant des galactolipides. Les autres glucides sont surtout des pentosanes insolubles capables d'interagir et de retenir un niveau assez important d'eau. Cependant, les lipides forment des complexes (lipoprotéines) avec les protéines de gluten. Des lipoxygénases et des protéases sont également détectables dans le gluten (BELITZ et GROSCH 1987).

#### **1. 1. 2. 1. Gliadines**

D'après BUSHUK (1974), les gliadines sont inversement reliées au potentiel de panification, alors que les gluténines sont directement reliés au volume du pain. BUNKAR et al. (1989) rapportent également que les gliadines sont négativement corrélées au volume du pain.

Les gliadines diminuent la fermeté et la viscoélasticité du gluten (HOULIAROPOULOS 1982) et sont négativement corrélées à la résistance au pétrissage. (HAMADA et al. 1982).

#### **1. 1. 2. 2. Gluténines**

FINNEY et al. (1982), observent que les caractéristiques requises pour un bon pétrissage sont dues aux fonctions des gluténines, lesquelles sont responsables du développement de la pâte et du temps de pétrissage (POMERANZ 1983).

La teneur en gluténines est directement liée au volume du pain (SHOGREN et al. 1969). Les travaux de KHAN et al. (1989), précisent que le temps de pétrissage est positivement corrélé à toutes les gluténines et négativement corrélé aux gliadines tandis que l'ensemble des fractions gliadine plus gluténine est positivement corrélé au volume du pain.



### **1. 1. 3. Amidon**

L'absorption d'eau par la pâte est directement affectée par le niveau d'endommagement de l'amidon (FARRAND 1972 ; POMERANZ 1983). Selon FARRAND, (1972), un taux important d'amidon endommagé peut conduire à une pâte collante et à une baisse du volume du pain avec détérioration de la qualité.

BUSHUK (1974) a estimé par calcul que 45,5 p. cent de l'eau totale de la pâte sont absorbés par l'amidon, 31,2 p. cent par les protéines et 23,4 p. cent par les pentosanes. Le grain d'amidon intact absorbe la moitié de son poids, le grain endommagé absorbe 2 fois son poids, les protéines environ 2 fois leur poids et les pentosanes 15 fois leur poids.

La gélatinisation de l'amidon durant la cuisson constitue une des propriétés les plus importantes. YASUNAGA et al. (1968) indiquent que le degré de gélatinisation de l'amidon durant la cuisson est contrôlé par trois facteurs principaux ; l'absorption d'eau, la température et le temps de cuisson. Par contre la taille des granules d'amidon ne semble pas affecter la température de gélatinisation et la performance en panification. Les mêmes auteurs indiquent que la rétrogradation rapide de la fraction d'amylose est responsable de la fixation de la structure de la mie du pain.

GREENWOOD (1975) a signalé qu'un taux optimum d'amidon endommagé contribue positivement à l'amélioration de la texture de la mie et qu'avec un taux d'amylose plus élevé, le phénomène d'effondrement est observé après refroidissement du produit.

### **1. 1. 4. Pentosanes**

Les pentosanes ou hémicelluloses agissent à trois niveaux différents de la panification.

- **Au niveau de la pâte**

Leur structure très ramifiée favorise l'interaction avec l'eau par le biais de leur groupements hydroxyles (PYLER 1988) tel que 1/3 de l'eau de la pâte est absorbée par les pentosanes de la farine et que les arabinoxylanes (pentosanes solubles dans l'eau) peuvent absorber 11 leurs poids. BELITZ et GROSCH (1987) rapportent que les fractions hydrosolubles ont une capacité d'absorption de 15 à 20 fois leur poids en eau et donnent des solutions très visqueuses. Cette capacité d'absorption joue un rôle de régulateur de l'hydratation de la pâte en augmentant la résistance de la pâte à l'extension et en abaissant son extensibilité (JELAKA et HLYNKA 1972). Lors de leur dissolution dans l'eau à une concentration de 1 p. cent la solution visqueuse se transforme en un gel solide après l'addition d'agent oxydant. Cette gélification est exceptionnelle et aucun autre polysaccharide ne peut montrer un comportement similaire (LINAS 1988)

Les pentosanes et les glycoprotéines agissent en tant que ponts entre les protéines et les composants de l'amidon dans la pâte d'où ces propriétés de viscosité et de gélification (PATIL et al. 1975). Ainsi, POMERANZ (1983) indique que les pentosanes et les glycoprotéines contribuent à l'extensibilité du gluten et à la rétention gazeuse des pâtes fermentées.

- **Au niveau du volume de pain**

Etudiant l'effet des pentosanes sur les propriétés de pain KLUP et BECHTEL (1970), considèrent que les pentosanes solubles dans l'eau ont un effet bénéfique alors que ceux insolubles réduisent le volume de pain et confèrent à la mie une structure grossière.

Les pentosanes ne participent pas seulement à la formation du gluten mais en plus, leur addition à la farine de blé améliore le volume de pain et la texture de la mie (BELITZ et GROSCH 1987). Les pentosanes insolubles peuvent établir un réseau parallèle au réseau glutineux qui enchasse les grains d'amidon et permet la continuité de la structure de la pâte (ROUAU 1990).

- **Au niveau de pain cuit**

Les pentosanes influent le phénomène de rassissement des produits cuits. En effet, une relation positive entre la teneur en pentosanes solubles et les propriétés de texture de la mie a été montrée par (GRAYBOSCH et al. 1993).

Les pentosanes solubles diminuent la vitesse de rétrogradation en affectant la fraction amylopectine de l'amidon. Cependant les insolubles retardent davantage le phénomène en affectant les deux fractions (amylose et amylopectine) de l'amidon (KIM et D'APPOLONIA 1977). La baisse de la vitesse de rétrogradation des gels d'amidon de pain rassis par les pentosanes serait due à une baisse du niveau des composants de l'amidon qui cristallisent (PATIL et al. 1975)

### **1. 1. 5. Les lipides**

Ne constituant qu'une faible proportion de la farine, les lipides présentent un rôle majeur en panification variable à la fois en fonction de leur qualité et de leur quantité.

Mac RITCHIE, (1977) rapporte que les fractions de lipides de la farine en plus de leurs rôles stabilisants ou émulsifiants, ont un effet sur le volume. De même, BELITZ et GROSCH (1987) observent que le volume est positivement corrélé à la teneur en lipides polaires et en particulier aux glycolipides.

Durant le pétrissage, tous les glycolipides se lient au gluten. GRAYBOSCH et al. (1993) trouvent que la concentration en lipides polaires exerce une contribution substantiellement positive sur la machinabilité et la mise en forme des pâtons.

### **1. 2. Technologie de panification**

Le processus de panification se compose essentiellement de trois étapes principales, le pétrissage, la fermentation et la cuisson.

### 1. 2. 1. Le pétrissage

Le pétrissage constitue la première étape dans le diagramme de fabrication des pâtes. Il se compose de deux phases effectuées à l'aide d'un pétrin:

- Le frasage : consiste à mélanger les ingrédients à vitesse lente.
- Le pétrissage : cette deuxième phase se déroule à vitesse rapide.

Ces deux phases visent à développer le réseau glutineux, à structurer la pâte et à emprisonner l'air dans la pâte (AUTIO et LAURIKAINEN 1997). Les particules de gluten gonflent pour devenir collantes et s'attachent les unes aux autres pour former le réseau de gluten (BLOKSMA 1990).

Lors du pétrissage différents phénomènes physico-chimiques ont lieu, ces phénomènes sont les suivants (BLOKSMA 1990).

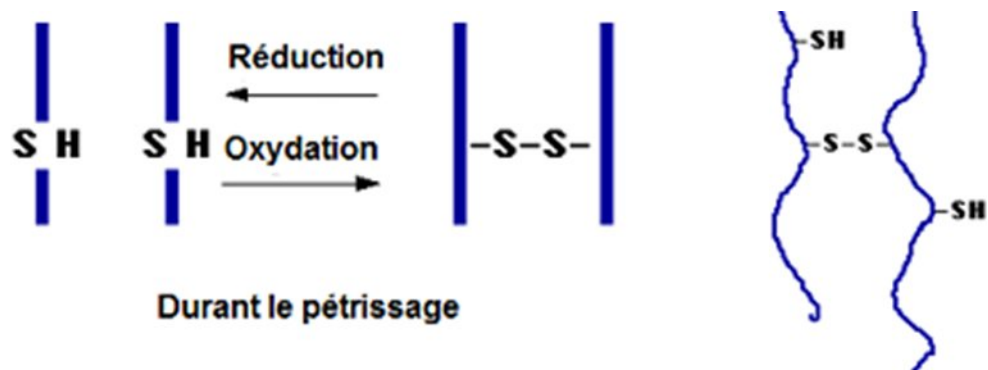
- La dispersion uniforme des ingrédients.
- La dissolution et d'hydratation des ingrédients, en particulier les protéines et les granules d'amidon endommagés de la farine.
- L'incorporation de bulles d'air dans la pâte qui sert de nucléi gazeux pour le dioxyde de carbone généré au cours de la fermentation par les levures.

Le nombre et la taille des bulles de gaz dans la pâte à la fin du pétrissage sont fortement influencés par le mécanisme de formation de la pâte et les paramètres du pétrissage (CAUVAIN 2001). Les propriétés viscoélastiques des pâtes dépendent principalement d'une phase continue de protéines dans laquelle se trouvent de nombreux éléments dispersés : granules d'amidon, cellules de levure, globules lipidiques (BLOKSMA 1990).

Le réseau protéique de la pâte se développe grâce aux liaisons chimiques lors du pétrissage, elles sont de types covalents et secondaires (figure 1). Les liaisons covalentes sont des ponts disulfures (S-S) inter ou intramoléculaires des chaînes protéiques (MEREDITH 1964). Les liaisons secondaires sont de type hydrogène, hydrophile, des liaisons hydrophobes, ioniques et des interactions polaires entre les constituants (KULP et al. 1995).

Les conditions de pétrissage sont à prendre en considération. En effet, le pétrissage doit être rapide, homogène et à température contrôlée, on obtient ainsi une pâte avec des cellules de gaz dont le diamètre est compris entre 1 et 10 mm. Le nombre et la taille des bulles de gaz ont un effet significatif sur les caractéristiques finales du produit (GIANNOU et al. 2003).

Toutefois, un pétrissage long peut augmenter les effets d'oxydation des groupements thiol (S-H) des protéines dépolymérisées (DEMIRALP et al. 2000). Il en résulte habituellement une pâte collante en raison des forces mécaniques appliquées à la pâte qui diminuent le poids moléculaire des protéines (AUTIO et LAURIKAINEN 1997). A la fin du pétrissage une élévation de la température est constatée qui induit le démarrage de la fermentation (ZOUNIS et al. 2002).

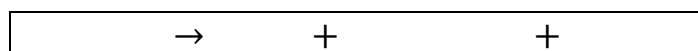


**Figure 1.** : Schéma représentatif de la formation du réseau du gluten durant le pétrissage (MEREDITH 1964).

### 1. 2. 2. Fermentation

La fermentation (pousse), de type alcoolique, est provoquée par l'action de la levure qui transforme les sucres présents dans la pâte en alcool (éthanol) et en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et est accompagnée d'un dégagement d'énergie.

En l'absence d'oxygène, la fermentation anaérobie se déroule selon l'équation suivante :



La fermentation s'effectue dans une enceinte contrôlée entre 28 et 30 °C avec une humidité relative entre 80 et 90 p. cent. Elle se fait en trois étapes :

- Le pointage
- L'apprêt
- Début de la cuisson

Le rôle de la fermentation est de produire du dioxyde de carbone dans la pâte qui sera par la suite retenu par le réseau glutineux. Le pouvoir fermentatif dépend de plusieurs facteurs : nombre de cellules de levure et la quantité de sucre (AUTIO et SINDA 1992).

Dans un premier temps, le gaz carbonique s'accumule dans la phase aqueuse de la pâte provoquant une diminution du pH (BEUCHAT 1987). Après saturation, il s'accumule sous forme gazeuse dans les alvéoles et exerce une pression interne sur le réseau de gluten ce qui provoque une expansion du volume de la pâte (GIANNOU et al. 2003).

Au cours de la fermentation, la croissance des cellules de gaz dépend en partie de leur taille et leur stabilité ainsi que leur capacité à retenir le gaz. Elles sont d'un intérêt considérable car elles déterminent la structure de la mie et le volume final du produit.

Dans le cas des pâtes congelées VAN VLIET (2008), notent que la taille et la distribution des cellules de gaz sont influencées par la congélation et le stockage. En effet, la phase gazeuse dispersée dans la matrice des pâtes peut être sujette à différents types d'instabilités physiques (crémage, maturation d'Ostwald, agrégation et coalescence)

KULP et al. (1995) font observer que les pâtes congelées sont caractérisées par un temps de fermentation plus long par rapport aux pâtes fraîches. Cela est dû à la diminution de l'activité fermentaire des levures et la perte du pouvoir de rétention du CO<sub>2</sub> par le réseau de la pâte causée par le processus de congélation

### 1. 2. 3. Cuisson

La cuisson a pour but essentiel de gélatiniser l'amidon et de coaguler les protéines afin d'accroître leur digestibilité. Elle permet en plus d'assurer une durée de conservation convenable au produit par destruction des enzymes et des microorganismes (POTUS et DRAPRON 1990).

FARIDI et RUBENTHALER (1984) font remarquer que des pains cuits durant une longue période à faible température sont secs et de mauvaise qualité comparés aux pains cuits rapidement et à haute température. De plus, la vitesse de rassissement est plus importante dans le cas des pains cuits à faible température pendant un temps plus long.

Au début de la cuisson, il existe un certain temps de quelques minutes, entre la destruction de l'amylase à 50 °C et la gélatinisation de l'amidon à 60 °C, dans lequel la production de maltose et de dextrine est maximale (BLOKSMA 1990). Cela augmente le collant de la mie, la porosité de la pâte et donc diminue la rétention gazeuse et en définitive le volume de pain (POTUS et DRAPRON 1990).

Durant la cuisson la pâte s'étend encore et son volume relatif augmente de 4-5 à 5-7 fois (MARSTON et WANNAN 1983). L'augmentation du volume est due à la forte activité de la levure qui continue à produire du CO<sub>2</sub> jusqu'à son inactivation à 50 °C, et à l'alcool produit qui s'évapore à 60 °C (BLOKSMA 1990). Les propriétés viscoélastiques de la pâte diminuent et donnent une fluidité importante à 50-60 °C avant que le gonflement de l'amidon ne soit significatif.

Etudiant la cuisson du pain, MARSTON et WANNAN (1983) notent que la température de cuisson progresse de l'extérieur vers l'intérieur selon un gradient de température. A 60-70 °C l'activité de  $\alpha$ -amylase est maximale ; cette enzyme est inactivée à 80-85 °C. La gélatinisation de amidon commence à 60 °C et continue jusqu'à 70 °C en passant de l'état semi-cristallin à l'état état amorphe où il devient plus hydrophile.

La coagulation du gluten commence à 70 °C. Vers 90 °C la pâte acquiert une structure semi-rigide qui se fige à 95°C. Il y a formation de la croûte à 100°C concomitante de la vapeur d'eau dans la mie, et à partir de 110 °C, c'est la dextrinisation puis la caramélisation. Quand la température atteint 170°C - 230 °C, la réaction de Maillard entre groupements amines des protéines et groupements carbonyles des oses réducteurs intervient dans la coloration (ALAIS et LINDEN 1997).

La durée de cuisson varie en fonction de la grosseur des pains, de 12 à 13 min pour les petits pains et 45 à 50 min pour les gros pains. L'appréciation de la cuisson se fait d'après le degré de résistance de la croûte et d'après la résonance du pain quand il est frappé du bout du doigt à sa partie inférieure (GUINET 1992).

## **2. LA CONGELATION DES ALIMENTS**

### **2. 1. Généralités**

La congélation est un changement d'état d'eau liquide en glace et consistant en un abaissement et un maintien de la température du produit à une température négative de façon à congeler.

La surgélation est une congélation effectuée de façon à franchir rapidement la zone de cristallisation et s'achève seulement quand la température moyenne du produit atteint -18 °C. Cette valeur très souvent servant de référence en matière de congélation des aliments, a été choisie pour sa correspondance avec le 0° Fahrenheit, et par le constat de l'absence de multiplication des levures et moisissures. (MAFART 1991). Une denrée est surgelée lorsque sa température est maintenue dans tous ses points et sans interruption à des valeurs inférieures ou égales à -18 °C (Association Française du Froide 1995)

### **2. 2. Principe de la congélation**

En abaissant la température d'un aliment, Cette influence de la température découle de trois éléments :

- La loi d'Arrhénius relative à la vitesse des réactions chimiques :



$$= \frac{.}{/}$$

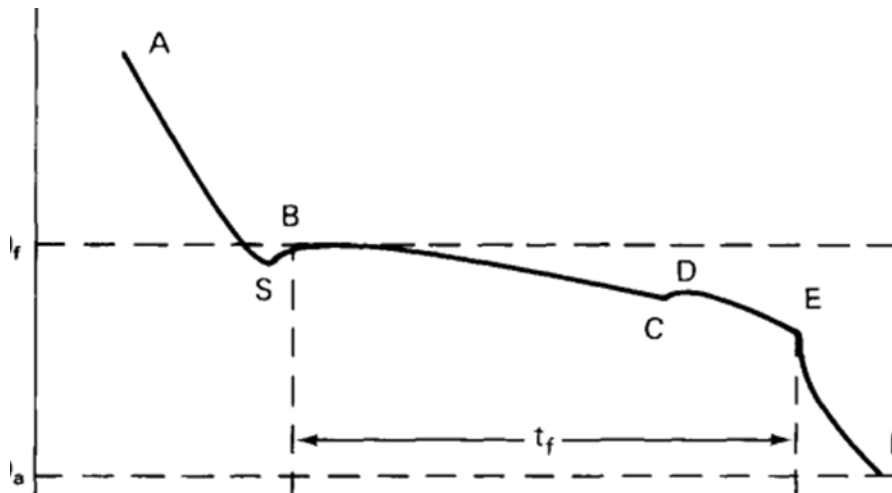
Où **a** est une constante ( $s^{-1}$ ), **E** l'énergie d'activation de la réaction ( $J. mol^{-1}$ ), **R** la constante des gaz parfaits ( $8,314 J. mol^{-1} .K^{-1}$ ) et **T** la température absolue ( $^{\circ}K$ ). L'équation montre qu'une diminution de la température entraîne une diminution de la constante de vitesse, donc le ralentissement de l'ensemble des processus d'altérations biochimiques, enzymatiques et chimiques ayant lieu dans l'aliment (JEANTET et al. 2006).

- L'eau transformée en glace n'est plus mobile et n'est donc plus disponible ni comme solvant ni comme réactif (JEANTET et al. 2006 ; CHEFTEL et CHEFTEL 1977). La congélation provoque la dénaturation de certaines enzymes bactériennes. Ceci explique que l'on puisse obtenir, en dessous d'une température critique, l'arrêt de la croissance des micro-organismes.
- Cette température varie avec la nature du micro-organisme. D'après FREDOT (2005), la congélation à  $-18^{\circ}C$  provoque un blocage de la multiplication des cryophiles, mésophiles, une destruction des parasites et un arrêt de l'activité des enzymes. Un grand nombre de micro-organismes résistent à la congélation. Ils sont inhibés par le froid et la baisse de l'activité de l'eau. Leur métabolisme reprendra à la décongélation (GENOT 2000).

La qualité du produit final dépend de celle du produit avant congélation, de la vitesse de refroidissement et de la congélation et du maintien du froid négatif au cours de son stockage (JEANTET et al. 2006). La congélation n'améliore pas la qualité initiale du produit mais ralentit sa dégradation (BIMBENET et al. 2002).

### **2. 3. Etapes de congélation d'aliment**

D'après GOFF et SAHAGIAN (1996), en contrôlant la température au centre thermique d'un aliment (point qui se refroidit plus lentement), la courbe caractéristique (figure 2) comprend six composantes de la courbe sont les suivantes.



**Figure 2.** Courbe de congélation d'un aliment (GOFF et SAHAGIAN 1996).

- AS : L'aliment est refroidi au-dessous de son point de congélation  $\theta_f$  qui, à l'exception de l'eau pure, est toujours en dessous de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Au point S, l'eau reste liquide, même si la température est inférieure au point de congélation. Ce phénomène est connu sous le nom de surfusion et peut aller jusqu'à  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  en dessous du point de congélation.

- SB : La température s'élève rapidement au point de congélation, des cristaux de glace commencent à se former et la chaleur latente de cristallisation est libérée.

- BC : La chaleur est retirée de l'aliment au même rythme que précédemment, mais la chaleur latente libérée en formant la glace fait que la température reste donc à peu près constante. Le point de congélation est progressivement abaissé par l'augmentation de la concentration du soluté dans la liquide non encore congelé, et la température descend ainsi légèrement. C'est durant cette étape que la majeure partie de la glace se forme.

- CD : Le milieu devient sursaturé en solutés et cristallise. La chaleur latente de cristallisation est libérée et la température atteint le point eutectique.

- DE : La cristallisation de l'eau et des solutés continue. Le temps total  $t_f$ , ou plateau de congélation, est déterminé par la vitesse à laquelle la chaleur est éliminée.

- EF : La température du mélange eau-glace revient à la température du congélateur.

Une partie de l'eau reste non congelée aux températures utilisées dans le gel commercial, sa proportion dépend de la nature de l'aliment et de la température de conservation. Par exemple, à une température de stockage de - 20 °C, le pourcentage de l'eau congelée est de 88 p. cent dans la viande d'agneau, de 91 p. cent dans le poisson et de 93 p. cent dans l'albumine d'œuf.

#### 2. 4. Calcul du temps de congélation

L'équation de Planck, ci-dessous, pour le calcul du temps  $t$  de congélation au cœur de l'aliment suppose la formulation à partir de la surface d'une couche de produit de demi-épaisseur  $x$  avec une conductivité thermique  $\lambda$  et de la concentration  $\rho$  (kg de glace par  $m^3$  de produit). La température du milieu de refroidissement est  $\theta_M$ . Tout le produit est à une température de congélation  $\theta_f$ , du cœur jusqu'au front de congélation.  $\Delta H$  est l'enthalpie de fusion de la glace (bien supérieure à la chaleur sensible) et  $h$  est le coefficient de transfert de chaleur en surface. Le coefficient  $a$  prend respectivement les valeurs 1, 2 et 3 selon qu'il s'agit d'une plaque refroidie sur ses deux faces, du rayon d'un cylindre ou d'une sphère (BIMBENET et al. 2002).

$$t = \frac{\rho \cdot \Delta H}{h \cdot \Delta \theta} \times \left( \frac{x^2}{2\lambda} + \frac{x}{h} + \frac{\theta_f - \theta_M}{\lambda} \right)$$

#### 2. 5. Conséquences de la congélation sur les aliments

Les effets seront plus ou moins marqués selon le type de congélation : forts pour la congélation lente.

### **2. 5. 1. Modifications physicochimiques**

- **Augmentation de volume**

L'eau augmente de 9 p. cent en volume lors de la congélation. Cette augmentation peut créer des lésions au niveau des structures tissulaires. Pour les aliments cette augmentation de volume est plus faible car toute l'eau n'est pas congelée (CHEFTEL et CHEFTEL 1977).

- **Déshydratation des tissus**

La cristallisation de l'eau dans les espaces extracellulaires, parce que la concentration en solutés y est moindre que dans les fluides intracellulaires, provoque une déshydratation progressive des cellules par osmose. Cette déshydratation des cellules abaisse encore la probabilité d'une nucléation intracellulaire dans la plupart des tissus ou des suspensions de cellules congelées lentement.

L'augmentation de la concentration saline et une baisse de pH sont dues à l'élévation de la force ionique. Des modifications de la pression osmotique, du potentiel d'oxydoréduction, de la tension superficielle et de la pression de vapeur ou encore de point de congélation ont lieu (CHEFTEL et CHEFTEL 1977 ; JEANTET et al. 2006).

### **2. 5. 2. Activité des enzymes**

Toutes les enzymes ne sont pas inhibées de la même façon par le froid. Lors d'une congélation lente, l'activité prolongée de certaines enzymes devient significative (JEANTET et al. 2006). Il y a mise en contact anormal d'enzymes et de leur substrat par altération de la structure cellulaire accélérant l'activité enzymatique lors de la décongélation (CHEFTEL et CHEFTEL 1977).

FREDOT, (2005) estime que les lécithinases, phospholipases et lipases ne sont inhibées qu'à -25 °C. Il se produit donc une hydrolyse enzymatique des phospholipides, avec libération d'acides gras libres oxydables entraînant un rancissement biologique. Cette oxydation peut être spontanée, c'est le rancissement chimique.

## 2. 6. Décongélation

C'est une opération très délicate qui conditionne complètement la qualité gustative et bactériologique du produit décongelé. Il faut donc un contrôle rigoureux de la vitesse de décongélation.

OUDOT (1999) décrit cours de la décongélation l'apparition d'un gradient thermique entre le centre et l'extérieur du produit : la zone périphérique se décongèle toujours plus vite que le cœur. Aussi, outre les méthodes classiques de décongélation par réchauffement externe, les méthodes par réchauffement interne sont de plus en plus utilisées.

La décongélation est une opération quatre fois plus lente que la congélation car la conductivité thermique de l'eau est quatre fois plus faible que celle de la glace. Il se forme au début de la décongélation une couche aqueuse qui va freiner le processus (CHEFTEL et CHEFTEL 1977). La zone - 5 à - 1 °C sera la plus difficile et la plus longue à franchir : on est dans la zone critique de cristallisation maximum à la congélation et de plus forte résistance à la décongélation car le gradient thermique entre le fluide qui réchauffe et le produit devient très faible (OUDOT 1999).

Lors de la décongélation, la masse congelée est portée assez rapidement à une température de peu inférieure à 0 °C. La quantité importante de chaleur nécessaire à la fusion n'est transmise que lentement à travers la couche aqueuse qui s'est formée extérieurement, et pendant ce temps le produit reste proche de 0 °C ce qui n'est guère favorable. En pratique la décongélation est encore plus lente, par crainte de trop chauffer les couches extérieures de produit ou de favoriser le développement de microorganismes, on applique un gradient de température habituellement plus faible que pour la congélation (FENNEMA et al. 1973).

Concernant la pâte à pain congelée, LORENZ et KULP (1995) recommandent une décongélation à température constante ou avec une température qui augmente graduellement pour éviter la condensation à la surface de la pâte. Pour KENNY et al. (2001) une décongélation rapide élève les températures de surface qui seront prêtes pour la fermentation, alors que le centre de la pâte reste encore congelé.

Selon MARSTON (1978), la décongélation respectant le mieux la qualité des pâtes congelées (volume final et texture de la mie) semble être de l'ordre de 12 heures entre 0 et 5 °C.

## 2. 6. 1. Calcul théorique de la vitesse de décongélation

D'après OUDOT (1999) la décongélation étant un transfert thermique, on peut appliquer la loi de Planck. Dans l'équation de calcul la variation de vitesse  $\Delta V$ ,  $\Delta H$  est la variation d'enthalpie,  $\varpi_m - \varpi_c$  est la différence de température,  $\rho/N$  le rapport de la masse volumique sur la forme du produit,  $1/\alpha$  coefficient d'échange du fluide,  $E$  épaisseur du produit et  $\lambda$  est le coefficient d'échange du produit. On note dans cette loi l'importance de l'écart de température produit-fluide, de la forme du produit et du fluide utilisé (coefficient d'échange).

$$\Delta V = \frac{\Delta H}{\rho/N} \times \frac{1/\alpha}{E} \times \lambda$$

## 3. EFFET DE LA CONGELATION SUR LA PATE A PAIN

### 3. 1. Influence de la congélation de la pâte sur l'amidon

Au cours du stockage des pâtes congelées à  $-18^{\circ}\text{C}$  les propriétés de gélification et de rétrogradation de l'amidon sont modifiées. Une augmentation de la rétrogradation, mesurée par analyse calorimétrique différentielle, a été observée par RIBOTTAA et al.2003. Cette rétrogradation est affectée par différents facteurs, tels que l'humidité, la teneur en lipides et d'autres ingrédients (BILIADERIS, 1990 ; ZELENAK et HOSENEY, 1986).

LU et GRANT (1999) ont montré que la quantité d'eau congelable dans la pâte augmente avec le temps de congélation. La répartition de l'eau et la cristallisation de la glace pourraient induire des modifications dans la structure et l'agencement de l'amylopectine (RIBOTTAA et al. 2003).

### **3. 2. Perte de poids de la pâte à pain**

Le taux de perte de poids à une température constante, précisé par la cinétique d'Arrhenius, augmente avec l'amplitude des fluctuations de température. GIANNOU and TZIA 2007 ont constatés que la perte de poids de la pâte congelée variait de 11 p. cent à 13 p. cent durant l'entreposage pour un maximum de 270 jours.

La perte de poids est une altération importante de la qualité des produits alimentaires congelés qui dépend des conditions et de la fluctuation de la température de stockage (PHIMOLSIRIPOLA et al. 2011).

### **3. 3. Affaiblissement de la pâte**

Des changements de la solubilité des protéines ainsi que l'altération définitive de la structure de la gluténine qui se dépolymérise en des molécules de plus faible poids moléculaire, causée en partie par la libération de substances réductrices des cellules mortes de levures sont des explications possibles de l'affaiblissement de la pâte et de l'effet sur l'extensibilité au cours de la congélation.

La cristallisation de la glace, la perte de gaz carbonique en congélation et d'autres facteurs non connus interviendraient également (INOUE et al. 1994).

KAUFMANN et KUHN (1994), ont montré que les pâtes non fermentées avant congélation étaient plus élastiques que celles fermentées qui sont devenues encore plus visqueuses avec augmentation du temps de fermentation.

### **3. 4. Effet de la congélation sur le gluten**

La détérioration du réseau de gluten a été attribuée à des cristaux de glace, formés pendant la congélation, qui provoquent la rupture physique du gluten, affaiblissent les liaisons hydrophobes et redistribuent l'eau dans la structure du gluten (VARRIANO-MARSTON et al 1980, BERGLUND et al. 1991, INOUE & BUSHUK 1991, AUTIO & SINDA 1992). La redistribution de l'eau augmente l'hétérogénéité

dans les pâtes décongelés et l'assèchement de certains composants. Il est suggéré que les changements dans le réseau de gluten de la pâte congelée résultent de l'effet de composés réducteurs tel le glutathion, léssivés à partir des cellules de levure, qui par réduction affaiblissent les groupements disulfures du gluten (KLINE & SUGIHARA 1968 ; HSU et al. 1979).

RÄSÄNEN et al.1995 montrent que la diminution de la rétention de CO<sub>2</sub> des pâtes congelées est due à un réseau de gluten endommagé et à la perte de viabilité de la levure. Le gluten, en particulier à l'interface air-cellule, est en extension et est très sensible aux dommages causés par des cristaux de glace.

L'interruption de la fermentation résulte en un épais réseau de gluten autour des bulles d'air de taille moyenne plus faible. Ainsi, les parois des bulles d'air sont plus résistantes au stress de la congélation que celles des pâtes fermentées de manière optimale. Cela a également été observé avec des pâtes congelées cuites sans décongélation (RÄSÄNEN et al. 1995).

### **3. 5. Fermentation**

La fermentation est ralentie par l'abaissement de la température. À des températures inférieures à 10 °C, la viabilité est seulement 75 p. cent de l'optimum (HECKELMANN 1993).

Pendant la préfermentation des sous-produits métaboliques sont formés lesquels sont supposés rendre les cellules de levure moins cryoresistantes lors de la congélation (HSU et al. 1979). Une réduction du temps de préfermentation accroît la rigidité de la pâte, et une plus faible teneur en eau l'accroît davantage comparativement à une pâte fraîche (VOIVALA 1998).

La congélation diminue la rigidité, ce qui explique la faible capacité de rétention de gaz des pâtes. Ce type de détérioration peut être évité en réduisant la teneur en eau des pâtes (RÄSÄNEN et al. 1998).

Les pâtes fermentées 40 min et congelées fournissent des pains avec un rapport



de forme stable lors du cycle congélation-décongélation (RÄSÄNEN et al. 1998).

### **3. 6. Les cristaux de glace dans les pâtes congelées**

Les principaux changements qui se produisent dans les pâtes congelées, à la fois dans la structure du gluten et de la viabilité de la levure, sont dues à des cristaux de glace. Le dommage est à la fois direct (physique) et indirect (redistribution d'eau).

STAUFFER (1993) a souligné le rôle des cristaux de glace à endommager la structure du gluten. Dans les études sur les pâtes congelées, BERGLUND et ses collaborateurs (1991) ont constaté que moins d'eau est associée à la fois au gluten et aux fractions d'amidon que dans les pâtes fraîches correspondantes. L'eau est plutôt concentrée dans de grandes parcelles de cristaux de glace. Ils ont également observé des brins de gluten qui tendent à s'amincir et à se séparer des granules d'amidon de la matrice de gluten pendant la congélation.

### **3. 7. Aspect de pain**

La pâte est généralement stockée entre -15 et -20 °C (PHIMOLSIRIPOL et al. 2011). La congélation lente est souvent recommandée pour la pâte, car un rythme plus rapide, endommage la levure, réduit la qualité du pain, diminue son volume spécifique avec un durcissement et une fermeté de la mie (HAVET et al. 2000 ; LE BAIL et al. 2010 ; PHIMOLSIRIPOL et al. 2008).

La qualité globale du pain cuit d'une pâte congelée se dégrade progressivement au cours de la congélation (INOUE et BUSHUK 1991). Deux facteurs sont identifiés comme cause, la diminution de la puissance gazeuse en raison d'une baisse de l'activité de la levure et la perte progressive de la force de la pâte. Celle-ci est due à la libération de substances réductrices disulfures par les cellules de levure mortes (KLINE et SUGIHARA 1968) et à la perturbation du réseau de gluten par les cristaux de glace (VARRIANO-MARSTON et al. 1980).

