

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail – Patrie

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPÉRIEUR

UNIVERSITÉ DE NGAOUNDERE



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace - Work - Fatherland

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION

UNIVERSITY OF NGAOUNDERE



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES SCIENCES

AGRO-INDUSTRIELLES

NATIONAL SCHOOL OF AGRO-INDUSTRIAL SCIENCES

B.P:455 – Ngaoundéré. CAMEROUN

Tel/ Fax: 679 828 800 / 222 25 40 72

**Département Sciences Alimentaires - Nutrition**

**Department of Food Science and Nutrition**

## **Valorisation de la farine de manioc en panification**

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**Master en science et Technologie**

Mention : Sciences Alimentaires et Nutrition

Parcours : Science et Technologie Post – Récolte

*Présenté par :*

MONTHE POUDEU Orissa Charlène

Matricule : 11I075EN

*Ingénieur des IAA*

Sous la direction de :

**Lidwine GROSMAIRE**

Maître de Conférences

Université de Montpellier

**Robert NDJOUENKEU**

Professeur/ ENSAI

**Richard Marcel NGUIMBOU**

Chargé de Cours/ ENSAI

**Année académique 2014/2015**

## **In memoriam**

A Fils Edouard NOUGA, mon défunt fiancé.

## **Dédicace**

A toute la famille MONTHE.

## Sponsoring



Ce travail est réalisé au sein de l'équipe de recherche **Technologie, Qualité et Innovations Agro-Alimentaire (TQI2A)**, dans le cadre du projet « **Production durable du manioc en Afrique Centrale et intégration au marché** » (Contrat de Subvention N°DCI-FOOD/2010/252-886) piloté par le **PRASAC** (Pôle Régional de Recherche Appliquée au développement des Systèmes Agricoles d'Afrique Centrale), et avec l'appui complémentaire de l'**AIRD** (Agence Inter établissement de Recherche pour le Développement).

## Remerciements

Le présent travail n'aurait pas vu le jour sans l'aide du Dieu Tout Puissant qui m'a toujours donné la force d'accomplir mes différentes tâches. Je tiens également à remercier:

❖ Pr NSO Emmanuel JONG, Directeur de l'ENSAI, pour les efforts consentis afin que les conditions de notre formation soient toujours des plus favorables ;

❖ Pr Robert NDJOUENKEU: qu'il trouve dans le présent travail l'expression de ma gratitude pour les enseignements dispensés ainsi que sa patience et sa rigueur scientifique dans l'accomplissement du présent travail;

❖ Dr NGUIMBOU Richard Marcel pour son assistance, ses conseils et sa disponibilité;

❖ Dr Lidwine GROSMIRE pour son accueil, sa disponibilité, son suivi méticuleux et sa rigueur scientifique ;

❖ Dr Thierry TRAN pour sa participation et ses conseils pour le bon déroulement de ce stage ;

❖ Dr Layal DAHDOUH et Julien RICCI pour leurs disponibilités et leurs assistances continue dans le bon déroulement de ce stage ;

❖ Toute l'équipe 3 de l'UMR Qualisud du Cirad en particulier Nadine LOPEZ, Thierry GOLI, Virginie LEMAITRE, Michel RIVIER, Camille ROUQUIE, pour leur accueil, leurs disponibilités et leurs convivialités pour le bon déroulement de ce stage ;

❖ Tout le personnel enseignant de l'ENSAI, pour tous les enseignements prodigués durant tout notre parcours ;

❖ Mes parents, MONTHE Pierre et MONTHE Esther, pour les moyens qu'ils ont toujours mis à ma disposition pour que mon éducation ne souffre de rien ;

❖ Tous mes frères et sœurs Kelly, Vladimir, Dimitri, Sarah et Quentin pour le soutien qu'ils m'ont toujours apporté ;

❖ Toute la famille NOUGA en particulier Thérèse NOUGA Fleur qui n'a cessé de me soutenir moralement, spirituellement et financièrement durant le déroulement de mon stage ;

❖ Tous mes camarades de promotion en particulier Jules HANDJO, Patrick YODOM et Fadi GOYGOY pour leur soutien ;

❖ Toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont soutenu pour la réalisation de ce travail.

## Table des matières

In memoriam.....	i
Dédicace.....	ii
Sponsoring.....	iii
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures.....	ix
Abbreviations.....	x
Résumé.....	xi
Abstract.....	xii
Introduction.....	1
Chapitre I: Revue de la littérature.....	4
I.1. La Panification : enjeux technologiques et contraintes.....	4
I.1.1. Une technologie centrée sur le blé.....	4
I.1.2. Limites du pain de blé.....	5
I.2. Panification avec des farines alternatives sans gluten.....	6
I.2.1. Farine de manioc.....	7
I.2.2. Farine de patate.....	11
I.2.3. Farine de sorgho.....	12
I.3. Les gommes hydrocolloïdes, substituants potentiels du gluten en panification SG.....	13
I.3.1. Définitions et propriétés des gommes hydrocolloïdes.....	14
I.3.2. Quelques gommes hydrocolloïdes d'intérêt en panification.....	15
I.3.2.1. La gomme de xanthane.....	15
I.3.2.2. Hydroxypropylméthylcellulose.....	17
Chapitre II: Matériel et Méthodes.....	19

II.1. Matériel .....	19
II.2. Méthodes .....	19
II.2.1. Préparation des farines .....	19
II.2.2. Préparation des pains.....	22
II.2.2.1. Formulation des mélanges de farines .....	22
II.2.2.2. Procédé de panification .....	24
II.3. Analyses physico – chimiques et technologiques .....	26
II.3.1. Sur les farines .....	26
II.3.1.1 Teneur en matière sèche .....	26
II.3.1.2. Teneur en amidon.....	26
II.3.1.3. Teneur en amylose.....	30
II.3.1.4. Propriétés d’empesage.....	30
II.3.1.5. Analyse thermique différentielle .....	32
II.3.2. Sur la pâte fermentée crue .....	33
II.3.3. Sur le pain.....	34
II.3.3.1. Rendement massique et taux de levée.....	34
II.3.3.2. Volume spécifique.....	34
II.3.3.3. Analyse de la couleur .....	35
II.3.3.4. Caractéristiques texturales.....	36
II.4. Etude technologique : Influence du mode de fermentation, du couple temps- température de cuisson et de la scarification sur la qualité des pains .....	39
II.5. Analyses statistiques .....	39
Chapitre III: Résultats et Discussion.....	44
III.1. Caractéristiques physico – chimiques et fonctionnelles des farines .....	44
III.1.1. Qualité des amidons de farines .....	44
III.1.2. Caractéristiques fonctionnelles des farines .....	45
III.1.2.1. Propriétés d’empesage .....	45

III.1.2.2. Propriétés thermiques.....	50
III.2. Panification .....	51
III.2.1. Valeurs technologiques des mélanges de farines .....	51
III.2.2. Compression – relaxation de la mie.....	58
III.3. Analyses physiques des pains du plan de mélange .....	59
III.3.1. Teneur en eau, taux de levée et rendement des pains formulés .....	59
III.3.2. Couleur de la croûte et de la mie.....	60
III.4. Effet du vieillissement sur les caractéristiques de la mie.....	62
III.5. Impact du mode de fermentation sur la qualité des pains .....	64
III.6. Influence du couple temps-température de cuisson et de la scarification sur la qualité des pains .....	68
III.6.1. Par rapport aux propriétés physiques des pains .....	68
III.6.2. Par rapport aux propriétés texturales des pains.....	71
Conclusion.....	74
Références Bibliographiques.....	xiii



## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Composition de la farine de manioc pour la panification .....	7
<b>Tableau 2:</b> Différentes formulations SG à base de sorgho.....	13
<b>Tableau 3:</b> Classification des gommés hydrocolloïdes selon leur origine et leur fonctionnalité (Norton et al., 2002). .....	15
<b>Tableau 4 :</b> Récapitulatif des matières premières.....	19
<b>Tableau 5:</b> Proportion des différents intrants dans la formulation .....	22
<b>Tableau 6:</b> Construction du plan d'expérience.....	23
<b>Tableau 7:</b> Dosage de l'amidon dans les farines .....	27
<b>Tableau 8:</b> Préparation de la gamme étalon .....	27
<b>Tableau 9:</b> Réalisation de la courbe d'étalonnage.....	29
<b>Tableau 10:</b> Profil de température appliqué au cours des tests RVA.....	31
<b>Tableau 11 :</b> Paramètres obtenus lors d'un test TPA et interprétations .....	37
<b>Tableau 12:</b> Paramètres du procédé .....	39
<b>Tableau 13:</b> Teneurs en eau, en amidon et en amylose des différentes farines étudiées .....	44
<b>Tableau 14:</b> Paramètres RVA des différentes farines .....	47
<b>Tableau 15 :</b> Paramètres RVA des différents mélanges de farines .....	49
<b>Tableau 16:</b> Paramètres DSC des différentes farines .....	50
<b>Tableau 17:</b> Modèles retenus et paramètres statistiques du " plan simplex centroïde avec contraintes" .....	52
<b>Tableau 18 :</b> Récapitulatif de l'évolution des différentes réponses en fonctions des proportions de différentes farines .....	58
<b>Tableau 19 :</b> Paramètres de compression – relaxation de la mie .....	59
<b>Tableau 20:</b> Teneur en eau, rendement et taux de levée des pains.....	60
<b>Tableau 21:</b> Paramètres de couleur des pains .....	61
<b>Tableau 22:</b> Teneur en eau, paramètres chromatiques et paramètres physiques des pains de différents procédés .....	70
<b>Tableau 23 :</b> Paramètres TPA de la mie.....	72
<b>Tableau 24 :</b> Paramètres texturaux de compression – relaxation de la mie, et de pénétrométrie de la croûte .....	73

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Schéma représentatif de la formation du réseau du gluten durant le pétrissage .....	5
<b>Figure 2</b> : Diagramme de production de Farine de Manioc de Haute Qualité à partir de racines fraîches de manioc (CORAF, 2010).....	8
<b>Figure 3</b> : Procédé de fabrication de l'amidon aigre de manioc (René Taga, 1995).....	10
<b>Figure 4</b> : Mécanisme d'expansion de l'amidon aigre de manioc au cours de la panification (Mestres et al., 1996).....	11
<b>Figure 5</b> : Structure primaire d'un pentasaccharide de xanthane .....	16
<b>Figure 6</b> : structure simplifiée de l'HPMC .....	17
<b>Figure 7</b> : Procédé d'obtention de la farine de sorgho (Osungbaro et al., 2010) .....	20
<b>Figure 8</b> : Procédé d'obtention de la farine de manioc fermenté (PNDRT, 2007).....	21
<b>Figure 9</b> : Procédé d'obtention de la farine de patate douce (ITA, 2010) .....	21
<b>Figure 10</b> : Représentation schématique du domaine expérimental.....	23
<b>Figure 11</b> : Procédé de fabrication des pains SG (Lan, 2014).....	25
<b>Figure 12</b> : Profil classique de RVA avec les différents paramètres mesurés (Saunders, 2010) .....	31
<b>Figure 13</b> : Espace chromatique CIE L*a*b* .....	35
<b>Figure 14</b> : Allure typique d'un profil de texture TPA (Bourne, 2002) .....	36
<b>Figure 15</b> : Surface de réponse de la dureté de la mie.....	53
<b>Figure 16</b> : Surface de réponse de l'adhérence de la mie .....	53
<b>Figure 17</b> : Surface de réponse de l'élasticité .....	54
<b>Figure 18</b> : Surface de réponse de la cohésion .....	55
<b>Figure 19</b> : Surface de réponse du volume spécifique.....	56
<b>Figure 20</b> : Surface de réponse de la limite viscoélastique du pâton (LVE G').....	57
<b>Figure 21</b> : Evolution de la dureté de la mie au cours du vieillissement.....	63
<b>Figure 22</b> : Evolution de la cohésion au cours du vieillissement.....	63
<b>Figure 23</b> : Evolution de l'élasticité au cours du vieillissement.....	64
<b>Figure 24</b> : Evolution du chewiness au cours du vieillissement .....	64
<b>Figure 25</b> : Dureté de la mie en fonction du type de fermentation.....	65
<b>Figure 26</b> : Elasticité de la mie en fonction du type de fermentation .....	66
<b>Figure 27</b> : Cohésion de la mie en fonction du type de fermentation .....	66
<b>Figure 28</b> : Teneur en eau de la croûte en fonction du mode de fermentation .....	67
<b>Figure 29</b> : Teneur en eau de la mie en fonction du mode de fermentation .....	68

## **Abbreviations**

AACC: American Association of Cereal Chemist

ANOVA : Analyse des Variances

AOAC: Association of Official Analytical Chemists

CST: Chaleur Sèche Tournante

DSC: Analyse Thermique Différentielle

ENSAI: Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro – Industrielles

FPMHQ : Farine Panifiable de Manioc de Haute Qualité

GOD – POD: Glucose Oxydase – Peroxydase oxydase

MS: Matière Sèche

PDMACIM : Production Durable de Manioc en Afrique Centrale et Intégration au  
Marché

PNDRT: Programme National de Développement des Racines et Tubercules

RVA : Analyse Rapide de viscosité

SG : Sans Gluten

TE : Teneur en Eau

TPA : Analyse du Profil de Texture

## Résumé

Le présent travail s'intègre dans le cadre de la Production Durable de Manioc en Afrique Centrale et de son Intégration au Marché (PDMACIM). L'une des composantes de ce projet est la formulation des pains sans gluten (SG) à haute proportion en farine de manioc. L'objectif étant d'une part, de réduire la dépendance économique de la région en importation de blé, d'autre part, de contribuer à répondre aux besoins de consommateurs intolérants au gluten. Les farines sans gluten retenues dans ce travail ont été les farines de manioc fermenté, de patate et de sorgho du Cameroun. Ces farines ont été sujettes à des analyses physico – chimiques et fonctionnelles. La formulation des différents pains a été faite à l'aide d'un plan de mélange sous contrainte, en utilisant comme réponse les paramètres texturaux (Texture Profil Analysis [TPA] de la mie : dureté, élasticité, cohésion, adhérence ; pénétrométrie : dureté de la croûte), physiques (volume spécifique du pain) et rhéologiques (limite viscoélastique du pâton fermenté). Les analyses physico – chimiques ont montré que la farine de manioc fermenté en raison de sa forte teneur en amidon (91,20%) montrait un gonflement plus important comparé aux farines de patate et de sorgho ayant des teneurs plus faibles (69,51% et 72,00%, respectivement). Ceci a été confirmé par les paramètres RVA (Rapid Visco Analyser) qui ont montré un pic de viscosité (PV) 3 à 6 fois plus élevé pour la farine de manioc que pour les farines de patate et de sorgho. L'analyse du plan de mélange a révélé que les pains présentant les caractéristiques recherchées sur le plan textural, rhéologique et physique sont ceux contenant des fortes proportions de manioc. De même, l'étude du vieillissement a montré que les pains avec des teneurs maximales de patate et sorgho (30% et 20%, respectivement) avait un durcissement de la mie plus important en fonction du temps par rapport aux autres pains ceci en raison de leur forte teneur en amylose qui favoriserait le phénomène de rétrogradation. Pour une amélioration de l'humidité de la mie et de la couleur de la croûte, une cuisson en trois phases (une phase mixte et deux phases en chaleur sèche tournante [CST]) ainsi que la scarification des pâtons amélioreraient significativement ces paramètres.

**Mots clés :** Farine de manioc fermenté, pain SG, plan de mélange sous contrainte, analyses texturales et rhéologiques.