### **3. 8. Volume du pain**

L'effet général de la congélation sur les volumes de pains cuits de pâtes congelées a été étudié par BRÜMMER et al. (1993). La plus forte baisse de la qualité se produit pendant le premier jour du stockage à -20 ° C. En d'autres termes, les volumes de pain diminuent en passant de 730 ml à 560 ml avec les pâtes préfermentées congelées.

D'une part, selon KLINE ET SUGIHARA (1968) et Hsu et al. (1979), après un jour de congélation de la pâte, le volume du pain s'est amélioré. D'autre part, la baisse la plus marquée de volume a été observée pendant la première semaine de stockage et a continué de baisser au cours de la deuxième semaine (RÄSÄNEN et al. 1995).

Le temps de préfermentation est déterminant. BRUMMER et al. (1993) avec 75 p. cent de préfermentation, ont rapporté des volumes de 77 p. cent de ceux des pains frais. Par contre, KRAFT et al. (1994) ont indiqué que les volumes de pains fermentés à 80 p. cent étaient en moyenne de 87,5 p. cent des volumes de pain frais.

Pour RÄSÄNEN et al. (1995), les volumes de pain de pâtes fermentées 40 min ont diminué de 15% en moyenne, alors que ceux des pains des pâtes fermentées 25 min sont conservés ou ont même augmentés de 3-13 p. cent.

Il semble ainsi que le volume des pains des pâtes préfermentées et congelées est indépendant de la qualité de la farine. Le temps de pré-fermentation a effet négatif sur la stabilité des pâtes congelées, sa réduction favorise donc le volume du pain.

Selon HANNEFORTH et al (1994), le temps de préfermentation des pâtes à congeler devrait être de moitié ou des deux tiers de la durée optimale pour les pâtes fraîches.

### **3. 9. Cuisson directe**

Les pâtes préfermentées et congelées peuvent être cuites directement au four sans décongélation préalable (BRUMMER et NEUMANN 1993). Le réseau de gluten étant

endommagé par les cristaux de glace, les propriétés de cuisson de pâtes congelées préfermentées ne sont pas aussi bonnes que de celles non fermentées (RÄSÄNEN et al.1998).

### **3. 10. Décongélation à température ambiante 20 °C**

Selon BRUMMER et al. (1993), avec une décongélation optimale de 60 min à 20 °C, suivie de 45 min de fermentation à 32 °C à une humidité relative de 70 p. cent, le volume du pain est plus faible que celui de la décongélation et la cuisson directes dans un four programmé. La qualité est moins bonne pour les pains issus d'une cuisson lente (RÄSÄNEN 1998)

### **3. 11. Rapport de forme (H/L)**

Le rapport de forme, rapport de la hauteur (H) sur la largeur (L) à mi-hauteur, des pains de pâtes congelées ont été plus plats que ceux de pâtes fraîches. La fermentation interrompue n'a pas éliminé l'aplatissement de pains, le H/L a diminué en moyenne de 19 p. cent presque indépendamment de la durée de la fermentation et de la qualité de la farine (RÄSÄNEN et al.1995). Auparavant, en 1986, DUBOIS et LE BLOC-COLSKY ont observé l'effet de temps de fermentation. Les pains fermentés 25 min avait un rapport de forme un peu plus grand que ceux fermentés pendant 40 min. La grande différence dans les rapports forme des pains pâtes fraîches et de ceux congelés peut-être due à la température trop élevée de décongélation créant un gradient de température important en plus de la perte d'étanchéité de la partie extérieure de la pâte

### **3. 12. Fermeté de la mie**

Des analyses microscopiques montrent que le pain de pâte fermentée et congelée a une mie dense avec de grosses alvéoles sous la croûte. Ainsi, la destruction du réseau de gluten a libéré la plupart du CO<sub>2</sub> (RÄSÄNEN et al.1995)

La perte d'humidité ainsi que la rétrogradation de l'amidon sont deux des mécanismes de base opérant dans le raffermissement de la mie (RIBOTTAA et al.2003). Ce raffermissement est principalement causé par recristallisation de la fraction

d'amidon impliquant des chaînes d'amylopectine (SCHOCH et FRANÇAIS 1947 ; ZOBEL et KULP 1996).

MARTIN et al. (1991) ont suggéré que la principale raison de la fermeté du pain est la formation de liaisons hydrogènes entre le gluten et les granules d'amidon. Par ailleurs, la congélation affecte la viabilité de la levure et son pouvoir fermentaire (RÄSÄNEN 1998).

*Matériel*  
*et*  
*Méthodes*

## MATERIEL ET METHODES

### 1. MATIERES PREMIERES

#### 1. 1. Farine

Nous avons utilisé dans notre étude une farine de panification courante distribuée pour les boulangeries, produite et commercialisée par ERIAD Khroub-Constantine.

Un échantillon de 100 kg est prélevé le jour de production 04 - 04 - 2012 au niveau de la minoterie Sidi Rached Khroub-Constantine.

#### 1. 2. Eau, sel et levure

Dans les essais de préparation du pain, nous avons utilisé l'eau du robinet du laboratoire de nutrition de l'INATAA et le sel de table produit par ENASEL (Entreprise National du Sel).

La levure boulangère *Saccharomyces Cerevisiae* utilisée. De la marque Saf-Instant France, produite et distribuée par S.I. le SAFFRE, se présente sous forme de petits granules secs de tailles uniformes, de couleur brune et odeur caractéristique de levure. Elle est conditionnée sous vide en paquets de 500 g. L'emballage porte les dates de fabrication (29 - 08 - 2011) et de péremption (29 - 08 - 2013). Durant le travail, la levure est conservée au réfrigérateur.

### 2. CARACTERISATION DE LA FARINE

#### 2. 1. Teneur en eau

La teneur en eau de la farine de blé est mesurée dans un étuve à vide isotherme de marque (MEMMERT model 700), selon la méthode décrite par la norme AFNOR (NF V 03-707). C'est une dessiccation à 130 °C d'une prise d'essai de  $5 \pm 0.001$  g jusqu'à un poids constant (AFNOR 1991).

La teneur en eau (H) exprimée en gramme pour 100 g de produit est :

$$H (\%) = \frac{(m - m_1)}{m} \times 100$$

$m_0$  : La prise d'essai en g avant séchage.

$m_1$ : La prise d'essai en g après séchage.

Le passage de la base humide à la base sèche (H) en p. cent en prenant en compte l'humidité (H) pour 100 g de produit frais est :

$$H (\%) = \frac{100}{100 - H}$$

## 2. 2. Teneur en cendres

Les cendres sont mesurées par incinération complète jusqu'à poids constant à 900 °C pendant trois heures dans un four à moufle de marque LINN, d'une prise d'essai de  $5 \pm 0,001$  g suivant la norme N.F.V03-720 (AFNOR 1991).

Le taux de cendres (TC), exprimé en pourcentage de masse rapporté à la matière sèche est :

$$TC = (m - m_1) \times \frac{100}{m} \times \frac{100}{100 - H}$$

$m_0$  : prise d'essai en g avant incinération.

$m_1$ : prise d'essai en g après incinération.

H : teneur en eau, exprimée en pourcentage de masse de produit.

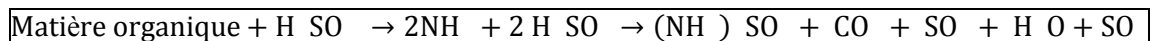
### 2. 3. Protéines totales

Le dosage des protéines est estimé par la détermination de l'azote total par la méthode de KJELDHAL décrite par la norme AFNOR (NFV03-050). Le coefficient de conversion de l'azote total en protéines est de 5,7 pour la farine de blé (KIGER et KIGER 1967).

Le principe de la méthode consiste en la minéralisation de l'azote de la matière organique sous l'action de l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur approprié (sulfate de potassium et sulfate de cuivre). L'azote passe se forme de sulfate d'ammonium. Après déplacement de l'ammoniac par la lessive de soude, il est dosé par titration. Les principales étapes sont:

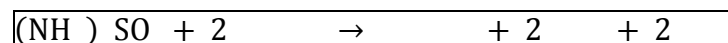
#### ➤ Minéralisation

À chaud, l'acide sulfurique concentré (d = 1,98, 98 p. cent) oxyde la matière organique et transforme l'azote organique en azote minéral. Avant d'être fixé sous forme de sulfate d'ammonium, l'azote passe d'abord à l'état d'ammoniac (GODON 1991).



#### ➤ Distillation de l'ammoniac

L'ammoniac est déplacé de son sel par la lessive de soude (30 p. cent).



Sous l'action de la chaleur, l'ammoniac est libéré de son sel et entraîné avec les vapeurs d'eau. Il est récupéré dans un volume connu d'acide borique (4 p. cent) sous forme de borate d'ammonium.



## ➤ Titration

Le borate d'ammonium est titré avec une solution d'acide sulfurique à 0,01 N en présence de rouge de méthyle et de bleu de méthylène (indicateur de TASHIRO) (KAOURITCHEV 1983)

La teneur en azote (A ) est exprimée en gramme pour 100 g de matière humide

$$A = \frac{N \times 14 \times D \times V}{1000 \times Pe} \times 100$$

N : Normalité de l'acide sulfurique

14 : Masse en gramme d'un atome d'azote.

V : Volume en ml de solution d'acide sulfurique utilisée pour la titration.

D : Coefficient de dilution de l'échantillon.

Pe: Prise d'essai en g

## 2. 4. Granulométrie

Cet examen réalisé au laboratoire central de l'ERAD de Constantine, permet d'apprécier dans un planchister la finesse de la mouture. Il consiste à passer à travers un tamis, de 200 µm d'ouverture de maille, une prise d'essai de 100 ± 0,01 g de farine (LECOQUE 1965).

Le planchister fonctionne à une vitesse constante de 200 tr/min. Les tamis sont en bronze phosphoreux d'une surface utile de 283 cm<sup>2</sup>. Le dégommage est assuré par 4 billes de caoutchouc de 15 cm de diamètre. Le tamisage dure 5 min et le refus du tamis est pesé à 0,001g près.

## 2. 5. Teneur en gluten

Le gluten est estimé par extraction manuelle selon la méthode décrite par (GODON et POPINEAU 1984). Cette technique repose sur le fait que le gluten est insoluble dans l'eau salée et qu'il s'agglomère lorsqu'on le malaxe sous un filet d'eau.

La masse plastique obtenue à partir de 33,33 g de farine, est pesée à état humide pour estimer le gluten humide (GH). La dessiccation de la masse, à l'étuve à 102 °C jusqu'à poids constant, donne le gluten sec (GS). La capacité d'hydratation CH (en p. cent) du gluten est calculée par la formule:

$$\text{CH (\%)} = \frac{\text{GH} - \text{GS}}{\text{GH}} \times 100$$

## 2. 6. Acidité

L'acidité grasse est l'expression conventionnelle des acides, essentiellement des acides gras libres. Elle est exprimée en gramme d'acide sulfurique pour 100 g de matière sèche.

### Mode Opérateur

#### Extraction

- Peser et introduire environ  $5 \pm 0.01$  g de farine dans le tube de centrifugeuse.
- Y ajouter à la pipette 30 ml d'éthanol à 95 p. cent et fermer le tube hermétiquement.
- Agiter pendant une heure à l'aide de l'agitateur rotatif mécanique, en opérant à une température de  $20 \pm 5$  °C.
- Centrifuger ensuite à deux reprises et successivement pendant 2 min.
- Laisser reposer 24 heures.

#### Titration

- Prélever à la pipette 20 ml du liquide surnageant parfaitement limpide et les verser dans une fiole conique.
- Ajouter 5 gouttes de phénolphtaléine.
- Titrer à l'aide de la micro-burette avec NaOH titrée à 0,05 N, jusqu'au virage au rose pâle persistant pendant quelques secondes.

## Essai à blanc

- Titrer l'acidité apportée par l'alcool en opérant sur 20 ml d'éthanol.

## Expression des Résultats

- ❖ Acidité exprimée en gramme d'acide sulfurique pour 100 g de matière fraîche (A<sub>1</sub>) est :

$$A_1 (\%) = \frac{7,35 \times (V_1 - V_0)}{m} \times T$$

- ❖ Acidité exprimée en gramme d'acide sulfurique pour 100 g de matière sèche (A<sub>2</sub>)

$$A_2 (\%) = \frac{7,35 \times (V_1 - V_0) \times T}{m} \times \frac{100}{100 - H}$$

V<sub>1</sub> : volume en ml de Na OH utilisé à la trituration de la prise d'essai.

V<sub>0</sub> : volume en ml de Na OH utilisé pour l'essai à blanc.

m : masse en gramme de la prise d'essai

T : titre de la solution Na OH (0,05)

H : teneur en eau en pourcentage de la farine.

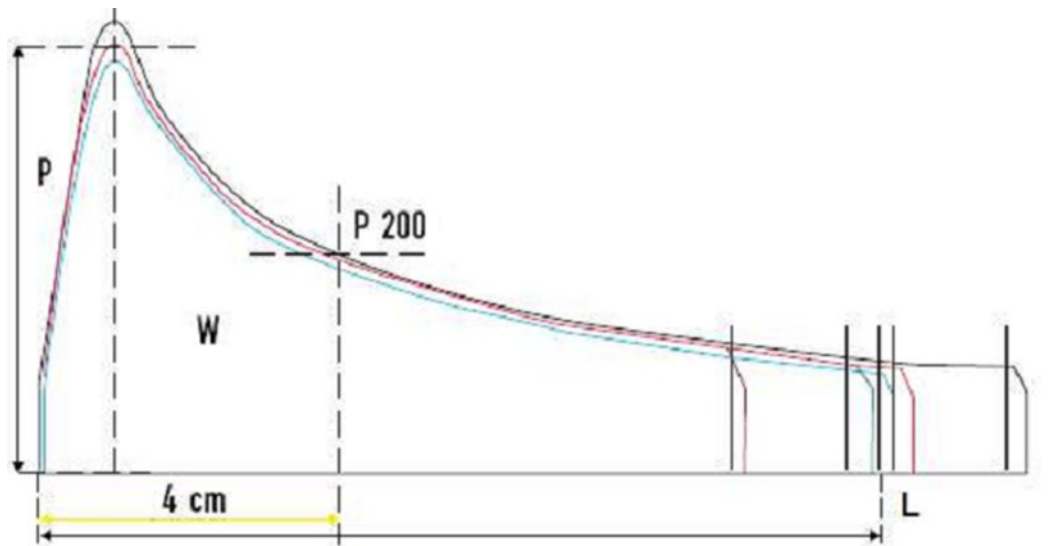
Le coefficient 7,35 correspond à la conversion de la normalité en g d'acide sulfurique d'un litre de solution d'échantillon contenant 5 g de la prise d'essai.

## 2. 7. Caractérisation plastique de la farine par l'Alvéographe Chopin

Cet appareil permet l'évaluation de la valeur boulangère des farines 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. Ceci est réalisé par l'Alvéographe Chopin au niveau de laboratoire central de l'ERAD de Constantine.

## Mode Opérateur

Les pâtes destinées aux mesures à l'Alvéographe Chopin ont été préparées sans ajout de levure. Les pâtons sont préparés à partir de 250 g de farine et d'une quantité d'eau salée (2,5 p. cent) déterminée à partir d'une table en fonction de l'humidité de la farine. De l'air est insufflé sous une certaine pression à l'intérieur de la pâte. Celle-ci s'expande en bulle. Le temps d'expansion et de résistance à la rupture de cette dernière varie d'un échantillon à un autre. La pression à l'intérieur de la bulle de pâte est enregistrée comme une courbe sur un support en papier. Une courbe moyenne est tracée à partir des enregistrements des 5 pâtons (figure 3).



**Figure 3.** Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre réalisé sur l'Alvéographe Chopin (DELFRATE 2005).

## Expression des résultats

La lecture d'un alvéogramme (figure 3) se fait à travers les paramètres suivants (NAEGA 2005)

W : le travail au sens physique du terme, cette grandeur exprime la force boulangère de la pâte, sa valeur est proportionnelle à la Surface (S) de la courbe obtenue selon l'équation suivante :

$$W = S \times P$$

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 d'eau sur l'axe des ordonnées de l'alvéogramme.

L : 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 : Gonflement de la pâte est exprimé en cm<sup>3</sup>. Il est donné par l'équation suivante :

$$G = \frac{P}{L} \times \sqrt{L}$$

P/L : 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. P<sub>200</sub> : Pression à 4 cm de début de la courbe (figure 3). Il est donné par l'équation suivante :

$$Ie = \frac{P_{200}}{L} \times G$$

La réglementation algérienne (J.O.R.A. 1991) en matière de panification exige :

- W compris entre 130 et 180
- G supérieur à 20
- P/L compris entre 0,45 et 0,65.

## 2. 8. Paramètres et protocole de panification

Les différents tests de panification présentent des insuffisances au niveau de la reproductibilité des résultats en raison de variation des conditions opératoires, type de farine, type de pétrin, pétrissage, fermentations (ROUSSET & LOISEL 1984). À cet effet, nous avons envisagé la détermination d'un protocole de panification qui résulte de la synthèse des principaux protocoles cités dans la littérature de 1965 à 2007 (tableau 1).

Ainsi, nous avons considéré tous les paramètres intervenant dans la panification et leurs intervalles de variations : taux de sel, de levure et d'hydratation, nombre et durées de pétrissage, de fermentations et durée de cuisson.

### **2. 8. 1. Protocole de panification**

À partir de la synthèse du tableau 1 nous avons établi un diagramme général de panification (figure 4) comprenant les paramètres à tester suivant l'intervalle de variation (minimum- maximum) rapporté de la littérature ce qui constituera le protocole adopté pour la panification de notre pain témoin (figure 5)

### **2. 8. 2. Indicateurs des paramètres optima**

La grandeur retenue du paramètre établie est celle qui confère à la pâte en fin de pétrissage les meilleures caractéristiques rhéologiques, i.e., de maniabilité, de consistance, hydratation et aspect. Egalement, le pain obtenu doit avoir un bon aspect et un bon développement mesurés par le volume (V), la masse volumique (M/V), la hauteur (H), la largeur à mi hauteur (L) et le rapport de forme H/L.

Nous avons effectué des essais préliminaires sur les taux des ingrédients pour préciser le pourcentage de chaque constituant par apport à la pâte.

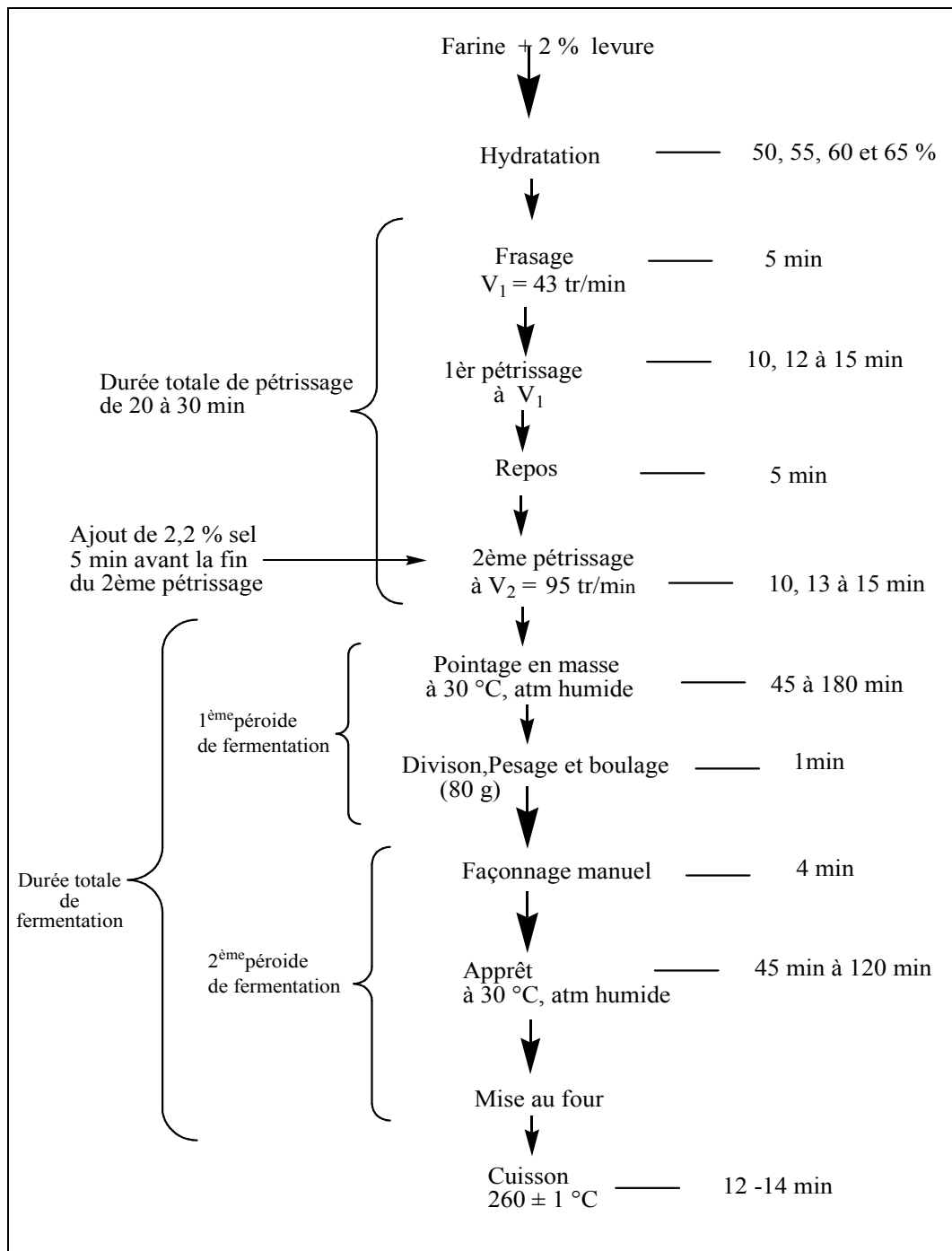
### **2. 8. 3. Variation des taux d'hydratation et durée de pétrissage**

Quatre taux d'hydratation de farine ont été testés ; 50, 55, 60 et 65 p. cent et trois durées de pétrissage total, 20 min, 25 min et 30 min ont été testés.

**Tableau 1.** Intervalles des paramètres de panification suivant la littérature de 1965 à 2007.

Paramètres de recherche	Références							
	LECOQ 1965	GUINET 1979	CALVEL 1984	ROUSSET et LOISEL 1984	AFNOR 1991	GUINET et GODON 1994	NAMOUNE 1996	JEANTET 2007
Taux de sel (p. cent)	—	1,8 - 2,1	2,2	2,2	2,2	1,8 à 2,2	2,2	1,8 - 2,2
Taux de levure (p. cent)	—	2	1,2	2,5	2,5	1 à 2	2	1,5 à 3
Taux d'hydratation (p. cent)	60 à 70	60	60	—	Appréciation manuelle	60 à 63	70	60
Durée Pétrissage (min)	—	PVL 10 PI 20	18 à 20	—	21 à 25	15 à 21	≥ 20	10 à 25
Durée de 1 <sup>ère</sup> Fermentation (min)	60 à 120	60 à 120	40 à 60	60 à 27 °C	45	45-90 -180	60 à 28 °C	40 à 180
Durée de 2 <sup>ème</sup> fermentation (min)		40 à 60	120 à 150	120 à 27 °C	60	60 - 90- 120 - 150- 240	60 à 36 °C	60 à 180
Température et durée de Cuisson	220 à 250 °C 35 à 60 min	—	—	260 °C 20 à 25 min	260 ± 10 °C	220 à 250°C	240°C à 45 min	—

PVL : pétrissage à vitesse lente, PI : pétrissage intensif, min : minute.



**Figure 4.** Schéma général de panification du pain témoin avec la variation des intervalles des paramètres. ( $V_1$ = première vitesse,  $V_2$  = deuxième vitesse)



#### **2. 8. 4. Durée de fermentation**

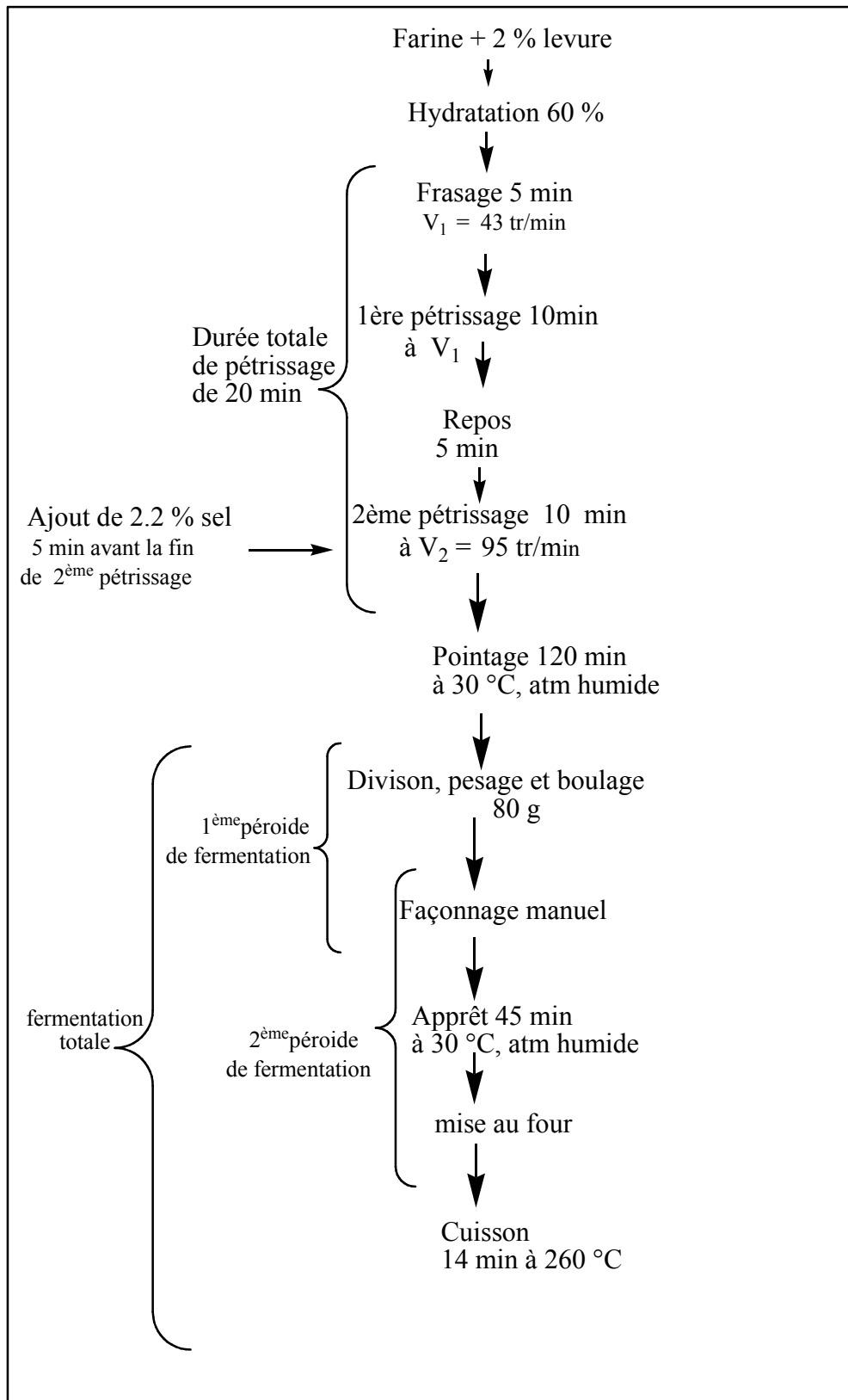
Le taux d'hydratation et le temps de pétrissage étant fixés sur la base de la qualité de la pâte obtenue à la fin du pétrissage nous avons recherché le couple de fermentation temps de pointage / temps d'apprêt (Pt/App) optimum.

Chacune des durées de première fermentation, pointage ou fermentation de masse qui en compte sept (7) durées, 45, 60, 75, 90, 105, 120 et 180 minutes sont testés avec chaque temps de deuxième fermentation ou apprêt qui compte six (6) durées, 45, 60, 75, 90, 105 et 120 min. Au total 42 couples Pt/App sont essayées avec 4 répétitions, soit au final 168 essais sur le témoin. En plus, dans deux essais préliminaires, la fermentation unique a été testée (Pt/0, 0/App).

#### **3. Protocole de fabrication de pain témoin**

Le protocole adopté pour notre test de panification tient compte des caractéristiques du pétrin, notamment la vitesse et sa possibilité de variation, la puissance, l'échauffement du dispositif et la capacité (figure 5).

La panification du témoin commence par le mélange des ingrédients à faible vitesse, suivent en suite les trois principales étapes, pétrissage, fermentation et cuisson.



**Figure 5.** Protocole de fabrication du pain témoin,  $V_1$  : première vitesse,  $V_2$  : deuxième vitesse.

### 3. 1. Essais préliminaires du pétrin

Le pétrin utilisé de marque Kenwood KM 02 a une capacité de 2,4 Kg de pâte, développe une puissance nominale de 1500 W et possède une variation de vitesse à points discontinus ( $V_{\min}$ ,  $V_1, \dots, V_6$ ). L'élément de pétrissage est en forme de crochet, en métal inox, à rotation hélicoïdale en mouvement planétaire (figure 6) dans une cuve fixe en inox.



**Figure 6.** Photographie du pétrin Kenwood KM 02, **A** : pétrin, **B** : crochet à pâte.

#### 3. 1. 1. Vitesse du pétrin

Les vitesses en tours/min n'étant pas indiquées sur l'appareil, ni dans la fiche technique fournie, nous avons procédé à la détermination de ces vitesses, au moyen d'un chronomètre.

Le mouvement hélicoïdal du crochet se fait en deux temps. Le premier est une rotation coaxiale au rayon du crochet et dans le deuxième temps, le crochet tourne hélicoïdalement en balayant en quatre positions sur la périphérie de la cuve. Aussi, en prenant un repère fixe, pour un point de vitesse donnée, dans un intervalle de temps d'une minute, le nombre de rotation correspond à une vitesse de rotation totale égale à 4 fois le nombre de tours comptés. La mesure des vitesses est réalisée dix fois. Les vitesses  $V_{\min}$  de 43 tr/min et  $V_1$  de 95 tr/min seront considérées pour notre travail et seront indiquées, respectivement  $V_1$  et  $V_2$ .

**Tableau 2.** Vitesse mesurées du pétrin Kenwood KM 02

Repère de vitesse	Vitesses (tr/min) moyenne $\pm$ E.T.
$V_{\min}$	$43 \pm 2$
$V_1$	$95 \pm 3$
$V_2$	$160 \pm 5$
$V_3$	$240 \pm 5$
$V_4$	$325 \pm 10$
$V_5$	$400 \pm 11$
$V_6$	$500 \pm 15$

### 3. 1. 2. Choix des vitesses à mettre en œuvre

Après le frassage qui se fait à une vitesse minium, le pétrissage pratiqué habituellement (AFNOR 1991; CALVEL 1984) se fait en deux temps. D'abord à une vitesse ( $V_1$ ) de 40 tr/min pendant 15 min (5 min de frassage et 10 min pour le premier pétrissage) puis à une vitesse ( $V_2$ ) de 80 tr/min pendant 10 min pour le deuxième pétrissage. Le critère de choix des vitesses consiste à avoir dans le premier temps un bon pétrissage à la vitesse  $V_1$ , puis dans la deuxième période, les caractéristiques rhéologiques appréciées au toucher et à l'aspect doivent se développer avec une température enfin de pétrissage ne dépassant pas 30 °C, comme indiqué par la norme NF V03-716 (AFNOR 1991)

### 3. 2. Frassage

Une quantité de 300 g de farine est pesée sur une balance technique (marque OHAUS, précision  $\pm 1$  g et mise dans la cuve du pétrin avec 2 p. cent de levure sèche et 60 p. cent d'eau par apport au poids de la farine à 15 p. cent de taux d'humidité, soit 6 g de levure et 180 g d'eau. Le mélange est homogénéisé 5 min à une vitesse  $V_1 = 43$  tr/min.

### 3. 3. Pétrissage

Considérant les exigences de la norme NF V03-716 (AFNOR 1991), nous avons retenu la vitesse  $V_1$  ( $V_{\min}$  sur le pétrin) de 43 tr/min comme première vitesse au frassage et de premier temps de pétrissage et la vitesse  $V_2$  ( $V_1$  sur le pétrin) de 95 tr/min comme

deuxième vitesse de deuxième temps de pétrissage. Les deux phases de pétrissage, de durées égales de 10 min, sont intercalées d'une période de repos de 5 min.

L'ajout du sel, 2,2 p. cent (6,6 g) du poids de la farine (15 p. cent d'humidité) mise en œuvre se fait à 5 min avant la fin du deuxième temps de pétrissage. La température de pétrissage est relevée au moyen du thermocouple de marque T/As Jenway, model 220 K tout au long du pétrissage, elle n'a pas dépassé 30 °C en fin de pétrissage ce qui justifie le choix des vitesses.

### **3. 4. Fermentation**

La fermentation est réalisée dans une étuve de marque MEMMERT model 700, de 0,15 m<sup>3</sup> de volume utile, munie de plateaux perforés pour faciliter la répartition uniforme de la chaleur dans toute l'enceinte. Nous avons humidifié l'atmosphère par pulvérisation d'un brouillard d'eau, pour éviter le croûtage de la pâte tout au long de la fermentation qui comprend deux périodes:

- La première période comprend la fermentation en masse ou pointage, dont la durée est recherchée, la division, le pesage des pâtons de 80 g et le boulage.
- La deuxième période de fermentation comprend :
  - Le façonnage manuel des pâtons sous forme des petits pains de 12 cm de longueur qui sont ensuite disposés sur un plateau métallique préalablement pulvérisé par un film de farine pour éviter le collage de la pâte.
  - L'apprêt ou deuxième fermentation dont la durée est recherchée, dans une étuve réglée à  $30 \pm 2$  °C dans une atmosphère humidifiée.
  - La mise au four, où dès l'entrée dans le four les pâtons gonflent et continuent de fermenter pendant les premières minutes avant que la température au cœur du pâton n'atteigne 55 °C.



**Figure 7.** Photographie de pâton fermenté.

### 3. 5. Cuisson

La cuisson est effectuée dans un four électrique de Marque XTS International, série E, modèle F<sub>1</sub>/ 90 E, de dimensions externe 90 x 1020 x 420 mm, et de 610 x 915 x 140 mm de dimension de la chambre de cuisson (figure 8). D'une puissance électrique 7,2 KW, il peut atteindre une température de 500 °C. Il est muni de deux résistances indépendantes thermostatées. La première résistance est située sous le plancher en briques réfractaires procurant un transfert par conduction. La deuxième, en contact direct avec l'air de l'enceinte de cuisson, est située au plafond et fournit un chauffage par rayonnement et convection.



**Figure 8.** Photographie de four électrique (90 x 1020 x 420 mm)

La cuisson est réalisée dans le four préalablement chauffé à une température de  $260 \pm 1$  °C. Elle est achevée dès l'obtention d'une croûte bien colorée après environ 12 - 14 min. Dès leur sortie du four les pains sont légèrement pulvérisés d'un brouillard d'eau pour avoir un aspect brillant. Notons que chaque essai comprend huit pains cuits qui seront analysés pour leurs caractéristiques afin de déterminer les paramètres optima de panification.

#### **4. Fabrication de pain à partir de pâte fermentée Congelée**

Le schéma global de la fabrication de pain à partir de pâte fermentée et congelée suit les mêmes étapes que la panification normale du témoin (figure 5), jusqu'au stade de façonnage. Après la fermentation, il est procédé à la congélation des pains crus.

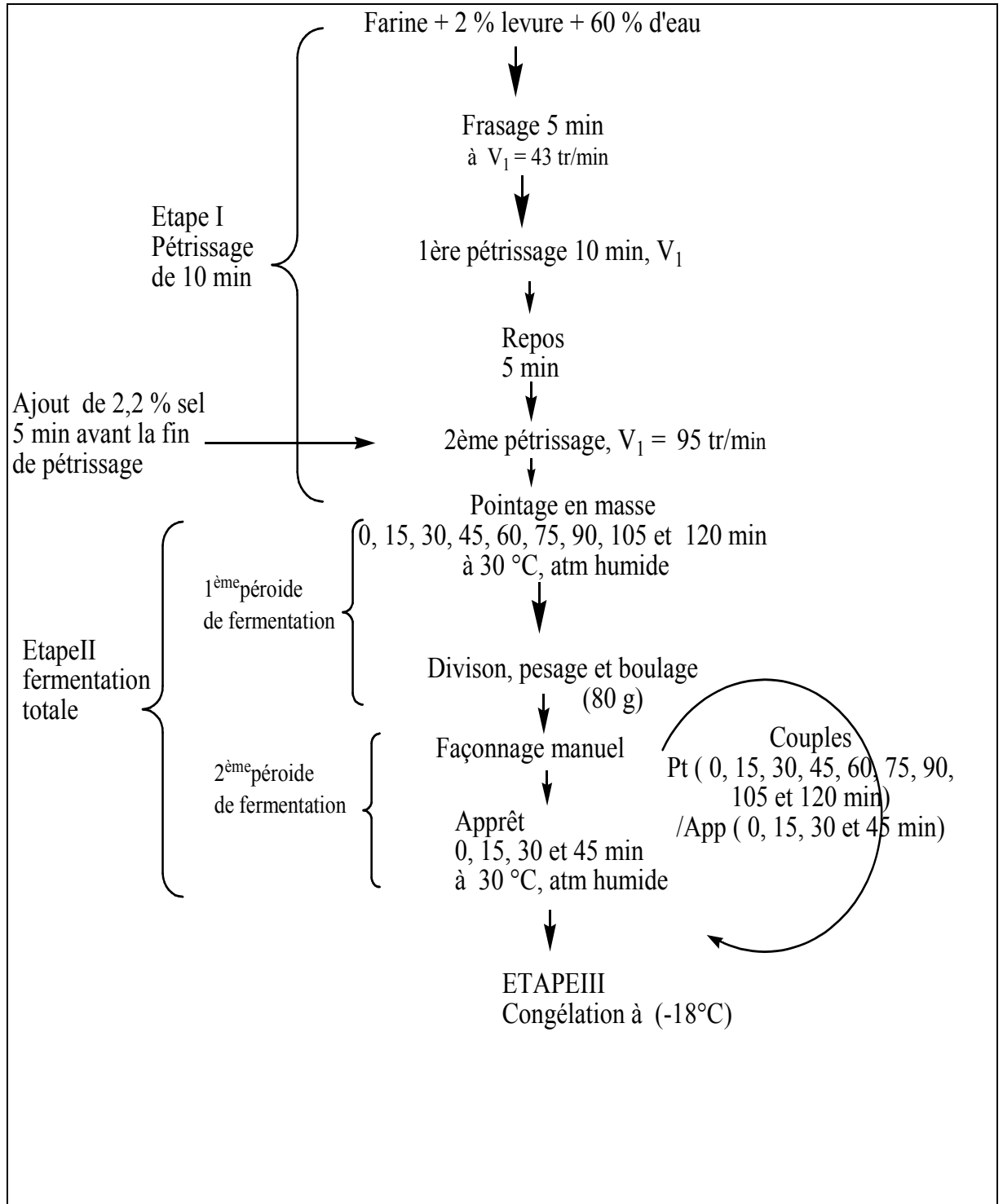
La fermentation optimale en vue de la congélation est recherchée. Les temps de pointage testés sont 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 et 120 min, chaque temps de pointage est testé avec les temps d'apprêt 0, 15, 30 et 45 min. Cet intervalle de durées d'apprêts est préconisé par GUINET et GODON (1994) dans la panification française des pâtes préfermentées congelées (figure 9). Les meilleurs couples Pt/App de fermentation sont comparés pour retenir le couple optimum correspondant au meilleur pain obtenu selon le type de décongélation. Faisons remarquer que l'apprêt est fixé au maximum à 45 min. Il est recommandé pour les pâtes pré-poussées à congeler que cette deuxième fermentation doit être bloquée entre 1/3 et 1/2 de la fermentation complète (HANNEFORTH et al. 1994) ou du 3/4 de l'apprêt complet (LANGRAF 2002).

##### **4. 1. Congélation de la pâte fermentée crue**

La fabrication des pâtons façonnés et levés étant maîtrisée, leur congélation reste à optimiser pour bloquer la fermentation des pâtes et programmer ultérieurement la pousse et la cuisson après décongélation (Association Française de Froide 1995). La congélation est effectuée dans un congélateur de marque FRIGOR RC 340 à trois compartiments. La température (-18 °C) est contrôlée au moyen d'un thermocouple (T/As Jenway, model 220 K).

##### **4. 2. Décongélation de la pâte fermentée façonnée**

À la différence d'un aliment surgelé traditionnel, la pâte à pain doit subir une décongélation pour préserver simultanément la capacité de la levure à produire du CO<sub>2</sub>. Le volume donc, et les propriétés biophysiques des pâtons à retenir le CO<sub>2</sub> dégagé. Avant cuisson, la décongélation est aussi testée suivant quatre modes, au réfrigérateur à 5 °C, à température ambiante (25 °C), à 40 °C dans l'étuve ou mise au four directement sans décongélation préalable (figure 10).



**Figure 9.** Etapes de fabrication du pain à partir de pâte fermentée et congelée.



#### **4.2.1. Contrôle et suivi de la décongélation**

Pour tous les modes de décongélation, la procédure de suivi est la même. Sur quatre échantillons, l'évolution de la décongélation est observée toutes les cinq minutes au moyen d'une sonde métallique en inox de 10 cm de longueur et de 0,2 mm de diamètre. Le pâton est transpercé perpendiculairement, en son centre, avec une légère pression. La progression de la sonde sans résistance dans la masse de pâton indique la disparition des cristaux de glace. La durée de décongélation est obtenue ainsi à 5 min près. Pour plus de précision d'autres essais sont effectués avec cette même durée de décongélation, mais la tranche des cinq dernières minutes est vérifiée toutes les minutes.

- **Décongélation au réfrigérateur à 5 °C**

Les échantillons sont mis à décongeler dans le compartiment le plus bas, correspondant à la température de 5 °C contrôlée au thermocouple.

- **Décongélation à température ambiante 25 °C**

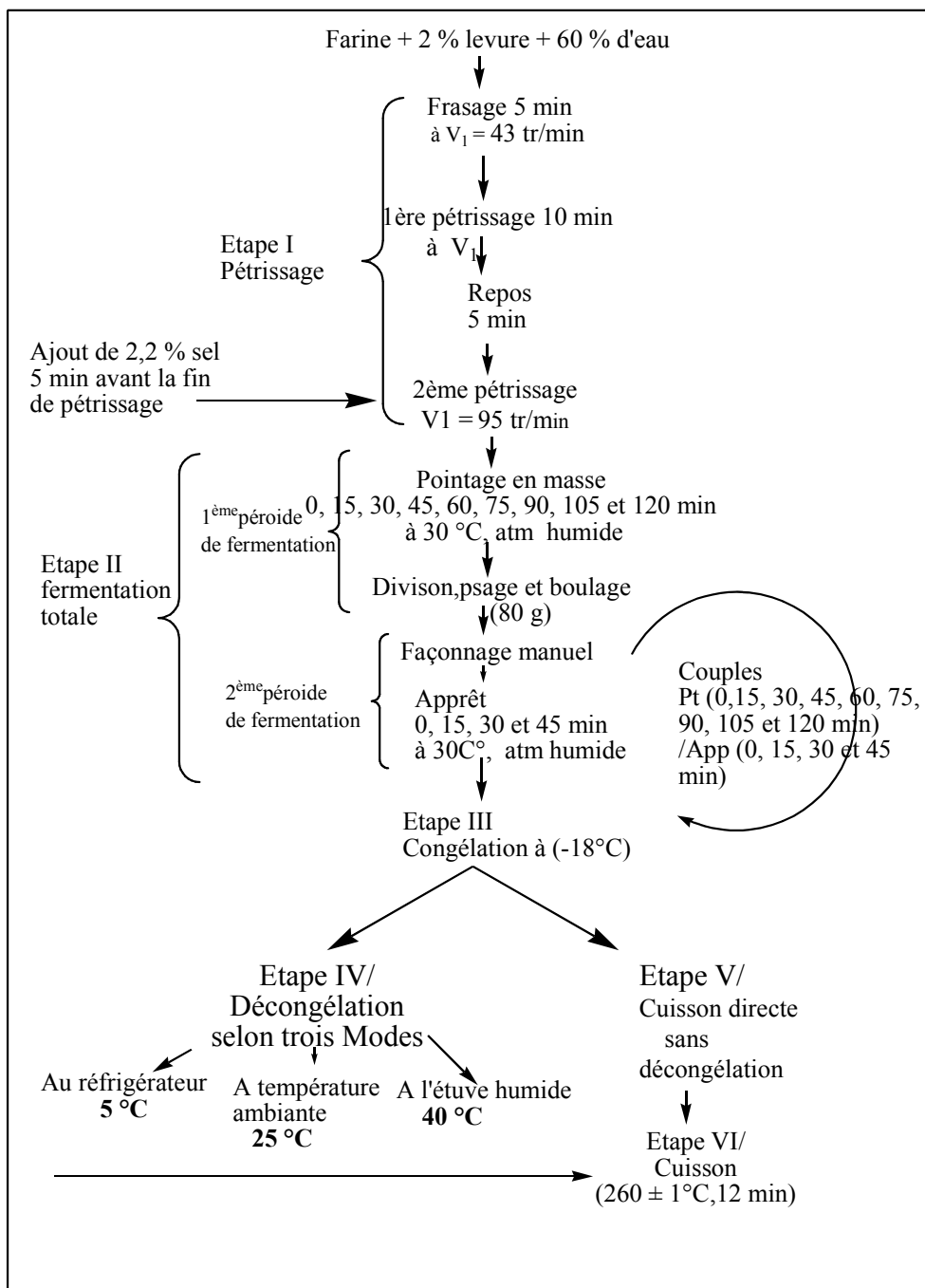
Au préalable et durant tout le temps de décongélation, la température ambiante est contrôlée pour la maintenir à 25 °C au moyen du conditionneur d'air du laboratoire. Le plateau contenant les pâtons est recouvert d'un couvercle en carton, surélevé de 15 cm de la surface des pâtons, pour créer une enceinte humidifiée par un spray d'eau durant la décongélation afin d'éviter le dessèchement et la formation de croûte à la surface des pâtons.

- **Décongélation à l'étuve réglée à 40 °C**

D'après CHARGLEGUE et al. (1994) dans une plage de 20 à 40 °C, une élévation de température de la pâte de 1°C, entraîne une augmentation de la vitesse de fermentation de 8 à 12 p. cent. La température d'activité optimale de la levure est de 30 à 35 °C, au dessus de 55 °C la levure est détruite. Afin d'activer la décongélation par rapport à celle effectuée à température ambiante, nous avons retenu, après dix essais préliminaires, la température de 40 °C; à cette température ni la surface, ni l'intérieur de pâtons n'atteint 35 °C.

- **Décongélation directe au four de cuisson**

Dans cet essai, les pâtons de pâte façonnés et pré-fermentés sont cuits directement à  $260 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , sans décongélation préalable.



**Figure 10.** Panification, décongélation et cuisson de la pâte fermentée et congelée.

#### **4. 2. 2. Evaluation du test de panification**

Les paramètres de panification recherchés sont déterminés par l'appréciation de la panification à deux niveaux principalement, la qualité de la pâte après pétrissage et la qualité du pain obtenu.

##### **4. 2. 2. 1. Qualité de la pâte**

La pâte est appréciée visuellement, lors du pétrissage et à la fin de celui-ci en observent l'évolution de la couleur, du blanc-grisâtre au blanc, et sa tendance éventuelle à coller aux parois de la cuve du pétrin. Au toucher, nous apprécions la finesse, l'hydratation, l'élasticité, l'extensibilité et sa maniabilité.

##### **4. 2. 2. 2. Qualité du pain**

L'appréciation est commune au pain témoin et à celui obtenu après congélation de la pâte pétrie et fermentée, elle comprend deux approches complémentaires portant sur des critères quantifiés par des scores en fonction de la qualité croissante de 0-5. La somme des scores des deux approches permet de classer les pains.

###### **4. 2. 2. 2. 1. Approche semi-quantitative ou subjective**

Une heure après cuisson, le pain entier, la croûte et la mie sont appréciés sensoriellement, donc de façon subjective, sur l'aspect général du pain, volume, forme rond ou plat, la couleur (rouge, brune, pâle ...) et la finesse de épaisseur de la croûte.

Sur la mie nous apprécions la couleur blanche, crème ou grise, la texture aérée, serrée et l'importance et la régularité de l'alvéolage. Au toucher nous observons le collant éventuel de la mie et son élasticité appréciée par le retour à l'état initial après compression entre les doigts.

#### **4. 2. 2. 2. Approche quantitative objective**

Également, une heure après la cuisson, le poids du pain ( $M \pm 1$  g) est mesuré et le volume est estimé indirectement par déplacement d'un volume  $V$  de grains de couscous à granulométrie fine. La masse volumique ( $M/V$ ) en  $\text{g/cm}^3$  est calculée. La hauteur ( $H$ ) de la section du pain au milieu, ainsi que la largeur ( $L$ ) de cette section à mi-hauteur sont mesurées et le rapport de forme  $H/L$  est calculé. La moyenne de ces deux grandeurs nous fournit un score (sans unité) permettant, à notre sens, de mieux apprécier le développement ce que nous appelons couramment le volume du pain.

D'autre part des photos des pains entiers et des coupes sont prises pour les illustrations

#### **4. 2. 2. 3. Jugement des caractéristiques qualitatives des meilleurs pains**

Le jugement des caractéristiques du pain, le volume, l'aspect extérieur du pain et de la mie est effectué une heure après la sortie de four. Nous avons utilisé la grille de notation (figure 11) de la méthode BIPEA (bureau interprofessionnel d'études analytiques), norme V 03 -716 (AFNOR 1991) préconisée par ROUSSEL et CHIRON (2002).

Les notes 1, 4, 7 et 10 sont attribuées; si la caractéristique jugée paraît présenter un défaut par excès, l'appréciation sera notée dans la partie excès (+), par contre si elle paraît présenter un défaut par insuffisance, l'appréciation sera notée dans la partie insuffisance (-). La note 10 étant le caractère normal de référence.

### **5. Fermentation de la pâte lors et après décongélation**

#### **5. 1. Dispositif de mesure et procédé**

La recherche des paramètres optima de panification à partir de pâte congelée, inclut également le suivi de la fermentation lors de la décongélation, pour en déterminer l'optimum avec les trois modes de décongélation.

Interprétation	Excès (+)			N	Insuffisance (-)			Principe de calcul				
	1	4	7		7	4	1	des notes				
<b>OBSERVATION et notes</b>				10				Total=	/3			/30
<b>VOLUME DES PAINS</b>								X 1				
Section								X 2				
Couleur								X 0,5				
Epaisseur								X 0,5				
Croustillant								X 1				
Coup : développement								X 1				
De : régularité								X 1				
Lame : déchirement								X 1				
<b>ASPECT DU PAIN</b>								Total =		X cof (*)		/ 70
	Principe des mesures								Total pain			/100
Couleur								X 1				
Texture : souplesse								X 1				
Elasticité								X 1				
Collant								X 1				
Alvéolage : Régularité								X 1				
Epaisseur								X 1				
Odeur : Flaveur								X 4				
<b>ASPECT MIE</b>								Total =		Total mie		/100
Principe des mesures									Valeur boulangère			/200

**Figure 11.** Grille d'appréciation de la qualité du pain (norme V03. 716, AFNOR, 1991).

(-) : signe négatif signifie l'insuffisance de caractère, (+) : signe positif signifie l'excès de caractère, N : normal, x ... : multiple par un coefficient spécifique au caractère précisé, 10 : jugement normal du caractère, 7 : si la caractéristique est un peu excessive (insuffisance), selon le signe (+) ou (-), 4 : si la caractéristique est excessive (insuffisance), 1 : si la caractéristique est très excessive (insuffisance).

Afin de contrôler et de suivre la cinétique de fermentation, nous avons mis au point un dispositif inspiré du mesureur de pousse (NF V03-716. AFNOR 1991). Le dispositif comprend:

- une chambre de pousse en verre translucide de forme cylindrique ayant 120 mm de hauteur et 60 mm de diamètre interne. La paroi externe de la chambre comporte une graduation en mm sur toute sa hauteur.
- Un piston à base circulaire pour déposer un échantillon de 30 g de pâte de forme ronde (60 mm de diamètre) et 2 cm de hauteur dans la chambre de pousse.
- Un disque de 58 mm de diamètre et de 5 poids déposé sur la surface de la pâte pour permettre un niveau plat et horizontal durant la levée.

Le disque coulis au fur à mesure de la fermentation, joue le rôle d'indicateur du niveau de levée de la pâte (figure 12).



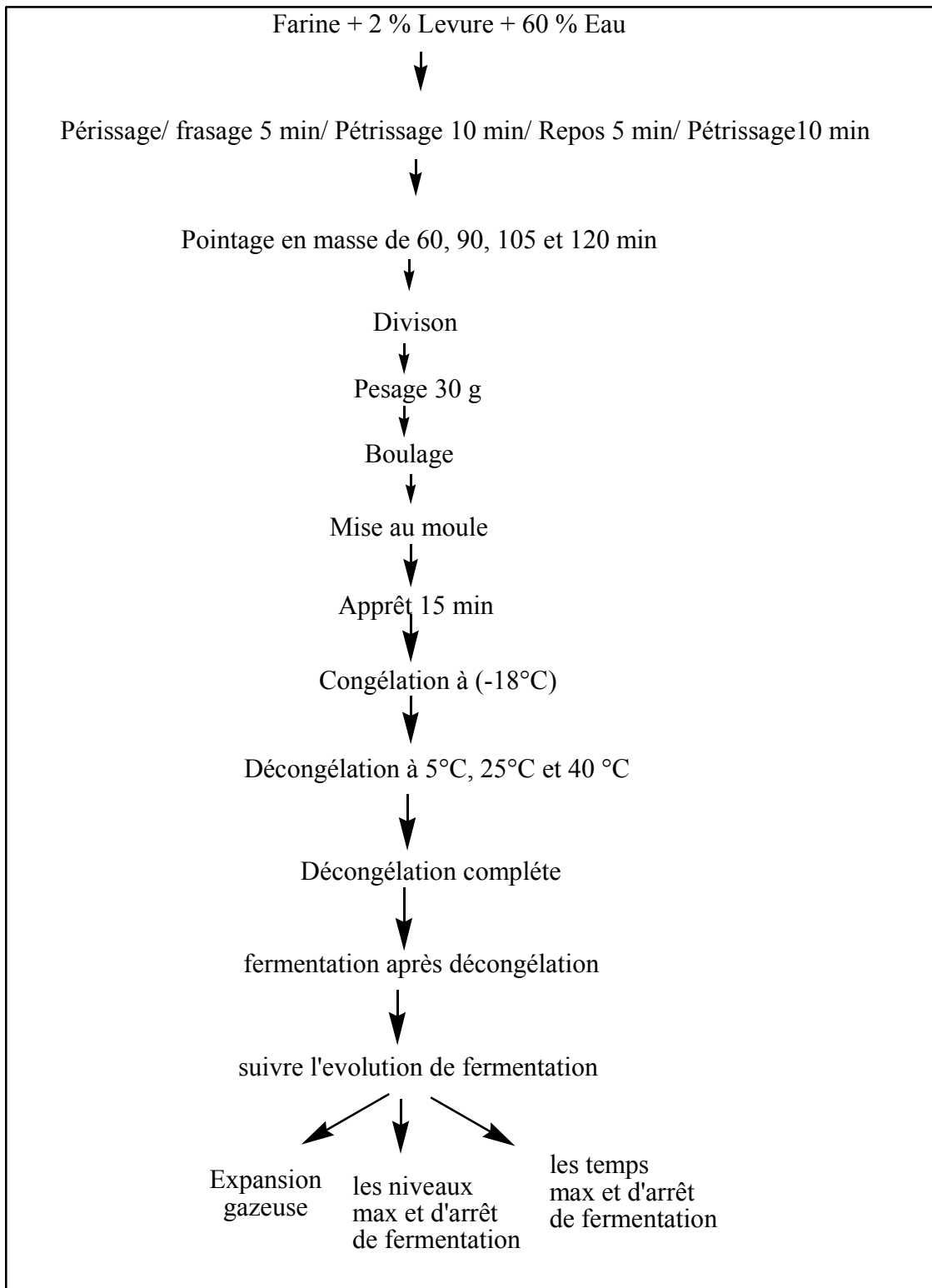
**Figure 12.** Mesureur de pousse

Pour les couples Pt/App de fermentation avant congélation ayant donné les meilleurs résultats de panification, nous avons étudié l'évolution de la fermentation lors de la décongélation au réfrigérateur à 5 °C, à température ambiante à 25 °C et à 40 °C à l'étuve.

## **5. 2. Courbes de fermentation de la pâte décongelée**

L'évolution de la fermentation est relevée à l'intervalle réguliers de 5 mm durant toute la décongélation et poursuivie jusqu'à la fin de la levée (figure 13). Des courbes sont tracées pour déterminer le profil, la vitesse, la fin et la stabilisation et la décroissance de la fermentation.

La variation de la vitesse ( $dx/dt$ ) en fonction du temps est étudiée. Le modèle mathématique qui s'ajuste au mieux à la courbe est recherché.



**Figure 13.** Schéma de mesure de la fermentation après décongélation à 5 °C, 25 °C et 40 °C.

## 6. ANALYSE DES DONNEES

Le traitement des résultats, des données est effectuée avec Microsoft Excel 2007. L'analyse statistique est réalisée par les logiciels NCSS (V 6.0.9, 1995) et Statistica 6.0 (StatSoft 2002). Le seuil de signification est fixé à 0.05.

La normalité des distributions observées est vérifiée par le tracé de la droite de Henry, avec l'écart réduit de la variable en ordonnée et cette même variable en abscisse. L'alignement avec une bonne corrélation des points sur une droite indique la normalité (GELLER 1983)

La comparaison entre deux moyennes est effectuée par le test de Student quand il s'agit d'effectif inférieur à 30 et le test de l'écart réduit pour l'effectif  $\geq 30$ . Pour comparer plusieurs moyennes et pour la recherche des effets principaux des facteurs et de leurs interactions nous avons utilisé l'analyse de la variance (ANOVA). Quand cette analyse est significative, le test de Tukey a été effectué dans la comparaison multiple (GEOFFREY KEPPEL 1982). La recherche de lien éventuel entre deux grandeurs est objectivée à l'aide du test de corrélation linéaire simple.

Pour déterminer les niveaux des facteurs (minimum-maximum) nous avons eu recours à l'analyse des surfaces de réponse (ASR). L'ASR construit un modèle de régression polynomiale avec des produits de croisement des termes des variables pouvant être élevées au troisième ordre. Ce modèle permet de calculer le minimum ou le maximum de surface. Le but est de trouver une approximation polynomiale du modèle non-linéaire réel. Il permet ainsi une approximation du modèle par région (surface). Dans une région restreinte l'approximation est linéaire (premier ordre), une zone plus large peut demander une approximation de deuxième ordre. Les niveaux des facteurs, la masse volumique (M/V) la plus faible et le rapport de forme (H/L) le plus élevé par exemple, appartenant au modèle de croisement d'une surface de réponse donnée sont ainsi déterminés.

L'analyse d'un ensemble de variables simultanément nécessite l'analyse en composantes principales (ACP). Celle-ci permet de détecter, sur un grand nombre d'observations, les similitudes, les différences et les interrelations entre variables. Les individus, rapports pointage/apprêt par exemple, sont également regroupés selon leurs similitudes ou différences (SETSER 1996 ; STRIGLER et al. 1998).



*Résultats*  
*et*  
*Discussion*

## RESULTATS ET DISCUSSION

La farine utilisée, même si certaines caractéristiques sont données par le producteur, doit être caractérisée pour ajuster au mieux les paramètres de panification.

### 1. CARACTERISATION DE LA FARINE

Hormis l'humidité, les résultats sont exprimés en p. cent de la matière sèche pour nous permettre de faire des comparaisons objectives et d'éviter les biais apportés par les différences d'humidité.

#### 1. 1. Teneur en eau

La détermination de la teneur en eau est réalisée afin de permettre par la suite une comparaison des résultats aux travaux antérieurs et aux normes. L'humidité de la farine de blé déterminée dès sa réception, elle est en moyenne  $15,28 \pm 0,01$  p. cent. La bonne préservation a fait que la teneur n'a que très peu variée durant les six mois de notre travail expérimental (tableau 3).

**Tableau 3.** Teneur en eau en (p. cent) de la farine durant la durée expérimentale

	Réception	30 jours	180 jours
Echantillon 1	15,29	15,14	15,11
Echantillon 2	15,27	15,16	15,12
Echantillon 3	15,28	15,18	15,13
Moyenne* $\pm$ écart type	$15,28 \pm 0,01$	$15,16 \pm 0,02$	$15,12 \pm 0,01$

\*: différence significative entre période,  $p < 0,05$ .

En général, les farines boulangères ont une teneur en eau de 13 à 15 p. cent (CALVEL 1984). La teneur en eau moyenne de notre échantillon est considérée conforme aux normes.

#### 1. 2. Teneur en cendres totales

La teneur en cendres de notre farine (tableau 4), en moyenne de  $1,15 \pm 0,01$  p. cent à la réception, a très peu varié. Elle se situe dans l'intervalle des farines normales,

entre 1 et 1,2 p. cent (VERLING 1999). Avec cette teneur elle correspondant à une farine bise et se classe dans le type 110 (CALVEL 1984)

**Tableau 4.** Teneur en cendres (p. cent) durant la durée expérimentale

	Réception	30 Jours	180 Jours
Echantillon 1	1,15	1,18	1,2
Echantillon 2	1,16	1,17	1,18
Echantillon 3	1.15	1,17	1,18
Moyenne* ± écart type	1,15 ± 0,01	1,17 ± 0,01	1,19 ± 0,01

\* : différence significative entre période,  $p < 0,05$ .

### 1. 3. Protéines

La teneur en protéines totales de notre farine est en moyenne de  $10,09 \pm 0,94$  p. cent, dans les blés cette teneur varie de 7 à 15 p. cent (GRANDVOINNET et PRATX 1994). D'après FEILLET et ces collaborateurs (1994), la qualité culinaire du pain s'améliore avec un taux de protéine élevé. Un seuil minimum de 10 p. cent est nécessaire pour une farine panifiable de qualité (TAUPIER-LETAGE 2005).

### 1. 4. Taux de gluten et sa caractérisation

Nos échantillons renferment en moyenne  $18,5 \pm 0,75$  p .cent de gluten humide, cette valeur est inférieure au minimum de l'intervalle 24 à 30 p. cent de gluten humide des farines panifiable. Le gluten sec représente en moyenne  $8,00 \pm 0,46$  p. cent, cette teneur correspond au taux qui varie de 7 à 11 p. cent des glutens secs des farines panifiable. Au vu de ces résultats, on peut considérer que cette farine comme riche en gluten.

La capacité d'hydratation calculée est en moyenne de  $57 \pm 0,01$  p. cent. Ce taux d'hydratation, comparable à celui de gluten d'une farine normale qui est d'environ 66 p. cent. Elle est fonction de la qualité de blé et peut atteindre dans certain cas 69 p. cent. La capacité d'hydratation du gluten intervient dans l'absorption d'eau au cours de pétrissage en boulangerie (CALVEL 1984).

Le gluten de notre farine est de couleur grise. Par évaluation manuelle, nous

avons estimé qu'il est ferme, tenace et peu élastique. Pour ces caractéristiques il est de qualité moyenne (HERRERO & ETIENNE 2009)

### **1. 5. Acidité**

Le pourcentage d'acidité est  $0,03 \pm 0,01$  p. cent, il correspond à une concentration de 0,03 g d'acide sulfurique dans 100 g de farine. Cette acidité ne dépasse pas la teneur limite  $\mu = 0,05$  p. cent ; au delà la qualité de gluten se trouve altérée (TALANTIKIT 1991 ; CALVEL 1984). Notre farine n'a pas subi de dégradation de la sa matière grasse, preuve de sa fraîcheur et sa bonne préservation.

### **1. 6. Granulométrie**

Le pourcentage de refus au tamis d'ouverture de mailles de 200  $\mu\text{m}$  est 6,42 p. cent. Ce pourcentage est proche de la normale correspond à 6 p. cent du grain de blé, alors notre farine a une forte teneur en piqûres correspond au fin finot normal (UGRINOVITS et al. 2004). En boulangerie, la quantité d'eau absorbée, ainsi que la vitesse d'absorption d'eau augmente avec la finesse des particules de farine (COLAS & PETEL 1984).

### **1. 7. Caractérisation plastique de la farine par l'Alvéographe Chopin**

La force de la farine est une caractéristique technologique qui conditionne la qualité du produit fini et qui est le plus généralement appréciée au moyen de travail de déformation (W) de l'Alvéographe Chopin.

La farine utilisée pour nos essais, se caractérise par un travail de déformation (W) de  $180,17 \times 10^{-4}$  joule (tableau 5), ce qui la classe comme farine de bonne force boulangère selon les normes algériennes J.O.R.A. 1991 (W entre 130 et  $180 \times 10^{-4}$  joule). Au vue de la courbe l'alvéogramme reste cependant d'une allure légèrement déséquilibré (figure 14). Avec un gonflement (G) relativement faible de  $17,26 \text{ cm}^3$  et une ténacité (P) de 77,66 mm est très élevée. La norme recommande une ténacité supérieure à 45 mm. Cette forte ténacité indique de grandes capacités d'absorption d'eau, résistance et élasticité de la pâte (VERLING 1999). L'extensibilité (L) de 60 mm,

très faible dont un rapport de configuration de la courbe (P/L) de 1,29 est supérieur à celui exigé ( 0,45 et 0,65) par la réglementation algérienne ( J.O.R.A. 1991). Ce rapport pourrait s'expliquer par la valeur de la ténacité ou résistance élastique élevée de cette farine. Les propriétés de la pâte sont étroitement liées à la teneur en gluten et ses caractéristiques rhéologiques (TALANTIKIT 1991).

Les données Alvéographiques, ainsi que les appréciations manuelles, élasticité et plasticité, du gluten sont compatibles et indiquent que notre farine présente des propriétés rhéologiques moyennes. Cette farine a été retenue justement par ce qu'elle nous permet de mener des essais de panifications de pâte fermentée et congelée. Avec une farine de force, nous risquons de ne pas observer de variations significatives.