## **Abstract**

This work fits in the cassava development project in Central Africa as well as its integration to the PDMACIM market or which one of the components is to make gluten-free breads (GF) with high proportion of cassava flour, in order to reduce the economic dependence of Wheat imports in the Region, on one hand. On the other hand, it helps to meet the needs of consumers who are intolerant to gluten, whose proportion is obviously increasing worldwide. The gluten-free flours (GF) retained in this work were fermented Cassava flour, Potato and Sorghum in Cameroun on which the physicochemical and functional analyses were performed. The formulation of different Breads was made using a mixture design under constraints with response like textural parameters (Texture Profile Analysis [TPA] of crumb: the hardness, elasticity, cohesion, coherence; Penetrometry: hardness of the Crust); Physical (specific loaf volume); Rheological (the viscoelastic limit of the fermented Dough). Physicochemical analysis have revealed that the fermented Cassava flour because of its high starch content (91%) went up to the best Swelling as compared to Potato and Sorghum flours with lower levels (69.51% and 72.00 % respectively). This was confirmed by RVA (Rapid Visco Analyser) parameter which revealed a peak viscosity 3 to 6 times higher for the cassava flour as compared to potato and sorghum flours. The analyze of mixture design revealed that the bread with the best features are those containing high proportion of cassava. Similarly the study of aging revealed that the bread with high proportion in potato and sorghum flour (30% and 20% respectively) had depending on time, a harder Crumb as compared to other Breads. This is due to their high proportion of Amylose capable to promote the downgrade phenomenon. For the improvement of the moisture of the Crumb and the color of the Crust, a three-stage cooking (one mixed phase and two Rotary Dry Heat (RDH) phases and scarification of the Dough pieces) would significantly improve these parameters.

**Key-words:** Fermented Cassava flour; Gluten-free Bread (GF); Mixture constrain plan; textural and rheological analyzes.

# INTRODUCTION

Importante source de calories pour plus de deux milliards de personnes dans le monde, les racines et tubercules constituent le deuxième groupe de plantes vivrières amyliacées derrière les céréales (**Lebot, 2008**). Le manioc (*Manihot esculenta*), plante de la famille des Euphorbiacées, est l'une des racines les plus consommées en Asie, en Amérique latine et en Afrique (**Nweke, 2004**). Comme pour plusieurs pays de cette dernière zone, le manioc est la principale culture vivrière du Cameroun, avec une production annuelle d'environ trois millions de tonnes à travers de petites exploitations familiales agricoles (**DONATA, 2008**). Toutefois, le manioc a longtemps été considéré comme *aliment du pauvre*, parce que les zones marginales où se cultive la racine sont celles où vivent en général les populations pauvres (**Agueguia et al., 2000**). Afin d'inverser cette fausse vision, les gouvernements des pays africains, avec l'appui des institutions internationales, ont développé des programmes de recherche-développement destinés à valoriser le manioc sur les plans agricole, technologique, nutritionnel et de marché de manière à faire de cette racine un des supports de la lutte contre la pauvreté (**NEPAD, 2004**). Cette racine présente une bonne capacité de croissance dans des conditions écologiques défavorables pour beaucoup d'autres plantes, une bonne qualité de l'amidon et une diversité des produits dérivés. Tout ceci a contribué à faire amener progressivement cette plante de *culture du pauvre* à *culture de rente* (**Maziya et al., 2005**).

Au Cameroun, le manioc est cultivé dans toutes les zones agro écologiques couvrant les dix régions avec une forte propension dans le « Grand Sud » Cameroun (comprenant les régions de l'Est, du Centre, du Sud, du Littoral, du Sud-ouest, de l'Ouest et du Nord-ouest) (**Giraud et al., 1995**). Cependant les racines de manioc fraîchement récoltées se détériorent rapidement. Selon **Kakou et al., (2007)**, les pertes post-récoltes sont estimées à 30% de la production de racines de manioc. Depuis des décennies, le caractère périssable du manioc a engendré un développement de procédés et technologies de transformation et de conservation, fondés sur une valorisation des pratiques traditionnelles et essentiellement destinés à réduire la charge en glycosides cyanogénétiques et en eau. La fermentation de la racine est une des opérations unitaires centrales de ces procédés, avec pour résultat, près d'une quarantaine de produits dérivés (dont les plus courants sont le *miondo*, le *gari*, le *bobolo*, le *mitumba*, les cossettes et le fofou) (**Tiki Mpondo, 1997**). La dynamique de développement du manioc et dérivés a conduit divers gouvernements à envisager son introduction en panification afin de réduire l'importation du blé et améliorer l'économie des pays en développement.

C'est notamment le cas du Cameroun qui veut introduire des matières premières locales dans la fabrication du pain pour réduire le coût d'importation de la farine de blé. En effet, en

2010, 10 milliards de Francs CFA ont servi à l'importation de 422.000 tonnes de blé (**Weigand, 2011**). C'est pourquoi, l'intérêt d'utiliser des farines locales (manioc, sorgho, patate, taro ...) en panification en remplacement de la farine de blé est grandissant. Cependant, à cause de l'absence de gluten dans ces matières premières, leur utilisation en panification représente un véritable challenge technologique.

Au-delà de l'intérêt économique que représente cette démarche, elle constitue également une opportunité d'apporter une réponse aux besoins des personnes intolérantes au gluten qui, représentent environ 1% de la population mondiale (**Lamacchia et al., 2014**). Pour relever ce défi, les formulations sans gluten (SG) nécessitent des ingrédients tels que les amidons et les hydrocolloïdes pouvant imiter les propriétés viscoélastiques du gluten (**Gallagher et al., 2004; Abdel-Aal, 2009**). Malgré les avantages liés à l'ajout d'amidon dans les formulations SG, ses inconvénients majeurs sont le rassissement rapide (**Schober, 2009**) et d'un point de vue nutritionnel, le manque de fibre et un indice glycémique élevé (**Thompson, 2009**). Par conséquent, l'utilisation d'un mélange de farines serait alors à privilégier. Par ailleurs, afin d'obtenir des pains SG de qualité, l'ajout d'hydrocolloïdes est essentiel. Parmi la large gamme d'hydrocolloïdes, les plus utilisés sont la carboxyméthylcellulose (CMC), l'hydroxypropylméthylcellulose (HPMC), la gomme xanthane et la gomme guar (**Abdel-Aal, 2009; Lazaridou et Biliaderis, 2009 ; Kittisuban et al., 2014 ; Mancebo et al., 2015**). Par ailleurs, certaines études affirment que l'incorporation de protéines et de matière grasse est nécessaire pour améliorer la qualité des pains SG (**Crockett et al., 2011; Houben et al., 2012 ; Storck et al., 2013**). De la même manière, le procédé d'élaboration peut affecter significativement la qualité du pain (**Shittu et al., 2007 ; Della Valle et al., 2012; Altamirano-Fortoul et al., 2012**).

Dans la logique de valorisation du manioc, la question centrale est de savoir : Quel choix technologique mettre en œuvre pour la formulation de pains SG avec une forte teneur en manioc ? Dans ce contexte, ce travail, réalisé dans le cadre du projet PDMACIM (Production Durable de Manioc en Afrique Centrale et Intégration au Marché), financé par l'Union Européenne (DCI-FOOD/2010/252-886) avait pour objectif général l'étude technologique des formulations SG à partir de mélanges de farines de manioc (ingrédient majeur), de patate douce et de sorgho supplémenté avec les gommages. Plus spécifiquement il a été question :

❖ De tester l'aptitude d'un mélange ternaire de farine (manioc, patate et sorgho) à réaliser des pains acceptables sur le plan textural et physique ;



**H1** : les farines sans gluten de par leur propriétés physico – chimiques et fonctionnelles sont aptes à être utiliser en panification.

❖ D'améliorer les conditions technologiques de panification dans le but d'améliorer la qualité des pains obtenus à la fin du procédé.

**H2** : La fermentation et les différentes modes de cuissons permettent d'améliorer la qualité des pains SG.

# CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

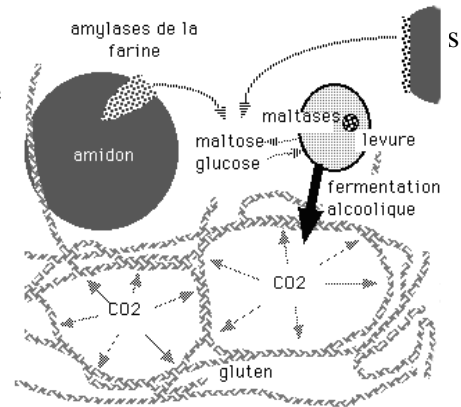
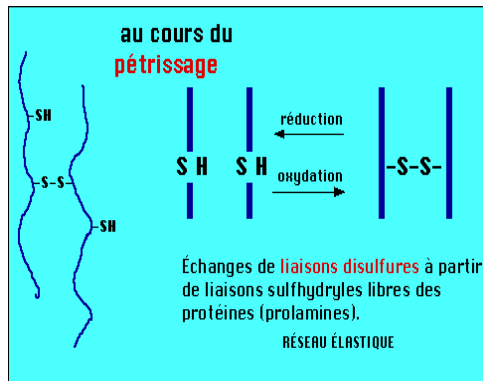
## **I.1. La Panification : enjeux technologiques et contraintes**

### **I.1.1. Une technologie centrée sur le blé**

La panification désigne l'ensemble des opérations qui permettent d'obtenir du pain. Le pain est un produit fermenté produit principalement à partir de farine de blé ou de froment, d'eau, de levure et de sel. Sa fabrication implique 3 étapes principales : le pétrissage, la fermentation et la cuisson (**Badifu et Aka 2001; Dewettinck *et al.*, 2008**). Le pétrissage permet le mouillage des ingrédients, le développement de la structure de la pâte et l'introduction de l'air sous forme de microsphères. La fermentation assure l'expansion gazeuse et la cuisson permet la gélatinisation de l'amidon, la consolidation de la structure et des caractéristiques finales (mie, croûte) du produit. En plus des ingrédients principaux entrant dans la structure physique du pain, une large gamme d'autres ingrédients peuvent être ajoutés notamment le lait, les œufs, le sucre, les améliorants et les hydrocolloïdes. Le pain est historiquement l'aliment le plus consommé par l'homme. Introduit en Afrique probablement pendant la période d'expansion européenne, sa consommation s'est considérablement développée dans nos pays, du fait notamment de la croissance démographique, de l'urbanisation et des changements d'habitudes alimentaires (**Shittu *et al.*, 2007 ; Mandala *et al.*, 2007; Ogunjobi et Ogunwolu, 2010; Adebowale *et al.*, 2012; Komlaga *et al.*, 2012**).

Conventionnellement, les farines utilisées en panification sont issues de céréales contenant du gluten, principalement le blé (**Cauvain et Young 2002**). A cet égard, la dénomination « pain » sans qualificatif, renvoie à l'utilisation exclusive du blé dans sa fabrication. Le gluten est une protéine dont les fractions principales, responsables de ses propriétés physiques et fonctionnelles dans la pâte sont : Les gliadines (30 – 40%) capables de former le réseau qui contribue essentiellement à la viscosité et l'extensibilité de la pâte; et les gluténines (40 – 50%) responsables de l'élasticité et de la force de la pâte (**Barak *et al.*, 2013**). Les propriétés de ces protéines permettent au cours de la panification, de former un réseau tridimensionnel imperméable, capable de retenir le gaz carbonique et de s'étirer sous sa pression pour former la structure et la texture alvéolée du pain principal critère de sa qualité (**Feillet *et al.*, 1994 ; Gujral et Rosell 2004 ; Sinmenou, 2008**). Au cours du pétrissage, les gluténines s'unissent par l'intermédiaire des ponts disulfures pour former une grande surface sur laquelle de nombreuses liaisons non covalentes peuvent apparaître avec des gliadines (Figure 1)

(Godon, 1991). Malgré le rôle majeur du gluten en panification, il présente certaines contraintes d'une part économique pour les pays en développement qui ne peuvent cultiver le blé en raison des conditions climatiques peu favorables, et d'autre part personnes suivant un régime sans gluten (intolérances, alle



**Figure 1 :** Schéma représentatif de la formation du réseau du gluten durant le pétrissage

### I.1.2. Limites du pain de blé

Le pain de blé est exposé à au moins deux contraintes d'ordre nutritionnel et économique selon les espaces.

Sur le plan nutritionnel, la plupart des individus consomment une grande variété d'aliments sans encourir de risques pathologiques. Cependant, pour un faible pourcentage de la population, certains aliments ou composants spécifiques peuvent provoquer des réactions plus ou moins graves, on parle alors d'intolérance. Le gluten peut être responsable de trois pathologies :

- *La maladie cœliaque ou intolérance au gluten:* c'est une maladie auto-immune permanente touchant environ 1% de la population mondiale (soit 74,3 millions d'habitants) (Lamacchia et al., 2014). A ce jour il n'existe aucun traitement. Les personnes atteintes de cette pathologie doivent suivre un régime strict à vie. L'ingestion de gluten provoque une inflammation de l'intestin grêle menant à la malabsorption de plusieurs nutriments importants dont le fer, l'acide folique, le calcium et les vitamines liposolubles (Gallagher et al., 2004).
- *L'allergie au blé:* cette pathologie affecte environ 0,5% de la population mondiale (Taupier, 2006), et son traitement repose aussi sur l'éviction du blé et du gluten de l'alimentation.
- *La sensibilité au gluten* qui est une intolérance au gluten hors maladie cœliaque avec une prévalence estimée à 6% de la population américaine (Rosell et al., 2014).

Au-delà de l'impact sur la santé, l'importation du blé entraîne de nombreuses dépenses économiques pour les pays non producteurs de blé, notamment les pays en développement dont les conditions climatiques non favorable ne permettent de le cultiver. Ceci oblige ces pays à une importation importante de blé, ce qui abaisse significativement leur balance commerciale.

La nécessité de pallier aux contraintes ci-dessus offre l'opportunité du développement des produits SG à partir d'autres ressources amylacées pour des raisons aussi bien de santé publique (intolérance au gluten) qu'économiques (réduction des pertes en devises pour les régions non productrices de blé) (Collin *et al.*, 2002). Il convient de relever que sur le plan du vocabulaire, les pains SG sont affectés d'un qualificatif désignant la source d'amylacée utilisée.

## **I.2. Panification avec des farines alternatives sans gluten**

Le développement des aliments SG a pour principal intérêt de valoriser les matières premières locales des pays en développement qui, ne peuvent produire la quantité de blé nécessaire à leur consommation et doivent donc l'importer, ce qui entraîne des dépenses importantes. Globalement, les produits panifiés SG sont, à ce jour, de qualité médiocre et ne peuvent répondre à la demande croissante des personnes suivant un régime SG. Par ailleurs, la production de pain à partir des farines non gluteniques est limitée par l'incapacité de ces dernières à former le réseau viscoélastique pendant le pétrissage avec l'eau (Miyazaki et Morita, 2005). Ainsi, la formulation de ce type de produit représente un véritable challenge que la technologie alimentaire essaie de relever grâce à l'utilisation de nombreux additifs (hydrocolloïdes, émulsifiants...) pouvant imiter les propriétés viscoélastiques du gluten afin d'améliorer la structure, l'acceptabilité en bouche et de prolonger la durée de conservation des produits obtenus (Gallagher *et al.*, 2004). Les farines SG les plus utilisées sont celles de riz, de soja, de maïs, de sorgho et de manioc (Sanchez *et al.*, 2002; Rosales-Juárez *et al.*, 2008 ; Onyango *et al.*, 2009). D'autres encore disponibles en très faibles quantités et seulement dans certaines régions du monde sont utilisées comme le quinoa, l'amarante et le sarrasin (Schoenlechner *et al.*, 2010 ; Mäkinen *et al.*, 2013 ; Sanz-Penella *et al.*, 2013 ; Mariotti *et al.*, 2013). L'aptitude au gonflement de l'amidon de ces céréales et tubercules constitue le principal intérêt de leur utilisation en panification. La finalité de l'utilisation de toutes ces farines est de répondre aux exigences des consommateurs, qui recherchent le plus souvent des pains qui se rapprochent le plus des pains traditionnels de blé.