**Tableau 5.** Caractéristiques de la farine.

<b>Caractéristique</b>	<b>Valeur</b>
Teneur en cendres	1,15 ± 0,01 p. cent
Teneur en protéines	10,09 ± 0,94 p. cent
Acidité	0,026 p .cent
Granulométrie	6,42 p .cent
Humidité	15,28 p .cent
Ténacité P	77,66 (mm H <sub>2</sub> O)
Indice de gonflement G	17,26 cm <sup>3</sup>
La force de la farine W	180,15 x 10 <sup>-4</sup> joule
Extensibilité L	60 mm
Rapport de configuration (P/L)	1,29
Gluten humide	18,5 ± 0,75 p .cent
Gluten sec	8,00 ± 0,46 p .cent

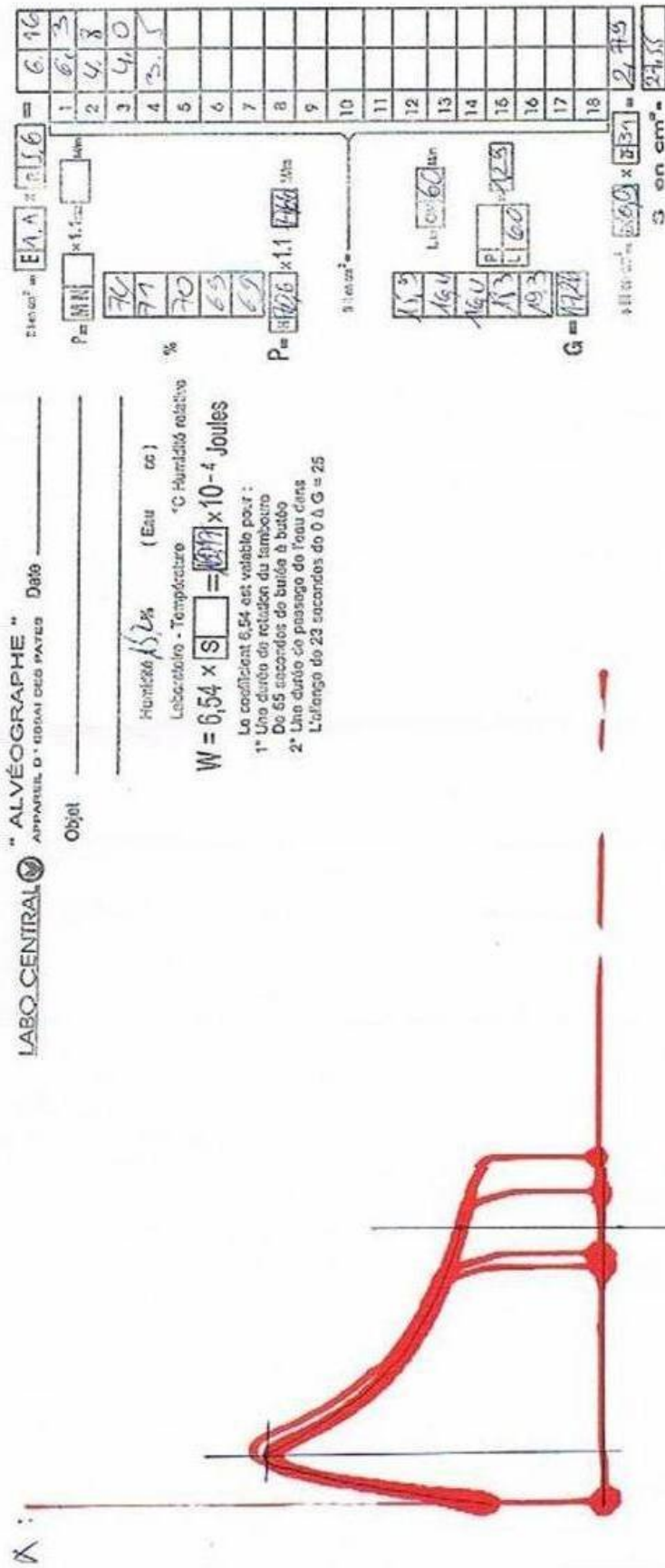


Figure 14. Alvéogramme de farine témoin

## **2. Tests de panification du pain témoin**

### **2. 1. Essais préliminaires**

#### **2. 1. 1. Taux des ingrédients**

Nous avons effectué des essais préliminaires sur les taux des ingrédients pour préciser le pourcentage de chaque constituant par apport à la pâte.

##### **2. 1. 1. 1. Taux de levure**

Pour connaître le taux de levure convenable à la fermentation de notre farine, nous avons testé la fermentation de la pâte avec des taux de levure de 2, 2,2 et 2,5 p .cent. Une bonne fermentation a été obtenue dans les trois cas. Cependant, une odeur accentuée de la levure a été remarquée avec des taux de 2,2 p .cent et 2,5 p .cent, ce qui n'est pas le cas avec 2 p .cent. Pour cette raison, nous avons fixé le taux de la levure à 2 p .cent dans nos tests de panification.

##### **2. 1. 1. 2. Taux de sel**

Pour déterminer le taux de sel convenable pour notre farine, nous avons testé l'ajout de sel à la pâte avec les taux 1,8, 2 et 2.2 p .cent.

Une bonne fermentation a été obtenue dans les trois cas. Cependant, la couleur pâle de la croûte avec un gout moins salé ont été remarquée avec des taux de 1,8 p .cent et 2 p .cent, ce qui n'est pas le cas avec 2,2 p .cent (couleur rouge de la croûte avec un bon gout). Pour cette raison, nous avons fixé le taux de la sel à 2,2 p .cent dans nos tests de panification.

##### **2. 1. 2. Taux d'hydratation**

Les teneurs en 50, 55, 60 et 65 p .cent (P/P) d'eau dans la farine sont testés pour la panification du témoin. Les taux 50 p .cent et 55 p .cent donnent une hydratation insuffisante de la pâte, sèche, difficile à manier et à ne fermente presque pas à la fin de pointage. Avec 65 p .cent d'eau la pâte est hydratée en excès et présente des propriétés physiques médiocres, collante, difficile à manier et exsude de l'eau en surface à la fin

du pointage.

L'hydratation semble optimale de notre farine est à 60 p. cent. La pâte obtenue a de bonnes propriétés plastiques. Elle est souple, tenace et conserve ses caractéristiques tout au long de fabrication. Son volume a doublé à la fin de pointage.

### 2. 1. 3. Temps de pétrissage

Le temps de pétrissage conditionne la force de la pâte et porte les propriétés plastiques à leur optimum (force et élasticité). Les temps de pétrissages testés sont de 20, 25 et 30 min.

La durée de pétrissage de 20 minutes donne les meilleures caractéristiques viscoélastiques, avant et après fermentation. Au-delà de ce temps la pâte devient collante et perd sa ténacité et se relâche

### 2. 1. 4. Autolyse

Le rapport de configuration P/L de la farine très élevé indique une grande ténacité de la pâte qui en résulte. Pour améliorer l'extensibilité de la pâte nous avons testé différentes durées d'autolyse (15, 30, 45 et 60 min) entre l'étape de frasage et le premier pétrissage. L'effet des temps d'autolyse sur les caractéristiques des pains obtenus est présenté dans le tableau 6.

**Tableau 6.** Caractéristiques des pains suivant les temps d'autolyse.

	Temps d'autolyse (min)				
	0	15	30	45	60
H/L	0,622 ± 0,054	0,683 ± 0,066	0,744 ± 0,018	0,710 ± 0,086	0,779 ± 0,092
M	66,125 ± 0,873	68,2 ± 0,294	68,65 ± 0,661	66,5 ± 1,086	67,675 ± 0,562
V	177,5 ± 5,00	165 ± 10	160 ± 11,55	150 ± 8,16	157,5 ± 5
M/V	0,373 ± 0,015	0,414 ± 0,024	0,431 ± 0,032	0,444 ± 0,020	0,430 ± 0,012

M : masse des pains en (g), V : volume des pains en (cm<sup>3</sup>), M/V : masse volumique en (g/cm<sup>3</sup>), H/L : rapport de forme (hauteur par rapport à la largeur à mi-hauteur)

Comparativement au témoin, l'autolyse améliore le rapport de forme H/L qui varie de 0,68 à 0,78 entre 15 et 60 min. le volume par contre est sensiblement diminué



par l'autolyse, il passe de 177,5 à 150 cm<sup>3</sup>. La masse volumique augmente conséquemment.

Les pains obtenus sont ainsi, rendus plus denses, l'autolyse ne serait pas bénéfique pour la panification de notre témoin.

### 2. 1. 5. Type de fermentation

Par ces essais préliminaires, nous tontons de déterminer le mode de fermentation à retenir dans la panification du témoin. Nous avons ainsi réalisé une fermentation unique avec seulement le pointage (Pt) à 120 min, et une deuxième fermentation avec un apprêt (App) de 120 min seulement. Nous avons considéré comme indicateurs de la qualité du pain obtenu la masse volumique M/V en (g/cm<sup>3</sup>) et le rapport de forme, entre hauteur (mm) et largeur (mm) à mi hauteur (H/L) (tableau 7).

La fermentation avec uniquement un pointage de 120 min donne un pain bien développé mais l'alvéolage de la mie est serré. Le pain obtenu avec un apprêt de 120 min sans pointage, est plat avec un alvéolage de la mie aéré (figure 15).

Pour notre farine les deux fermentations sont donc complémentaires, le pointage permet le développement du volume et apprêt contribue à l'alvéolage de la mie.

**Tableau 7.** Caractéristiques des pains obtenus de la fermentation unique.

	Pointage 120 min (App = 0)	Apprêt 120 min (Pt = 0)
M/V* (g/cm <sup>3</sup> )	0,478 ± 0,05	0,439 ± 0,041
H/L*	0,866 ± 0,06	0,372 ± 0,017
Aspect de la mie	Serre	Aérée

M/V : masse volumique, H/L : rapport de forme (hauteur par rapport à la largeur à mi hauteur)

\* : différence significative (t<sub>2</sub>, p < 0,05)



**A**



**B**



**C**



**D**

**Figure 15.** Photographie de fermentation unique.

**A** : pain avec pointage 120 min et sans apprêt.

**B** : pain avec apprêt 120 min et sans pointage

**C** : mie du pain de pointage 120 min et sans apprêt 0.

**D** : mie du pain d'apprêt 120 min et sans pointage 0.

## 2. 2. Paramètres de panification du témoin

La panification du pain témoin, suivant le schéma global précédemment décrit en méthodologie servira de référence de comparaison avec les pains obtenus à partir de pâte fermentée et congelée, objet de notre travail. Dans ce but, les paramètres de panification du pain témoin sont à rechercher.

### 2. 2. 1. Effet des taux d'hydratation

#### 2. 2. 1. 1. Caractéristiques de la pâte en fonction de l'hydratation

Nous avons testé l'hydratation de la farine avec 50, 55,60 et 65 p. cent d'eau. Au taux d'hydratation de 50 p. cent, la pâte reste sèche, dure et cassante. Elle est difficile à manier et son volume ne change pratiquement pas après fermentation. Les caractéristiques des pâtes à différents taux d'hydratation sont présentées dans le (tableau 8).

Les caractéristiques de la pâte s'améliorent avec le taux d'hydratation jusqu'à 60 p. cent. Elle devient plus lisse, plus élastique, facile à manier et son volume est doublé après fermentation. Cependant, à 65 p. cent, la pâte devient collante et difficile à manier (figure 16). Les propriétés rhéologiques de la pâte se modifient avec l'hydratation (TOFFALORI 1993)

**Tableau 8.** Caractéristiques de la pâte en fonction de l'hydratation.

Taux hydratation (p. cent)	Caractéristiques de la pâte obtenue
50	Sèche, dure, cassante, maniabilité difficile, volume très peu augmenté après fermentation.
55	Assez bien hydratée, maniable, non collante, augmente de volume après fermentation
60	Bien hydratée, élastique, non collante, très lisse, facile à manier, double de volume après fermentation
65	Sur-hydratée, trop collante, difficile à manier, double de volume après fermentation



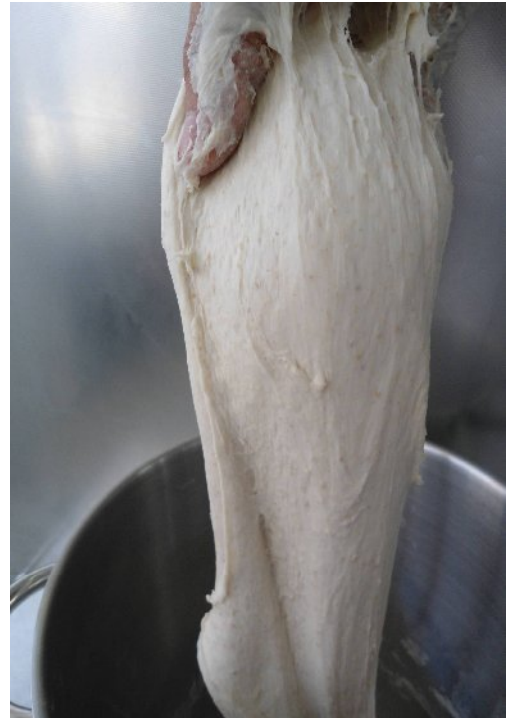
**Hydratation 50 p .cent**



**Hydratation 55 p .cent**



**Hydratation 60 p .cent**



**Hydratation 65 p .cent**

**Figure 16.** Photographies de pâtes à différents taux d'hydratation de farine témoin.

## 2. 2. 1. 2. Caractéristiques des pains en fonction de l'hydratation

Après cuisson, le volume le plus faible est observé avec une hydratation de 50 p. cent. Il augmente remarquablement à un même volume aux hydratations supérieures (tableau 9 et figure 17).

L'alvéolage de la mie augmente également avec les taux d'hydratation jusqu'à 60 p. cent. Au delà de ce pourcentage, l'alvéolage devient assez serré.

Ainsi, pour notre farine, le taux d'hydratation de 60 p. cent est optimal. Cela est objectivé par les meilleures caractéristiques de la pâte au cours de pétrissage, lors de la fermentation, et par des meilleurs aspects du pain et l'alvéolages de la mie (figure 17).

Nous constatons que l'hydratation est importante et doit être à un taux tel que la pâte puisse acquérir des caractéristiques rhéologiques optimales. Ces caractéristiques permettent la formation du réseau amyloglutineux et favorisent les diverses réactions physico-chimiques produisant la quantité de gaz de fermentation nécessaire au développement de volume et à la production des substances volatiles de la sapidité (tableau 9).

**Tableau 9.** Caractéristiques des pains obtenus aux taux d'hydratation.

TH	M (g)	V (cm <sup>3</sup> )	M/V (g/cm <sup>3</sup> )	H/L	Aspect du pain
50	68,3 ± 0,868	112,5 ± 12,990	0,616 ± 0,0879	0,824 ± 0,018	Peu développée, haut, mie serrée.
55	71,275 ± 0,435	147,50 ± 8,291	0,485 ± 0,032	0,769 ± 0,065	Développé, éclaté, mie serrée.
60	66,250 ± 0,755	147,5 ± 8,291	0,450 ± 0,027	0,609 ± 0,045	Développé, rond, mie aérée.
65	66,63 ± 0,115	146,67 ± 9,43	0,456 ± 0,034	0,599 ± 0,047	Plat, mie aérée

TH : taux d'hydratation en p. cent, M : masse, v : volume, M/V : masse volumique, H/L : rapport de forme (hauteur par rapport à la largeur à mi hauteur)



**Taux d'hydratation 50 p. cent**



**Taux d'hydratation 55 p. cent**



**Taux d'hydratation 60 p. cent**



**Taux d'hydratation 65 p. cent**

**Figure 17.** Photographie des sections du témoin à différents taux d'hydratation.

## 2. 2 .2. Effet de la durée de pétrissage

La modification des durées de pétrissage de 20, 25 et 30 minutes a donné les résultats regroupés dans le tableau 10. La durée de pétrissage de 20 minutes donne les meilleures caractéristiques viscoélastiques, avant et après fermentation. Au-delà de ce temps la pâte devient collante et perd sa ténacité et se relâche.

La capacité de rétention de CO<sub>2</sub> est liée à la quantité d'air incorporée lors du pétrissage. En effet, c'est à partir de nuclei d'air que le CO<sub>2</sub> produit par la levure va diffuser et faire lever la pâte (BAKER et MIZE 1941).

**Tableau 10.** Caractéristiques de la pâte aux différents temps de pétrissage en minute.

Tps. Pétr	Caractéristiques de la pâte
20	Lisse, non collante, élastique, facile à manier, double de volume après fermentation
25	Assez collante, et maniable
30	Collante, difficile à manier, relâche après fermentation et perde sa ténacité

Tps.pétr. : temps de pétrissage en minute.

Le pain a de meilleures caractéristiques avec 20 min de pétrissage (tableau 11 et figure 18). Le volume y est plus élevé ( $160 \pm 8,165 \text{ cm}^3$ ). La masse volumique est plus faible ( $0.443 \pm 0,026 \text{ g/cm}^3$ ) et le rapport de forme le plus élevé ( $0,696 \pm 0,043$ ), au-delà il y un surpétrissage, ce qui provoque selon CECYLIA & BOUSHUK (1967) un mauvais développement du réseau de gluten, responsable de la capacité de rétention gazeuse. Le gluténine est solubilisée résultant en un faible volume du pain (BUSHUK 1974). Il existe une quantité d'énergie optimale fournie à la pâte durant le pétrissage pour la quelle le volume de pain est maximum (FRAZIER et al. 1979).

Ainsi, pour nos essais de panification, le temps de pétrissage de 20 minutes confère à la pâte et au pain les meilleurs caractéristiques. Le pétrissage conventionnel en panification française avec une vitesse lente de 40 tr/min sur une durée de 12 à 15 min permet d'obtenir une masse macroscopiquement homogène (ROUSSEL et CHIRON

2002 ; BLOKSMA 1990).

**Tableau 11.** Caractéristiques des pains aux différents temps de pétrissage.

Tps. Pétr	V	M	M/V	H/L
20	160 ± 7,071	70,950 ± 0,520	0,444 ± 0,026	0,696 ± 0,043
25	152,5 ± 10,90	68,65 ± 0,995	0,453 ± 0,039	0,693 ± 0,050
30	147,5 ± 4,33	70,175 ± 0,435	0,476 ± 0,015	0,688 ± 0,041

Tps.pétr. : temps de pétrissage en minute, M : masse : volume en cm<sup>3</sup>, M/V : masse volumique en g/cm<sup>3</sup>, H/L : rapport de forme (hauteur/largeur à mi hauteur)

### 2. 2. 3. Effet de la durée de fermentation

La fermentation, comme indiqué dans les essais préliminaires, doit comporter deux phases; la première fermentation en masse ou pointage (Pt) et la deuxième fermentation en pâton ou apprêt (App). Suivant le protocole de panification après synthèse bibliographique (partie méthodologie), le temps minimum pour les deux fermentations Pt et App est de 45 min. Les durées optima sont recherchées dans l'intervalle allant de 45 à 120 min. Par la suite sur la base des résultats comme il aura vu ultérieurement, nous avons testé l'étendue des apprêts à 120 min et testé le pointage à 180 min. Pour déterminer le couple optimal pointage/apprêt (Pt/App). Nous avons eu recours à des analyses statistiques basées sur la normalité; il est donc nécessaire de tester la normalité de la distribuée de nos données.

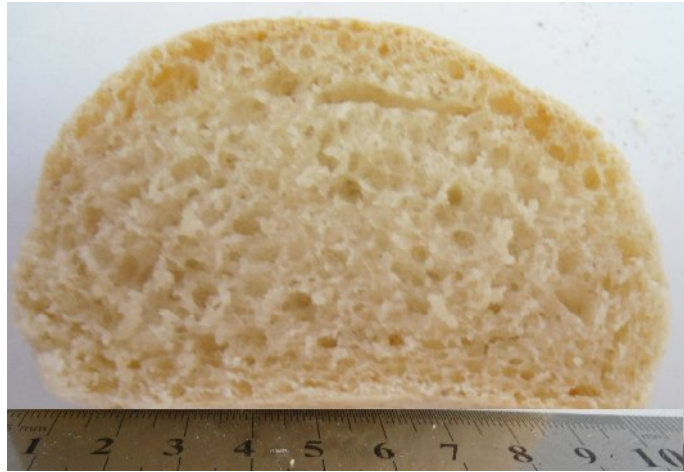
#### 2. 2. 3. 1. Distribution de rapport de forme et de masse volumique

Les courbes obtenues suivant le procédé, dit droite de Henry (GELLER 1983), de vérification graphique de la normalité du rapport de forme (H/L) et de la masse volumique (M/V) des pains témoins sont significativement ( $r = 0.99$ ,  $p \leq 0.05$ ) des droites de forme  $y = a x + b$ .





**Pétrissage 20 minutes**



**Pétrissage 25 minutes**



**Pétrissage 30 minutes**

**Figure 18.** Photographies des mies à différents temps de pétrissage.

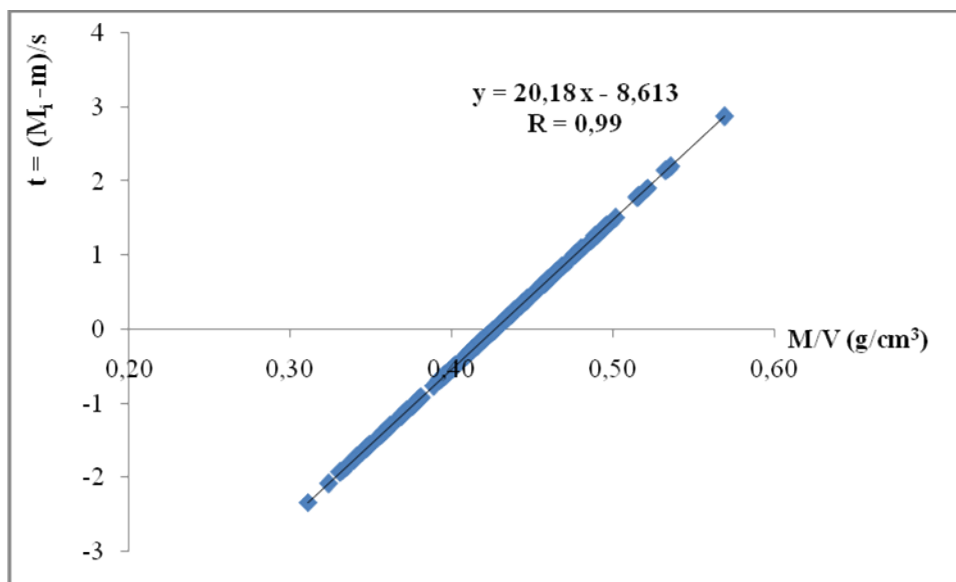
Les variables se distribuent donc suivant une loi normale gaussienne. Les paramètres de ces droites sont présentés dans le tableau (12). Un exemple de droite de Henry, celle pour la vérification de la distribution de M/V est présenté dans la figure 19.

Ainsi, la normalité de la distribution de l'ensemble des données de ces variables étant vérifiée, nous pouvons alors utiliser les tests statistiques basés sur la loi normale (test de corrélation, ANOVA, ACP...)

**Tableau12.** Paramètres de la droite de Henry pour le rapport de forme H/L et la masse volumique M/V

	<b>n</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
<b>H/L</b>	144	7,83	4,198	0,99
<b>M/V</b>	144	20,18	-8,613	0,99

n : effectif ; a : pente ; b : ordonné à l'origine ; r : coefficient de corrélation.



**Figure 19.** Droite de Henry pour la vérification de la normalité de la distribution de la masse volumique (M/V) en g/cm<sup>3</sup>. (t : écart réduit ; M<sub>i</sub> : M/V ; m : moyenne ; s : écart type)

### 2. 2. 3. 2. Effet des temps de pointage et d'apprêt sur les caractéristiques de pain

La fermentation est réalisée selon deux procédures. Dans l'une la fermentation est unique (LECOQUE 1965), dans l'autre la fermentation se fait en deux phases (Afnor 1991, ROUSSET & LOISEL 1984 ; GUINET & GODON 1994), le pointage (Pt) ou fermentation en masse et l'apprêt (App) ou fermentation en pàton. Dans nos conditions

de travail (farine, pétrin ...), il serait intéressant de rechercher le type de fermentation le plus adéquate. Ainsi, nous avons recherché l'effet des facteurs pointage et apprêt sur la qualité du pain obtenu en prenant comme critères, la masse volumique (M/V) et le rapport de forme (H/L). Cela est réalisé par une ANOVA à deux facteurs. Les tableaux 13 et 14 résument les résultats de l'analyse de la variance ANOVA à deux facteurs pointage (Pt) et apprêt (App).

**Tableau 13.** Analyse de la variance, réponse masse volumique (M/V).

	ddl	SCE	MCE	F	P*	$\omega$	$G^2$
Pt	5	0,03985	0,00797	8,77	< 0,001	0,99	0,10038
App	5	0,04470	0,00894	9,84	< 0,001	0,99	0,11417
Pt x App	25	0,16806	0,00672	7,40	< 0,001	1,00	0,41326
Erreur	108	0,09816	0,00091				
Total ajusté	143	0,35078					

Effectif n = 144, ddl ; degré de liberté, SCE : Somme des carré des écarts, MCE : Moyenne des carrés des écarts, P : probabilité,  $\omega$  : puissance du test, F : rapport de Fisher, \* terme de signification à  $\alpha = 0,05$ ,  $G^2$  : mesure de l'importance relative du facteur.

L'analyse de la variance est très significative pour M/V et H/L ( $p < 0,001$ ) pour les effets principaux (Pt et App) et l'interaction des facteurs Pt et Pt x App. Le plan factoriel étudié par l'ANOVA est puissant ( $\omega \geq 0,99$ ), les effets principaux des facteurs et leur interactions sur la qualité du pain sont remarquable.

**Tableau 14.** Analyse de la variance, réponse rapport de forme (H/L).

	ddl	SCE	MCE	F	P *	$\omega$	$G^2$
Pt	5	0,19261	0,03852	8,48	< 0,001	0,99	0,07304
App	5	1,07295	0,21459	47,27	< 0,001	1,00	0,45146
Pt x App	25	0,56599	0,02264	4,99	< 0,001	1,00	0,23396
Erreur	108	0,49025	0,00454				
Total ajusté	143	2,32181					

Effectif n = 144, ddl ; degré de liberté, SCE : Somme des carré des écarts, MCE : Moyenne des carrés des écarts, P : probabilité,  $\omega$  : puissance du test, F : rapport de Fisher, \* terme de signification à  $\alpha = 0,05$ ,  $G^2$  : mesure de l'importance relative du facteur.

De l'observation de l'importance de l'effet facteur ( $G^2$ ), concernant la masse volumique (M/V), il en ressort que le pointage, l'apprêt et leurs interactions ont effet,

respectivement de 10,04 p. cent, 11,42 p. cent et 41,33 p. cent. L'interaction Pt/App a l'effet le plus important. Pour le rapport de forme (H/L), les effets de ces facteurs sont 7,30 p. cent, 45,15 p. cent et 24,74 p. cent respectivement pour Pt, App et leur interaction. L'apprêt ayant l'effet le plus important. L'apprêt est la dernière phase de repos pendant laquelle le pâton se développe pour atteindre un volume jugé optimal : environ trois fois leur volume initial au moment de la mise au four. A ce stade, les levures jouent pleinement leur rôle d'agent de levée de la pâte (LARPENT 1992 ; BOURDET 1977)

Au final il apparaît clairement dans nos conditions de panification qu'il faut effectuer une fermentation biphasique et non une fermentation unique.

#### **2.2.4. Relation et description globale des paramètres de panification par Analyse en Composants Principales (ACP)**

En vue d'examiner globalement les liaisons pouvant exister entre les principaux critères d'appréciation de pain obtenu, la masse volumique (M/V) et le rapport de forme (H/L) et les temps de la première fermentation ou pointage (Pt) et la deuxième fermentation ou apprêt (App), nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP). Les individus (n = 36) correspondent aux pains obtenus avec quatre répétitions, soit 144 observations au total. Nos variables sont de différentes natures et exprimées dans des unités différentes, nous utilisons une ACP basée sur les variables centrées et réduites ou matrice de corrélation (FOUCART 1982)

##### **2.2..4.1. Choix des axes**

Pour choisir les composantes ou axes quatre au maximum dans notre étude, nous nous sommes basés sur les communautés entre variables et axes (Tableau 15) et le pointage de variance en valeur propre apporté par chaque axe.

**Tableau15.** Communautés basées sur le carré des corrélations ( $R^2$ ).

Variable	Composant C <sub>1</sub>	Composant C <sub>2</sub>	Composant C <sub>3</sub>	Composant C <sub>4</sub>
Pt	0,000008	0,518595	0,999994	1,000000
App	0,834754	0,834804	0,834961	1,000000
M/V	0,057015	0,574375	0,986067	1,000000
H/L	0,770905	0,813050	0,847396	1,000000

Pt : pointage, App : apprêt, M/V : masse volumique en (g/cm<sup>3</sup>), H/L : rapport de forme (hauteur par rapport largeur à mi-hauteur)

Nous observons que l'axe 1 est corrélé le plus avec les deux variables (App et H/L), alors que l'axe 2 est corrélé le plus avec les deux autres variables (Pt et M/V). Ces deux axes ensemble, expliquent 81,31 p. cent de la corrélation avec les variables qui ont formé ces axes apportant près de 69 p. cent de la variance totale. Les deux autres axes (3 et 4) tout en apportant 31 p. cent de l'information expliquent moins les variables (Tableau 15 et 16). Ainsi, est-il plus judicieux de retenir le plan formé par l'axe 1 ( $C_1$ ) et l'axe 2 ( $C_2$ ).

**Tableau 16.** Valeurs propres.

composantes	V.P	Pourcentage de la variance totale	Cumul V.P	Cumul pourcentage de la variance
$C_1$	1,662681	41,56703	1,662681	41,5670
$C_2$	1,078143	26,95357	2,740824	68,5206
$C_3$	0,927594	23,18985	3,668418	91,7105
$C_4$	0,331582	8,28955	4,000000	100,0000

V.P : Valeur Propre.

## 2. 2. 4. 2. Etude des variables, matrice et cercle de corrélation

### 2. 2. 4. 2. 1. Représentation des variables dans le plan

De l'examen de corrélations variables axes, nous constatons que les qualités des variables sont globalement bien représentées dans le plan  $C_1 \times C_2$ . Le pointage (Pt) et la masse volumique M/V sont moyennement représentées par le plan, avec respectivement des sommes de  $R^2 = 0,52$  et  $0,57$ . Les deux autres variables, l'apprêt (App) et le rapport de forme (H/L) sont très bien représentés par le plan  $C_1 \times C_2$  avec respectivement des sommes de  $R^2 = 0,83$  et  $0,81$  (tableau 15 et figure 20).

### 2. 2. 4. 2. 2. Regroupement des variables

L'observation des corrélations entre variables (Tableau 17) et la qualité de leur représentation de celles-ci sur les axes du plan  $C_1 \times C_2$  (figure 20 et tableau 18) permet un regroupement des variables. L'apprêt (App) et le rapport de forme (H/L) sont corrélés seulement avec la première composante  $C_1$  mais opposés ( $r = - 0,69$ ). Le pointage (Pt) et la masse volumique (M/V) sont regroupés et corrélés avec la deuxième composante  $C_2$ . La masse volumique (M/V) est faiblement corrélée de manière inverse

avec App ( $r = -0,18$ )

**Tableau 17.** Coefficients de corrélation entres paramètres

	Pt	App	M/V	H/L
Pt				
App	0,000000			
M/V	0,073166	- 0,183354		
H/L	- 0,0177962	- 0,639715	0,847396	

Pt : pointage, App : apprêt, M/V : masse volumique en ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), H/L : rapport de forme (hauteur par rapport largeur à mi hauteur)

### 2. 2 .4. 2. 3. Rapports de représentation des variables sur le plan $C_1 \times C_2$

À apriori on peut déduire que l'apprêt (App) détermine le rapport de forme (H/L). Dans le présent travail l'influence de l'apprêt (App) est plus importante sur H/L que la masse volumique M/V, sa durée peut être augmentée au-delà d'un certain temps compromis entre une (M/V) et un (H/L) convenables, 45 à 60 min à notre avis.

Le pointage (Pt) n'étant corrélé à aucune variable, donc sa durée semble être indépendante de l'aspect du pain au contraire de l'apprêt.

**Tableau 18.** Corrélation entre composant et variable

	Composant $C_1$	Composant $C_2$	Composant $C_3$	Composant $C_4$
Pt	0,002830	0,720130	0,-693829	0,002540
App	0,913649	- 0,0077076	0,012558	-0,406249
M/V	0,238777	0,719278	0,641633	-0,118036
H/L	0,878012	-0,205294	0,185325	-0,390646

Pt : pointage, App : apprêt, M/V : masse volumique en ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), H/L : rapport de forme (hauteur par rapport largeur à mi hauteur)

Projection des variables sur le plan factoriel ( 1 x 2 )

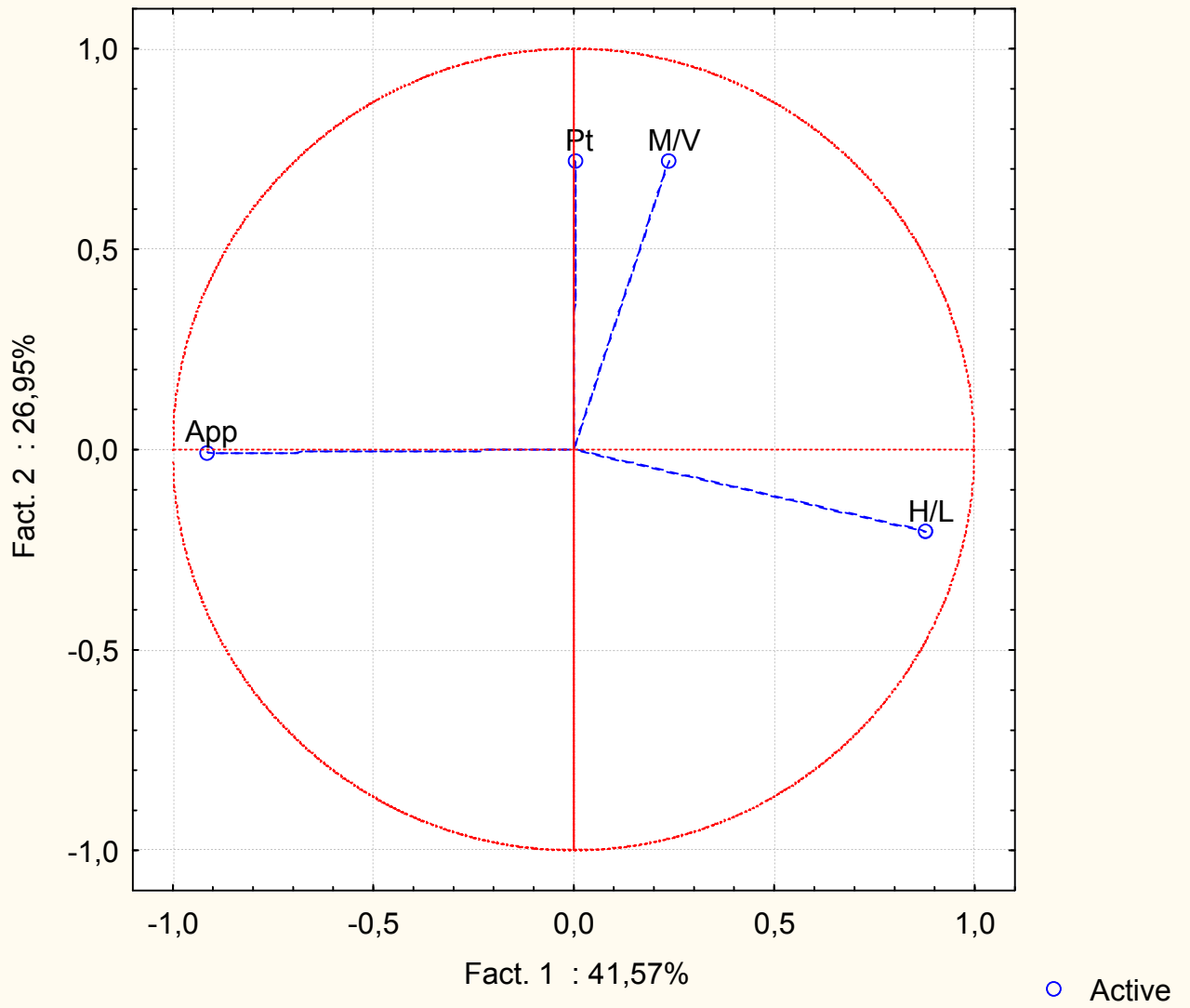


Figure 20. Cercle de corrélation

#### 2. 2. 4. 2. 4. Représentation des individus

L'ensemble des individus (pains) sont représentés dans le plan  $C_1 \times C_2$  (figure 21). On constate qu'un groupe des individus 1, 2, 3 et 4 forment un groupe à part. Le reste des individus formé un autre groupe homogène réparti uniformément dans le plan  $C_1 \times C_2$ . Les individus du première groupe se rapprochent et sont caractérisés par un couple Pt/ App 45/45 ayant les masses volumiques les plus faibles et les rapports de forme les plus élevés.

#### 2. 2. 5. Recherche des couples optima

Nous avons entrepris de rechercher les couples optima de première fermentation ou pointage (Pt) et de deuxième fermentation ou apprêt (App) optima.

Les critères retenus pour le choix des couples sont la masse volumique (M/V) la plus faibles et le rapport de forme (H/L) le plus élevé.

La méthode d'analyse des surfaces de réponses avec comme variables indépendantes Pt et App et les variables dépendantes (réponses) est appropriée pour déterminer au moins un intervalle des couples Pt/App sur la base des critères retenus.

##### 2. 2. 5. 1. Analyse du modèle de la surface de réponse

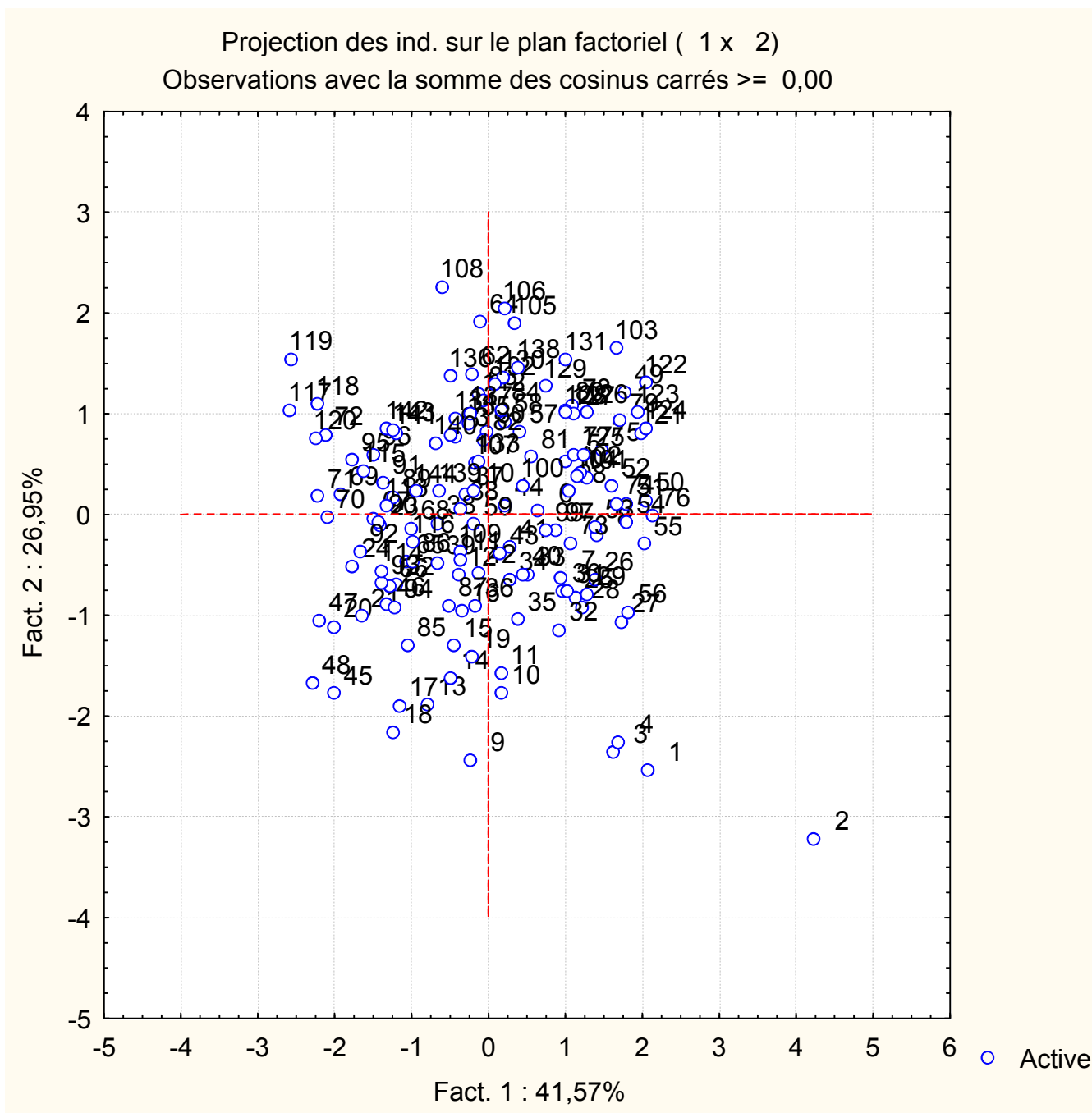
Le modèle de régression polynomial est significatif pour les deux réponses M/V et H/L ( $p < 0,05$ ). Pour H/L, la régression globale est assez forte ( $R^2 = 0,46$ ), elle est plutôt linéaire ( $R^2 = 0,41$ ) et non quadratique ( $R^2 = 0,04$ ). (tableau 19)

**Tableau 19.** Analyse de la variance, facteurs Pt et App, réponse H/L.

Source	ddl	SCE	MCE	F	P *	R <sup>2</sup>
Regression Globale	5	1,0745	0,2149	47,34	< 0,01	0,4628
Regression Linéaire	2	0,9515	0,4758	104,81	< 0,01	0,4098
Régression quadratique	2	0,1016	0,0580	11,19	< 0,01	0,0438
Lin x Lin	1	0,0213	0,0213	4,70	< 0,05	0,0092
Erreur totale	138	1,2473	0,0094			0,5372
Défaut d'ajustement	30	0,7571	0,0252	5,56	<0,01	0,3261
Erreur pure	108	0,4902	0,0045			0,2111

n : Effectif = 144, \* terme de signification à  $\alpha = 0,05$ , R<sup>2</sup> : facteur de détermination, SCE : Somme des carrés des écarts, MCE : Moyenne des carrés des écarts, P : probabilité.





**Figure 21.** Représentation des individus sur le plan  $C_1 \times C_2$ .

Pour M/V, la réponse globale est plutôt faible ( $R^2 = 0,11$ ), décrivant très peu les relations Pt, App avec M/V. Les paramètres de ces régressions sont représentés dans le tableau (20).

**Tableau 20.** Analyse de la variance, facteurs Pt et App, réponse (M/V).

Source	ddl	SCE	MCE	F	P *	R <sup>2</sup>
Regression Globale	5	0,0392	0,0078	8,62	< 0,0001	0,1117
Regression Linéaire	2	0,0136	0,0068	7,50	< 0,0009	0,0389
Régression quadratique	2	0,0215	0,0108	11,86	< 0,00002	0,0614
Lin x Lin	1	0,0040	0,0040	4,39	< 0,04	0,0114
Erreur totale	138	0,3116	0,0025			0,8883
Défaut d'ajustement	30	0,2134	0,0071	7,83	<0,0001	0,6084
Erreur pure	108	0,0982	0,0009			0,2798

n: Effectif = 144, \* terme de signification à  $\alpha = 0,05$ , R<sup>2</sup> : facteur de détermination, SCE : Somme des carrés des écarts, MCE : Moyenne des carrés des écarts, P : probabilité.

### 2. 2. 5. 2. Extraction des couples Pt/App

À partir des projections des surfaces de réponses, les couples correspondants à une masse volumique (M/V) minimum, intervalle (0,35 – 0,41 g/cm<sup>3</sup>) et un rapport de forme (H/L) élevé, l'intervalle (0,65 – 0,75) sont identifiés (figure 22 et 23). Ces couples sont confrontés aux résultats de l'appréciation globale des pains obtenus pour déterminer les couples optima (tableau 21). De cette analyse des surfaces de réponse, neuf couples sont extraits. La confrontation avec les résultats de la panification, permet de sélectionner au final trois couples 45/45, 60/45 et 120/45 correspondants aux meilleurs pains. Il semble, de cette analyse, que les meilleurs pains sont obtenus avec les temps de pointage (Pt) allant de 45 à 120 minutes et un apprêt de 45 minutes. D'autre part, l'observation des corrélations (entre composant et variable) (tableau 18) appuie ces résultats. Le temps de pointage (Pt) n'est corrélé ni avec M/V ni avec H/L, d'où sa variation dans un large intervalle. Par contre le temps d'apprêt est très lié, de façon inverse à H/L ( $r = - 0,69$ ) et faiblement lié à M/V ( $r = - 0,18$ ). En d'autre terme quand apprêt diminue H/L augmente (temps d'apprêt court donne un bon H/L) et M/V diminue. Nous pensons qu'un compromis est nécessaire entre un H/L acceptable ( $\geq 0,65$ ) et une M/V la plus basse (0,35). Ainsi un apprêt supérieur, soit 60 min est à tester avec les pointages de plus de 45 min.

Au final, cette analyse nous a permis de réduire le nombre d'essais à effectuer pour trouver les couples Pt/App optima. Le temps minimum est de 45 min pour les deux fermentations, avec un effet optimal de l'apprêt pouvant se situer à 45 - 60 min.

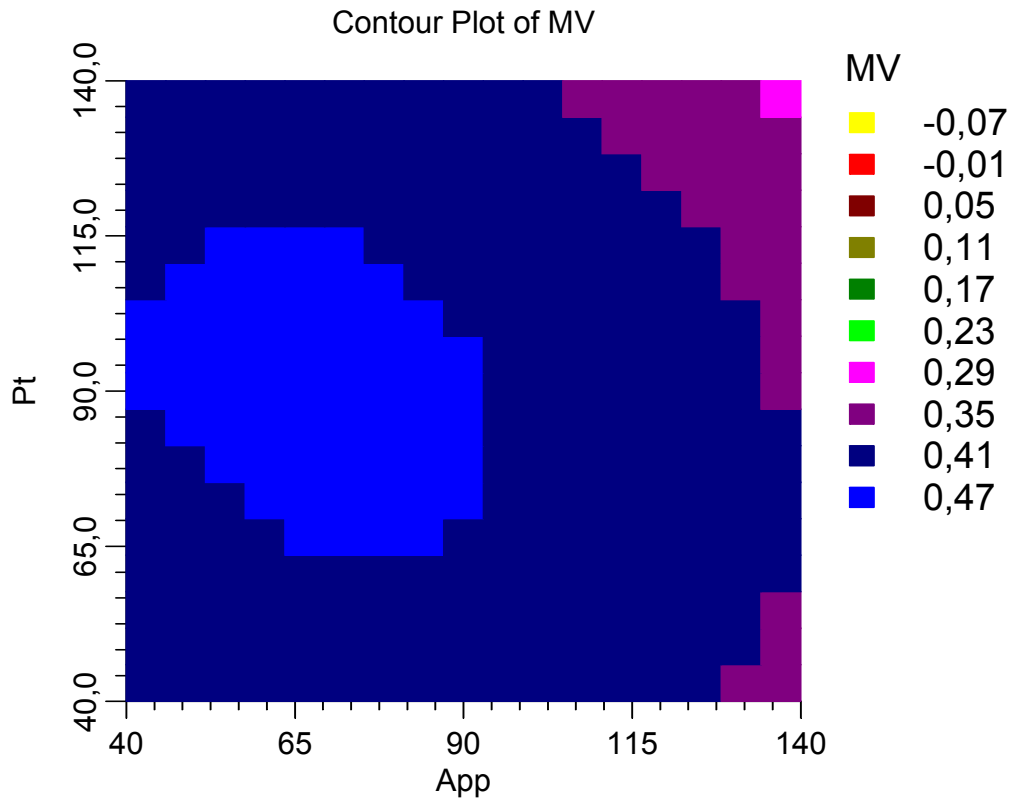
**Tableau 21.** Couples Pt/App extraits des surfaces de réponses et caractéristiques des pains correspondants.

Surfaces de réponse				Les pains obtenus		
Classement	Pt/App	M/V	H/L	Appréciation globale	M/V	H/L
1	45 / 45	0,35	0,75	Bon aspect, forme ronde, mie ouverte	0,345	0,787
2	120 / 45	0,41	0,65	Bon aspect, forme ronde, mie ouverte	0,436	0,719
3	60 / 45	0,41	0,65	Bon aspect, forme ronde, mie ouverte	0,409	0,679
4	60 / 75	0,41	0,65	Mauvais aspect, assez plat	0,401	0,587
5	120 / 120	0,35	0,75	Mauvais aspect, assez plat	0,377	0,586
6	105 / 45	0,35	0,65	Mauvais aspect, plat	0,372	0,543
7	120 / 75	0,41	0,65	Mauvais aspect, assez plat	0,443	0,500
8	105 / 75	0,35	0,65	Mauvais aspect, assez plat	0,413	0,475
9	105 / 120	0,35	0,75	Mauvais aspect, Plat	0,414	0,317

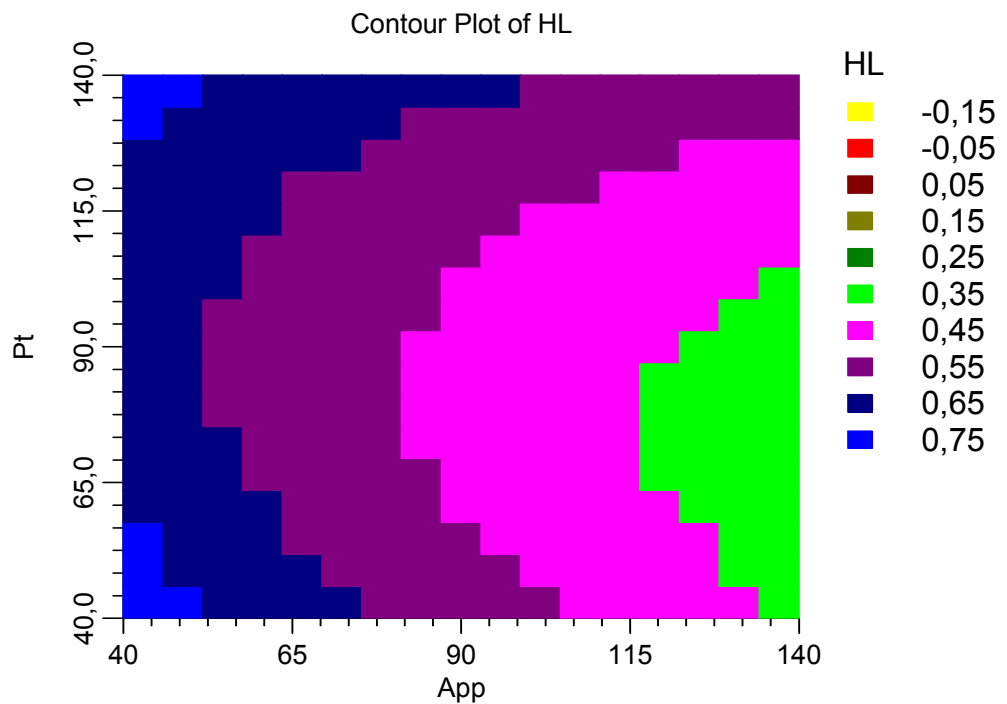
(Pt/App) : Couple de fermentation pointage/apprêt, M/V : masse volumique en g/cm<sup>3</sup>, H/L : rapport de forme (hauteur / largeur à mi hauteur).

### 2. 2. 6. Recherche de la durée de fermentation

Dans notre diagramme de panification la fermentation comprend deux, le pointage et l'apprêt. Dans cette partie qui nous recherchons les couples optima pt/App de la panification du témoin, en prenant comme indicateurs M/V, H/L et l'aspect général du pain. Sur la base de l'analyse des surfaces de réponse le temps minimum est de 45 min. Nous avons encore testé l'apprêt au-delà de 60 min, pour vérifier si l'effet ne s'exprime à plus de 60 min.



**Figure 22.** Les surfaces de la réponse pour les masses volumiques M/V.



**Figure 23.** Les surfaces de la réponse pour les rapports de forme H/L.

## 2. 2. 6. 1. Couples pt/App optima

Les masses volumiques (M/V) et les rapports de formes (H/L) correspondants aux différents couples Pt/App sont présentés dans le tableau 22.

**Tableau 22.** Masses volumiques (M/V) et rapports de forme (H/L) moyens en fonction des couples de fermentation Pt/App.

Pt	45		60		75		90		105		120	
App	M/V	H/L	M/V	H/L	M/V	H/L	M/V	H/L	M/V	H/L	M/V	H/L
45	0,348 ± 0,006	0,848 ± 0,235	0,416 ± 0,010	0,606 ± 0,051	0,483 ± 0,034	0,641 ± 0,044	0,431 ± 0,029	0,636 ± 0,075	0,384 ± 0,015	0,517 ± 0,048	0,444 ± 0,015	0,706 ± 0,012
60	0,496 ± 0,032	0,558 ± 0,061	0,418 ± 0,014	0,623 ± 0,025	0,438 ± 0,026	0,742 ± 0,055	0,485 ± 0,016	0,610 ± 0,057	0,446 ± 0,047	0,653 ± 0,014	0,430 ± 0,013	0,634 ± 0,026
75	0,383 ± 0,049	0,515 ± 0,070	0,415 ± 0,017	0,552 ± 0,048	0,479 ± 0,036	0,480 ± 0,033	0,471 ± 0,015	0,492 ± 0,064	0,493 ± 0,053	0,441 ± 0,083	0,456 ± 0,015	0,571 ± 0,073
90	0,393 ± 0,030	0,502 ± 0,018	0,450 ± 0,022	0,504 ± 0,099	0,519 ± 0,040	0,452 ± 0,008	0,360 ± 0,043	0,484 ± 0,048	0,395 ± 0,051	0,550 ± 0,009	0,420 ± 0,020	0,518 ± 0,044
105	0,375 ± 0,032	0,473 ± 0,133	0,462 ± 0,021	0,652 ± 0,026	0,407 ± 0,020	0,339 ± 0,045	0,399 ± 0,023	0,404 ± 0,020	0,368 ± 0,026	0,445 ± 0,059	0,423 ± 0,043	0,600 ± 0,066
120	0,447 ± 0,027	0,433 ± 0,044	0,361 ± 0,035	0,411 ± 0,066	0,440 ± 0,023	0,329 ± 0,028	0,398 ± 0,049	0,474 ± 0,075	0,434 ± 0,020	0,274 ± 0,045	0,403 ± 0,017	0,526 ± 0,042

Pt/App : couple de fermentation, pointage/apprêt, (moyenne ± écart type), M/V : Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ ), H/L : rapport de forme sans unité.

La masse volumique M/V observée varie de  $0,348 \pm 0,006 \text{ g/cm}^3$  pour le couple Pt/App 45/45 à  $0,519 \pm 0,040 \text{ g/cm}^3$  pour Pt/App 75/90. Chiron et al. (2007) avec une farine similaire de type 110, rapportent une M/V de  $0,387 \text{ g/cm}^3$  légèrement supérieure à notre minimum. Apriori le couple 45/45 est à considérer.

Le rapport de forme H/L varie de  $0,274 \pm 0,045$  avec le couple Pt/App 105/120 à  $0,848 \pm 0,235$  pour Pt/App 45/45. La encore, à priori le couple 45/45 est à retenir.

Cependant la qualité de pain tient en compte également son aspect général, forme, couleur de croûte, texture de la mie.

La synthèse des observations tenant compte de tous les critères M/V, H/L (tableau 22) et aspects nos a permis de considérer six couples qui correspondent pour

chaque pointage (45 à 120 min) au meilleur apprêt (tableau 23). La somme des classements des caractéristiques de chaque un des six couples donne un score de classement final. Nous constatons que, ces pains tous de bonne qualité, sont obtenus avec tout l'intervalle des pointages (45 à 120 min) mais avec des apprêts 45 et 60 min uniquement. Ainsi nous confirmons nos précédentes prédictions déduites de l'analyse par les surfaces de réponses croisés avec les aspects du pain (paragraphe 2.2.5.2). Le meilleur pain parmi ces six couples, reste celui obtenu avec un couple Pt/App 45/45. Ainsi, l'apprêt devrait fixer à 45 min. Le pointage cependant varie dans son effet dans large intervalle avec les apprêts serrés 45- 60 min.

**Tableau 23.** Classement des meilleurs pains en fonction des couples Pt/App

Pt/App	45/45	60/60	75/60	90/45	105/60	120/45
M/V	0,348	0,418	0,438	0,431	0,446	0,444
	±	±	±	±	±	±
	0,006	0,014	0,026	0,029	0,047	0,015
	1	2	4	3	6	5
H/L	0,848	0,623	0,742	0,636	0,653	0,706
	±	±	±	±	±	±
	0,235	0,025	0,055	0,075	0,014	0,012
	1	6	2	5	4	3
Aspect	R+	R+	R+	R-	R- -	R+
	4	2	1	5	6	3
Somme score final	6	10	7	13	16	11
	1	3	2	5	6	4

Pt/App : couple de fermentation, pointage/apprêt, M/V : Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ ), H/L : rapport de forme sans unité, les chiffres de 1 à 6 indiquent le classement des caractéristiques décroissant de la qualité, R+ : Rond R- : moins rond, R- - : plat.

## 2. 2. 6. 2. Recherche de pointage

Les résultats précédents nous ont fait entreprendre des essais supplémentaires pour rechercher le pointage dans un intervalle plus large de 45 à 180 min (tableau 24). Le pointage 105 min est éliminé, le pain étant plat. Les apprêts sont de 45 et 60 min. Les résultats présentés dans le tableau 24 indiquent que le rapport de forme H/L, s'améliore en général avec les pointages pour l'apprêt de 45 min et se détériorent avec l'apprêt 60 min. Le couple optimal pour H/L est Pt/App 120/45 (figure 24).

La masse volumique augmente quelque peu avec le pointage à 45 min d'apprêt et s'améliorent légèrement avec 60 min d'apprêt. La fermentation permettant d'obtenir

le meilleur pain, avec un compromis entre H/L, M/V et l'aspect général est celle du couple Pt/App 120/45. Avec un temps de pointage long la pâte est douce, en absence d'additif, et en présence de quantité de levures réduites (LE NAOUR et al. 1998).

Le couple Pt/App 120/45 de notre témoin suit la règle générale que lorsque le temps de pointage est long, le temps d'apprêt est diminué et vice versa. La fermentation dépend : de la quantité de levures présentes et de leur pouvoir fermentaire, du pouvoir enzymatique de la farine (activité amylolytique), de la température du milieu environnant et de l'hydratation de la pâte (LARPENT 1992 ; BOURDET 1977).

**Tableau 24.** Masses volumiques (M/V) et rapports de forme (H/L) moyennes en fonction des couples de fermentation en minute

Pt	45		60		75		90		120		180	
App	M/V	H/L	M/V	H/L	M/V	H/L	M/V	H/L	M/V	H/L	M/V	H/L
45	0,435	0,595	0,479	0,669	0,452	0,668	0,476	0,656	0,441	0,784	0,453	0,761
	± 0,022	± 0,046	± 0,031	± 0,039	± 0,016	± 0,036	± 0,012	± 0,026	± 0,042	± 0,058	± 0,023	± 0,073
60	0,465	0,519	0,442	0,621	0,432	0,507	0,422	0,507	0,427	0,496	0,430	0,732
	± 0,019	± 0,027	± 0,026	± 0,038	± 0,027	± 0,040	± 0,014	± 0,040	± 0,025	± 0,013	± 0,011	± 0,034

Pt/App : couple de fermentation pointage/apprêt, (moyen ± écart type), M/V : Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>), H/L : rapport de forme sans unité.

### 3. FABRICATION DE PAIN A PARTIR DE PATE CRUE FERMENTEE ET CONGELEE

#### 3. 1. Effet des temps du pointage, de l'apprêt et de la décongélation sur M/V et H/L

Nous avons recherché l'effet des facteurs pointage (Pt), apprêt (App) et le mode de décongélation (Dng) sur la qualité du pain obtenu en prenant comme critères, la masse volumique (M/V) et le rapport de forme (H/L). Pour cela nous avons réalisé une analyse de la variance (ANOVA) à trois facteurs, Pt, App et Dng. La variable réponse est M/V ou H/L.

En cas de signification, nous avons recherché dans chaque groupe de facteur les différences pour les réponses par le test de comparaison multiple de Tukey (GEOFFREY KEPPEL 1982)



**A**



**B**

**Figure 24.** Photographie de pain témoin Pt/App 120/45. **A** : aspect extérieur de pain, **B** : section (aspect de la mie).



### 3. 1. 1. Effet de Pt, App et Dng sur la masse volumique (M/V)

Les résultats de l'analyse de la variance sont résumés dans le tableau 25. Deux facteurs Pt et App ont des effets principaux très significatifs ( $p < 0,001$ ) sur M/V. Le mode de décongélation Dng, seul n'a pas d'effet principal. La perte de poids est une altération importante de la qualité des produits alimentaires congelés qui dépend des conditions et de la fluctuation de la température de stockage (PHIMOLSIRIPOLA et al. 2011). GIANNOU et TZIA (2007) ont constatés que la perte de poids de la pâte congelée variait de 11 p. cent à 13 p. cent durant l'entreposage pour un maximum de 270 jours.

Cependant les interactions de ces facteurs deux à deux ou l'ensemble ont un effet très significatif sur la masse volumique M/V,  $p < 0,001$ . Sauf pour Dng, l'analyse est puissante ( $\phi > 0,8$ ) pour Pt, App et toutes les interactions.

L'importance de l'effet facteur ou de l'interaction est objectivée par  $G^2$ . De cette analyse il en ressort, que l'apprêt a l'effet le plus puissant ( $G^2 = 0,1683$ ) sur M/V, soit près de 17 p. cent. Le pointage a un effet très faible ( $G^2 = 0,0001$ ) avec 0,01 p. cent et le mode de décongélation Dng a un effet nul ( $G^2 = -0,0023$ ). Par contre l'interaction de l'apprêt avec le pointage est assez forte ( $G^2 = 0,151$ ), faible avec la décongélation (Dng) ( $G^2 = 0,0843$ ) et très faible avec Pt et Dng ( $G^2 = 0,00892$ ). Cela, nous indiquons à priori que la deuxième fermentation App a le plus d'effet sur M/V. Les autres facteurs seuls ont un effet très faible et en interaction avec App, l'effet sur M/V diminue. Durant le temps de l'apprêt, les levures jouent pleinement leur rôle d'agent de levée (LARPENT 1992 ; BOURDET 1977), par contre, lors du pointage une structuration lente de la pâte s'opère permettant de consolider le réseau de gluten et stabiliser les interfaces gaz-pâte, ainsi que libérer des sucres fermentescibles (LE VAVASSEUR 2007).

**Tableau 25.** Analyse de la variance à trois facteurs, réponse masse volumique (M/V).

	ddl	SCE	MCE	F	P	$\omega$	$\zeta^2$
Pt	8	0,12444	0,01555	34,67	< 0,001	1,00	0,00010
App	3	0,093758	0,03125	69,65	< 0,001	1,00	0,16827
Pt x App	24	0,094535	0,00393	8,78	< 0,001	1,00	0,15106
Dng	3	0,000064	0,00002	0,05	< 0,9860	0,05	-0,0023
Dng x Pt	24	0,044064	0,00183	4,09	< 0,001	0,99	0,06004
Dng x App	9	0,050808	0,00564	12,58	< 0,001	0,99	0,08434
Pt x App x Dng	72	0,081782	0,00113	2,53	< 0,001	0,99	0,00892
Erreur	144	0,064616	0,00049				
Total ajusté	287	0,554069					

Effectif n = 72, ddl : degré de liberté, SCE : Somme des carrés des écarts, MCE : Moyenne des carrés des écarts, P : probabilité,  $\omega$  : puissance du test,  $\zeta^2$  : mesure de l'importance relative du facteur, \* seuil de signification à  $\alpha = 0,05$ .

### 3. 1. 1. 1. Comparaison entre pointages (Pt) entre apprêts (App) dans leurs effets sur M/V

L'ANOVA était puissante et significative pour les facteurs Pt et App, la différence dans le groupe des pointages ainsi que la différence dans le groupe des apprêts sont objectivées par le test de Tukey.

### 3. 1. 1. 1. 1. Comparaison des effets des pointages pour M/V

La comparaison des temps des pointages (Pt) fait ressortir que les temps de pointages se répartissent en deux intervalles principaux contenant des pointages ayant des effets similaires sur la masse volumique (M/V) et un intervalle limite entre les deux groupes (tableau 26).

Le premier intervalle principal de 0 à 45 min de pointage est significativement différent du deuxième intervalle de 75 à 120 min. Les pointages 45 et 60 min tout en ayant le même effet délimitent les deux plages de pointages précédentes. Il en ressort de cette comparaison multiple que le pointage a un faible effet sur la masse volumique (M/V) et ne s'observe qu'entre des temps très éloignés. Cela, concorde avec la faible importance relative du facteur Pt (0,01 p. cent) sur M/V comme indiqué par  $\zeta^2$  (0,0001) de l'ANOVA.

**Tableau 26.** Comparaison multiple, entre les temps de pointages pour la masse volumique (M/V), test de Tukey.

	0	15	30	45	60	75	90	105
15	NS							
30	NS	NS						
45	NS	NS	NS					
60	NS			NS				
75					NS			
90					NS	NS		
105					NS	NS	NS	
120				NS	NS	NS	NS	NS

Temps de pointage effectif des n : 32, ddl= 144, valeur critique = 4,38652, NS : non significatif, ■ différence significatif, seuil de signification : 0,05.

### 3. 1. 1. 2. Comparaison des effets des apprêts pour M/V

Absence de l'apprêt résulte en un effet sur M/V significativement différents ( $p < 0,05$ ) des autres temps d'apprêts (tableau 27). Les temps d'apprêts 15 min et 45 min ont des effets différents. À 30 min d'apprêt il n'est pas observé de différence avec 15 et 45 min. Il en ressort ainsi que l'apprêt a un effet sur la masse volumique (0,17) et que cet effet se distingue le plus entre 15 et 45 min. Ce résultat concorde avec les données de la littérature. Une réduction du temps de préfermentation accroît la rigidité de la pâte, et une plus faible teneur en eau l'accroît davantage comparativement à une pâte fraîche (VOIVALA 1998).

**Tableau 27.** Comparaison multiple, entre les temps des apprêts pour la masse volumique (M/V), test de Tukey.

APP	0	15	30	45
0				
15				
30		NS		
45			NS	

Temps d'apprêt, effectif des n : 72, ddl= 144, valeur critique = 4,633169, ■ différence significatif, NS : non significatif seuil de signification : 0,05.

### 3. 1. 2. Effet de Pt, App et Dng sur le rapport de forme H/L

Le résumé de l'ANOVA est présenté dans le tableau 28. Les facteurs sont Pt, App et Dng. La variable réponse est le rapport de forme H/L. Cette analyse est puissante  $\phi > 0,8$ . L'analyse de la variance est très significative ( $p < 0,001$ ) pour les effets

principaux de chaque facteur ainsi que leurs interactions. L'effet principal le plus puissant est celui de l'apprêt ( $\mathcal{G}^2 = 0,404$ ), l'effet de pointage est quatre fois moins ( $\mathcal{G}^2 = 0,101$ ). La décongélation (Dng) a l'effet le plus faible ( $\mathcal{G}^2 = 0,042$ ). L'effet interaction sur H/L le plus fort est celui Pt x App ( $\mathcal{G}^2 = 0,092$ ) les autres interactions (Dng x Pt ; Dng x App ; Pt x App x Dng) sont plus tôt faibles, à cause assemblément du faible effet du l'effet du facteur Dng. Il en ressort que tous les facteurs ont un effet significatif, mais l'apprêt est celui qui a l'effet prépondérant sur H/L. Ces données concordent avec les données de la littérature. Les traitements de congélation et de décongélation influencent profondément la stabilité des pâtes congelées. Les effets se traduisent par une diminution du volume du produit. INOUE et BUSHUK (1992) constatent une diminution considérable du volume du pain obtenu à partir des pâtes congelées stockées pendant une semaine à -20 °C.