### I.2.1. Farine de manioc

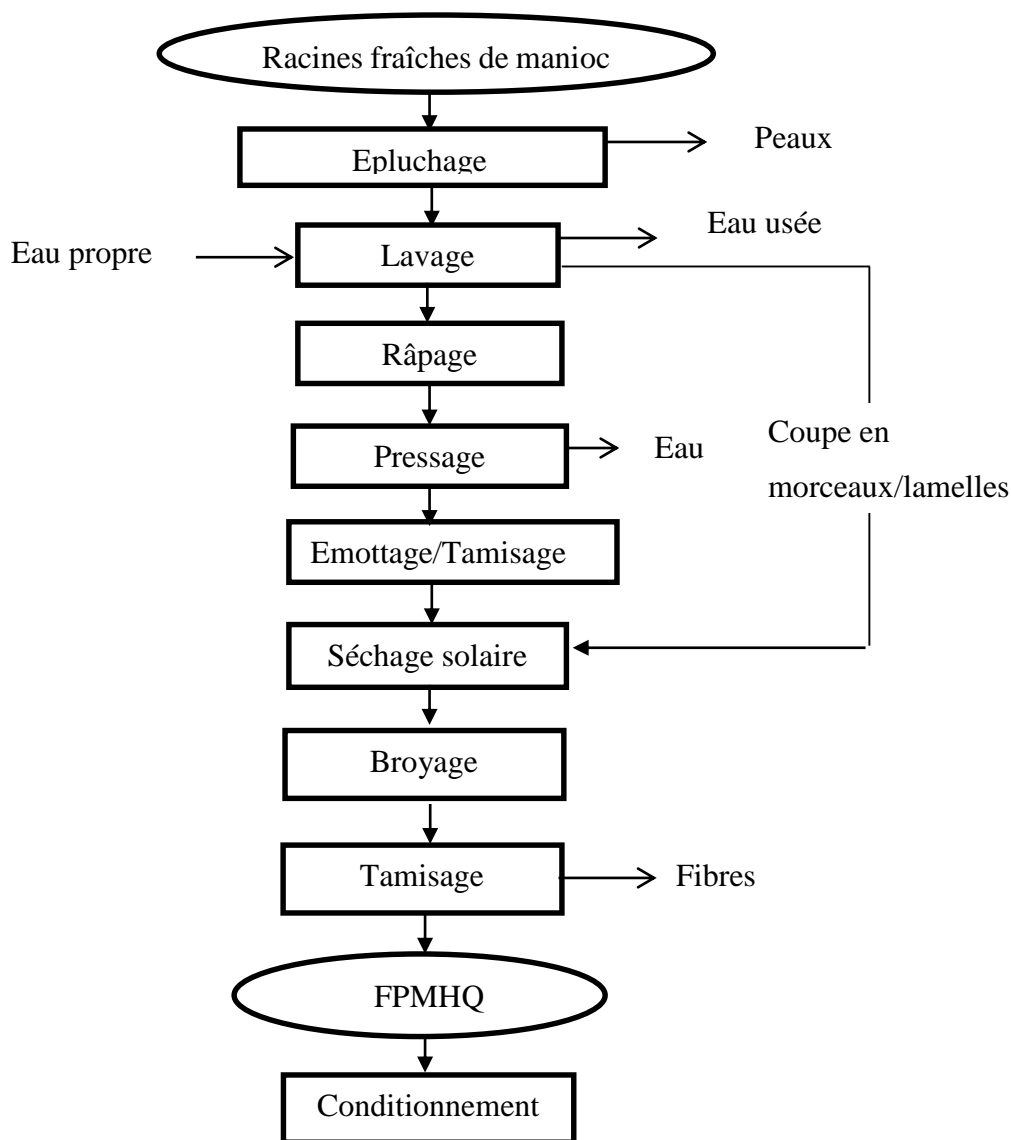
La Farine Panifiable de Manioc de Haute Qualité (FPMHQ) est une farine raffinée produite à partir de racines de manioc fraîchement récoltées (10-12 mois après avoir été mises en terre) et rapidement traitées (Figure 2). La FPMHQ est une farine non fermentée, lisse, inodore, de couleur blanche ou crème, insipide et sans gluten (CORAF, 2010). La FPMHQ a contribué considérablement à la révolution industrielle du manioc, principalement au Nigeria et au Ghana (Sanni *et al.*, 2009).

La farine de manioc est composée essentiellement d'amidon et sa composition est résumée dans le tableau 1.

**Tableau 1:** Composition de la farine de manioc pour la panification

Constituants	Teneur
Eau	10%
Amidon	88%
Fibres	0,5%
Protéines	1%
Cendres	0,5%
HCN	< 10mg/kg

Source : I2T ; spécification farine de manioc



**Figure 2:** Diagramme de production de Farine de Manioc de Haute Qualité à partir de racines fraîches de manioc (CORAF, 2010).

La FPMHQ est utilisée dans l'industrie alimentaire (pain et pâtisserie) et dans l'industrie des boissons alcoolisées. Une substitution à 100% de la farine de blé est possible dans la production d'une grande quantité de produits pâtisseries à base de FPMHQ, mais de grandes quantités de matière grasse, et d'autres ingrédients rehaussant le goût sont nécessaires afin d'obtenir des produits acceptables.

La farine de manioc a un grand potentiel technologique (de par l'aptitude de son granule d'amidon à absorber de l'eau et à gonfler facilement sous l'effet de la chaleur) comme ingrédient alternatif à la farine de blé en panification (Onyango *et al.*, 2011). Cependant,

l'absence de gluten, mais aussi la différence de composition de la fraction d'amidon de la farine de manioc et de blé constituent un challenge majeur de l'utilisation de cette farine en panification (**Hershey et al., 2000, Jensen et al., 2015**), d'où la nécessité d'ajouter des protéines ou des hydrocolloïdes. Des substitutions de farine de manioc (jusqu'à 30%) à la farine de blé ont permis d'obtenir des pains avec des qualités sensorielles et texturales comparables au pain pur blé, moyennant, selon les cas des traitements complémentaires :

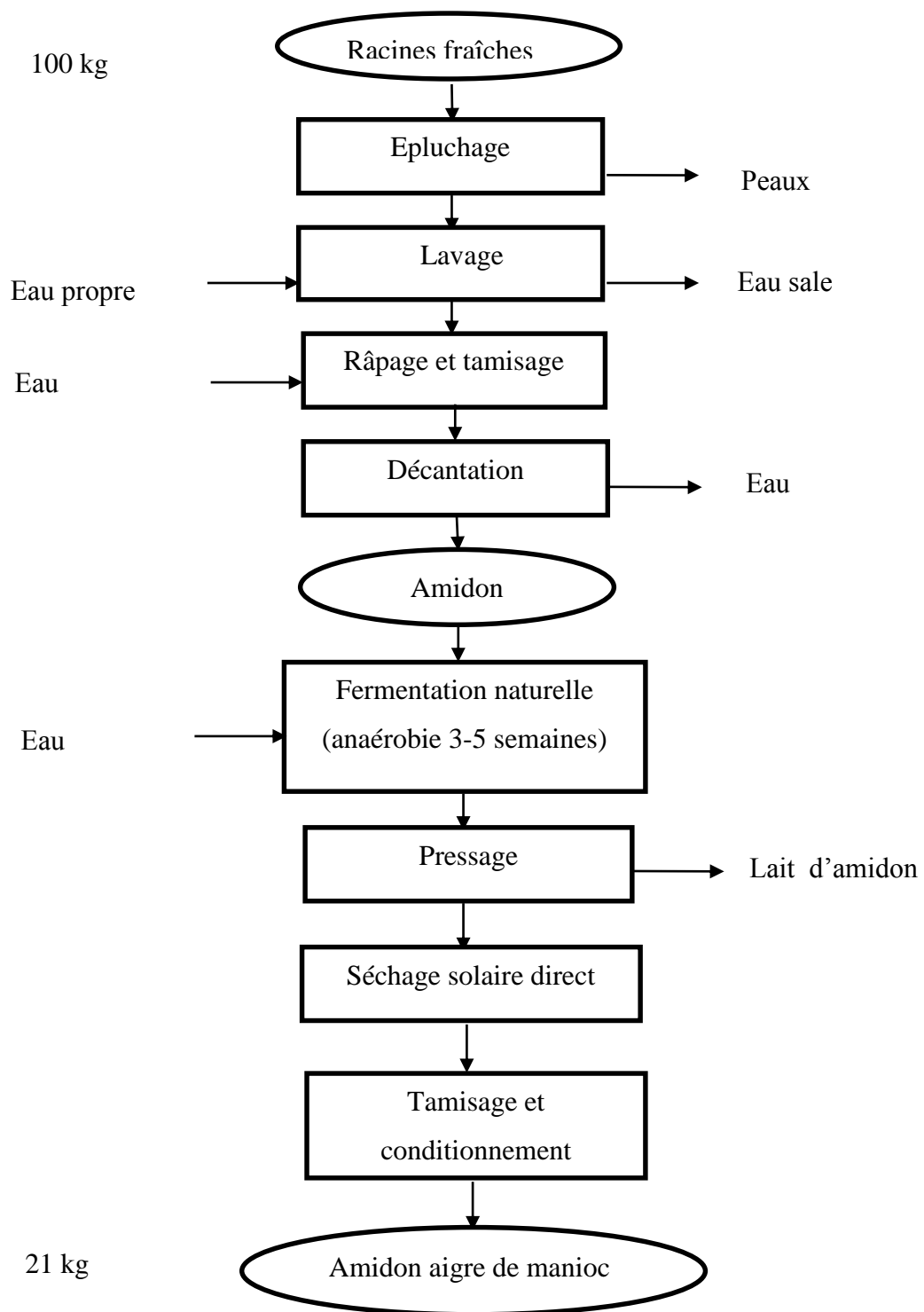
- Un trempage des racines de manioc dans une solution d'acide citrique (1, 2, 5, 10 et 20% M/V) permet d'améliorer la qualité de la farine et lui confère une meilleure aptitude à la panification (**Onwuamamam, 2007**).

- L'utilisation d'additifs tels que le blanc d'œuf ou les matières grasses permettent d'améliorer son pouvoir de panification (**Eggleston, 1992**).

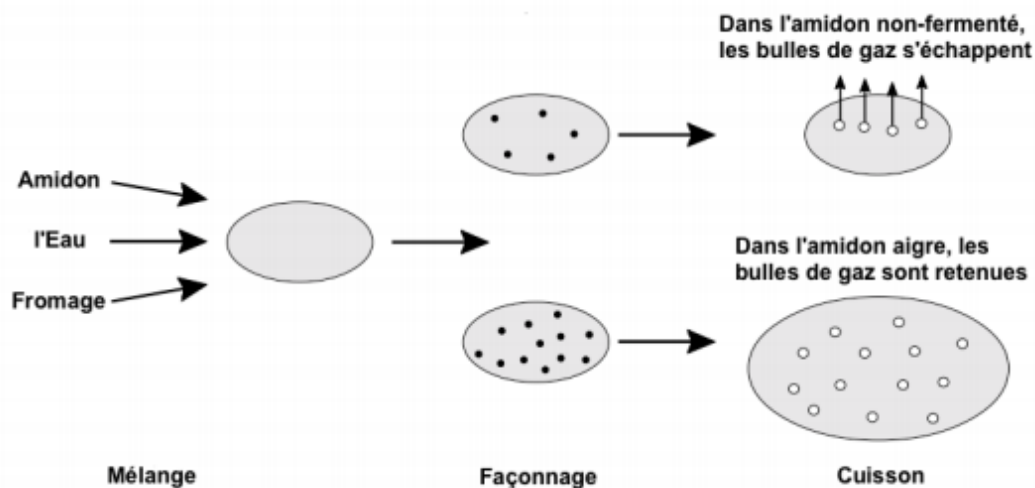
- Les traitements de fermentation et d'irradiation UV entraînent une diminution du poids moléculaire de l'amidon par rapport à l'amidon natif et un effondrement plus important de la structure des granules d'amidon au cours de la gélatinisation, ce qui améliore le pouvoir de réticulation de cet amidon. Ainsi les molécules d'amidon forment plus facilement un film emprisonnant les bulles de gaz qui se forment pendant la cuisson et qui contrôlent l'expansion de la pâte (**Bertolini et Colonna, 2000 ; Marcon et al., 2009**).

L'amidon de manioc s'utilise en panification principalement après un traitement de fermentation et séchage solaire, lui donnant le nom d'amidon aigre. Il est produit traditionnellement en Amérique Latine par l'agro – industrie rurale. Le traitement post - récolte de fermentation et de séchage solaire (Figure 3) confère à cet amidon sa capacité de panification (**Dufour et al., 1995**). Cet amidon est utilisé pour la fabrication de pains tels que le *pandebono* et le *pan de yuka* en Colombie, et des produits industriels de type « *snack* » (**Cereda, 1973 ; Chuzel, 1990**). Le procédé de panification de l'amidon aigre diffère de celui des autres farines traditionnelles, les levures ne sont pas utilisées et une fois le pétrissage terminé les pains sont directement moulés et cuits (Figure 4). Grâce à son pouvoir d'expansion, il est largement utilisé en panification SG avec éventuellement d'autres farines comme le maïs (**Milde et al., 2012**), le sorgho (**Onyango et al., 2009, 2010**) et d'autres céréales ou tubercules.





**Figure 3:** Procédé de fabrication de l'amidon aigre de manioc (René Taga, 1995)



**Figure 4:** Mécanisme d'expansion de l'amidon aigre de manioc au cours de la panification (Mestres *et al.*, 1996)

**Camargo *et al.*, (1988)** ont formulé l'hypothèse qu'au cours de la cuisson l'expansion du mélange serait due au développement de bulles de gaz, principalement de la vapeur d'eau. Ce gaz serait soit piégé à l'intérieur de la matrice d'amidon gélatinisé utilisé pour la préparation de la pâte à pain, soit relâché par désorption des molécules volatiles au cours de la cuisson (**Marcon *et al.*, 2009**).

### **I.2.2. Farine de patate**

La patate douce (*Ipomoea batatas L.*) est classée comme le septième aliment le plus important dans le monde et le quatrième dans les pays tropicaux (**FAOSTAT, 2005**). Toutefois elle occupe le troisième rang mondial parmi les racines et tubercules après la pomme de terre et le manioc et est généralement reconnue comme aliment nutritif sous – utilisé (**Woolfe, 1992; Bovell-Benjamin, 2007; Rodriguez-Amaya *et al.*, 2011**). Elle est communément consommée sous forme frite, grillée, bouillie ou à la vapeur. Sa transformation en purée, farine et amidon élargit ses possibilités d'utilisations. La composition moyenne en base sèche de la farine de patate est de 360 calories au 100 g avec 2,5% de cendres, 0,3% de lipides, 2,8% de fibres et 87,3% d'hydrates de carbone (**Akubor, 1997**). On peut également noter une faible teneur en protéine de 1,44% (**Oluwalana *et al.*, 2012**).

La farine de patate douce utilisée en pâtisseries donne des résultats acceptables (à cause de son amidon et de la présence des sucres), mais difficile à mettre en œuvre et à diffuser en raison des habitudes alimentaires (**Bell *et al.*, 2000**). Les travaux de **Julianti *et al.*, (2015)** ont permis d'affirmer les observations précédentes, avec une formulation de pain contenant la farine de patate douce (40%), l'amidon de maïs (40%), la farine de soja (19,5%) et la gomme

de xanthane (0,5%). La gomme est utilisée dans ce cas en raison de l'absence du gluten dans les farines utilisées.

### **I.2.3. Farine de sorgho**

Le sorgho (*Sorghum bicolor L.*) est une céréale sans gluten qui constitue un aliment de base de la majorité des populations vivant dans les tropiques semi-arides de l'Afrique et une partie de l'Asie. Le sorgho contient des composés phénoliques et des antioxydants bénéfiques pour la santé (**Kulamarva et al., 2009**). Il est consommé sous différentes formes comme tortillas, boissons, couscous et produits de boulangeries (pains, biscuits). La valeur énergétique moyenne de la farine de sorgho est de 328 calories au 100 g soit 10,92 g de protéines, 3,19 g de lipides et 72,12 g de glucides, 6,60g de fibres et 4 mg de sodium. Le grain de sorgho contient en plus du calcium (25mg), du fer (5,4mg), de la thiamine (0,38mg) et de la riboflavine (0,15 mg). Cependant le grain contient des tanins qui ne sont pas digestibles, d'où la nécessité de transformer le sorgho avant de le consommer.

Le pain au sorgho peut être défini comme un pain préparé à partir de farine de sorgho et d'amidon dans lequel le composant sorgho est au moins de 50% (**Onyango et al., 2011**). Dans la littérature, les formulations à base de sorgho contiennent de l'amidon natif (**Olatunji et al., 1992; Schober et al., 2005, 2007**), de l'amidon pré-gélatinisé (**Onyango et al., 2009, 2010**) ou un mélange des deux (**Hugo et al., 1997**), ceci pour favoriser la levée de la pâte du fait de l'incapacité de l'amidon de sorgho à faire du pain de bon volume (volume spécifique élevé) lorsqu'il est soumis à un traitement hydrothermique. Ceci nécessitant l'utilisation d'autres additifs pour améliorer la qualité du produit fini comme des hydrocolloïdes, émulsifiants et enzymes (Tableau 2). **Carson et al.** (2000) pour corroborer ces observations, ont étudié les caractéristiques sensorielles des pains composites à base de sorgho en présence de gluten vital (isolé à partir du blé) et d'améliorants. Le test hédonique a permis d'apprécier les pains obtenus sur une échelle de 1 à 9 avec une moyenne de 6,9. Cette note permet de conclure que la farine de sorgho malgré sa faible aptitude à la levée serait un bon substitut à la farine de blé pour produire des pains acceptables par des consommateurs.

**Tableau 2:** Différentes formulations SG à base de sorgho

	Olatunji <i>et al.</i> (1992a)	Olatunji <i>et al.</i> (1992b)	Hugo <i>et al.</i> (1997)	Hart <i>et al.</i> (1970)	Schober <i>et al.</i> (2005)	Schober <i>et al.</i> (2007)
Farine de sorgho	70	70	70	80	70	70
Amidon de manioc natif	30	10	10	20	-	-
Amidon de manioc gélatinisé	-	20	20	-	-	-
Amidon de maïs	-	-	-	alternativement	30	-
Amidon PDT	-	-	-	alternativement		30
HPMC	-	-	-	2	-	2
Emulsifiant	-	0,6	-	-	-	-
Eau	80 - 100	100 - 110	90	120	105	105

Le challenge technologique de l'utilisation des farines sans gluten en panification est de pouvoir faire des pains aux propriétés semblables (construction du réseau viscoélastique avec les protéines du gluten contribuant à la formation de la mie) aux pains de blé. Etant donné que l'une des améliorations recherchées dans l'utilisation des additifs en panification SG repose sur l'imitation des caractéristiques du gluten, les gommages hydrocolloïdes, eu égard à pouvoir de gonflement et de réticulation, constituent, à cet égard, l'une des voies d'exploration les plus courantes en technologie de la panification SG.

### **I.3. Les gommages hydrocolloïdes, substituants potentiels du gluten en panification SG**

De nos jours l'utilisation des additifs dans l'industrie boulangère est devenue une pratique commune. Le but étant d'améliorer les propriétés de manipulation de la pâte, ce qui a un impact positif sur la qualité du pain et permet de prolonger sa durée de vie (**Rosell *et al.*, 2001**). Les pains SG ont en général de faibles propriétés viscoélastiques. A cet égard, l'ajout de gommages hydrocolloïdes, en raison de leur pouvoir de gonflement et de réticulation, constitue l'une des voies courantes d'exploration en technologie de la panification, car certains hydrocolloïdes imitent les propriétés du gluten, et permettent d'obtenir une structure alvéolée et de retenir le gaz, caractéristiques nécessaires dans le développement des pains (**Toufeili *et al.*, 1994**).

### **I.3.1. Définitions et propriétés des gommages hydrocolloïdes**

Les gommages hydrocolloïdes sont des polymères, hydrophiles, capables de fixer de grandes quantités d'eau correspondant à un multiple de leur poids propre. Leurs propriétés colloïdales se traduisent par leur aptitude à modifier le comportement physique des milieux aqueux (augmentation de la viscosité notamment) conduisant, pour certains hydrocolloïdes, à la formation de gel (**Hoefler, 2004**). Ils sont généralement utilisés comme ingrédients fonctionnels (épaississants, gélifiants, stabilisateurs, etc.) dans de nombreux produits pour contrôler la viscosité ou la texture, et ajouter une valeur commerciale aux produits finaux. Ce sont généralement des polysaccharides, mais ils peuvent aussi être de nature protéique et sont d'origine végétale, animale et microbienne (**Norton et Foster, 2002 ; Abdel-Al et al., 2009**). Sur la base de leurs fonctionnalités, les gommages hydrocolloïdes peuvent être classées en trois catégories : agents gélifiants, épaississants et émulsifiants (Tableau 3).

Dans la formulation des pains SG de nombreuses gommages hydrocolloïdes ont été testées notamment l'hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), la carboxymethylcellulose (CMC), la gomme de xanthane, la caroube, la gomme guar, la  $\beta$ -glucane et la pectine (**Haque et Morris, 1994 ; Toufeili et al., 1994 ; Gambus et al., 2001, Gujral et al., 2003; Gallagher et al., 2003, 2004 ; Sivaramakrishna et al., 2004 ; Ahlborn et al., 2005; McCarthy et al., 2005 ; Arendt et al., 2008 ; Shittu et al., 2009 ; Sciarini et al., 2010 ; Houben et al., 2012**). La gomme de xanthane et l'HPMC ont été particulièrement étudiées dans la formulation des pains SG séparément ou en combinaison.

**Tableau 3:** Classification des gommés hydrocolloïdes selon leur origine et leur fonctionnalité (Norton et Foster, 2002)

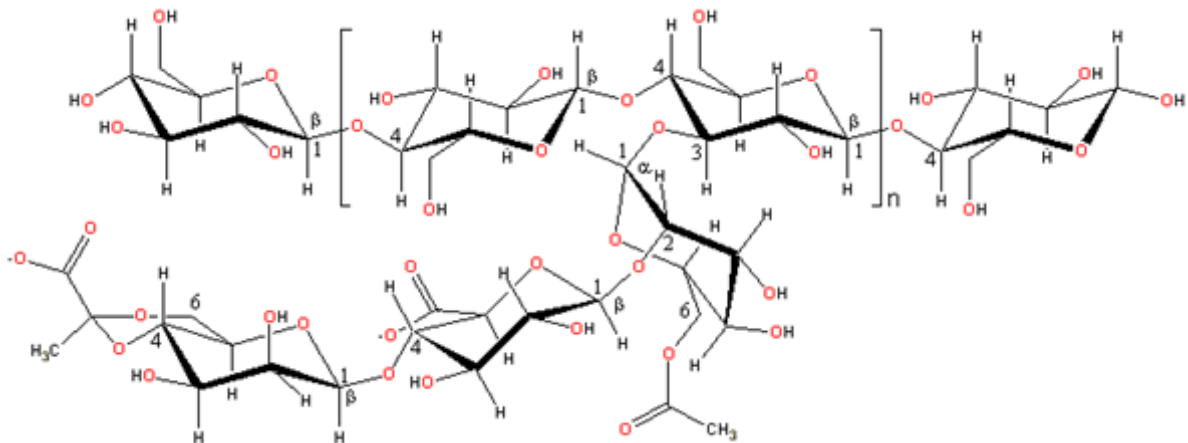
Origines	Hydrocolloïdes	Propriété
<b>Végétale</b>		
Exsudats de plantes	Ghatti	Epaississant
	Karaya	
Extraits de graines	Gomme Guar	Epaississant, Emulsifiant
	Gomme Caroube	Epaississant
	Agar	Gélifiant
Extraits d'algues	Alginate	Gélifiant, Epaississant
	Carraghénane	gélifiant
Céréales	Amidon de blé, maïs, sorgho	Epaississant
Tubercules	Amidon de pomme de terre	
<b>Animale</b>		
	Protéine du lait	Gélifiant, Emulsifiant
	Protéine d'œuf	Gélifiant, Emulsifiant
	gélatine	Gélifiant, Emulsifiant
<b>Bactérienne</b>	xanthane, gellane, dextrane	Epaississant, Gélifiant

### I.3.2. Quelques gommés hydrocolloïdes d'intérêt en panification

#### I.3.2.1. La gomme de xanthane

La gomme de xanthane est un hétéropolysaccharide (Figure 5) extracellulaire de haut poids moléculaire produit par *Xanthomonas* principalement l'espèce *campestris* (Born *et al.*, 2002). Sa formule brute approximative et moyenne est la suivante (**Technique de l'ingénieur : F 4300**):





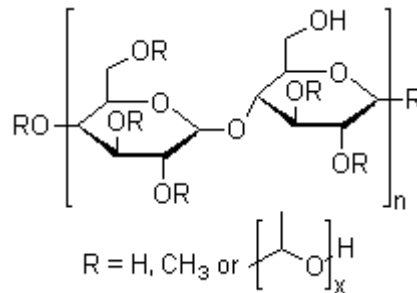
**Figure 5** : Structure primaire d'un pentasaccharide de xanthane

Elle est soluble dans l'eau froide et confère à la solution un écoulement hautement pseudo-élastique. En solution les molécules sont capables de former des liaisons intermoléculaires qui donnent lieu à un réseau complexe faiblement lié. **Christiansson *et al.***, (1974) ont montré la nécessité d'utiliser la gomme de xanthane pour obtenir une bonne structure de la mie en l'absence de gluten dans un système à base d'amidon. L'aptitude de cette gomme à substituer le gluten dans les formulations SG est fortement dépendant de sa concentration et du type de farine utilisée. **Ács et Matuz** (1996) ont comparé différentes gommes (guar, xanthane, caroube et adragante) dans la formulation d'un pain SG à base d'amidon de maïs et ont conclu que la xanthane avait les meilleurs effets (volume spécifique élevé, faible dureté de la mie) sur la qualité globale des pains à un taux compris entre 1% et 3%. Par ailleurs, les travaux de **Lazaridou *et al.*** (2007) montre que la gomme de xanthane à 1% donne des pains avec des volumes spécifiques élevés tandis qu'à 2% le volume diminue.

D'autres travaux (**Mohammadi *et al.***, 2013) sur le développement des pains SG à base de riz en utilisant la gomme de xanthane et la CMC ont montré que les pains avec une faible dureté sont obtenus pour une incorporation de 1,5% de xanthane, suivi de ceux fait en combinant la gomme de xanthane et la CMC à un taux de 1% chacun. Il ressort de cette étude que la gomme de xanthane semble être l'hydrocolloïde de choix permettant d'améliorer la qualité des pains SG. Malgré les nombreux avantages de cette gomme, les travaux de **Rosell *et al.***, (2001) ont montré que la gomme de xanthane pouvait avoir une influence négative sur la dureté de la mie de pain, ceci pouvant être expliquée par le caractère épaississant de celle – ci sur les parois de la mie entourant les bulles d'air.

### I.3.2.2. Hydroxypropylméthylcellulose

L'hydroxypropylméthylcellulose (HPMC :  $C_{56}H_{108}O_{30}$ ) est un éther de cellulose constitué d'un enchaînement linéaire  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) d'unités glucosidiques dont les fonctions hydroxyles pendantes (-OH) ont été partiellement transformées en éthers. Cette modification chimique confère à la molécule sa solubilité dans l'eau avec une activité de surface élevée et des propriétés d'hydratation unique en solution (**Sarkar et Walker, 1995**). Sa formule brute approximative est la suivante (figure 6) :



**Figure 6** : structure simplifiée de l'HPMC

En solution, à basse température, l'HPMC a une forte capacité de rétention d'eau et forme un gel en libérant les molécules d'eau lorsque la température augmente. Au cours de sa prise en gel, l'HPMC forme de fortes liaisons hydrophobes intermoléculaires, établissant un réseau stable quand la température augmente (**Hager et al., 2013**). Le réseau de gel ne persiste pas après le refroidissement mais cela n'a pas d'effet négatif sur la texture du produit final (**Bell, 1990**). Un pain de riz avec une qualité comparable au pain blé a été obtenu par incorporation d'HPMC (**Cato et al., 2001**). L'HPMC a aussi été utilisée dans le pain de blé, aboutissant à un meilleur volume spécifique, une mie souple et des caractéristiques sensorielles plus appréciées (**Collar et al., 1999; Rosell et al., 2001**).

**McCarthy et al.** (2005) ont utilisé une méthodologie de surface de réponse pour évaluer le taux maximal d'eau et d'HPMC à utiliser dans la formulation d'un pain de riz. L'augmentation de la quantité d'eau augmente le volume spécifique du pain ainsi que sa hauteur, et diminue sa fermeté. A un taux de 0,8% d'HPMC et 91% d'eau, le pain SG est obtenu avec des valeurs maximales de volume spécifique, de hauteur et des valeurs minimales de fermeté de la mie. Cependant ce pain est de qualité médiocre à cause de la présence de très grandes alvéoles. Le pain de meilleure qualité comparable au pain de blé a été obtenu pour des taux optimum d'HPMC de 2,2% et d'eau de 79%. Ce résultat pourrait nous permettre de tester cette gomme dans la formulation des pains à base de farine de manioc.



L'état des connaissances ci-dessus met en évidence l'importance de l'utilisation des farines locales en panification dans le but de les valoriser en leur donnant une valeur ajoutée pour relever l'économie des pays en développement, mais aussi de pouvoir répondre aux besoins des personnes sous régime sans gluten. Pour répondre à ces besoins, une démarche méthodologique sera adoptée et consistera :

- Premièrement à produire les farines d'intérêt (manioc, patate douce et sorgho) et de les caractériser sur le plan physico – chimique et fonctionnelles ;
- Ensuite il sera question de tester les farines obtenues dans différentes formulations en utilisant un plan de mélange pour faire varier les proportions de farine ;
- Enfin d'apprécier la qualité des pains obtenus sur les plans physico – chimiques et texturaux.

**CHAPITRE II :**  
**MATERIEL ET**  
**METHODES**

## II.1. Matériel

Les racines de manioc (variété locale douce : Balbine) ont été récoltées et transformées en farine dans la région de l'Est Cameroun (GIC OTRTM Mbama). Les tubercules de patate douce (chair jaune) et les graines de sorgho blanc ont été achetés au petit marché de Bini – Dang de Ngaoundéré et à l'office céréalier de Garoua respectivement, et transformés en farine au laboratoire de physico – chimie alimentaire de l'ENSAI. Les autres ingrédients utilisés dans ce travail sont résumés dans le tableau 4.