**Tableau 28.** Analyse de la variance à trois facteurs, réponse rapport de forme (H/L).

	ddl	SCE	MCE	F	P*	$\omega$	$\mathcal{G}^2$
Pt	8	0,5265	0,0658	19,80	< 0,001	1,00	0,10147
App	3	1,9998	0,6666	200,5	< 0,001	1,00	0,40392
Pt x App	24	0,4611	0,0192	5,78	< 0,001	0,99	0,09232
Dng	3	0,2167	0,0723	21,74	< 0,001	0,99	0,04198
Dng x Pt	24	0,4001	0,0167	21,74	< 0,001	0,99	0,06544
Dng x App	9	0,1899	0,0211	5,02	< 0,001	0,99	0,03263
Pt x App x Dng	72	0,6501	0,0090	6,35	< 0,001	0,98	0,04733
Erreur	14	0,4786	0,0033	2,72	< 0,001	0,99	
Total ajusté	28	4,9231					

Effectif n = 72, ddl: degré de liberté, SCE : Somme des carrés des écarts, MCE : Moyenne des carrés des écarts, P : probabilité,  $\omega$  : puissance du test,  $\mathcal{G}^2$  : mesure de l'importance relative du facteur, \* seuil de signification à  $\alpha = 0,05$ .

### 3. 1. 2. 1. Comparaison entre pointages (Pt), entre apprêts (App) et entre décongélations (Dng) dans leurs effets sur H/L

#### 3. 1. 2. 1. 1. Comparaison des effets des pointages (Pt) pour H/L

L'ANOVA étant significative pour l'ensemble des facteurs (tableau 28), nous recherchons donc avec le test à posteriori de Tukey l'homogénéité ou la différence dans le groupe de chaque facteur (tableau 29). La comparaison des temps de pointages sur le rapport de forme H/L ne fait ressortir une tendance générale. Néanmoins on peut déduire globalement que les pointages entre 0 et 75 min ont le même effet et que les pointages de 90 à 120 min ont également des effets similaires, ces deux plages ont des effets significativement ( $p < 0,05$ ) distincts sur le rapport de forme (tableau 28).

Généralement en ressort ainsi, la faible influence du pointage ( $G^2 = 0,1$ ) sur H/L ne peut s'observer qu'entre des temps extrêmes.

**Tableau 29.** Comparaison multiple, entre les temps de pointages pour le rapport de forme (H/L), test de Tukey.

	0	15	30	45	60	75	90	105	120
15	NS								
30	NS	NS							
45	NS	NS	NS						
60	NS	NS	NS	NS					
75	NS	NS	NS	NS	NS				
90	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
105	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
120	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Temps de pointage effectif des n : 32, ddl = 144, valeur critique = 4,386522, ddl = 144, NS : non significatif, ■ : différence significatif, seuil de signification 0,05.

#### 3. 1. 2. 1. 2. Comparaison des effets des apprêts (App) sur H/L

L'effet de l'apprêt sur le rapport de forme (H/L) s'observe nettement à partir de 15 min (tableau 30). Ainsi l'apprêt à un forte influence sur H/L, l'importance relative de du facteur App est de 40,39 p. cent ( $G^2 = 0,4039$ ). Ce résultat concorde avec les données de la littérature. Les pâtes fermentées 40 min et congelées fournissent des pains avec un rapport de forme stable lors du cycle congélation-décongélation (RÄSÄNEN et al. 1998).

**Tableau 30.** Comparaison multiple, entre les temps des apprêts pour le rapport de forme (H/L), test de Tukey.

APP	0	15	30	45
15	NS			
30				
45				

Temps d'apprêt, effectif n : 72, ddl= 144, valeur critique = 4,386522, ddl= 144, valeur critique = 3,633169, ■ différence significatif, seuil de signification : 0,05, NS : non significatif.

### 3. 1. 2. 1.3. Comparaison des effets modes de décongélation (Dng)

La comparaison multiples des effets de la température de la décongélation sur le rapport de forme H/L fait ressortir que la décongélation à 5°C au réfrigérateur est différents des autres modes de décongélation, cuisson directe, à 25 °C et 40 °C (tableau 31). Donc, la température de décongélation aurait un effet sur le rapport de forme. Dans les travaux de KLINE & SUGIHARA (1968) ; HSU et al. (1979) après un jour de congélation de la pâte, le volume du pain s'est amélioré. D'autre part, la baisse la plus marquée de volume a été observée pendant la première semaine de stockage et a continué de baisser au cours de la deuxième semaine (RÅSÄNEN et al.1995).

**Tableau 31.** Comparaison multiple, entre les modes de décongélation (Dng) pour le rapport de forme (H/L), test de Tukey.

	C1	C2	C3
C2			
C3	NS		
C4	NS		NS

C1 : mode de cuisson direct, C2 : décongélation à 5 °C, C3 : décongélation à 25 °C, C 4 : décongélation à 40°C. n : 72, ddl= 144, NS : non significatif, ■ : différence significatif, seuil de signification : 0,05.

### 3. 1. 3. Synthèse sur l'effet des facteurs sur M/V et H/L

Au final, il semble que le pointage seul a un effet très faible sur la masse volumique. Le mode de décongélation n'a aucun effet. L'apprêt a l'effet le plus élevé (16,83 p. cent) sur la masse volumique (M/V) notamment entre 15 et 45 min. Les interactions observées entre facteurs seraient dues à l'effet apprêt. La puissance des interactions diminue quand la deuxième fermentation interagit avec les deux autres facteurs. Ce résultat est en accord avec HANNEFORTH et al. (1994) le temps de

préfermentation des pâtes à congeler devrait être de moitié ou des deux tiers de la durée optimale pour les pâtes fraîches.

Le pointage (Pt) a un effet moindre de l'ordre de 10 p. cent. Le rapport de forme H/L est influencé grandement, à 40 p. cent par l'apprêt de 15 min. La décongélation (Dng) a un net même faible (4,2 p. cent) effet sur H/L. Conjointement le pointage et l'apprêt ont une faible influence sur H/L de l'ordre de 9 p. cent. L'ensemble des facteurs ont un effet d'interaction très faible de 4,7 p. cent. Ainsi l'apprêt agit le plus sur M/V et H/L, le pointage agit principalement sur H/L.

### **3. 2. Recherche de la durée de fermentation**

Dans notre diagramme de fabrication de pain à partir de pâte fermentée puis congelée, comme pour le pain témoin, la fermentation comprend deux étapes, la première fermentation ou pointage (Pt) dont la durée optimale est recherchée entre 0 et 120 min et la deuxième fermentation ou apprêt (App) est recherchée aux temps 0, 15, 30 et 45 min, ceux-ci sont décrits en littérature pour le pré poussé congelé où la fermentation est bloquée entre 1/3, 1/2 par rapport à la fermentation complète (HANNEFORTH et al. 1994) et le pâton est surgelé aux 3/4 de l'apprêt en vue de son stockage (LANGRAF 2002). Les couples optima Pt/App sont déterminés pour chaque mode de décongélation, en prenant comme indicateurs la masse volumique M/V, le rapport de la hauteur sur la largeur à mi hauteur (H/L) et l'aspect général du pain.

#### **3. 2. 1. Recherche du couple Pt/App optima pour le mode de cuisson directe**

Les masses volumiques (M/V) et les rapports de forme (H/L) des pains fabriqués à partir de pâte fermentée, congelée et cuite directement au four à  $260 \pm 1^\circ\text{C}$  correspondant aux différents couples Pt/App sont présentés dans le tableau 32.

**Tableau 32.** Valeurs moyennes de la masse volumique M/V et le rapport de forme H/L cuisson directe et décongélation à 5°C

Pt (min)	App (min)	Cuisson directe		Décongélation à 5°C	
		M/V	H/L	M/V	H/L
0	0	0,532 ± 0,002	0,925 ± 0,000	0,559 ± 0,040	0,973 ± 0,000
	15	0,480 ± 0,006	0,833 ± 0,000	0,462 ± 0,065	0,878 ± 0,004
	30	0,458 ± 0,039	0,818 ± 0,006	0,432 ± 0,003	0,704 ± 0,006
	45	0,530 ± 0,033	0,516 ± 0,083	0,511 ± 0,013	0,526 ± 0,129
15	0	0,485 ± 0,001	0,580 ± 0,027	0,504 ± 0,003	0,977 ± 0,002
	15	0,425 ± 0,003	0,631 ± 0,040	0,504 ± 0,003	0,785 ± 0,010
	30	0,480 ± 0,000	0,767 ± 0,016	0,511 ± 0,019	0,847 ± 0,037
	45	0,529 ± 0,024	0,622 ± 0,000	0,497 ± 0,001	0,766 ± 0,016
30	0	0,485 ± 0,001	0,800 ± 0,000	0,491 ± 0,014	0,873 ± 0,147
	15	0,467 ± 0,019	0,875 ± 0,106	0,491 ± 0,000	0,819 ± 0,021
	30	0,479 ± 0,000	0,818 ± 0,058	0,492 ± 0,007	0,791 ± 0,055
	45	0,530 ± 0,016	0,629 ± 0,075	0,485 ± 0,010	0,707 ± 0,010
45	0	0,454 ± 0,018	0,792 ± 0,029	0,528 ± 0,027	0,885 ± 0,071
	15	0,443 ± 0,000	0,898 ± 0,076	0,449 ± 0,022	0,875 ± 0,043
	30	0,486 ± 0,027	0,779 ± 0,094	0,479 ± 0,023	0,789 ± 0,047
	45	0,524 ± 0,005	0,551 ± 0,028	0,448 ± 0,005	0,600 ± 0,031
60	0	0,459 ± 0,038	0,540 ± 0,024	0,500 ± 0,013	0,844 ± 0,000
	15	0,387 ± 0,002	0,850 ± 0,014	0,414 ± 0,016	0,844 ± 0,063
	30	0,409 ± 0,006	0,765 ± 0,050	0,447 ± 0,026	0,796 ± 0,006
	45	0,486 ± 0,003	0,540 ± 0,028	0,469 ± 0,025	0,613 ± 0,075
75	0	0,443 ± 0,003	0,888 ± 0,124	0,449 ± 0,019	0,820 ± 0,035
	15	0,410 ± 0,035	0,976 ± 0,001	0,456 ± 0,005	0,877 ± 0,046
	30	0,414 ± 0,001	0,700 ± 0,028	0,456 ± 0,005	0,657 ± 0,024
	45	0,445 ± 0,022	0,543 ± 0,018	0,421 ± 0,006	0,644 ± 0,031
90	0	0,502 ± 0,023	0,902 ± 0,003	0,457 ± 0,002	0,951 ± 0,002
	15	0,428 ± 0,001	0,873 ± 0,022	0,421 ± 0,012	0,930 ± 0,062
	30	0,428 ± 0,001	0,899 ± 0,109	0,423 ± 0,040	0,866 ± 0,122
	45	0,490 ± 0,001	0,724 ± 0,050	0,445 ± 0,002	0,681 ± 0,020
105	0	0,470 ± 0,001	0,845 ± 0,156	0,464 ± 0,005	0,964 ± 0,020
	15	0,426 ± 0,021	0,930 ± 0,065	0,371 ± 0,012	0,901 ± 0,050
	30	0,406 ± 0,019	0,905 ± 0,030	0,406 ± 0,004	0,727 ± 0,051
	45	0,454 ± 0,017	0,590 ± 0,014	0,447 ± 0,013	0,705 ± 0,064
120	0	0,500 ± 0,032	0,916 ± 0,045	0,470 ± 0,032	0,921 ± 0,045
	15	0,404 ± 0,001	0,931 ± 0,034	0,406 ± 0,059	0,876 ± 0,050
	30	0,511 ± 0,004	0,772 ± 0,012	0,480 ± 0,003	0,805 ± 0,053
	45	0,478 ± 0,008	0,613 ± 0,075	0,483 ± 0,002	0,757 ± 0,096

Pt : pointage, App : apprêt, M/V : masse volumique en (g/cm<sup>3</sup>), H/L : rapport de forme (hauteur / largeur à mi hauteur), valeur moyenne ± écart type



### 3. 2. 1. 1. Masse volumique (M/V)

Pour le mode de cuisson directe sans décongélation préalable, les pains obtenus ont une masse volumique moyenne variant de  $0,387 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$  pour le couple Pt/App 60/15 à un maximum de  $0,532 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$  pour une panification sans fermentation, couple 0/0. Apriori le couple 60/15 donne le pain le plus léger.

### 3. 2. 1. 2. Rapport de forme (H/L)

Le rapport de forme (H/L) varie dans un intervalle de  $0,516 \pm 0,083$  pour le couple Pt/App 0/45 à  $0,976 \pm 0,001$  pour le couple Pt/App 75/15 donnant le meilleur rapport de forme.

### 3. 2. 1. 3. Pointage et apprêt pour M/V et H/L

Considérant M/V et H/L optima, les pointages correspondants ne sont pas les mêmes, 60 et 75 min respectivement. Par contre les meilleurs M/V et H/L se rapportent au même temps d'apprêt (15 min). Semble donc que ces seuls indicateurs M/V et H/L sont insuffisants pour déterminer précisément le couple optimum Pt/App. Aussi une caractérisation plus globale, basée sur l'aspect du pain et de la mie sont nécessaires. La caractérisation du pain est basée sur l'observation de l'aspect extérieur et de la mie et le classement en considération de la masse volumique M/V et le rapport de forme H/L (tableau 33).

Les pains issus des différents couples Pt/App au nombre 36, sont classés suivant le score total égal à la somme de notes différentes caractéristiques pour un pain donné, le score le plus faible étant le meilleur. De ce classement il en ressort que le meilleur pain (score 11) correspond au couple 60/15 suivi du pain (score 12) obtenu avec le couple 120/15. Au final nous estimons le meilleur pain cuit directement correspond au couple de fermentation Pt/App 60/15 (figure 25). Nous retenons ces données de fermentation, d'une part, ce pain en plus de son meilleur aspect, il présente la meilleure texture de mie, avec un bon H/L (0,850) et une masse volumique la plus faible (0,387

g/cm<sup>3</sup>). Dans ce pain courant panifiée avec la même farine que la notre (type 110), Chiron et al, 2007 ont observés une M/V similaire.

**Tableau 33.** Classement des couples de la cuisson direct, par apport au pain témoin.

Pt/App	Aspect du pain	V cm <sup>3</sup>	M/V (g/cm <sup>3</sup> )	H/L	Texture de la mie	Score totale	Classe
0/30	6	150 6	0,458 7	0,818 8	Serré 4	31	7
15/30	7	150 6	0,480 9	0,767 9	Assez aéré 3	34	8
30/15	5	155 5	0,467 8	0,875 5	Assez aéré 3	26	6
45/15	2	155 5	0,443 6	0,898 4	Assez aéré 3	15	4
60/15	1	180 1	0,387 1	0,850 7	aéré 1	11	1
75/15	2	170 3	0,413 4	0,976 1	Assez aéré 3	13	3
90/15	4	160 3	0,428 5	0,873 6	aéré 1	19	5
105/30	3	175 2	0,406 3	0,905 3	aéré 2	13	3
120/15	4	180 1	0,404 2	0,931 2	Assez aéré 3	12	2

Pt/App : couple de fermentation, pointage/apprêt, V: volume des pains, M/V : masse volumique, H/L : rapport de forme (hauteur par apport largeur), les numéros de 1 à 6 : les notes des critères de plus bon au mauvais, score total : la somme des notes des caractéristiques des pains, classe : l'ordre final des pains de bon au mauvais

### 3. 2. 2. Recherche du couple Pt/App optimum, décongélation à 5 °C

Les masses volumiques (M/V) et les rapports de forme (H/L) des pains fabriqués à partir de pâte fermentée à différents couples Pt/App puis congelée et décongelée au réfrigérateur (5 °C) sont regroupés dans le tableau 32.



**A**



**B**

**Figure 25.** Photographie de pain obtenu à partir de la pâte fermentée Pt/App 60/15, congelée et cuite directement. **A** : aspect extérieur. **B** : section (aspect de la mie)

### 3. 2. 2. 1. Masse volumique (M/V)

Avec la décongelée au réfrigérateur à 5 °C avant cuisson, les pains obtenus ont une masse volumique moyenne M/V allant d'un minimum de  $0,371 \pm 0,012 \text{ g/cm}^3$  pour le couple 105/15 à un maximum de  $0,559 \pm 0,004 \text{ g/cm}^3$  pour une panification sans fermentation (Pt/App 0/0).

### 3. 2. 2. 2. Rapport de forme (H/L)

Le rapport de forme (H/L) le plus faible  $0,526 \pm 0,129$  est obtenu avec le couple Pt/App 0/45, le meilleur H/L de  $0,977 \pm 0,002$  est obtenu avec un pointage de 15 min sans apprêt Pt/App 15/0.

### 3. 2. 2. 3. Caractérisation des pains

La masse volumique et le rapport de forme optima observés pour le pain décongelé à 5°C avant cuisson ne correspondent pas aux mêmes couples. La caractérisation la plus globale nous permet de déterminer de manière objective les couples de fermentation. Le classement des pains (tableau 34), suivant le score total, comme décrit précédemment, fait ressortir que le meilleur pain décongelé à 5 °C est obtenu avec un couple de fermentation Pt/App 90/15.

La présence de cloques nombreuses, petites, à aspect blanchâtre affectent la croûte des pains résultant de la décongélation à 5 °C (figure 26). Le cloquage résulte de l'abaissement de la température (GODON et al. 1994). L'activité des enzymes est faible et moins rapide par conséquent la croûte des pains obtenus est pâle. Les pâtes congelées sont caractérisées par un temps de fermentation plus long par rapport aux pâtes fraîches. Cela est dû à la diminution de l'activité fermentaire des levures et la perte du pouvoir de rétention du CO<sub>2</sub> par le réseau de la pâte causée par le processus de congélation (KULP et al. 1995).

**Tableau 34.** Classement des couples obtenus à partir de pâte pré-fermentée, congelée et décongelée à 5°C, par apport au pain témoin.

Pt/App	Aspect du pain	V (cm <sup>3</sup> )	H/L	M/V (g/cm)	Texture de la mie	Score totale	classe
0/30	6	160 3	0,704 9	0,431 4	Assez aéré 3	25	6
15/30	1	135 7	0,847 5	0,511 8	Assez aéré 3	25	6
30/15	3	140 7	0,819 7	0,491 7	Assez aéré 3	27	7
45/15	5	155 6	0,875 4	0,449 5	Assez aéré 3	23	5
60/15	4	165 2	0,844 6	0,414 2	aéré 1	15	2
75/15	2	150 5	0,877 2	0,456 6	Assez aéré 3	18	4
90/15	2	160 3	0,930 1	0,421 3	Assez aéré 3	12	1
105/30	4	170 1	0,727 8	0,406 1	Assez aéré 2	16	3
120/15	6	165 2	0,876 3	0,406 1	Assez aéré 3	15	2

Pt/App : couple de fermentation, pointage/apprêt, V : volume des pains, M/V : masse volumique, H/L : rapport de forme (hauteur par apport largeur), les numéros de 1 à 6 : les notes des critères de plus bon au mauvais, score total : la somme des notes des caractéristiques des pains, classe : l'ordre final des pains de bon au mauvais

### 3. 2. 3. Recherche de couple Pt/App optimum, pour la décongélation à 25 °C

Les M/V et H/L des pains fabriqués à partir de pâte fermentée à différents couples Pt/App puis congelée et décongelée à 25 °C avant cuisson au four à  $260 \pm 1$  °C sont regroupés dans le tableau 35.

#### 3. 2. 3. 1. Masse volumique (M/V)

Les pains de pâtons décongelés à température ambiante (25 °C) avant cuisson, ont une masse volumique moyenne M/V variant de  $0,374 \pm 0,014$  g/cm<sup>3</sup> pour le couple Pt/App 120/15 à  $0,627 \pm 0,003$  g/cm<sup>3</sup> en absence de fermentation (Pt/App = 0/0).



**A**



**B**

**Figure 26.** Photographie de pain de la pâte fermentée Pt/App 90/15, congelée et décongelée à 5°C. **A** : aspect extérieur. **B** : section (aspect de la mie)

**Tableau 35.** Valeurs moyennes de la masse volumique M/V et le rapport de forme H/L décongélation à 25 °C et 40 °C

Pt (min)	App (min)	Décongélation à 25 °C		Décongélation à 40 °C	
		M/V	H/L	M/V	H/L
0	0	0,627 ± 0,003	0,932 ± 0,022	0,585 ± 0,006	0,854 ± 0,029
	15	0,431 ± 0,024	0,755 ± 0,030	0,387 ± 0,012	0,909 ± 0,029
	30	0,440 ± 0,023	0,733 ± 0,031	0,425 ± 0,007	0,756 ± 0,063
	45	0,386 ± 0,024	0,573 ± 0,039	0,475 ± 0,003	0,573 ± 0,061
15	0	0,505 ± 0,024	0,833 ± 0,085	0,524 ± 0,024	0,758 ± 0,004
	15	0,474 ± 0,020	0,737 ± 0,024	0,482 ± 0,022	0,867 ± 0,031
	30	0,448 ± 0,007	0,708 ± 0,072	0,537 ± 0,001	0,867 ± 0,031
	45	0,501 ± 0,021	0,647 ± 0,029	0,477 ± 0,026	0,822 ± 0,063
30	0	0,448 ± 0,027	0,740 ± 0,000	0,532 ± 0,001	0,720 ± 0,028
	15	0,497 ± 0,001	0,683 ± 0,024	0,461 ± 0,001	0,745 ± 0,007
	30	0,472 ± 0,022	0,670 ± 0,042	0,483 ± 0,001	0,690 ± 0,014
	45	0,489 ± 0,003	0,617 ± 0,067	0,478 ± 0,006	0,596 ± 0,006
45	0	0,508 ± 0,033	0,774 ± 0,017	0,494 ± 0,014	0,764 ± 0,113
	15	0,491 ± 0,002	0,689 ± 0,079	0,447 ± 0,006	0,818 ± 0,006
	30	0,491 ± 0,002	0,610 ± 0,014	0,493 ± 0,008	0,696 ± 0,083
	45	0,482 ± 0,005	0,485 ± 0,007	0,427 ± 0,042	0,490 ± 0,014
60	0	0,544 ± 0,060	0,847 ± 0,146	0,506 ± 0,028	0,795 ± 0,042
	15	0,454 ± 0,018	0,743 ± 0,117	0,419 ± 0,020	0,760 ± 0,057
	30	0,465 ± 0,001	0,574 ± 0,004	0,479 ± 0,023	0,764 ± 0,020
	45	0,472 ± 0,028	0,550 ± 0,071	0,462 ± 0,025	0,540 ± 0,028
75	0	0,489 ± 0,027	0,830 ± 0,078	0,488 ± 0,024	0,850 ± 0,071
	15	0,454 ± 0,018	0,743 ± 0,117	0,442 ± 0,028	0,822 ± 0,000
	30	0,465 ± 0,001	0,574 ± 0,004	0,457 ± 0,000	0,550 ± 0,014
	45	0,454 ± 0,021	0,600 ± 0,000	0,451 ± 0,001	0,487 ± 0,046
90	0	0,480 ± 0,024	0,892 ± 0,117	0,486 ± 0,046	0,859 ± 0,013
	15	0,438 ± 0,042	0,864 ± 0,028	0,430 ± 0,003	0,782 ± 0,006
	30	0,431 ± 0,018	0,830 ± 0,135	0,430 ± 0,003	0,899 ± 0,109
	45	0,387 ± 0,016	0,670 ± 0,024	0,428 ± 0,044	0,570 ± 0,014
105	0	0,446 ± 0,005	0,805 ± 0,070	0,471 ± 0,016	0,890 ± 0,127
	15	0,388 ± 0,000	0,853 ± 0,076	0,409 ± 0,001	0,796 ± 0,006
	30	0,420 ± 0,023	0,789 ± 0,016	0,421 ± 0,008	0,789 ± 0,016
	45	0,447 ± 0,024	0,590 ± 0,014	0,454 ± 0,017	0,721 ± 0,143
120	0	0,458 ± 0,048	0,931 ± 0, 037	0,494 ± 0, 002	0,881 ± 0,073
	15	0,374 ± 0,014	0,808 ± 0,017	0,417 ± 0,015	0,861 ± 0,037
	30	0,476 ± 0,023	0,887 ± 0,026	0,459 ± 0,042	0,795 ± 0,007
	45	0,425 ± 0,049	0,732 ± 0,039	0,447 ± 0,027	0,663 ± 0,005

Pt : pointage, App : apprêt, M/V : masse volumique en (g/cm<sup>3</sup>), H/L : rapport de forme (hauteur /largeur à mi hauteur), valeur moyenne ± écart type

### 3. 2. 3. 1. Masse volumique (M/V)

Les pains de pâtons décongelés à température ambiante (25 °C) avant cuisson, ont une masse volumique moyenne M/V variant de  $0,374 \pm 0,014 \text{ g/cm}^3$  pour le couple Pt/App 120/15 à  $0,627 \pm 0,003 \text{ g/cm}^3$  en absence de fermentation (Pt/App = 0/0).

### 3.2.3.2. Rapport de forme

Le rapport de forme H/L le plus faible de  $0,485 \pm 0,007$  est obtenu avec des couples de fermentations Pt/App 45/45, les rapports de forme les plus élevés sont de  $0,931 \pm 0,037$  et  $0,932 \pm 0,022$ , dans l'ordre, pour des couples Pt/App 120/0 et 0/0.

### 3.2.3.3. Caractérisation des pains

A cette température de décongélation (25 °C), également, les couples de fermentation optima sont différents pour M/V et H/L. Cependant tout en ayant des apprêts différents (15 min vs 0 min). Les pointages sont similaires si on considère le H/L de 0,931. La caractérisation globale des pains permettrait une précision plus objective des couples Pt/App optima. Le classement des pains (tableau 36) suivant le score total, fait ressortir que les trois meilleurs pains ont un apprêt de 15 min, avec des pointages de 105, 120 et 90 min, respectivement pour le premier, le second et le troisième. Le meilleur pain a un Pt/App 105/15 (figure 27).

Selon BRUMMER et al. (1993), avec une décongélation optimale de 60 min à 20 °C, suivie de 45 min de fermentation à 32 °C à une humidité relative de 70 p. cent, le volume du pain est plus faible que celui de la décongélation et la cuisson directes dans un four programmé. La qualité est moins bonne pour les pains issus d'une cuisson lente (RÄSÄNEN 1998)



**Tableau 36.** Classement des couples obtenus à partir de pâte pré-fermentée, congelée et décongelée à 25 °C, par apport au pain témoin.

Coupe (Pt/App)	Aspect Du pain	V (m <sup>3</sup> )	H/L	M/V (g/cm <sup>3</sup> )	Texture de la mie	Score total	classe
0/15	8	155 4	0,755 4	0,431 3	serré 3	22	6
15/30	3	150 5	0,708 6	0,448 5	Assez aéré 2	21	5
30/30	2	145 6	0,670 8	0,847 8	Assez aéré 2	26	7
45/15	1	140 7	0,687 7	0,491 9	Assez aéré 2	26	7
60/15	4	155 4	0,742 5	0,454 7	aéré 1	17	4
75/15	4	155 4	0,742 5	0,453 6	Assez aéré 2	21	5
90/15	6	160 3	0,864 1	0,438 4	Assez aéré 2	16	3
105/15	5	180 2	0,853 2	0,388 2	Assez aéré 2	13	1
120/15	7	185 1	0,808 3	0,374 1	Assez aéré 2	14	2

Pt/App : couple de fermentation : (pointage/apprêt), V : volume des pains, M/V : masse volumique, H/L : rapport de forme (hauteur par rapport à la largeur à mi hauteur), les numéros de 1 à 9 : les notes des critères de plus bon au mauvais, score total : la somme des notes des caractéristiques des pains, classe : l'ordre final des pains de bon au mauvais

### 3. 2. 4. Couple Pt/App de fermentation optimum pour la décongélation à 40 °C

Les masses volumiques M/V et les rapports de forme H/L obtenus des pains obtenus à partir des pâtons décongelés à 40°C à divers fermentation sont regroupés dans le tableau 35.

#### 3. 2. 4. 1. Masse volumique (M/V)

Les pains issus de la décongélation des pâtons à étuve réglée à 40 °C, avant cuisson ont des masses volumiques moyennes M/V minimale de  $0,387 \pm 0,012 \text{ g/cm}^3$  avec le couple Pt/App 0/15 et maximale de  $0,585 \pm 0,007 \text{ g/cm}^3$  pour une panification sans fermentation (Pt/App 0/0)



**A**



**B**

**Figure 27.** Photographie de pain obtenu à partir de la pâte fermentée Pt/App 105/15, congelée et décongelée à 25°C. **A** : aspect extérieur. **B** : section (aspect de la mie)

### 3. 2. 4. 2. Rapports de forme (H/L)

Le rapport de forme H/L le plus bas,  $0,487 \pm 0,046$  se rapporte au couple de fermentation Pt/App 75/ 45. H/L le plus élevé de  $0,909 \pm 0,029$  est obtenu avec un couple Pt/App 0/15. Selon (RÄSÄNEN et al.1998) les pâtes fermentées 40 min et congelées fournissent des pains avec un rapport de forme stable lors du cycle congélation-décongélation.

### 3. 2. 4. 3. Caractérisation des pains

Avec cette température de décongélation (40 °C), les optima de M/V et H/L correspondent à la même fermentation Pt/App 0/15. La caractérisation globale des pains permettrait une précision plus objective des couples Pt/App optima. Le classement des pains (tableau 37) fait ressortir que les trois meilleurs pains ont subi une deuxième fermentation ou apprêt de 15 min. Cependant les pointages sont, dans l'ordre, de 120, 0, 60, et 75 min. Le meilleur pain (score 11) présentant le plus de bonnes caractéristiques est celui obtenu avec un couple de fermentation Pt/ Ap 120/15 (figure 28).

Les aspects des pains de pâtes congelées et décongelées à 40 °C ont été plus plats que ceux de pâtes fraîches et les autres modes. Pour RÄSÄNEN et al.1995, Le rapport de forme H/L a diminué en moyenne de 19 p. cent presque indépendamment de la durée de la fermentation et de la qualité de la farine. Auparavant, en 1986, DUBOIS et LE BLOC-COLSKY ont observé l'effet de temps de fermentation. Les pains fermentés 25 min avait un rapport de forme un peu plus grand que ceux fermentés pendant 40 min. La grande différence dans les rapports forme des pains de pâtes fraîches et de ceux congelés peut-être due à la température trop élevée de décongélation créant un gradient de température.

**Tableau 37.** Classement des couples obtenus à partir de pâte pré-fermentée, congelée et décongelée à 40 °C, par apport au pain témoin.

Couple Meilleur Pt/App	Aspect du pain	V cm <sup>3</sup>	M/V (g/cm <sup>3</sup> )	H/L	Texture de la mie	score Total	Classe
0/15	6	175 1	0,387 1	0,909 1	Serré 3	12	2
15/15	1	145 6	0,482 7	0,867 2	Assez aéré 2	18	4
30/15	2	145 6	0,482 7	0,867 2	Assez aéré 2	19	5
45/15	5	150 5	0,447 3	0,818 5	Assez aéré 2	20	6
60/15	3	165 2	0,419 3	0,760 8	aéré 1	17	3
75/15	2	155 4	0,442 5	0,822 4	Assez aéré 2	17	3
90/15	4	160 3	0,430 4	0,782 7	Assez aéré 2	20	6
105/15	1	165 2	0,409 8	0,796 6	Assez aéré 2	19	5
120/15	2	165 2	0,417 2	0,859 3	Assez aéré 2	11	1

Pt/App : couple de fermentation, pointage/apprêt, V : volume des pains, M/V : masse volumique, H/L : rapport de forme (hauteur par apport largeur), les numéros de 1 à 6 : les notes des critères de plus bon au mauvais, score total: la somme des notes des caractéristiques des pains, classe : l'ordre final des pains de bon au mauvais.

### 3. 2. 5. Durée de fermentation optimum des pains de pâte congelée

Les couples de fermentation pointage/apprêt (Pt/App) étant déterminés précédemment, nous en donnons synthèse dans le tableau 38.

**Tableau 38.** Des durées de fermentation du pain témoin et des pains de pâte congelée selon le mode de décongélation avant cuisson.

	Témoin	Cuisson directe	Dng. à 5 C°	Dng. à 25 C°	Dng. à 40 C°
Pt (min)	120	60	90	105	120
App (min)	45	15	15	15	15

Pt : pointage, App : apprêt, Dng : décongélation.



**A**



**B**

**Figure 28.** Aspect du mie obtenue à partir de la pâte fermentée Pt/App 120/15, congelée et décongelée à l'étuve réglée à 40 C°. **A** : aspect extérieur. **B** : section (aspect de la mie)

Nous retenons que le pointage est de 60 min pour le pain de pâte congelé et cuit directement sans décongélation préalable. Ce temps augmente avec la température de décongélation (5 °C à 40 °C) de 90 à 120 min. Ces résultats sont cohérents, la fermentation étant ralentie par l'abaissement de la température. A des températures inférieures à 10 °C, la viabilité de la levure est seulement 75 p. cent de l'optimum (HECKELMANN 1993). L'apprêt est le même (15 mn) pour tous les pains de pâte congelée. Il représente le 1/3 du temps d'apprêt du témoin comme préconisé par (HANNEFORTH et al. 1994)

### **3. 3. Classement du témoin et des meilleurs pains de pâte congelée**

Les caractéristiques des meilleurs pains obtenus à partir de la pâte congelée (selon leur temps de fermentation) sont comparées au témoin. Chaque caractéristique, i.e., volume, aspect du pain et de la mie, est notée suivant la grille d'évaluation de ROUSSEL et CHIRON (2002), résumée dans le tableau 39. Nous obtenons une note totale sur 200 permettant le classement.

De cette comparaison il en ressort que le pain témoin issu de la panification normale reste le meilleur avec une note de 197.

Le classement des pains de pâte congelée est dans l'ordre décroissant de la qualité : le pain cuit directement sans décongélation, le pain de pâte décongelé à 5 °C, le pain décongelé à 40 °C et en dernier celui dont le pâte est décongelé à 25°C. Ainsi, la cuisson directe donne un peu de pâte congelée de qualité très proche de celle du témoin. Comme rapporté par INOUE et BUSHUK (1991), la congélation de la pâte dégrade la qualité du pain. Deux facteurs sont identifiés comme cause, la diminution de la puissance gazeuse en raison d'une baisse de l'activité de la levure et la perte progressive de la force de la pâte due à la libération de disulfures réducteurs par les cellules de levure mortes (KLINE et SUGIHARA, 1968) et à l'altération du réseau de gluten par les cristaux de glace (VARRIANO-MARSTON et al. 1980).