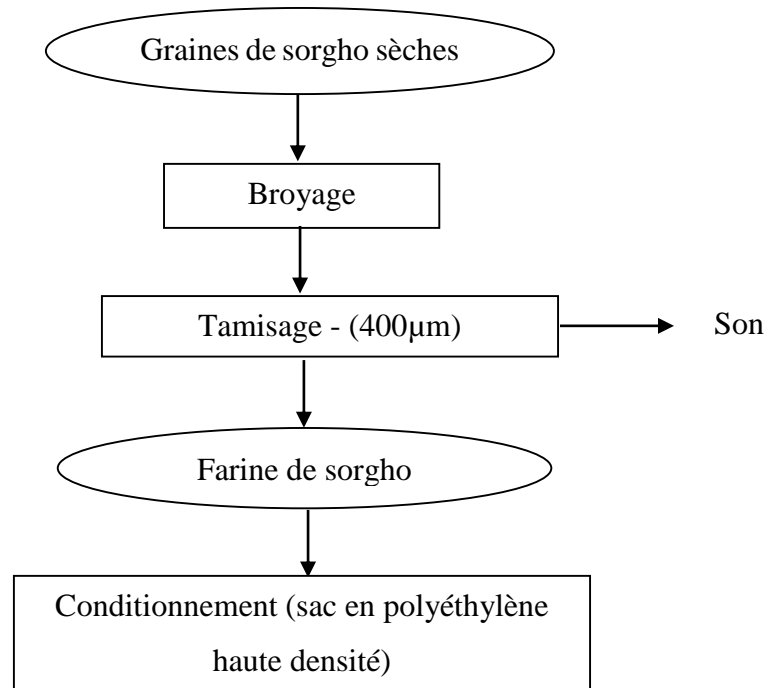
**Tableau 4** : Récapitulatif des matières premières

Matières premières	Pays d'origine	Marque fournisseur	N° de lot
Farine de manioc fermenté	Cameroun	-	-
Farine de patate	Cameroun	-	-
Farine de sorgho	Cameroun	-	-
Gomme de xanthane	-	Cooper	140211B2
Œufs frais	France	Carrefour	
Levure boulangère	France	Alsa	5331BZ779
Sucre	-	Bien Vu	39D0511306
Huile d'olive	Espagne	Carrefour	52025
	Union Européenne	Carrefour	50727J293
Vinaigre de cidre	France	Carrefour	20915
Sel	Méditerranée	La Baleine	133540723

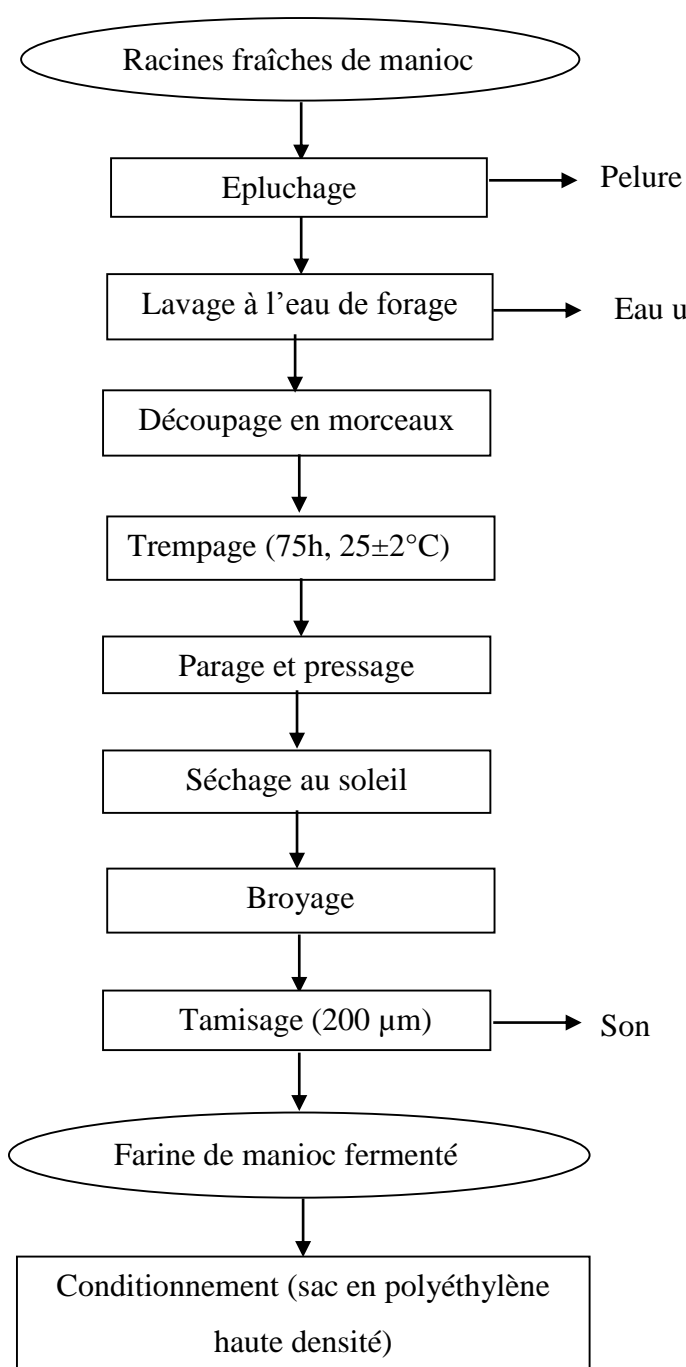
## II.2. Méthodes

### II.2.1. Préparation des farines

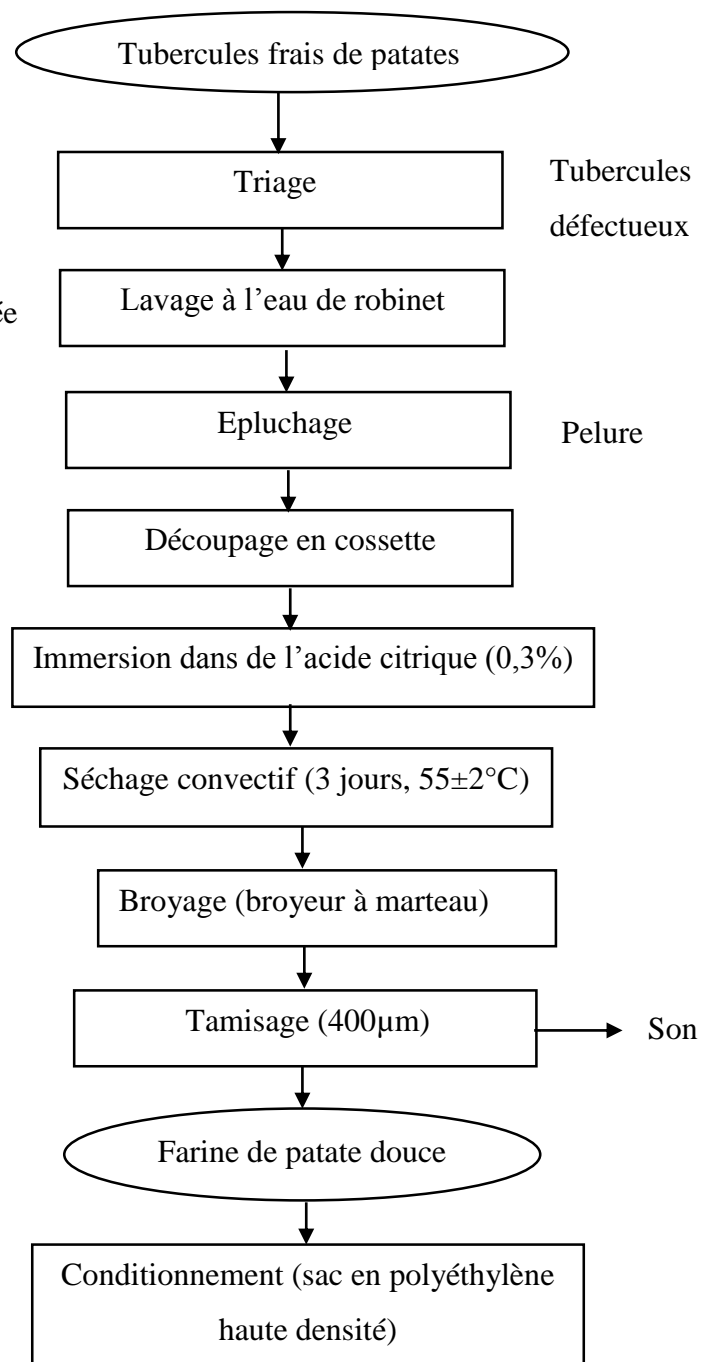
Les farines utilisées dans le cadre de ce travail ont été produites suivant les procédés représentés par les figures 7, 8 et 9 pour les farines de sorgho, manioc et patate douce respectivement.



**Figure 7:** Procédé d'obtention de la farine de sorgho (Osungbaro *et al.*, 2010)



**Figure 8:** Procédé d'obtention de la farine de manioc fermenté (PNDRT, 2007)



**Figure 9 :** Procédé d'obtention de la farine de patate douce (ITA, 2010)

## II.2.2. Préparation des pains

Les pains ont été préparés à partir des formulations générées par un plan de mélange en intégrant différents ingrédients (tableau 5) et un procédé spécifique (figure 11).

**Tableau 5:** Proportion des différents intrants dans la formulation

Matières premières	Proportions (%)
Eau	44,00
Sucre	0,62
Levure boulangère	1,14
Gomme hydrocolloïde	1,14
Huile d'olive	2,07
Blanc d'œuf	4,66
Sel	0,83
Vinaigre	1,04

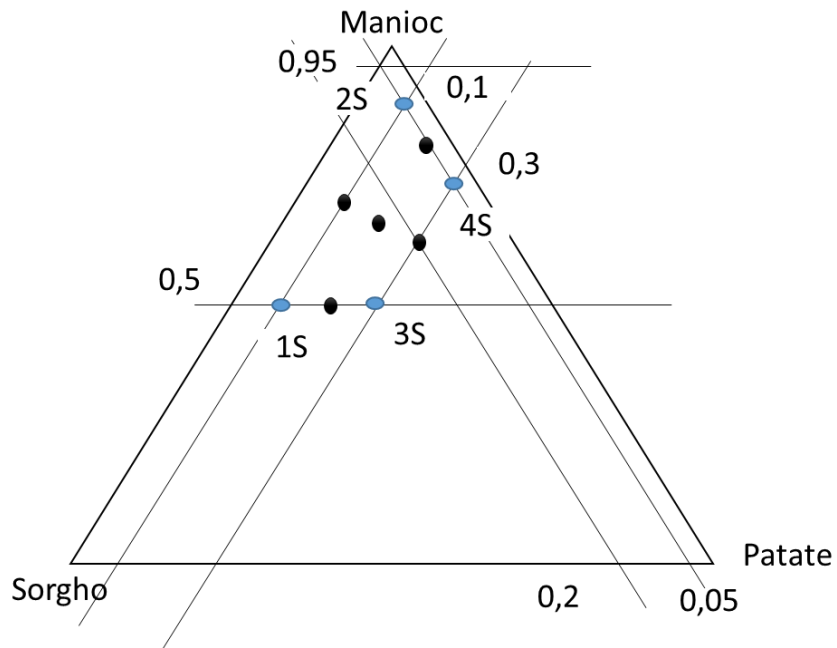
### II.2.2.1. Formulation des mélanges de farines

Le “plan simplex centroïd avec contraintes” a été choisi pour la formulation des pains avec une répétition au centre, et a été conçu à l’aide du logiciel Statistica 7.0 (StatSoft). Les différentes bornes (limites inférieures et supérieures) ont été fixées pour la farine de manioc d’après l’objectif du travail (utiliser le manioc à un taux >50%). Cependant les proportions des farines de patate et de sorgho ont été fixées par rapport aux données de la littérature (**Wu et al., 2009 ; Ndeye Doumoya, 2014** pour la patate ; **Osungbaro et al., 2010 ; Abdelghafor et al., 2011** ; pour le sorgho) et les limites imposées ont donné lieu à un plan irrégulier (Figure 10) avec quatre sommets, des points au milieu de chaque arête et un point central répété ce qui a donné lieu à un plan expérimental avec 10 points (tableau 6).

$$0,5 \leq \text{Manioc} \leq 0,95$$

$$0,1 \leq \text{Patate} \leq 0,3$$

$$0,05 \leq \text{Sorgho} \leq 0,2$$



**Figure 10:** Représentation schématique du domaine expérimental

**Tableau 6:** Construction du plan d'expérience

Points	Manioc	Patate	Sorgho
1S	0,500	0,300	0,200
2S	0,850	0,100	0,050
3S	0,650	0,300	0,050
4S	0,700	0,100	0,200
5C	0,775	0,100	0,125
6C	0,575	0,300	0,125
7C	0,750	0,200	0,050
8C	0,600	0,200	0,200
9C (1)	0,675	0,200	0,125
9C (2)	0,675	0,200	0,125

S pour sommet et C pour centre

Les réponses texturales (TPA de la mie: dureté, élasticité, cohésion et adhérence ; pénétrométrie : dureté de la croûte), physique (volume spécifique du pain) et rhéologique (limite viscoélastique du pâton fermenté) ont été retenues comme réponses d'intérêt pour le plan d'expérience.

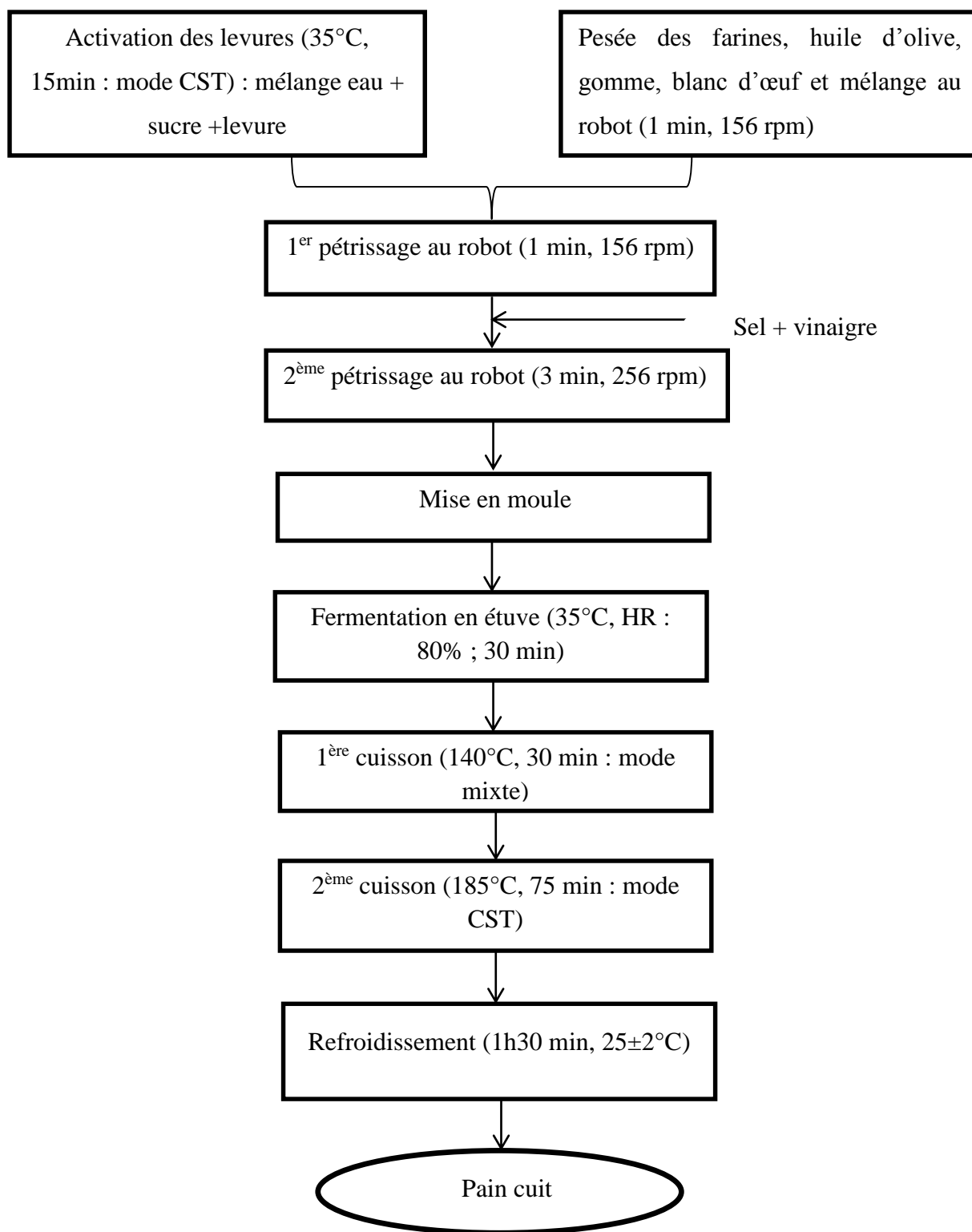
### **II.2.2.2. Procédé de panification**

La figure 11 montre le procédé de panification (**Lan, 2014**) avec une cuisson se déroulant en deux étapes :

- La phase mixte qui est une phase couplée de chaleur sèche et de chaleur humide. Le but étant de favoriser le développement de la pâte en l'assouplissant (retardant la formation de la croûte) et limiter l'évaporation de l'eau contenue dans la pâte (le pain se conserve plus longtemps).

- La phase CST (chaleur sèche tournante) continue et termine la cuisson afin d'améliorer la croustillance de la croûte et donner un bel aspect au pain.





**Figure 11:** Procédé de fabrication des pains SG (Lan, 2014)

## II.3. Analyses physico – chimiques et technologiques

### II.3.1. Sur les farines

#### II.3.1.1 Teneur en matière sèche

La teneur en eau a été déterminée en utilisant la méthode **AOAC 14.004** (1990) qui est basée sur la déshydratation du produit à  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  à la pression atmosphérique ( $P=1\text{atm}$ ) jusqu'à poids constant.

Trois creusets vides ont été séchés à l'étuve durant 35 min à  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ , puis tarés après refroidissement dans un dessiccateur.  $2 \pm 0,001\text{g}$  de chaque farine ont été pesés dans chacun des creusets, puis placés à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 24h jusqu'à poids constant de l'échantillon. Les creusets ont été retirés de l'étuve et pesés après refroidissement dans un dessiccateur. L'analyse a été faite en triplicate et la teneur en eau des échantillons a été calculée selon la formule suivante :

$$TE = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_0} * 100$$

Avec :

$M_1$  : Masse du creuset contenant l'échantillon frais avant étuvage (g)

$M_2$  : Masse du creuset contenant l'échantillon sec après étuvage (g)

$M_0$  : Masse du creuset à vide

#### II.3.1.2. Teneur en amidon

La teneur en amidon a été évaluée d'après la méthode décrite par **Holm et Bjorck** (1985) et modifiée par **Gilbert** (2013) et se déroule en deux grandes étapes :

##### *II.3.1.2.1. Détermination des hydrates de carbone totaux*

###### ❖ Préparation de l'échantillon

Exactement 500 mg (cas de la farine) ou 300 mg (cas de l'amidon) base sèche ont été pesés et dilués avec 30 mL d'eau distillée et mélangés à l'aide d'un agitateur magnétique. Après ajout de 100  $\mu\text{L}$  de Tertamyl ( $\alpha$  – amylase thermostable, L AYN04010, Novo Nordisk, Danemark), l'ensemble a été incubé au bain marie à  $98^\circ\text{C}$  pendant 20 min tout en homogénéisant pendant 1 min toutes les 5 min à l'aide d'un barreau aimanté placé dans les suspensions et un agitateur magnétique placé sous le bain marie pour permettre

l'homogénéisation. Après incubation, l'échantillon a été refroidi pendant 15 min à température ambiante ( $25\pm 2^\circ\text{C}$ ). Chaque échantillon a été transféré quantitativement dans une fiole jaugée de 100 mL tout en assurant un rinçage optimal du bécher et complété jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. L'ensemble a été homogénéisé vigoureusement à l'aide d'un barreau aimanté et d'un agitateur magnétique. 500 $\mu\text{L}$  du surnageant ont été prélevés en triplicate et placés dans des tubes à essai, le blanc a été réalisé en introduisant 500 $\mu\text{L}$  d'eau distillée dans un tube à essai. 1 mL de solution d'amylo – glucosidase (1 mg/mL) a été introduit dans les tubes contenant les échantillons ainsi que le blanc qui ont ensuite été incubés au bain marie à  $60^\circ\text{C}$  pendant 30 min. Après refroidissement des tubes à température ambiante pendant 3 min, 8,5 mL d'eau distillée ont été ajoutés pour un volume final de 10 mL dans chaque tube à essai. Les tubes pour la lecture ont été préparés selon le tableau 7 :

**Tableau 7:** Dosage de l'amidon dans les farines

Réactif / échantillon	Blanc	Echantillons
Echantillon/blanc	75 $\mu\text{L}$	75 $\mu\text{L}$
GOD – POD	1,5 mL	1,5 mL
Incubation à $37^\circ\text{C}$ pendant 10 min		
Lecture des D.O à 510 nm		

*Dans la méthode originale de Holm le volume d'échantillon/blanc était de 50 $\mu\text{L}$*

❖ Courbe d'étalonnage de l'amidon standard

Du glucose anhydre (D – glucose, Fisher Scientific G/0450/60 Laboratory Reagent Grade) séché à  $60^\circ\text{C}$  pendant 4 heures a été utilisé pour préparer le standard de glucose à 0,5 mg/mL avec de l'eau distillée et la courbe d'étalonnage a été réalisée comme indiqué dans le tableau 8 :

**Tableau 8:** Préparation de la gamme étalon

Tube	Volume de glucose ( $\mu\text{L}$ )	Eau distillé ( $\mu\text{L}$ )	GOD – POD (mL)
1	0	75	1,5
2	15	60	1,5
3	30	45	1,5
4	45	30	1,5
5	60	15	1,5
6	75	0	1,5

La teneur en amidon a été calculée en intégrant toutes les dilutions faites au cours de l'analyse par la formule :

$$\% \text{ amidon} = \frac{(D.O * Pente * 0,9 * 10 * 100)}{0,05 * 0,5 * 1000 * MS} * 100 - GL$$

Où :

1. D.O = absorbance lue à 510 nm
2. MS = matière sèche des différents échantillons
3. GL = glucose libre calculé
4. Pente = pente de la courbe étalon en mg
5. 0,9 est le facteur de conversion pour passer du glucose à l'amidon

#### *II.3.1.2.2. Détermination du glucose libre adaptée selon la norme NF V03 – 606*

La détermination du glucose libre se fait en deux grandes étapes :

##### ❖ Extraction du glucose dans les farines

100 mg (bs) de farine/amidon ont été prélevés et introduits dans des tubes à hémolyse, auxquels a été ajouté 1mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (5mM) et l'ensemble a été homogénéisé pendant 1h au vortex à une vitesse de 20 rpm à température ambiante (25±2°C). Les tubes à hémolyse ont été centrifugés à 10000g durant 3 min. 500µL de surnageant ont été prélevés et filtrés avec un tamis de 0,45µm. Le filtrat obtenu a constitué l'extrait d'intérêt pour le dosage.

##### ❖ Dosage du glucose libre

100µL de l'extrait ont été prélevés et introduits dans un tube à hémolyse et 200µL de solution d'amylo – glucosidase ont été ajoutés. Après 30 min à température ambiante (25±2°C), 2,5 mL de solution de GOD – POD (glucosidase – peroxydase) ont été ajoutés au mélange et laissés pendant 20 min pour hydrolyse. L'absorbance a été lue à 510 nm contre un blanc. La gamme étalon du glucose a été réalisée comme suit (Tableau 9):

**Tableau 9:** Réalisation de la courbe d'étalonnage

Tube	Volume de glucose ( $\mu\text{L}$ )	Eau distillée ( $\mu\text{L}$ )	Concentration de glucose ( $\mu\text{g/mL}$ )
1	0	100	0
2	25	75	125
3	50	50	250
4	75	25	375
5	100	0	500

La teneur en glucose libre a été déterminée comme suit :

$$GL (\%bs) = \frac{D.O * pente * 1000}{MS}$$

La pente est exprimée en  $\mu\text{g/mL}$  et 1000 est la conversion des mg en g.

#### II.3.1.2.3. Préparation des solutions

❖ La solution de GOD – POD a été préparée en pesant 20 mg (bs) de 4 – amino – antipyrine, 100 mg de GOD (glucose oxydase G6125-50KU, Sigma), 3 mg de POD (Péroxydase P8112-25KU, Sigma), 20 mL d'eau distillée et 20 mL de solution Tris. L'ensemble a été homogénéisé dans une fiole jaugée à l'aide d'un barreau aimanté et d'un agitateur magnétique pour optimiser la solubilisation. Le volume a été ajusté à 100 mL avec de l'eau distillée.

❖ La solution de Tris a été préparée par dissolution de 8,4 g d'hydroxyde de sodium dans 10 mL d'eau distillée. 27,2 g de phosphate de potassium ont été pesés et dissous avec 50 mL d'eau distillée et les deux solutions ont été mélangées. Après addition d'1 g d'acide hydrobenzoïque, le pH a été ajusté à 7,4 avec une solution de HCl concentré. Le volume a enfin été ajusté à 200 mL dans une fiole jaugée avec de l'eau distillée.

❖ La solution d'amylo – glucosidase (1 mg/mL) a été préparée en pesant 10 g (bs) d'enzyme (isolé à partir d'*Aspergillus Niger*, Sigma. 10115, 70U/mg) et en diluant avec une solution de tampon d'acétate de sodium (0,1 M à pH 4,8). Cette concentration d'enzyme est valable pour les hydrates de carbones totaux. Par contre, pour le dosage du glucose libre, la solution d'amylo – glucosidase a été préparée en dissolvant 107 mg d'enzyme (Sigma 10115) avec 4 mL d'eau distillée et 1 mL de tampon d'acétate de sodium (2M, pH 4,8).

❖ La solution tampon d'acétate de sodium pour le protocole Holm a été préparée en dissolvant 8,2 g d'acétate de sodium dans 500 mL d'eau distillée. Environ 5,56 mL d'acide acétique concentré ont été ajoutés pour obtenir une solution à pH de 4,8. Le volume de la solution a été complété jusqu'à 1000 mL pour une concentration de la solution finale à 0,1M. Pour le glucose libre, le tampon d'acétate de sodium a été préparé en dissolvant 164 g d'acétate de sodium anhydre dans environ 800 mL d'eau distillée, environ 120 mL d'acide acétique glacial ont été ajoutés pour ajuster le pH à 4,8. Le volume a été complété avec de l'eau distillée pour obtenir une solution de 1000 mL à une concentration de 2M.

#### **II.3.1.3. Teneur en amylose**

La teneur en amylose a été déterminée par DSC à partir de la mesure de l'enthalpie de fusion lors de la formation du complexe entre la L- $\alpha$ -lysophosphatidylcholine (LPC) et l'amylose (Mestres *et al.*, 1996).

Environ 8 g (bs) de farine ont été pesés dans des capsules en aluminium, 40 $\mu$ L de LPC (L- $\alpha$ -lysophosphatidylcholine, 62962-250MG, SIGMA) à 2% ont été ajoutés et les capsules ont été scellées. La capsule contenant l'échantillon et celle de référence (amylose de pomme de terre Avébé) ont été chauffées de 25 à 160°C à une vitesse de 10°C/min, maintenues à 160°C pendant 2 min et refroidies jusqu'à 50°C à 10°C/min. La teneur en amylose a été estimée par l'énergie dégagée lors de la formation du complexe amylose – lysophosphatidylcholine (phase de refroidissement) et l'analyse a été faite en duplicate.

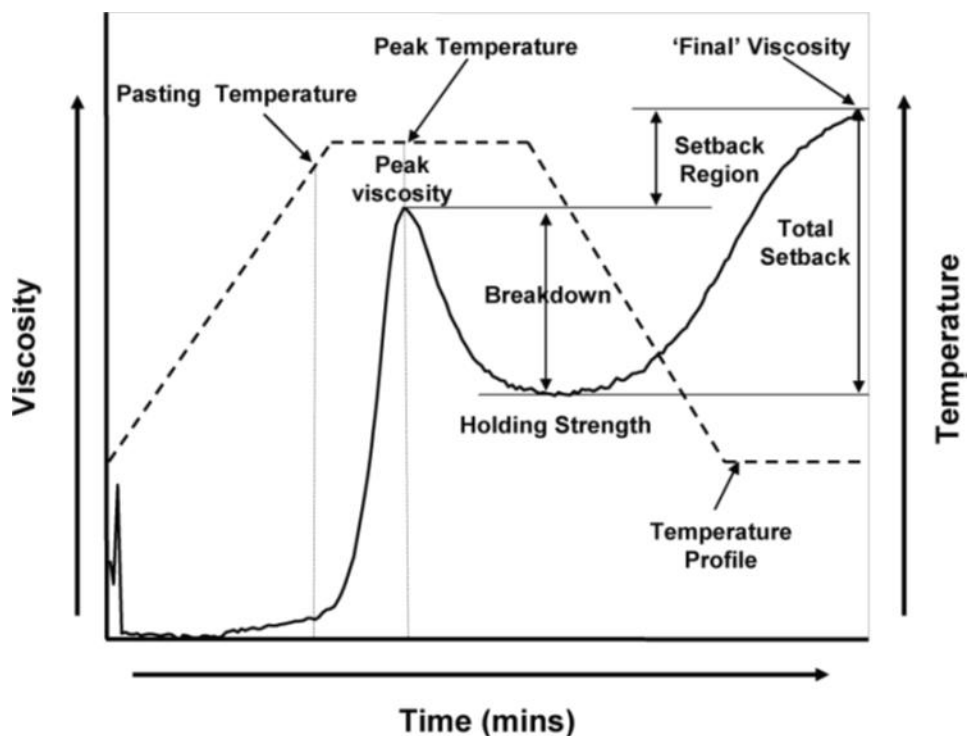
#### **II.3.1.4. Propriétés d'empesage**

Les propriétés d'empesages des farines individuelles et du mélange de farines ont été déterminées à l'aide de l'appareil RVA (Newport Scientific, Warriewood, Australie) équipé d'un logiciel Thermocline for Windows<sup>TM</sup> (TCW) en accord avec la méthode **ACCC 61-02** (1995). Les analyses ont été menées sur les farines seules ou en mélange suivant les formulations données par le plan de mélange. Des suspensions de farine dans l'eau ont été préparées en tenant compte de la matière sèche des différentes farines à une concentration de 8% (p/p). Environ 22,5 g d'eau ont été pesés et 2,5 g de farine (base sèche) ont été ajoutés pour avoir une masse totale de 25 g. L'ensemble a été pesé dans un godet de RVA préalablement taré et homogénéisé à l'aide de la palle puis fixé sur l'appareil. La vitesse de rotation de la pale est de 960 rpm pendant les 10 premières secondes puis de 160 rpm jusqu'à la fin du test. Toutes les farines ont été analysées suivant le même profil (Tableau 10) et en triplicate.

**Tableau 10:** Profil de température appliqué au cours des tests RVA

Etapes	Température (°C)	Durée (sec)	Vitesse (°C/min)
Phase initiale	50	60	-
Chauffage	50-90	400	6
Plateau	90	300	-
Refroidissement	90-50	400	6
Phase finale	50	120	-

Cette technique permet de mesurer la viscosité d'une suspension aqueuse de farine/amidon soumise à un cycle de chauffage/refroidissement. La courbe de la figure 12 montre un profil de RVA typique ainsi que les différents paramètres obtenus.



**Figure 12:** Profil classique de RVA avec les différents paramètres mesurés (Saunders, 2010)

Cette courbe permet d'obtenir les paramètres de viscosité suivants :

- ❖ La viscosité maximale (PV) : viscosité maximale atteinte par la suspension durant la phase de chauffage ou de maintien traduisant le gonflement des granules d'amidon ;
- ❖ La viscosité minimale à chaud (HS) : diminution de la viscosité liée à l'éclatement des granules ;

❖ La chute de viscosité (BD): ce paramètre traduit la fragilité des granules et donc la stabilité de la pâte à chaud ;

❖ La viscosité finale (FV) et le setback (SB): représentent la capacité du produit à gélifier après cuisson. Ces paramètres sont principalement expliqués par la diminution de température et la rétrogradation de l'amylose et traduisent la qualité texturale des produits après cuisson.

Ainsi que les paramètres de température (°C) et de temps (sec) associés à ces indicateurs. Généralement, la température d'empesage est donnée par la température à laquelle la viscosité dépasse de 20 cP la ligne de base durant l'étape de chauffage et correspond à la température à laquelle les granules commencent à gonfler. Toutefois les données obtenues à partir de la courbe peuvent être erronées et la méthode de **Norris** (2001) basée sur l'utilisation des dérivées peut alors être utilisée.

#### **II.3.1.5. Analyse thermique différentielle**

L'analyse thermique permet de caractériser le comportement de matériaux soumis à une variation de température sous atmosphère contrôlée. La calorimétrie différentielle à balayage (Differential Scanning Calorimetry DSC) est une des techniques d'analyse thermique les plus utilisées pour caractériser les changements d'état, de phase ou de structure des matériaux. Appliquée à l'amidon, elle permet de quantifier les phénomènes de gélatinisation, fusion des complexes amylose-lipide, transition vitreuse ou rétrogradation. C'est également une méthode rapide pour la détermination de la quantité d'amylose (**Mestres et al., 1996**).

L'analyse thermique a été réalisée à l'aide d'un appareil Perkin Elmer DSC 7 (Perkin Elmer, Norwalk, USA). Le principe consiste à enregistrer le flux de chaleur absorbé ou dégagé par un échantillon soumis à une variation de température. Ce flux thermique est directement proportionnel à la capacité calorifique du matériau à une température donnée. L'analyse thermique différentielle à balayage a été réalisée selon la méthode décrite par **Mestre et al., (1996)**.

Environ 8g (bs) de farine ont été pesés et introduits dans des capsules en aluminium, 40 mL d'eau distillée ont été ajoutés et les capsules ont été rapidement scellées pour analyse. Les thermogrammes de DSC ont été enregistrés à l'aide du logiciel *Pyris 1*. Les échantillons ont été dans un premier temps maintenus à 25°C pendant 1 min puis soumis à un gradient de température de 10°C/min jusqu'à 120°C. Une capsule vide a été utilisée comme référence. Le logiciel *Pyris 1* a été employé pour déterminer les températures de début et de fin de



gélatinisation ( $T_0$  et  $T_e$ ), la température de gélatinisation ( $T_p$ ) ainsi que l'enthalpie de gélatinisation ( $\Delta H$ ).