La mie des pains des quatre modes de décongélation est relativement moins. La perte d'humidité ainsi que la rétrogradation de l'amidon sont deux des mécanismes

opérant dans le raffermissement de la mie (RIBOTTAA et al.2003). Ce raffermissement est principalement causé par la recristallisation de la fraction d'amidon impliquant des chaînes d'amylopectine (SCHOCH et FRANÇAIS 1947 ; ZOBEL et KULP 1996). Comme suggéré par MARTIN et al. (1991), la principale raison de la fermeté du pain est la formation de liaisons hydrogènes entre le gluten et les granules d'amidon.

**Tableau 39.** Notation comparée la qualité du pain témoin et des pains de pâte congelée selon le mode de décongélation.

caractéristiques des pains/Note	Témoin (120/45)	Cuisson directe (60/15)	Dng à 5 C (90/15)	Dng à 25 C° (105/15)	Dng à 40 C° (120/15)
Volume /30	30	30	30	21	21
Aspect du pain/70	70	67	58	46	61
Total du pain /100	100	97	88	67	82
Aspect de la mie/100	97	97	97	94	82
Total/200 Classement	197 1	194 2	185 3	161 5	164 4

(/) : Couple de fermentation (pointage/apprêt), Dng : décongélation, Total du pain /100 : somme de la note de volume et celle de l'aspect de pain, Total/200 : somme des notes de l'aspect du pain et de la mie, les chiffres de 1 à 5 : classement final des pains du bon au mauvais selon le total des notes.

#### 4. Fermentation au cours de la décongélation

Dans cette partie de travail, pour les meilleurs pains obtenus avec un apprêt de 15 min et des pointages variant de 60 à 120 min (60, 90, 105 et 120 min), nous avons étudié l'évolution du volume de la pâte ou l'expansion gazeuse, exprimée par la hauteur en mm pendant et après décongélation à différentes température (Annexes : tableaux A, B et C).

##### 4. 1. Courbe de l'évolution de la fermentation

L'allure globale de la courbe de variation du volume de la pâte ou expansion gazeuse est similaire pour toutes les cinétiques de fermentation selon la température

de décongélation (5 °C, 25 °C et 40 °C) et pour tous les pointages étudiés. Ces courbes ont une forme se rapprochant de l'exponentielle (figures 29, 30 et 31), avec en général quatre phases ou segments.

Le premier segment de la courbe correspond à la décongélation qui varie très peu où l'expansion gazeuse est très faible.

La deuxième phase, ascendante, présente dans toutes les cinétiques débute et s'achève en des temps différents suivant la température de décongélation et le temps de pointage.

Le troisième segment de la courbe, également observé dans des toutes les cinétiques, est un plateau d'une durée variable.

La quatrième phase, descendante, n'est présente que dans les décongélation à 25 °C et 40 °C.

#### **4. 1. 1. Description des cinétiques**

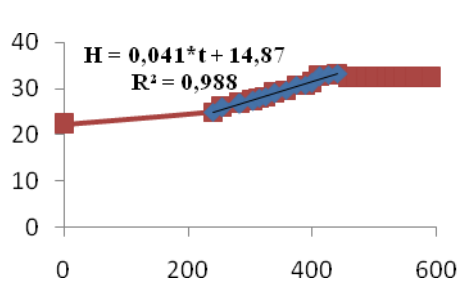
La première phase de décongélation, où d'expansion gazeuse est plus tôt très faible, est en général lente et progressive. Sa durée diminue avec l'augmentation de la température de décongélation, et varie de 35 min à 40 °C jusqu'à 240 min à 5 °C. Les durées sont les mêmes pour une température de décongélation donnée pour tous les temps de pointage, de 60 à 120 min (tableau 40).

La deuxième phase ascendante, de fermentation active atteint son maximum à des temps différents suivant les temps de pointage. Globalement, le temps maximum moyen de la phase active de fermentation diminue de 453 à 137 min avec l'élévation de la température de décongélation de 5 °C à 40 °C.

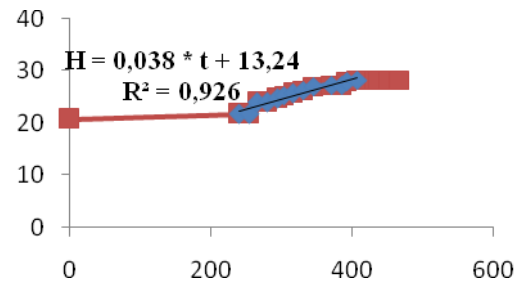
Le troisième segment de la courbe, se qui présente en plateau a une durée de 15 à plus de 60 min diminue avec l'élévation de la température de décongélation.

Dans la dernière phase, descendante, est absente à 5 °C. Cette décroissance est prononcée à 40 °C et plus tôt progressive à 25 °C.

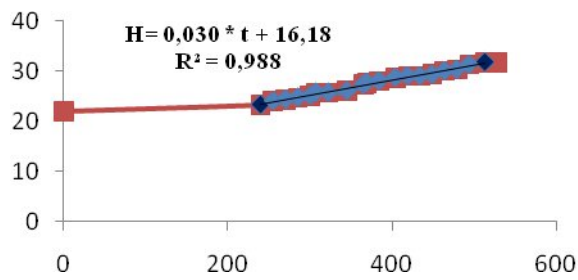




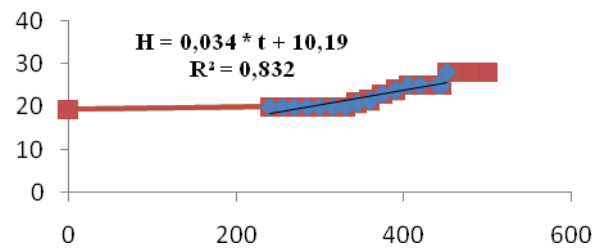
(A)



(B)

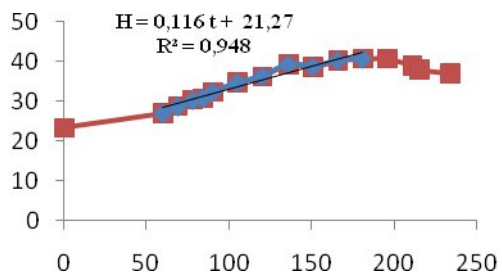


(C)

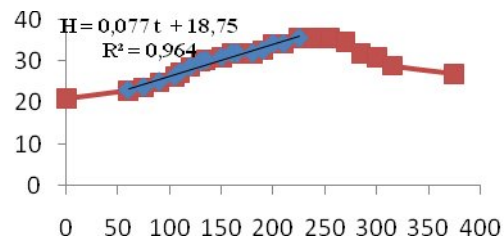


(D)

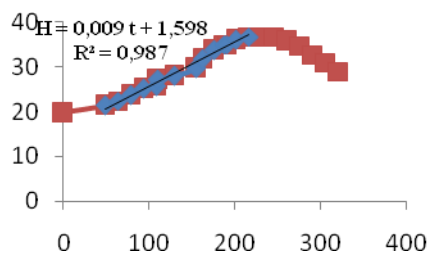
**Figure 29.** Evolution de la hauteur (mm) de fermentation de la pâte décongelée à 5 °C en fonction de temps (min). (A) : pointage 60 min, (B) : pointage 90 min, (C) : pointage 105 min, (D) : pointage 120 min, H : hauteur de fermentation de la pâte,  $R^2$  : coefficient de détermination, t : temps de fermentation par minute.



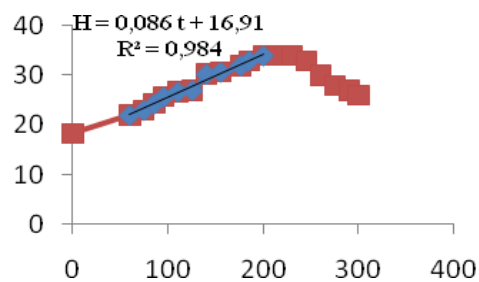
(A)



(B)

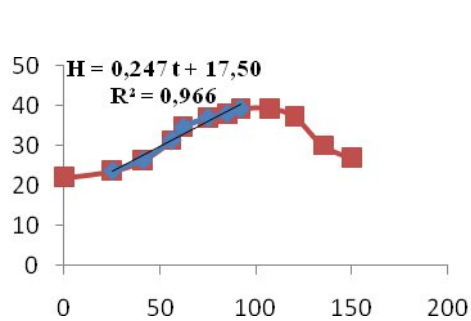


(C)

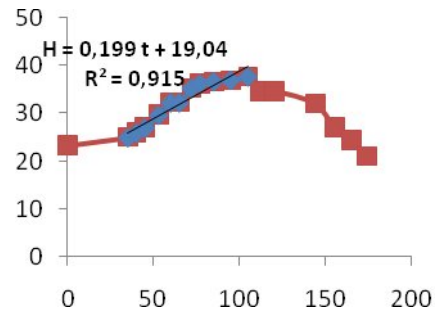


(D)

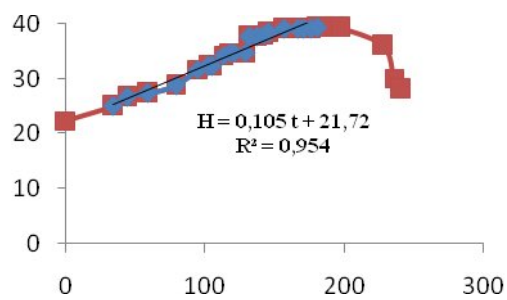
**Figure 30.** Evolution de la hauteur (mm) de fermentation de la pâte décongelée à 25 °C en fonction de temps (min). (A) : pointage 60 min, (B) : pointage 90 min, (C) : pointage 105 min, (D) : pointage 120 min,  $H$  : hauteur de fermentation de la pâte,  $R^2$  : coefficient de détermination,  $t$  : temps de fermentation par min



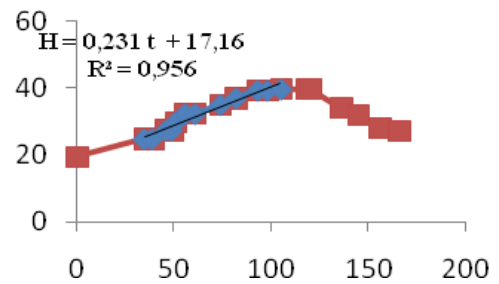
(A)



(B)



(C)



(D)

**Figure 31.** Evolution de la hauteur (mm) de fermentation de la pâte décongelée à 40 °C en fonction de temps (min). (A) : pointage 60 min, (B) : pointage 90 min, (C) : pointage 105 min, (D) : pointage 120 min, H : hauteur de fermentation de la pâte,  $R^2$  : coefficient de détermination, t : temps de fermentation par min.

**Tableau 40.** Durées (min) des phases des courbes de fermentation des pâtes suivant la température de décongélation

Phases	Température de décongélation		
	5 °C	25 °C	40 °C
Décongélation	240	60	35
Ascendante*	453 (393 - 513)	203 (181 - 225)	137 (92 - 181)
Plateau	>60	30	15
Descendante	—	>60	>30

\* temps maximum moyen, ( ) : intervalle des maxima suivant les pointages

#### 4. 2. Vitesse de fermentation dans la phase ascendante

L'expansion ou fermentation exprimée par la variation du volume se fait dans la deuxième phase ascendante de la courbe (Annexes, tableaux D, E et F) suivant une droite de la forme  $y = b x + a$  (figures 32, 33 et 34).

##### 4. 2. 1. Vitesse de fermentation de la pâte décongelée à différents température

Les paramètres de ces droites (segment ascendant) pour les pâtes fermentées aux différents pointages et décongelées à température de 5 °C à 40 °C sont présentés dans le tableau 41. Les régressions sont significatives ( $p < 0,01$ ), pour tous les cinétiques. Les pentes (b) représentant.

A 5 °C les vitesses d'expansion gazeuse varient de 0,03 à 0,04 mm/min. Aux pointages 60 et 90 min la vitesse est relativement rapide, par contre, les vitesses aux pointages 105 et 120 min sont plus lentes.

Dans la décongélation à 25 °C et avec les pointages 60, 90 et 120 min les vitesses de fermentation sont relativement élevées. A 105 min de pointage la vitesse est dix fois moindre.

Dans la décongélation à 40 °C, les vitesses d'expansion gazeuse varient de 0,019 à 0,247 mm/min. A 60 et 120 min de pointages la est élevée (0,23 à 0,25

mm/min). A 90 min de pointage la vitesse est la plus faible.

Globalement les vitesses de fermentation après décongélation dans la phase ascendante doublent d'intensité en passant d'une température à la suivante.

**Tableau 41.** Paramètres de la phase ascendante de la courbe de la fermentation  $H = f(t)$  de la pâte décongelée à différentes températures.

T° Dng.	Pt (min)	b	a	R <sup>2</sup>	r	n	P
5 °C	60	0,040	14,87	0,988	0,994	15	< 0,01
	90	0,038	13,24	0,926	0,962	13	< 0,01
	105	0,030	16,18	0,988	0,994	19	< 0,01
	120	0,034	10,19	0,832	0,912	16	< 0,01
25 °C	60	0,116	21,27	0,948	0,974	11	< 0,01
	90	0,077	18,75	0,964	0,982	14	< 0,01
	105	0,009	1,598	0,984	0,992	16	< 0,01
	120	0,086	16,91	0,984	0,992	11	< 0,01
40 °C	60	0,247	17,5	0,966	0,983	7	< 0,01
	90	0,019	1,904	0,915	0,956	11	< 0,01
	105	0,105	21,72	0,954	0,977	20	< 0,01
	120	0,231	17,16	0,956	0,978	12	< 0,01

T° de Dng : température de décongélation, Pt : pointage, b : pente, a : terme constant, n : effective, P : probabilité, R<sup>2</sup> : coefficient de détermination, r : coefficient de corrélation.

### 4. 3. Variation de la vitesse de fermentation

La variation de la vitesse dans les phases ascendantes, de nature polynomiale, est illustrée par les courbes (figures 31, 32 et 33).

Les variations des vitesses dans les phases ascendantes, calculées à partir des données et déduites de courbes ajustées ou théoriques avec ces même données sont présentées dans le tableau 42

#### 4. 3. 1. Variation Vitesse de fermentation de la pâte après décongélation à 5 °C

La variation de la vitesse  $dx/dt$  en fonction du temps de la phase ascendante atteint un maximum au bout de 120 min dès le début de l'expansion gazeuse, soit 360

min dès le début de la décongélation (figure 29).

Pour tous pointages, la variation de vitesse observée au début de la phase ascendante est nulle, sauf pour le pointage 60 min où la vitesse initiale déduite de la courbe théorique est de 0,02 mm/min, les autres vitesses initiales théoriques sont également nulles (figure 32)

Les vitesses de fermentation atteignent un maximum observé variant de 0,075 à 0,113 mm/min contre un intervalle théorique de 0,04 à 0,067 mm/min (tableau 42).

**Tableau 42.** Variation des vitesses minimales et maximales,  $dx/dt = f(t)$ , observés et théoriques des quartes pointages (Pt) étudés après leur décongélation à différentes températures, dans la phase ascendante.

T° Dng	Temps pointage (min)	Variation de la vitesse observée (mm/min)		Variation de la vitesse théorique (mm/min)	
		dv/dt min	dv/dt max	dv/dt min	dv/dt max
5 °C	60	0	0,108	0,02	0,067
	90	0	0,075	0	0,04
	105	0	0,1	0	0,059
	120	0	0,113	0	0,051
25 °C	60	0,027	0,267	0,027	0,17
	90	0	0,14	0,021	0,1
	105	0	0,28	0	0,38
	120	0,067	0,22	0,067	0,18
40 °C	60	0,1	0,567	0,16	0,44
	90	0,03	0,43	0	0,38
	105	0	0,25	0	0,18
	120	0	1,2	0	0,52

dv/dt min : variation de la vitesse min minimale, dv/dt : variation de la vitesse, max : maximale, T° Dng : température de décongélation

#### 4. 3. 2. Variation de la vitesse de fermentation de la pâte après décongélation à 25 °C

La courbe de la variation de la vitesse  $dx/dt$  atteint un maximum au bout de 108 min dès le début de l'expansion gazeuse, soit 168 min dès le début de la décongélation.

A 25 °C, pour les pointages 60 et 120 min, la variation de la vitesse observée au début de la phase ascendante varient de 0,027 à 0,067 mm/min et elle est nulle dans les pointages 90 et 105 min. La vitesse initiale déduite de la courbe théorique (figure 33)

varient de 0,021 à 0,027 mm/min. Elle est nulle au pointage 105 min (tableau 42).

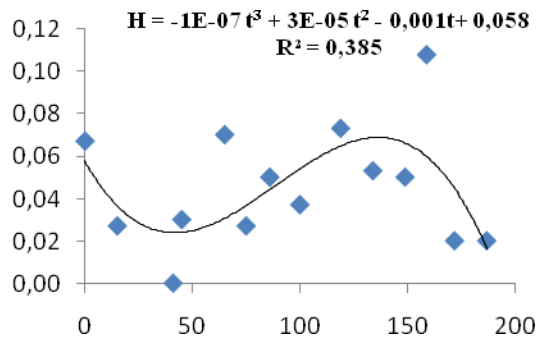
Les vitesses de fermentation atteignent un maximum observé variant de 0,14 à 0,28 mm/min contre un intervalle théorique de 0,1 à 0,38 mm/min.

#### **4.3. 3. Variation Vitesse de fermentation de la pâte après décongélation à 40 °C**

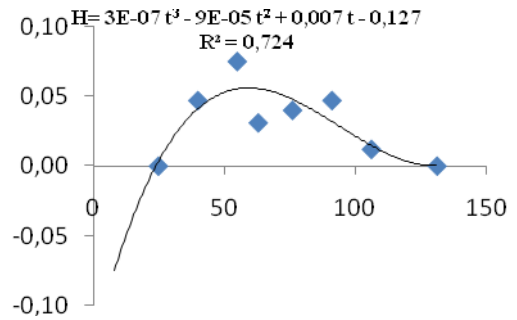
À 40 °C, la variation de la vitesse  $dx/dt$  en fonction du temps de la phase ascendante atteint un maximum au bout de 49 min au pointage 120 min, soit 289 min dès le début de la décongélation.

Pour les pointages 60 et 90 min, la vitesse observée au début de la phase ascendante varie de 0,03 à 0,1 mm/min et elle est nulle dans les pointages 105 et 120 min. Les vitesses de fermentation atteignent un maximum observé variant de 0,25 à 1,2 mm/min contre un intervalle théorique de 0,18 à 0,52 mm/min (tableau 42).

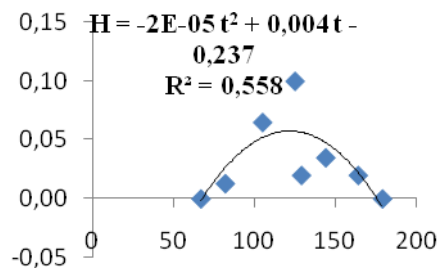
Sauf pour le pointage 60 min où elle est 0,16 mm/min, la vitesse initiale théorique déduite de la courbe théorique (figure 34) est nulle.



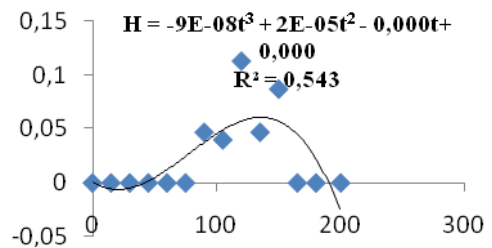
(A)



(B)



(C)

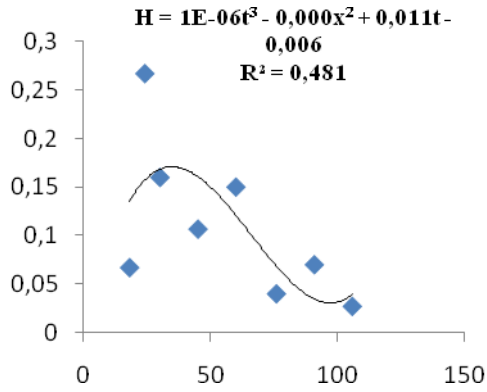


(D)

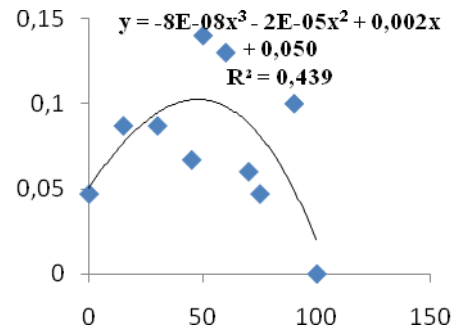
**Figure 32.** Variation de vitesse théorique  $dx/dt$  (mm/min), de la de la pâte décongelée à 5 °C puis fermentée au cours de la phase ascendante, en fonction de temps (min).

$dx$  : variation de vitesse théorique de fermentation en mm par min,  $dt$  : variation de temps en min (A) : pointage 60 min, (B) : pointage 90 min, (C) : pointage 105 min, (D) : pointage 120 min, H : hauteur de fermentation de la pâte,  $R^2$  : coefficient de détermination, t : temps de fermentation par min

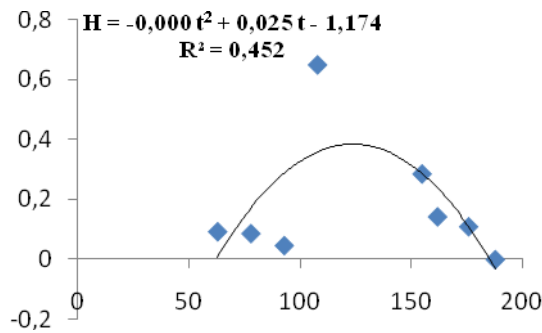




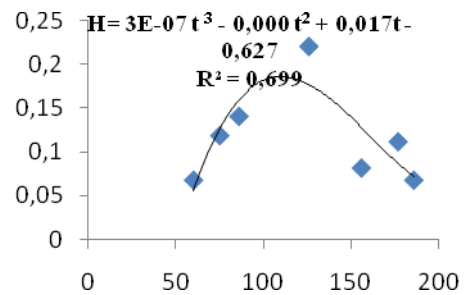
(A)



(B)



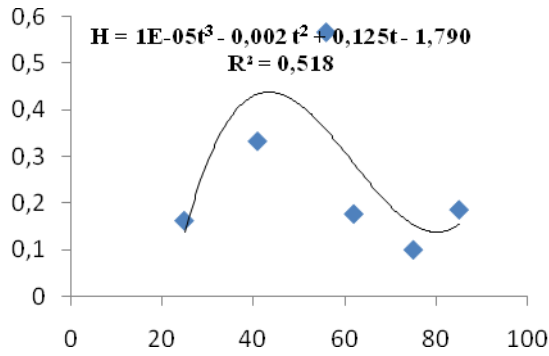
(C)



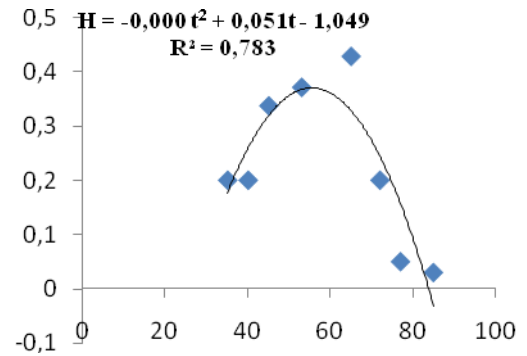
(D)

**Figure 33.** Variation de vitesse théorique  $dx/dt$  (mm/min), de la de la pâte décongelée à 25 °C puis fermentée au cours de la phase ascendante, en fonction de temps (min).

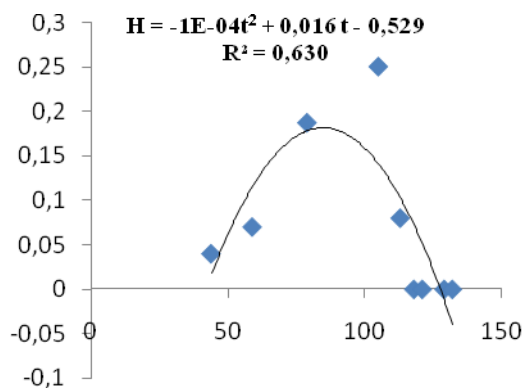
$dx$ : variation de vitesse théorique de fermentation en mm par min,  $dt$ : variation de temps en min, (A) : pointage 60 min, (B) : pointage 90 min, (C) : pointage 105 min, (D) : pointage 120 min, H : hauteur de fermentation de la pâte,  $R^2$  : coefficient de détermination, t : temps de fermentation par min



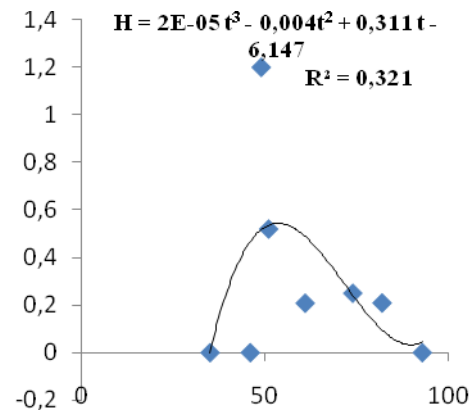
(A)



(B)



(C)



(D)

**Figure 34.** Variation de vitesse théorique  $dx/dt$  (mm/min), de la de la pâte décongelée à 40 °C puis fermentée au cours de la phase ascendante, en fonction de temps (min).

$dx$  : variation de vitesse théorique de fermentation en mm par min,  $dt$  : variation de temps en min, (A) : pointage 60 min, (B) : pointage 90 min, (C) : pointage 105 min, (D) : pointage 120 min, H : hauteur de fermentation de la pâte,  $R^2$  : coefficient de détermination, t : temps de fermentation par min.

*Conclusions*  
*Générales*

## CONCLUSIONS GENERALES

Dans la panification du témoin, le pointage et l'apprêt ont des effets combinés remarquables sur la qualité du pain. La fermentation biphasique est donc préférable à la fermentation unique.

L'apprêt (App) affecte plus le rapport de forme H/L ( $r = -0.69$ ) que la masse volumique M/V ( $r = -0.18$ ), l'optimal est de 45 mn. La durée du pointage (Pt) à elle seule au-delà de 45 mn semble avoir peu d'effet sur la qualité du pain.

Cependant, la combinaison de ces deux fermentations influence la masse volumique et donc la qualité du pain. Au final, le couple de fermentation Pt/App. 120/45 est un compromis pour un H/L élevé ( $> 0.65$ ) et une M/V proche de 0.35.

Dans le pain de pâte préfermentée et congelée, le pointage a un effet très faible, 0.01 p. cent sur M/V et assez élevé 10 p. cent sur H/L qui ne s'observent qu'entre durées extrêmes (45 et 120 mn). L'apprêt, notamment entre 15 et 45 mn, influence sensiblement (17 p. cent) M/V et il a un effet prépondérant (40.39 p. cent) sur H/L à partir de 15 mn.

L'interaction de ces deux fermentations diminue leur effet sur M/V, et leur combinaison avec le mode de décongélation se répercute négativement sur H/L (4.73 p. cent). Le mode de décongélation seul affecte (4.2 p. cent) H/L mais pas M/V.

Le meilleur pain de pâte congelée est celui obtenu avec la fermentation 60/15 et cuit directement sans congélation préalable. Le deuxième pain en qualité est celui de la décongélation à 5 °C avec un couple de fermentation 90/15 et le troisième classé est

décongelé à 40 °C avec un couple 120/15. Le temps de décongélation à 5°C est de 240 mn et à 40°C il est de 35 mn.

Au final nous estimons que la panification à partir de pâte fermentée et congelée est faisable et ne nécessite pas de décongélation préalable à la cuisson. Sans utilisation d'améliorant de panification, le résultat est similaire au témoin avec un gain appréciable du temps de fermentation. Nous recommandons ainsi l'industrialisation de la fabrication de la pâte fermentée et congelée qui sera destinée à des terminaux de cuisson des grandes surfaces, des boulangeries ou même des cantines.

En perspective, la cinétique d'expansion gazeuse après décongélation que nous avons décrite, utile pour déterminer la fermentation optimale, est à approfondir dans d'autres travaux notamment sur les pâtes non fermentées avant congélation. Egalement, l'effet de la durée de congélation de la pâte sur la qualité du pain et la préservation de l'activité fermentaire de la levure lors de la congélation sont des recherches à mener sur le sujet.

*Références  
Bibliographiques*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFF (ASSOCIATION FRANÇAISE DE FROIDE), (1995). Maîtrise de la chaîne du froid des denrées surgelées. Guide technique *Cemagref*, Paris, 120 p.
- ALAIS C. & LINDEN G. (1997). Biochimie alimentaire. ABREGES. 2<sup>ème</sup> édition, Masson. 254 p.
- ANONYME. (1991). Contrôle de la qualité des produits alimentaires. Recueil des normes françaises, 5<sup>ème</sup> édition, AFNOR, Paris. 360 p.
- ANONYME. (1995). Contrôle de la qualité des produits alimentaires. Recueil des normes françaises, 5<sup>ème</sup> édition, AFNOR, Paris. 400 p.
- AUTIO K. & SINDA E. (1992). Frozen doughs *in* Rheological changes and yeast viability. *Cereal Chem.* vol.413 p.
- AUTIO K. & LAURIKAINEN T. (1997). Relationships between flour/dough microstructure and dough handling and baking properties. *Trends in Food Science & Technology*. 185 p.
- BAKER J.C. & MIZE M.D. (1941). The origin of the gas cell in bread dough. *Cereal Chemistry*. 34 p.
- BELITZ H. D. & GROSCH W. (1987). Cereal and cereal products. *In: Food Chemistry*. Springer- Verlag, Berlin :535 p .
- BERGLUND P.T., SHELTON D.R. & FREEMAN T.P. (1991). Frozen bread dough ultra structure as affected by duration of frozen storage and freeze-thaw cycles. *Cereal Chem.* vol.107 p.
- BEUCHAT L. R. (1987). Traditional fermented food products. *Food and Beverage Mycology*,306 p.
- BILIADERIS C. (1990). Thermal analysis of food carbohydrates . *In* Developments carbohydrate chemistry. ALEXANDER R., & ZOBEL H. Eds., New York. 220 p.
- BIMBENET J., DUQUENOY A. & TRYSTMAN G (2002). Génie des procédés alimentaires, Edition RIA, DUNOD, Paris, 369 p.
- BLOKSMA A. H. (1990). Dough structure *in* dough rheology, and baking quality. *Cereal Foods World*, 244 p.
- BOURDET A. (1977) .La biochimie du pain *in* La Recherche, 74 p.
- BRÜMMER J.M., NEUMANN H. & MORGENSTERN G. (1993). Tiefkühlung von Teigling en für Weizenvollkornbrötchen. *Getreide Mehl und Brot*, vol.47 (2). 28 p.
- BUNKAR J. R., LOCKERMAN R.H., MCGUIRE C. F., BLAKE T.K. & ENGEL R.E. (1989). Silos Moisture Effects on bread loaf Quality and Evaluation of gliadins with

- Reversed- Phase high performance liquid Chromatography. *Cereal Chem.* 431 p
- BUSHUK W. (1974). Glutenin *in* Function properties and genetics. *The Bakers' Digest*: 22 p.
- CALVEL R. (1984). *La boulangerie moderne*. Editions EYROLLES, 10<sup>ème</sup> Édition, Paris. 460 p.
- CAUVAIN S. P. (2001). *Breadmaking: in Cereals processing technology*. CRC press Boca Raton Boston New York Washington, DC. Eds. Gavin Owens.
- CECYLIA J. M. & BOUSHUK W. (1967). Study of Gas production and Retention *in* Doughs with a Modified Brabender oven -Rise Recorder. *Cereal Chem.*307 p.
- CHARGELEGUE A., GUINET R., NEYRENEUF O., ONNO B. & POITRENAUD B. (1994). *La fermentation in: La panification française*, Vol. 528. GUINET, R. & GODON B. Edition., Lavoisier - Apria, Tec & Doc, Paris, 1994 : 283-325 p.
- CHEFTEL J.C. & CHEPTEL H. (1977). *Traitement de préservation in introduction à la biochimie et à la Technologie des aliments*. Volume 2. Ed : Tec & Doc. Lavoisier. Paris .419p.
- CHIRON H, HELGOUACH B, FISCHER J & RATHIER F. (2007). *Connaissance des filières meunerie et boulangerie in Du blé au pain. Le bio, une filière d'avenir*, INRA, Paris, 17 p.
- COLAS A. & PETEL D. (1984). *Analyse physique des farines. in: guide pratique d'analyses dans les industries des céréales*. GODON B. & LOISEL W. Tec & Doc. Lavoisier, Paris : 153-16 p.
- DEL FRATE R. (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 p.
- DEMIRALP H., ÇELIK S. & KÖKSEL H. (2000). Effects of oxidizing agents and defatting on the electrophoretic patterns of flour proteins during dough mixing. *European Food Research and Technology*. 325 P.
- DUBOIS D.K. & BLOCKCOLSKY D.(1986). *Frozen bread dough: Effect of additives*. AIB Tech. Bull. Vol. VIII, Issue 4. Manhattan KS: American Institute of Baking. 7 p.
- FARIDI H. A. & RUBENTHALER G.L. (1984). Effect of baking time and temperature on bread quality, starch gelatinization, and staling of egptian balady bread. *Cereal Chem.*, 488 p.
- FARRAND E. A. (1972). Controlled levels of starch damage in a commercial United Kingdom bread flour and effects on absorption, sedimentation value and loaf quality. *Cereal Chem.* 479 p.
- FENNEMA O.R., POWERIE W.D. & MARTH E.H. (1973). *Low-temperature*



- preservation of foods and Living Matter, DEKKER M. edition New York. 219 p .
- FEUILLET P., GUINET R., MOREL M. H. & ROUAU X. (1994). La pâte. Formation et développement *in* : La panification française. GUINET R. & GODON B. Tec. & Doc. Lavoisier, Paris 279 p.
- FINNEY K. F., JONES B.L. & SHOGREN M. D. (1982). Functional (bread making) properties of wheat protein fractions obtained by ultracentrifugation. *Cereal Chem.*453 p.
- FINNEY K.F. & BARMORE. A.1948. Loaf volume and protein content of hard winter and spring wheat. *Cereal chem.*312p.
- FOUCART T. (1982). Analyse factorielle. Programmation sur micro-ordinateur. *Editions Masson*, Paris, 243 p.
- FRAZIER P. J., BREIMBLECOME F. A., DANELS N. W. R. & RUSSELLEGITT P.W. (1979). Bessers brot aus schwacherem weizen rheologische Überlegungen. *Getreide Mehl und Brot.* 271 p.
- FREDOT E. (2005). La conservation des aliments in *Connaissance des aliments, Bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique*, 3<sup>ème</sup> édition Lavoisier. 397 p.
- GELLER S. (1983). Statistique, abrèges, 4<sup>ème</sup> édition Masson, paris New York, 229 p
- GENOT C. (2000). Aspects généraux de la congélation *in* *Congélation et qualité de la viande.* *Editions INRA*, Technique et pratique, paris, 92 p.
- GEOFFREY. & KEPPEL K. (1982). Design and analysis a researcher's handbook, 2<sup>nd</sup> edition prentice-hall,inc., Englewood Cliffs, New Jersey,669 p.
- GIANNOU V., KESSOGLOU V. & TZIA C. (2003). Quality and safety characteristics of bread made from frozen dough. *Trends in Food Science and Technology.* 108 p.
- GIANNOU V. & TZIA C. (2007). Frozen dough bread *in* quality and textural behavior during prolonged storage – prediction of final product characteristics. *Journal of Food Engineering.* 934 p.
- GODON B. & POPINEAU Y. (1984). Séparation et dosage des protéines et protéases *in* : Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales, Vol. 819. GODON B. & LOISEL, W. eds. Lavoisier-Apria, Tec & Doc, Paris. 810 p.
- GODON B. (1991). Les constituants des céréales, nature, propriétés et teneurs. *In* : Biotransformation des industries céréalières. GODON B. Tec. & Doc. Lavoisier, Paris : 22 p.
- GOFF H.D. & SAHAGIAN M.E. (1996). Fundamental aspects of the freezing process in Freezing effects of on food quality, L.E. Jeremiah ed., Marcel Dekker, New-York.50 p.
- GRANDVOINNET P & PRATX B. (1994). Les ingrédients des pâtes. *In* : la panification française. GUINET R. & GODON B. Eds., Lavoisier-Apria, Tec & Doc, Paris : 130 p.