### **II.3.2. Sur la pâte fermentée crue**

Des mesures rhéologiques ont été réalisées pour accéder aux propriétés viscoélastiques de différents pâtons après fermentation. La rhéologie permet en général d'étudier les déformations et l'écoulement de la matière sous l'effet des contraintes qui lui sont appliquées. C'est une science particulièrement adaptée à l'étude des corps viscoélastiques pour analyser leurs comportements sous sollicitations mécaniques. Dans le domaine agro-alimentaire, la rhéologie permet de remonter, entre autre, au rôle des ingrédients en analysant les effets de sollicitations imposées sur le comportement à l'écoulement ou sur les réponses viscoélastiques de la matrice alimentaire. Des corrélations sont souvent recherchées entre les propriétés rhéologiques et la texture des aliments.

Dans ce travail, l'étude des propriétés rhéologiques en régime dynamique a été effectuée pour analyser le comportement viscoélastique de différents types de pâtons préparés selon le protocole décrit en section II.2.2. (Figure 11) prélevés après l'étape de fermentation.

Le test réalisé, connu sous le nom de Sweep test, consiste à imposer à l'échantillon un balayage en déformation de pulsation donnée  $\omega$ . Au cours de ce mouvement périodique, la déformation  $\gamma(t)$  et la contrainte  $\tau(t)$  évoluent sinusoïdalement au cours du temps. L'analyse de l'évolution de ces 2 grandeurs au cours du test et de leur déphasage permet de définir des grandeurs dynamiques caractéristiques du comportement viscoélastique de l'échantillon, à savoir:

- Le module de conservation ou module élastique ( $G'$ , Pa), proportionnel à l'énergie élastique emmagasinée et restituée au cours d'une période ;
- Le module de perte ou module visqueux ( $G''$ , Pa), proportionnel à l'énergie dissipée au cours d'une même période.

$G'$  et  $G''$  décrivent respectivement les propriétés élastique (solide) et visqueuse (liquide) d'un échantillon ce qui justifie leur appellation.

Dans le cadre de ces travaux, les mesures rhéologiques ont été réalisées en utilisant un rhéomètre Physica (modèle MCR301, Anton Paar GmbH, Graz, Autriche), équipé d'un module de mesure à géométrie plans parallèles striés (PP 50-P2; 50 mm de diamètre) et accompagné d'un logiciel Rheoplus pour l'acquisition des données. La température est réglée à 25 °C en

utilisant un système à effet Peltier relié à un réfrigérant (Viscotherm VT2, Anton Paar GmbH, Graz, Autriche). Les modules  $G'$  et  $G''$  ont été mesurés à une fréquence constante de 1 Hz, tandis que l'amplitude de déformation a varié entre 0,001 et 1000 %. L'évolution du  $G'$  a permis d'identifier la contrainte critique  $\tau_c$  (Pa) limitant le domaine linéaire de viscoélasticité (LVE). La contrainte critique correspond donc à la première valeur du  $G'$  qui présente une diminution de plus de 5 % par rapport à la valeur précédente. Cette contrainte critique qui correspond au « LVE » a été retenue comme réponse dans ce travail. Toutes les mesures ont été répétées au moins deux fois pour une meilleure fiabilité des résultats.

### **II.3.3. Sur le pain**

#### **II.3.3.1. Rendement massique et taux de levée**

L'objectif étant d'évaluer les variations de masse et de hauteur de la pâte avant et après cuisson. Les mesures ont été effectuées à la fin de la mise en moule avant fermentation et à la fin de la cuisson après 1h30 de refroidissement. Les paramètres obtenus ont permis de calculer le rendement massique et le taux de levée.

$$\text{Rendement} = \frac{\text{masse finale du pain}}{\text{masse initiale du pain}} * 100$$

$$\text{Taux de levée} = \frac{\text{Hauteur finale du pain} - \text{Hauteur de la pâte humide}}{\text{Hauteur finale du pain}} * 100$$

#### **II.3.3.2. Volume spécifique**

Le volume spécifique des pains a été déterminé selon la méthode **AACC 10-05.01** (2000) en utilisant des graines de colza.

Au préalable, la masse volumique des graines a été déterminée. Un récipient de 5L a été totalement rempli d'eau, la masse ( $M_{\text{eau}}$ ) et la température ( $T_{\text{eau}}$ ) de l'eau ont été relevées. A partir de la température, la masse volumique de l'eau a été identifiée ( $\rho_{\text{eau}}$ ) et son volume calculé ( $V_1 = M_{\text{eau}} / \rho_{\text{eau}}$ ). Par la suite les graines de colza ont été placées dans le même récipient et la surface a été arasée à l'aide d'une règle épaisse et rigide qui ne déforme pas. La masse des graines a été déterminée par pesée ( $M_1$ ) et leur masse volumique a été calculée  $\rho_{\text{gc}} = M_1 / V_1$ .

Pour mesurer le volume du pain, ce dernier a été placé dans le récipient et l'ensemble a été taré, ensuite les graines de colza ont été déposées dans le récipient et la surface a été arasée. L'ensemble a été pesé ( $M_2$ ) et le volume occupé par les graines calculé ( $V_2 = M_2 / \rho_{\text{gc}}$ ). Le

volume du pain a été calculé comme suit :  $V_{\text{pain}} = V_1 - V_2$ . Son volume spécifique ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) est donné par la formule:

$$\text{Volume spécifique} = \frac{\text{volume du pain}}{\text{masse du pain}}$$

### II.3.3.3. Analyse de la couleur

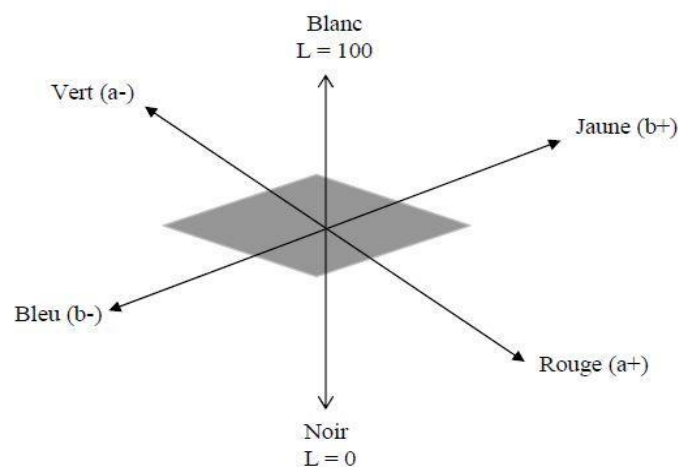
Les couleurs de la croûte et la mie ont été mesurées sur les tranches de 20 mm à l'aide d'un chromamètre (CR- 400, Konica Minolta, Japon) avec une lampe au xénon comme source de lumière. Le système  $L^*a^*b^*$  utilisé est un standard international pour la représentation des couleurs, développé en 1976 par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Ce système consiste en un cartésien tridimensionnel où l'axe  $L^*$  représente la clarté qui varie entre 0 (noir) et 100 (blanc), tandis que les axes de  $a^*$  et  $b^*$  représentent les composantes chromatiques variant du vert au rouge et du bleu au jaune qui sont compris entre  $-120$  et  $+120$  respectivement (Figure 13) (Papadakis *et al.*, 2000). Pour comparer la couleur des différents échantillons, la différence totale de couleur ( $\Delta E$ ) est calculée par la formule proposée par la CIE en 1976:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}$$

$L_0, a_0, b_0$  : Valeurs moyennes des pains correspond aux points centraux du plan d'expérience sur la formulation.

$L^*, a^*, b^*$  : Valeurs mesurées

La mesure a été faite sur trois tranches afin d'avoir une moyenne de la couleur générale du pain.



**Figure 13:** Espace chromatique CIE  $L^*a^*b^*$

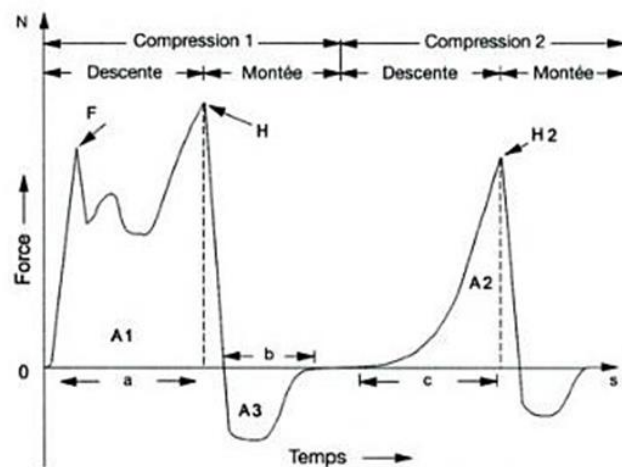
### II.3.3.4. Caractéristiques texturales

L'analyse instrumentale de la texture, utilisant un appareil nommé texturomètre, est une technique largement utilisée dans le domaine agro-alimentaire pour caractériser mécaniquement les matrices alimentaires. Ce type d'analyse est basé sur la stimulation du produit par une déformation et la mesure de la réaction du produit à la déformation appliquée. Il s'agit de mesurer la force de réaction du produit en fonction de la distance de déformation ou du temps de déformation. Différents tests peuvent être effectués sur les matrices alimentaires et les propriétés instrumentales de texture en découlant sont souvent reliées à différentes propriétés sensorielles de texture.

Dans ce travail, un texturomètre (modèle TA-XT plus, Stable Micro Systems, Godalming, Royaume uni), pouvant être équipé de différents capteurs de force (5 kg et 50 kg) et de différentes sondes (géométrie et tailles variées), a été utilisé. Trois types de tests ont été adoptés afin d'évaluer le comportement physique du pain cuit (croûte et mie), notamment sous de fortes sollicitations, et d'en déduire par la suite les propriétés de textures.

#### III.3.4.1. Test TPA (*Texture Profil Analyse*)

Ce test a été mis au point par **Friedman** (1963), **Szczesniak** (1963, 1975) et **Bourne** (1978, 2002) pour imiter la mastication des produits alimentaires en appliquant sur l'échantillon deux compressions successives. La courbe représentant la force (N) en fonction du temps (s) permet ainsi de déterminer huit paramètres qui décrivent la texture du produit analysé (Figure 14). Ces paramètres peuvent être à leur tour corrélés à des descripteurs d'analyse sensorielle (Tableau 11).



**Figure 14** : Allure typique d'un profil de texture TPA (Bourne, 2002)

**Tableau 11** : Paramètres obtenus lors d'un test TPA et interprétations

Paramètres	Formule	Unité	Signification physique	Signification sensorielle
Fracturabilité	F	N	Force nécessaire pour entrer dans le produit.	Force nécessaire pour briser le produit
Dureté	H	N	Force opposée par le produit à l'avancement de la sonde	Force nécessaire pour obtenir une déformation ou une pénétration donnée
Adhérence	$A_3$	Nm	Force exercée sur la sonde qui se retire	Force nécessaire pour décoller le produit de l'intérieur de la paroi buccale. Elle mesure la façon dont le produit colle aux dents, palais...
Filant	B	M	Distance jusqu'à laquelle le produit reste attaché à la sonde	
Elasticité	$c/a$	Sans unité	Rapport des distances parcourues lors des 2 compressions. Plus le rapport est petit (plus la 2 <sup>nd</sup> e distance est petite), moins le produit a récupéré de la hauteur entre les 2 compressions ce qui indique une élasticité faible	Qualifie la façon dont le produit revient à son état initial quand la force de déformation cesse. Un produit est totalement élastique lorsqu'il revient rapidement à son état initial, il ne l'est pas du tout si la déformation se maintient quand la contrainte cesse
Cohésion	$A_2/A_1$	Sans unité	Plus le 2 <sup>nd</sup> pic est petit par rapport au 1 <sup>er</sup> , plus le produit est déstructuré après compression, ce qui indique une cohésion faible	Qualifie le point limite jusqu'auquel un produit peut être déformé avant de se rompre
Gumminess	$H * A_2/A_1$	N	Paramètres empiriques établis pour refléter la difficulté à mâcher. Plus le produit est dur, cohésif et élastique, plus il est difficile à mâcher	Qualifie l'énergie nécessaire pour mastiquer un produit mi-solide vers un état de déglutition
Chewiness	$H * A_2/A_1 * c/a$	N		Qualifie l'énergie nécessaire pour mastiquer un produit solide vers un état de déglutition

Le test TPA a été utilisé dans ce travail pour analyser uniquement la texture de la mie dans les conditions suivantes : sonde cylindrique de 25 mm de diamètre, force de détection de la surface du produit de 5 g, vitesse de déplacement de la sonde pré et post-test de 1 mm/s,

vitesse de déplacement de la sonde au cours de la compression de 2 mm/s, déformation de 40 % et temps de repos de 5 s entre les 2 compressions. Ce test a été effectué à deux niveaux de la mie de 3 tranches de pain froids (refroidissement à température ambiante pendant 1h30) et ayant une épaisseur de 20 mm (6 répétitions).

#### *III.3.4.2. Test de compression – relaxation*

Ce test a été adopté pour évaluer la relaxation de la mie suite à la première compression (première morsure). Il s'agit d'exercer une déformation donnée sur la mie et de la maintenir pendant une certaine durée (**Qazi et al., 2014**). Le suivi de l'évolution de la force (N) en fonction du temps (s) permet ainsi de décrire le potentiel de relaxation du produit comprimé et de déterminer la force maximale de compression (PF) associée à la fermeté de la mie, la force finale (FF) à la fin de la relaxation, et ainsi que la constante de relaxation (K) traduisant l'élasticité du matériau.

Pour se rapprocher des conditions du test TPA, les conditions suivantes ont été choisies pour le test compression-relaxation: sonde cylindrique de 50 mm de diamètre, force de détection de la surface du produit de 5 g, vitesse de déplacement de la sonde pré et post-test de 1 mm/s, vitesse de déplacement de la sonde au cours de la compression de 2 mm/s, déformation de 40 %, temps de maintien de la compression ou temps de relaxation de 150 s. Ce test a été effectué sur 3 cylindres de mie froide (47 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur) (3 répétitions).

#### *III.3.4.3. Test de pénétrométrie de la croûte*

Ce test a été effectué dans le cadre de ce travail dans l'objectif d'évaluer la dureté de la croûte de différents types de pains. Il s'agit d'utiliser une sonde en forme de lame tranchante pour couper la croûte du pain ce qui permet d'imiter le début de la mastication. L'évolution de la force (N) en fonction de la distance parcourue (mm) permet de déterminer la force maximale nécessaire pour pénétrer ou couper la croûte. Cette force maximale a été retenue comme paramètre qui reflète la dureté de la croûte.

Le test été réalisé dans les conditions suivantes : sonde en forme de lame tranchante, force de détection de la surface du produit de 5 g, vitesse de déplacement de la sonde pré-test de 0,5 mm/s, vitesse de déplacement de la sonde au cours de la pénétration de 1 mm/s, vitesse de déplacement de la sonde post-test de 10 mm/s, distance de pénétration de 10 mm. Ce test a été effectué sur 3 croûtes différentes, isolées de leur mies froides et ayant une épaisseur de 20 mm maintenues sur la base par du ruban adhésif (3 répétitions).

## **II.4. Etude technologique : Influence du mode de fermentation, du couple temps-température de cuisson et de la scarification sur la qualité des pains**

L'intérêt de tester différents modes de fermentation a été de voir son influence sur la qualité des pains notamment en terme de TE de la mie et de la croûte et des paramètres de textures. Deux modes de fermentation ont été testés à cet effet (le procédé restant inchangé exception faite de l'étape de fermentation); une fermentation en étuve et une fermentation au four en mode CST selon le procédé décrit en section II.2.2. (Figure 11). Le plan de mélange formulé en section II.2.1. (Tableau 6) a été utilisé. Des améliorations technologiques ont été faites en faisant varier les paramètres de température et temps de cuisson des phases mixte et CST pour améliorer la qualité du produit fini. De même l'influence des scarifications réalisées sur le pâton avant cuisson a été testée dans le but d'améliorer les caractéristiques du pain (couleur, teneur en eau et texture de la mie). La formulation utilisée a été la 9C identique dans tous les cas.