- GRAYBOSCH R., PETERSON C.J., MOORE K. J., STEARNS M. & GRANT D. L. (1993). Comparative effects of wheat flour protein, lipid and pentosan composition *in* relation to baking and milling quality. *Cereal Chem.* 101 p.
- GREENWOOD C.T. & BANKS W. (1975). *Starch and its components*. Edition burgh University Press. 45 p.
- GUINET R. (1979). Evolution de la qualité de pain *in* *Le pain*, Actes de colloque du CNERNA, BURE J. Edition de CNRS, quai Anatole- France, paris, 314 p.
- GUINET R. (1992). *Technologie de pain français*. Edition B.P.I., Paris, 181 p.
- GUINET R. & GODON B. (1994). *La panification française*. Eds., Lavoisier-Apria, Tec & Doc, Paris. 534 p.
- HAMADA A., DONALD C.E. & SIBBITT L. D.(1982) . Relationship of protein fractions of spring wheat flour to baking quality. *Cereal Chem.* 311 p .
- HANNEFORTH U., BRACK G & VALERIUS U. (1994) Herstellung von Hefefeigebäck aus Vorgegärten Tiefkühlteigen. *Getreide Mehl und Brot*,vol. 48 p.
- HAVET M., MANKAI M. & LE BAIL A. (2000). Influence of the freezing conditions on the baking performances of French frozen dough . *Journal of Food Engineering.* 145 p.
- HECKELMANN U. (1993). Gärzeitsteuerung Verfahrenstechnik von Heute und Morgen. *Brot und Backwaren*, vol. 12.36 p.
- HERRERO D. & ETIENNE G. (2009). *Les nouvelles influences dans les métiers de l'Alimentation, traite scientifique.*148 p.
- HOLAS J. & TIPPLES K. H., (1978). Factors Affecting Farinograph and Baking Absorption. 1. Quality Characteristics of Flour Streams. *Cereal Chem.* 652 p.
- HOULIAROPOULOS E. (1982). Détermination, Utilisation en sélection variétale et bases biochimiques des propriétés viscoélastiques du gluten de blé tendre. Thèse Docteur d'ingénieur en science alimentaire, Université Languedoc, Montpellier, France.
- HSU K.H., HOSENEY R.C. and SEIB P.A. (1979). Frozen dough. I. Factors affecting stability of yeasted doughs. *Cereal Chem.*, vol. 424 p.
- INOUE Y. & BUSHUK W. (1991). Studies on frozen doughs. I. Effects of frozen storage and freeze-thaw cycles on baking and rheological properties.*Cereal Chem.*, vol. 631 p.
- INOUE Y., SAPIRSTEIN H. D., TAKAYANAGI S. & BUSHUK W. (1994). Studies on Frozen Doughs. III. Some Factors Involved in Dough Weakening During Frozen Storage and Thaw-Freezing Cycles, *BREADBAKING*, *Cereal Chem.*;121 p.
- J.O.R.A. (Journal Officiel de la République Algérienne) (1991). Décret exécutif N° 91/572 du 31 décembre relatif à la farine de panification au pain.

JEANTET R., CROGUENNEC T., SCHUCK P. & BRULE G. (2007). Sciences des aliments, vol 2. Edit TEC & DOC, Lavoisier, paris, 189 p.

JEANTET R., CROGUENNEC T., SCHUCK P. & BRULE G. (2006). Traitement de stabilisation des aliments in Science des aliments, vol 1. Édition. Lavoisier Tec & Doc, Paris : 383 p.

JELAKA S. L. & HLYNKA I. (1972). Effect of wheat-flour pentosans *in* dough, gluten and bread. *Cereal Chemistry*. 495 p

KAUFMANN B. & KUHN M. (1994). Rheologie von Weizenteigen mit Hefe. *Getreide Mehl und Brot*, vol. 52 p.

KENNY S., WEHRLE K., AUTY M. & ARENDT E. K. (2001). Influence of sodium caseinate and whey protein on baking properties and rheology of frozen dough. *Cereal Chemistry*. 463 p.

KHAN K. TAMMINGA G. & LUKOW O. (1989). The effect of wheat flour proteins on mixing and baking. Correlations with protein fractions and high molecular weight glutenin subunit composition by gel electrophoresis. *Cereal Chem.* 396 p.

KIGER J. L. & KIGER J. G. (1967). Technique modernes de la pâtisserie-boulangerie industrielles et artisanales et des produits de régime. Tome1. Edition DUNOD, paris, France, 676 p.

KIM S. K. & D'APPOLONIA B.L. (1977). The role of wheat Flour constituents *in* Bread staling . *The bakers Digest*. 57 p.

KLINE L. & SUGIHARA T. E. (1968). Factors affecting the stability of frozen doughs. I. Prepared by straight dough method. *Baker's Digest*. 53p.

KLUP K. & BECHTEL W.G. (1970). Effects of water soluble pentosan fraction of wheat endosperm on the quality of white bread, *Cereal Chem.*, 504 p.

KULP K. (1995). Biochemical and biophysical principles of freezing. *Frozen and Refrigerated Doughs and Batters*. St. Paul, Minnesota, USA: AACC publisher. 89 p.

LANGRAF F. (2002). Procédés de panification in *Produits et procédés de panification. Techniques de l'Ingénieur, traité Agroalimentaire F6 12-108 p.*

LARPENT J.P. (1992). La Microbiologie de la fermentation panaria in *Agro-alimentaire Informations* édition Massy : APRINCDKJPA. 65 p.

LE BAIL A., NICOLITCH C. & VUILLOD C. (2010). Fermented frozen dough *in* impact of pre-fermentation time and of freezing rate for a pre-fermented frozen dough on final volume of the bread. *Food and Bioprocess Technology*, 203 p.

LE NAOUR A., LE QUENTREC B., ROELOFS C., LAKHDARI W., MORICEAU S. PEYRON C., MEUNIER M. & PFIRSCH N. (1998). Les technologies de panification française in filière pain, Projet interdisciplinaire DESS. 240 p.

LE VAVASSEUR 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. Thèse de DOCTORAT Université Paris VII & Paris XI. 434 p.

LECOQUE R. (1965). Manuel d'analyses alimentaires et d'expertises usuelles. Tome 2 (F à Z). Edition DOIN. DEREN & Cie, Paris, 1246 p.

LEMOTNE D. (1996). Le pain précuit surgelé prend le relais. RIA, 555 p.

LINAS C. (1988). Carbohydrates of Durum Wheat *in* Durum Wheat. Chemistry and Technology, 138 p.

LORENZ K. & KULP K. (1995). Freezing of Doughs for the Production of Breads and Rolls in the United States. In: Frozen & Refrigerated Doughs and Batters. Ed. K. Kulp, K. Lorenz and J. Brümmer. Minnesota: AACC. 155p.

LU W. & GRANT L. (1999). Effects of prolonged storage at freezing temperatures on starch and baking quality of frozen doughs. Cereal Chemistry, 662 p.

Mac RITCHIE F. (1977). The liquid phase of dough and its role *in* baking. Cereal Chem., vol 326 p.

MAFART P., (1991). Chapitre 7. La congélation *in* Génie Industriel Alimentaire. Tome 1 Les procédés physiques de conservation, édition. Lavoisier Tec & Doc, Paris. 295 p.

MARSTON P.E. (1978). Frozen doughs for breadmaking. *The baker's Digest*, vol.52 (2), 18 p.

MARSTON P. E. & WANNANN T.L. (1983). Bread Baking *in* The transformation from dough to bread. *The baker's Digest*: 64 p.

MARTIN M., ZELEZNAK K. & HOSENEY R. (1991). A mechanism of bread firming. I. Role of starch swelling. Cereal Chemistry, 503 p.

MEREDITH P. (1964). A theory of gluten structure. Cereal Science Today.54 p.

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

NAMOUNE H. (1996). Panification de blé dur : mise au point d'un test de panification et d'aspects variétaux, génétiques, histologiques et technologiques. *Thèse de Doctorat d'état*, Université de Constantine, 2263 p.

ORTH R.A & BUSHUK W. (1972). A Comparative Study of the proteins of wheats of diverse Baking qualities. Cereal Chem, 275 p.

- OUDOT C. (1999). Technique de stabilisation *in* la transformation des aliments, option génie alimentaire, Editions ballery Techniplus, France, 79 p.
- PATIL S.K., TSEN C.C. & LINEBACK D.R. (1975). Water – soluble pentosans of wheat flour. II. Characterization of pentosans and glycoproteins from wheat flour and dough Mixed under Various conditions . Cereal Chem. 69 p.
- PHIMOLSIRIPOL Y., SIRIPATRAWAN U., TULYATHAN V. & CLELAND D. J. (2008). Effect of cold pre-treatment duration before freezing on frozen bread dough quality. Inter-national Journal of Food Science and Technology. 1762 p.
- PHIMOLSIRIPOL Y., SIRIPATRAWAN U. & CLELAND D.J. (2011). Weight loss of frozen bread dough under isothermal and fluctuating temperature storage conditions. Journal of Food Engineering. 143 p.
- POMERANZ Y. (1983). Molecular approach to breadmaking. An update and new perspectives. *The baker's Digest*, 86 p.
- POTUS J. & DRAPRON R. (1990). De la qualité dans la filière blé, farine, pain. 3. Les comportements physicochimiques de la qualité dans la filière farine, pain.*in* industries des céréales. 67 p.
- PYLER E.J. (1988). The carbohydrates *in* Baking science and Technology. 3ème edition published by Sosland publishing Company Merriam, Kansas. 38 p.
- RÄSÄNEN J., BLANSHARD J. M. V., MITCHELL J. R., DERBYSHIRE W. & AUTIO K. (1998). Properties of Frozen Wheat. Doughs at Subzero Temperatures. Journal of Cereal Science. 28 p.
- RÄSÄNEN J., HÄRKÖNEN H. & AUTIO K. (1995). Freeze-Thaw Stability of Prefermented Frozen Lean Wheat Doughs: The Effect of Flour Quality and Fermentation Time. Cereal Chemistry 642 p.
- RIBOTTAA P. D., ALBERTO E. L. & ANONB M. C. (2003). Effect of freezing and frozen storage on the gelatinization and Retrogradation of Amylopectin in dough baked in a differential scanning calorimeter, Food Research International 363 p.
- ROLES S.P., CLEEMPUT G., VANDEWALLE X., NYS M. & DELCOUR J.A. (1993). Bread Volume Potential of Variable Quality Flours with Constant Protein Level As Determined by Factors Covering Mixing Time and Baking Absorption Levels. Cereal Chem. 323 p.
- ROUAU X. (1990). Les polysaccharides pariétaux du grain de blé. Hémicelluloses et pentosanes, INRA, Montpellier, France. 38 p.
- ROUSSEL P. & CHIRON H. (2002). Les pains français : Evolution, qualité, production. 1<sup>ère</sup> édition. MAE-ERTI, France, 200 p.

- ROUSSET M. & LOISEL W. (1984). Tests de laboratoire *in* : Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales, GODON B. & LOISEL, W. édition. Lavoisier-Apria, Tec & Doc, Paris. 509 p.
- SCHOCH T. J. & FRENCH D. (1947). Studies on bread staling. I. The role of starch. *Cereal Chemistry*, 231 p.
- SETSER C. S. (1996). Sensory methods. *In* Baked goods freshness, HEBEDA, R. E. & ZOBEL, H.F. eds., Marcel Dekker, Inc, USA :187 p.
- SHOGREN M. D., FINNEY K.F. & HOSENEY R.C. (1969). Functional and Biochemical Properties of Wheat Flour Components in solubilizing *in* Gluten and Flour Protein, *Cereal Chem.* 102 p.
- STAUFFER C.E. (1993). Frozen Dough Production. *in* Advances in Baking Technology. Ed STAUFFER. C.E. & GLASGOW UK: Blackie Academic & Professional. 106 p.
- STRIGLER F., TOURAILLE C., SAUVAGEOT F., BARTHELEMY J. & ISSANCHOU S. (1998). Les épreuves. *In*: Evaluation sensorielle - Manuel méthodologique, Vol. 528, 2 ed., Depledt, F. ed., Lavoisier-Apria, Tec & Doc, Paris, 181p.
- TALANTIKIT M. (1991) . Wheat Symposium Alegria-canada in systèmes de contrôle de qualités de blés. 44 p.
- TAUPIER-LETAGE B. (2005). La qualité des blés panifiables en agriculture biologique in AQS (Aliment Qualité Sécurité), INRA, Alter Agri. 71 p.
- TOFFALORI N. (1993) Le pain et la santé in Thèse : Pharmacie : Lille, 123 p.
- UGRINOVITS M., ARRIGONI E., DOSSENBACH A. HÄBERLI G. HANICH H., RYCHENER M., THORMANN M. & STALDER U. (2004). Chapitre 14.Manuel suisse des denrées alimentaires in Céréales, produits de l'industrie meunière, pré-mélanges pour four, mélanges de farine, farines Instantanées, édition MSDA. 40 p.
- VAN VLIET T. (2008). Strain hardening as an indicator of bread-making performance: A review with discussion. *Journal of Cereal Science* 48 p.
- VARRIANO-MARSTON E., HSU K.H. & MHADI, J. (1980). Rheological & structural changes in frozen dough. *Baker's Digest*, vol. 54. 41 p.
- VIERLING E., (1999). Sciences des aliments et boissons Filières et produits. Edition Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, 164 p.
- VOIVALA L. (1998). Effects of biopolymers on frozen preproofed doughs. A Final Year Project. Vantaa: Espoo-Vantaa Institute of Technology. Study Programme *in* Biotechnology. 72 p.
- YASUNAGA T., BUSHUK W. & IRVINE G.N.(1968). Gelatinization of starch during bread baking. *Cereal Chem.*, 279 p.

ZELEZNAK K. & HOSENEY R. (1986). The role of water *in* The Retrogradation of Wheat Starch Gels & Bread Crumb. *Cereal Chemistry*, 411p.

ZOBEL H. & KULP K. (1996). The staling mechanism. *in* Baked goods freshness, Edition, New York: Marcel Dekker. 64 p .

ZOUNIS S., QUAIL K. J., WOOTTON M. & DICKSON M. R. (2002). Effect of final dough temperature on the microstructure of frozen bread dough. *Journal of Cereal Science*. 146 p.

## **Communications à des congrès de cette étude**

FALEK W., AGLI A., BENSALÉM A. & OULAMARA H. (2013). Fabrication de Pain à partir de Pâte Fermentée et Congelée : Modes de Décongélation avant cuisson. 1<sup>er</sup> Congrès de Biotechnologie et de Valorisations des Bio-Ressources (BVBR) 05 au 07 Mars 2013. Tunis

FALEK W., AGLI A., BENSALÉM A. & OULAMARA H. (2013). Application biotechnologique dans la technologie de fabrication du pain. 1<sup>er</sup> Congrès de Biotechnologie et de Valorisations des Bio-Ressources (BVBR). 05 au 07 Mars 2013 Tunis

FALEK W., AGLI A., BENSALÉM A. & OULAMARA H. (2013). Kinetics of fermentation of the bread dough after defrosting to different temperature. 4th International Workshop on industrial Biotechnology, April, 10-11, 2013. Tlemcen, Algeria.

FALEK W., AGLI A., BENSALÉM A. & OULAMARA H. (2013). Manufacture of bread baking loaf from fermented dough and frozen. 4th International Workshop on industrial Biotechnology, April, 10-11, 2013. Tlemcen, Algeria.



# *Annexes*

## ANNEXES

**Tableau A.** Evolution de la hauteur (H) de fermentation (mm) des pointages (60, 90, 105 et 120 min) pendant et après décongélation à 5 °C.

Pt 60		Pt 90		Pt 105		Pt 120	
t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)
0	22,3	0	20,7	0	22	0	19,3
240	25	240	21,7	240	23,3	240	20
255	26	255	21,7	255	24	255	20
281	26,7	265	24	270	24,3	270	20
285	26,7	280	24	285	24,7	285	20
305	27,3	295	24,7	300	25	300	20
315	28	303	25,7	307	25,7	315	20
326	28,3	316	26,3	322	25,7	330	20
340	29	331	27	345	26	345	20,7
359	29,7	346	27,3	365	27,3	360	21,3
374	30,8	371	27,3	369	27,7	375	23,0
389	30,8	386	28	384	28	390	23,7
399	31,3	393	28,3	404	28,7	405	25
412	32,7	408	28,3	419	29	420	25
427	33	430	28,3	434	29	440	25
442	33,3	438	28,3	449	29,3	446	25
457	32,7	453	28,3	464	30	451	28
472	32,3	468	28,1	479	30,3	466	28
489	32,3			494	31,3	480	28
504	32,3			513	31,7	500	28
519	32,3			528	31,7		
534	32,3						
549	32,3						
564	32,3						
591	32,3						
606	32,3						
621	32,3						
636	31,3						

Pt : temps de pointage, H : hauteur d'expansion gazeuse, t : temps de fermentation, min : minute.

**Tableau B.** Evolution de la hauteur de fermentation (mm) des pointages (Pt 60, Pt 90, Pt 105 et Pt 120 min) pendant et après décongélation à 25 °C.

Pt 60		Pt 90		Pt 105		Pt 120	
t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)
0	23,3	0	21	0	19,7	0	18,3
60	27	60	23	48	21,3	45	20,3
69	28,7	75	23,7	63	22,3	60	22
78	30,3	90	25	78	23,7	75	23
84	30,7	105	26,3	93	25	86	24,3
90	32,3	110	27,3	108	25,7	96	25,7
105	34,7	120	28,7	110	27	111	26,7
120	36,3	130	30,0	129	28	126	27
136	39,3	135	30,3	155	29,7	141	30,3
151	38,7	150	31	162	31,7	156	30,7
166	40,3	160	32	176	33,7	177	32
181	40,7	165	32	188	35	186	33
196	40,7	180	32	190	35	201	34
211	39	190	32,7	201	36	216	34
215	38	200	34,3	216	36,7	231	34
234	37	210	34,3	231	36,7	246	33
		225	35,7	246	36,7	261	30
		240	35,7	261	35,7	276	28
		255	35,7	276	34,7	291	27
		270	34,7	291	32,7	301	26
		285	32	306	31		
		300	31	321	29		
		315	29				
		375	27				

Pt : temps de pointage, H : hauteur d'expansion gazeuse, t : temps de fermentation, min : minute.

**Tableau C.** Evolution du hauteur de fermentation (mm) des pointages (60,90, 105 et 120 min) pendant et après décongélation à 40°C.

Pt 60		Pt 90		Pt 105		Pt 120	
t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)	t (min)	H (mm)
0	23,7	0	23,3	0	22,3	0	19,3
25	22	35	2,5	34	25	20	21,3
41	26,3	40	26	44	26,7	25	22,7
56	31,3	45	27	59	27,3	30	24,7
62	34,7	53	29,7	79	28,7	35	24,7
75	37	60	32,3	95	31,7	39	24,7
85	38	65	32,3	102	32,3	46	27,3
92	39,3	72	35,3	105	32,3	49	27,3
107	39,3	77	36,3	113	34,3	51	29,7
120	37,3	85	36,7	118	34,7	56	32,3
135	30	95	37	121	34,7	61	32,3
150	27	105	37,7	129	34,7	74	35
		112	34,7	132	37,7	82	37
		120	34,7	137	37,7	93	39,3
		144	32	142	38	98	39,3
		155	27	146	38,3	105	39,7
		165	24,3	157	39,0	118	39,7
		174	21	167	39	120	39,7
				171	39	136	34
				176	39	145	32
				181	39,3	156	28
				197	39,3	166	27
				217	36		
				228	30		
				236	28		
				241	30		

Pt : temps de pointage, H : la hauteur d'expansion gazeuse, t : temps de fermentation, min : minute.

**Tableau D.** Variation de vitesse observé  $dx/dt$  de fermentation de la phase ascendante des pointages 60, 90, 105 et 120 min après décongélation à 5°C.

Pt 60		Pt 90		Pt 105		Pt 120	
t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)
0	0,067	25	0	67	0	0	0
15	0,027	40	0,047	82	0,013	15	0
41	0,000	55	0,075	105	0,065	30	0
45	0,030	63	0,031	125	0,1	45	0
65	0,070	76	0,040	129	0,02	60	0
75	0,027	91	0,047	144	0,035	75	0
86	0,050	106	0,012	164	0,02	90	0,047
100	0,037	131	0,000	179	0	105	0,04
119	0,073					120	0,113
134	0,053					135	0,047
149	0,050					150	0,087
159	0,108					165	0
172	0,020					180	0
187	0,020					200	0

Pt : temps de pointage, t : temps d'expansion gazeuse,  $dx/dt$  : variation de la vitesse de fermentation au fonction de temps

**Tableau E.** Variation de vitesse observé  $dx/dt$  de fermentation de la phase ascendante des pointages 60, 90, 105 et 120 min après décongélation à 25° C.

Pt 60		Pt 90		Pt 105		Pt 120	
t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)
18	0,067	0	0,047	63	0,093	60	0,067
24	0,267	15	0,087	78	0,087	75	0,118
30	0,16	30	0,087	93	0,047	86	0,14
45	0,1067	45	0,067	108	0,65	126	0,22
60	0,15	50	0,14	155	0,286	156	0,081
76	0,04	60	0,13	162	0,143	177	0,111
91	0,07	70	0,06	176	0,11	186	0,067
106	0,027	75	0,047	188	0		
		90	0,1				
		100	0				

Pt : temps de pointage, t : temps d'expansion gazeuse,  $dx/dt$  : variation de la vitesse de fermentation au fonction de temps

**Tableau F.** Variation de vitesse observé  $dx/dt$  de fermentation de la phase ascendante des pointages 60, 90, 105 et 120 min après décongélation à 40°C.

Pt 60		Pt 90		Pt 105		Pt 120	
t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)	t (min)	$dx/dt$ (mm/min)
25	0,1625	35	0,2	44	0,04	35	0
41	0,333	40	0,2	59	0,07	46	0
56	0,567	45	0,337	79	0,187	49	1,2
62	0,177	53	0,371	105	0,25	51	0,52
75	0,1	65	0,428	113	0,08	61	0,208
85	0,186	72	0,2	118	0	74	0,25
		77	0,05	121	0	82	0,209
		85	0,03	129	0	93	0
				132	0		

Pt : temps de pointage, t : temps d'expansion gazeuse,  $dx/dt$  : variation de la vitesse de fermentation au fonction de temps.

## ABSTRACT

The goal of our study is the feasibility of bread baking from prefermented and frozen dough. This manufacture would allow the multiplication of cooking terminals that do not require neither big space nor equipment, other than a furnace.

After the physicochemical and rheological characterization of the flour, the main technological parameters of this type of bread making are given. Initially the normal bread making of the pilot bread is controlled by the precision of the optima parameters adapted to the flour used: rate of hydration, speed and duration of kneading, duration and type of single or biphasic fermentation with bulk and second fermentations, then cooking. In the second time, the optima parameters of bread making from prefermented dough and the effects of freezing and the thawing of the dough on bread quality were investigated.

Our results indicate that in bread making of the witness, bulk fermentation and second fermentation have remarkable combined effects on quality of the bread. Biphasic fermentation is thus preferable. With single fermentation. The second fermentation (App) affects more shape ratio H/L ( $R = -0.69$ ) than density M/V ( $R = -0.18$ ), its optimal duration is of 45 min. The only duration of bulk fermentation (Pt) beyond 45 min seems to have little effect on quality of the bread. However, the combination of these two fermentations influences the density and thus the quality of the bread. The couple of fermentation Pt/App. 120/45 is a compromise for a high H/L ( $> 0.65$ ) and a minimum M/V, close to 0.35.

In the bread of préfermented and frozen dough, the bulk fermentation has a very weak effect, 0.01 p.cent on M/V and rather higher 10 p.cent on H/L which are observed only between extreme durations (45 and 120 min). The second fermentation, in particular between 15 and 45 mn, appreciably influences (17 p.cent) M/V and it has a dominating effect (40.39 p.cent) on H/L starting from 15 min. The interaction of these two fermentations decreases their effect on M/V, and their combination with the mode of thawing is reflected negatively on H/L (4.73 p.cent). The mode of thawing alone affects (4.2 p.cent) H/L but not M/V.

The best bread of frozen dough is that obtained with fermentation (Pt/App) 60/15 and cooked directly without preliminary thaw. The second bread in quality is that of thawing with 5 °C with a pair of fermentation at 90/15. The third is that defrosted at 40 °C with a pair 120/15. The time of thaw at 5°C is of 240 mn and it is 35 mn at 40°C.

Finally, we estimate that bread making from fermented and frozen dough is feasible and does not require thaw preliminary to cooking. Without use of improving additives of bread making, the result is similar to the witness bread with an appreciable gain in the time of fermentation.

---

Key words: bread making, fermentation, bulk fermentation, second fermentation, freezing, thawing

## RESUME

Le but de notre travail est l'étude de la faisabilité de la fabrication du pain à partir de pâte préfermentée et congelée. Cette fabrication permettrait la multiplication de terminaux de cuisson ne nécessitant ni grand espace ni équipements autre qu'un four.

Après la caractérisation physico-chimique et rhéologique de la farine, les paramètres technologiques répondant au mieux à ce type de panification sont déterminés. En premier lieu la panification normale du pain témoin est maîtrisée par la précision des paramètres optima adaptés à la farine utilisée : taux d'hydratation, vitesse et durée de pétrissage, durée et type de fermentation unique ou biphasique avec pointage et apprêt, puis la cuisson. Dans un deuxième temps, les paramètres optima de panification du pain à partir de pâte préfermentée et l'influence de la congélation et la décongélation de la pâte sur la qualité du pain ont été recherchés.

Nos résultats nous indiquent que dans la panification du témoin, le pointage et l'apprêt ont des effets combinés remarquables sur la qualité du pain. La fermentation biphasique est donc préférable à la fermentation unique. L'apprêt (App) affecte plus le rapport de forme H/L ( $r = -0.69$ ) que la masse volumique M/V ( $r = -0.18$ ), sa durée optimale est de 45 mn. La durée du pointage (Pt) à elle seule au-delà de 45 mn semble avoir peu d'effet sur la qualité du pain. Cependant, la combinaison de ces deux fermentations influence la masse volumique et donc la qualité du pain. Au final, le couple de fermentation Pt/App. 120/45 est un compromis pour un H/L élevé ( $> 0.65$ ) et une M/V minimum, proche de 0.35.

Dans le pain de pâte préfermentée et congelée, le pointage a un effet très faible, 0.01 p. cent sur M/V et assez élevé 10 p. cent sur H/L qui ne s'observent qu'entre durées extrêmes (45 et 120 mn). L'apprêt, notamment entre 15 et 45 mn, influence sensiblement (17 p. cent) M/V et il a un effet prépondérant (40.39 p. cent) sur H/L à partir de 15 mn. L'interaction de ces deux fermentations diminue leur effet sur M/V, et leur combinaison avec le mode de décongélation se répercute négativement sur H/L (4.73 p. cent). Le mode de décongélation seul affecte (4.2 p. cent) H/L mais pas M/V.

Le meilleur pain de pâte congelée est celui obtenu avec la fermentation (Pt/App) 60/15 et cuit directement sans décongélation préalable. Le deuxième pain en qualité est celui de la décongélation à 5 °C avec un couple de fermentation 90/15 et le troisième classé est décongelé à 40 °C avec un couple 120/15. Le temps de décongélation à 5°C est de 240 mn et il est de 35 mn à 40°C.

Au final nous estimons que la panification à partir de pâte fermentée et congelée est faisable et ne nécessite pas de décongélation préalable à la cuisson. Sans utilisation d'améliorant de panification, le résultat est similaire au témoin avec un gain appréciable du temps de fermentation.

---

**Mots-clés** : panification, fermentation, pointage, apprêt, congélation, décongélation



## ملخص

الهدف من عملنا هو دراسة إمكانية صناعة الخبز من خلال عجينة مخمرة pré-fermentée و مجمدة, هذه الصناعة تسمح بزيادة أماكن الطهي لإنتاج الخبز لا تستلزم مساحة كبيرة أو معدات غير فرن كبير.

بعد تحديد الخصائص الفيزيوكيميائية و الريولوجية المتعلقة بالطحين قمنا بتحديد المعلمات التكنولوجية الأنسب لهذا النوع من الخبز. أولاً يتم ضبط الخبز الشاهد عن طريق التحكم بدقيقه في:نسبه الماء المضاف و السرعة و مدة العجن وأيضا مدة و عدد مراحل التخخير ( أحادي أو ثنائي) و في الأخير مدة الطهي . في الخطوة الثانية، المعلمات الأمثل للخبز المصنوع من العجينة المخمرة و المجمدة وتأثير تجميد وتذويب العجينة على نوعية الخبز قد حددت.

نتائجنا تشير إلى أن في الخبز الشاهد مرحلتي التخخير مجتمعة (pointage/apprêt) يكون لها آثار مشترك ملحوظا على نوعية الخبز المتحصل عليه . الطور الثاني من التخخير (App) له اثر كبير علي معامل الشكل H/L ( $r = - 0.69$ ) مقارنة بالكتلة الحجمية ( $r = - 0,18$ ) . M/V مدة المثالية هي 45 دقيقة. المرحلة الأولى لتخخير (Pt) وحدها أكثر من 45 دقيقة لها تأثير ضعيف علي نوعية الخبز و مع ذلك فان الجمع بين مرحلتي التخخير يؤثر علي الكتلة الحجمية ومنه نوعية الخبز وفي نهاية المطاف، فإن ثنائية التخخير 120/45 Pt/App . يمثل حلا وسطا بين معامل الخبز مرتفع ( $H/L > 0,65$ ) وكتلة الحجمية M/V للخبز منخفض, علي مقربة من 0,35 .

في الخبز المتحصل عليه من العجينة المجمدة , المرحلة الأولى من التخخير (Pt) لها اثر ضعيفا جدا 0.01 بالمئة علي الكتلة الحجمية M/V و شبه مرتفع 10 بالمائة علي معامل الشكل H/L الذي لا يلاحظ إلا بين المدتان الحديتين (45 و 120 دقيقة) . المرحلة الثانية من التخخير (App) خصوصا بين 15 و 45 دقيقة يؤثر بشكل كبير(17 بالمئة) علي الكتلة الحجمية M/V وله تأثير كبير علي معامل الشكل H/L (40.39 بالمئة) ابتداء من 15 دقيقة التفاعل بين اثنين يقلل تأثيرها على M / V . والجمع بينهما مع طريقة الذوبان يؤثر سلبا علي H / L فقط ولكن ليس M / V .

أحسن خبز من العجينة المجمدة هو الذي تم الحصول عليها بتخخير 60/15 (Pt/App) و طهي مباشر دون تذويب ثاني خبز مستحسن هو الذي أذيب عند 5 °م. مع ثنائي التخخير 15/90 , الترتيب الثالث هو الخبز الذي تم إذابته عند 40 °م مع ثنائي التخخير 120/15 , وقت الإذابة عند 5 °م هو 240 دقيقة و عند 40 درجة مئوية هو 35 دقيقة.

في نهاية المطاف نحن نقدم أن صناعة الخبز من عجينة مخمرة و مجمدة ممكنة ولا تستلزم إذابة قبل الطهي دون استعمال محسنات للخبازة هذه النتيجة مشابهة للخبز الشاهد مع ربح ملحوظ لوقت التخخير.

---

كلمات البحث : الخبز، التخخير، لافتا، و خلع الملابس، وتجميد، ذوبان الجليد.