**Tableau 12:** Paramètres du procédé

	Phase mixte		Phase CST	
	Température (°C)	Temps (min)	Température (°C)	Temps (min)
1 sans scarification	140	30	160	55
2 sans scarification	140	50	170	75
3 avec scarification (2)	140	50	170	75
4 avec scarification	140	50	170	95
5 avec scarification	140	10	1/140	40
			2/170	75

Les paramètres de couleur, teneur en eau et texture de la mie et de la croûte ont été mesurés selon les méthodes décrites en section III.

## **II.5. Analyses statistiques**

Les résultats ont été présentés sous forme de moyennes  $\pm$  écart type, la comparaison des moyennes a été faite en utilisant l'analyse de variances à un facteur (ANOVA). La différenciation des moyennes d'un même groupe a été faite à l'aide du test de Duncan. Tout ceci en utilisant le logiciel Statgraphics centurion XVI. (StatFolio). Les réponses du plan de

mélange ont été présentées sous forme de surfaces de réponse générées à l'aide de Statistica 7.1 (Statsoft).



**CHAPITRE III :**  
**RESULTATS ET**  
**DISCUSSION**

## III.1. Caractéristiques physico – chimiques et fonctionnelles des farines

### III.1.1. Qualité des amidons de farines

Le tableau 13 présente les teneurs en amidon et amylose des différentes farines étudiées.

**Tableau 13:** Teneurs en eau, en amidon et en amylose des différentes farines étudiées

Echantillon	Amidon (g/100g MS)	Amylose (g/100g amidon)
Farine de manioc fermenté	91,20±0,93 <sup>b</sup>	15,72±0,34 <sup>a</sup>
Farine de patate	69,51±5,04 <sup>a</sup>	16,38±0,24 <sup>b</sup>
Farine de sorgho	72,00±3,09 <sup>a</sup>	20,83±0,80 <sup>c</sup>

*Les moyennes ± écart type dans la même colonne ayant les même lettres ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$  ;  $n = 3$ )*

Les teneurs en amidon des farines de manioc et de patate sont de 91,20% et 69,51%, respectivement. La teneur en amidon de la farine de patate est comprise dans l'intervalle obtenu par **Nabubuya et al.** (2012) sur différentes variétés de patates (68 – 73% MS). La teneur en amidon de la farine de manioc fermenté obtenue est proche de celle d'**Erikson** (2013) sur une variété de manioc *Afisiafi* (89,2%). La teneur en amidon de la farine de sorgho (72,00±3,09) mesurée est inférieure à celle obtenue par **Frederick** (2009) sur le sorgho commercial qui était de 79,70±2,05% (bs). Cette différence observée pourrait être expliquée par la variété utilisée et le procédé d'extraction. Toutefois, la teneur en amidon obtenue est comprise dans l'intervalle trouvé par **Winger et al.** (2014) sur différentes variétés de sorgho.

Les teneurs en amylose sont comprises entre 15,72 et 20,83% (g/100g amidon); ce qui correspond à l'intervalle des teneurs en amylose des produits amyloacées (15 – 30%) avec les céréales ayant de plus forte teneurs (25 – 28%) et les tubercules les plus faibles (15 – 18%) (**Werner et al., 2010**). La teneur en amylose est un indicateur de la fonctionnalité de l'amidon. Plus la teneur en amylose est élevée (ou rapport amylose/amylopectine), plus l'aptitude au gonflement de l'amidon sera faible. Ceci peut permettre de prédire l'aptitude des différentes farines à la levée lors de la panification. Au vu des résultats obtenus, la farine de manioc fermenté sera plus apte à la levée que la farine de sorgho. La quantité d'amylose de farine de manioc fermenté obtenue est supérieure à celle d'**Erikson et al.** (2013) sur quatre variétés de manioc du Ghana (8,2 – 11%). La quantité d'amylose pour la farine de patate douce est semblable à celle de **Noda et al.** (1998) sur 51 variétés avec une teneur en amylose de

19,7±2,6% et de **Nabubuya et al.** (2012) sur 10 variétés (16 – 23%). Enfin, pour la farine de sorgho la teneur en amylose obtenue est différente de celle de **Liu et al.** (2007) qui était de 18,45%.

### **III.1.2. Caractéristiques fonctionnelles des farines**

#### **III.1.2.1. Propriétés d'empesage**

##### *III.1.2.1.1. Farines individuelles*

Les paramètres d'empesage (RVA) des différentes farines à une concentration de 8% (p/p) sont présentés dans le tableau 14. Les propriétés d'empesage des farines permettent de prédire le comportement des granules d'amidons lors d'un traitement hydrothermique. Les paramètres RVA en présence d'inhibiteur d'amylase ( $\text{AgNO}_3$  0,05M) sont relativement plus élevés pour l'ensemble des farines étudiées en comparaison à l'analyse faite sans inhibiteur. Ceci tient du fait que l'activité endogène des  $\alpha$  – amylases présentes dans les tubercules et les céréales natives rompt les liaisons glucosidiques  $\alpha$  -1,4 de façon aléatoire, diminuant ainsi rapidement la taille des molécules d'amidons et réduisant ainsi la viscosité des suspensions d'amidon (**Hoseney, 1990**). Les paramètres RVA permettront dans la suite du travail de prédire l'aptitude de levée et de rétrogradation de la pâte lors des différentes formulations. La viscosité maximale (PV) représente le pouvoir de gonflement des granules d'amidon, c'est aussi un indicateur de la capacité d'adsorption d'eau des granules (**Sciarini et al., 2010**). Parmi les farines étudiées, la farine de manioc fermenté présente la plus forte capacité de gonflement aussi bien avec que sans inhibiteur. Ces résultats se justifient, d'une part par la qualité de l'amidon de manioc, plus riche en amylopectine, et par conséquent plus apte au gonflement ; d'autre part, au cours de la fermentation, le granule d'amidon est endommagé, ce qui améliore sa capacité de gonflement et conduit à une viscosité plus élevée. On notera également, en ce qui concerne la patate, le fait que le pouvoir de gonflement double en présence d'inhibiteur d'amylase, ce qui est compréhensible au regard du fort taux d'amylases présentes dans la patate native (**Nabubuya et al., 2012**).

Les températures d'empesage de toutes les farines étudiées sont comprises entre 64,78 et 83,62°C et ne sont pas significativement affectées par l'utilisation d'inhibiteur d'amylase. Ces températures d'empesages sont des indices de l'énergie minimale requise pour initier une absorption rapide d'eau et un gonflement des granules d'amidon entraînant l'augmentation de la viscosité (**Kaur et al., 2005**). La température d'empesage de la farine de sorgho est plus élevée (82 – 84°C) que celle des autres farines (64 – 68°C), ce qui est en accord avec les travaux

de **Thomas et Atwell** (1999) montrant que la température d'empesage dépend de l'origine et de la teneur en amidon ; et est généralement plus élevée pour les céréales que pour les tubercules. Les températures d'empesage des farines de patates sont proches de celle de **Julianti et al.** (2015). Pour la farine de manioc, les températures d'empesages se rapprochent de celle d'**Osungbaro et al.** (2010) avec des valeurs de 63,80°C.

Une fois que la viscosité a atteint son maximum, les granules d'amidon éclatent et libèrent leur matériau interne, entraînant une diminution de la viscosité du milieu qu'on appelle chute de viscosité ou breakdown (BD). Ce paramètre renseigne sur la fragilité des granules d'amidon, plus sa valeur est élevée plus le granule d'amidon est endommagé. La farine de manioc fermenté présente les valeurs de ce paramètre les plus élevées, traduisant son endommagement.

La viscosité finale (FV) est associée à la capacité de gélification après refroidissement. La farine de manioc fermenté présente la valeur la plus élevée de ce paramètre. L'augmentation de la viscosité après refroidissement est en partie expliquée par la rétrogradation. Ce phénomène décrivant l'aptitude des chaînes d'amyloses à vouloir se réassocier par liaisons hydrogènes en expulsant les molécules d'eau peut être quantifié par le setback (SB). Un setback élevé sera donc associé à un effet négatif sur la qualité des produits panifiés au cours de la conservation. Les valeurs mesurées indiquent un SB plus faible pour les farines de sorgho et de patate et plus élevé pour le manioc. Par conséquent, on peut, de façon hypothétique, supposer que l'association de la farine de manioc avec des farines moins sujettes à la rétrogradation, comme la patate et le sorgho, pourrait être privilégiée en panification. Ces résultats sont en accord avec **Osungbaro et al.** (2010) qui ont étudié les propriétés d'empesages des farines de manioc et sorgho dans le but de pouvoir les utiliser en panification SG et sont arrivés à de meilleurs résultats avec un mélange de farine de manioc et farine de sorgho dans des proportions respectives de 70% et 30%.

Au regard de tous les paramètres de viscosité obtenus, la farine de manioc est bien adapté pour la panification en raison de son aptitude au gonflement, cependant elle est moins stable à chaud et à une tendance à la rétrogradation élevée. Son association avec les farines de patate et sorgho est donc susceptible de limiter cette tendance à la rétrogradation, mais ces farines doivent être utilisées en quantités modérées pour ne pas réduire l'aptitude de la pâte à lever en raison de leur faible viscosité.

**Tableau 14:** Paramètres RVA des différentes farines

Farines	PT (°C)	PV (cP)	tPV (sec)	TPV (°C)	HS (cP)	CA (sec)	FV (cP)	BD (cP)	RBD (%)	SB (cP)	RSB (%)
Sans inhibiteur											
Sorgho	82,12±0,26 <sup>e</sup>	586±8 <sup>b</sup>	786±7 <sup>d</sup>	89,35±1,04 <sup>b</sup>	495±7 <sup>b</sup>	378±3 <sup>d</sup>	756±10 <sup>b</sup>	91±2 <sup>a</sup>	15,48±0,27 <sup>b</sup>	267±3 <sup>b</sup>	34,50±0,04 <sup>c</sup>
Patate	68,18±0,15 <sup>c</sup>	308±3 <sup>a</sup>	380±2 <sup>a</sup>	89,77±0,05 <sup>b</sup>	160±3 <sup>a</sup>	123±2 <sup>b</sup>	225±5 <sup>a</sup>	147±1 <sup>b</sup>	47,89±0,54 <sup>a</sup>	64±2 <sup>a</sup>	28,63±0,11 <sup>b</sup>
Manioc fermenté	64,72±0,08 <sup>a</sup>	2039±13 <sup>d</sup>	482±9 <sup>b</sup>	89,87±0,06 <sup>b</sup>	165±14 <sup>e</sup>	259±8 <sup>c</sup>	1879±17 <sup>d</sup>	515±24 <sup>c</sup>	25,25±1,11 <sup>d</sup>	355±7 <sup>d</sup>	18,89±0,53 <sup>a</sup>
Avec inhibiteur											
Sorgho	82,87±0,68 <sup>d</sup>	570±2 <sup>b</sup>	773±27 <sup>d</sup>	89,27±0,65 <sup>b</sup>	482±3 <sup>b</sup>	376±25 <sup>d</sup>	757±24 <sup>b</sup>	88±1 <sup>a</sup>	15,43±0,20 <sup>b</sup>	257±23 <sup>bc</sup>	36,28±1,91 <sup>d</sup>
Patate	68,18±0,15 <sup>c</sup>	711±39 <sup>c</sup>	494±10 <sup>b</sup>	80,40±0,15 <sup>a</sup>	646±37 <sup>c</sup>	238±9 <sup>a</sup>	1006±144 <sup>c</sup>	70±10 <sup>a</sup>	9,07±0,14 <sup>a</sup>	304±44 <sup>c</sup>	30,20±0,79 <sup>b</sup>
Manioc fermenté	64,78±0,10 <sup>a</sup>	2170±2 <sup>e</sup>	498±1 <sup>b</sup>	89,73±0,08 <sup>b</sup>	1524±23 <sup>d</sup>	276±1 <sup>bc</sup>	2077±9 <sup>e</sup>	514±16 <sup>c</sup>	23,67±0,71 <sup>c</sup>	420±12 <sup>e</sup>	20,22±0,60 <sup>a</sup>

*Les valeurs (moy ± écart type) affectées de la même lettre dans les colonnes ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$  ;  $n = 3$ )*

**Légende:** **PT:** Pasting Temperature; **PV:** pic viscosity; **tPV:** time pic viscosity; **TPV:** temperature pic viscosity; **HS:** holding strength; **THS:** Temperature Holding Strength; **FV:** final viscosity; **BD:** breakdown; **RBD:** relative breakdown; **SB:** setback; **RSB:** relative setback

### *III.1.2.1.2. Mélange des farines*

Les propriétés d'empesage des différents mélanges de farine destinées à la panification sont résumées dans le tableau 15.

Les valeurs de PV sont comprises entre 1075,67 cP (2S) et 520,67 cP (6C), ce paramètre augmente avec la quantité de farine de manioc dans le mélange, qui, seule, présente la viscosité maximale la plus importante. La même tendance semble être observée pour les valeurs de viscosité finale (FV). Les échantillons à forte teneur en manioc (> 70%: 2S, 4S, 5C et 7C) sont ceux présentant les valeurs de FV les plus élevées. Cependant, l'évolution de la viscosité finale n'est pas uniquement reliée à la teneur en manioc, mais il faut aussi tenir compte des proportions de sorgho (tendance à augmenter FV) et de patate (tendance à diminuer FV). Par ailleurs, les viscosités finales suivent la même tendance ( $FV < PV$ ), excepté pour les mélanges 4S et 8C qui présentent les plus fortes teneurs en sorgho et sont théoriquement susceptible de subir un rassissement plus marqué. L'habilité à la cuisson (CA) des différents mélanges indique qu'à un taux en sorgho > 5% le temps de cuisson est plus important (4S, 8C, 9C et 2S). Le sorgho seul a un temps de cuisson élevé en comparaison aux autres farines. Le tableau 16 montre qu'en mélange avec les autres farines, il serait susceptible d'influencer significativement la cuisson des pains contenant les différents mélanges de farines. Cette observation a conduit à déterminer les paramètres de gélatinisation et l'énergie nécessaire pour la cuisson complète des pains.

**Tableau 15** : Paramètres RVA des différents mélanges de farines

	PT (°C)	PV (cP)	HS (cP)	FV (cP)	BD (cP)	RBD (%)	SB (cP)	RSB (%)	CA (sec)
1S	65,57±0,07 <sup>bc</sup>	773±11 <sup>f</sup>	405±5 <sup>b</sup>	573±5 <sup>b</sup>	368±6 <sup>g</sup>	47,63±0,07 <sup>f</sup>	168±1,15 <sup>h</sup>	29,38±0,28 <sup>g</sup>	180±5 <sup>a</sup>
2S	65,78±0,23 <sup>bc</sup>	1076±12 <sup>i</sup>	832±9 <sup>i</sup>	961±14 <sup>f</sup>	243±4 <sup>f</sup>	22,62±0,22 <sup>d</sup>	129±5 <sup>e</sup>	13,42±0,29 <sup>a</sup>	243±3 <sup>ef</sup>
3S	65,45±0,05 <sup>ab</sup>	614±7 <sup>b</sup>	455±6 <sup>c</sup>	558±10 <sup>b</sup>	159±2 <sup>d</sup>	25,90±0,29 <sup>e</sup>	103±4 <sup>a</sup>	18,45±0,36 <sup>e</sup>	237±2 <sup>de</sup>
4S	65,90±0,14 <sup>cd</sup>	882±15 <sup>g</sup>	748±14 <sup>g</sup>	900±15 <sup>e</sup>	134±1 <sup>bc</sup>	15,16±0,19 <sup>a</sup>	152±2 <sup>f</sup>	16,92±0,20 <sup>c</sup>	260±3 <sup>h</sup>
5C	65,43±0,14 <sup>ab</sup>	974±7 <sup>h</sup>	805±7 <sup>h</sup>	963±8 <sup>f</sup>	168±5 <sup>d</sup>	17,29±0,44 <sup>b</sup>	157±2 <sup>g</sup>	16,34±0,03 <sup>b</sup>	231±2 <sup>cd</sup>
6C	65,77±0,15 <sup>bc</sup>	521±6 <sup>a</sup>	392±3 <sup>a</sup>	509±3 <sup>a</sup>	129±5 <sup>b</sup>	24,77±0,65 <sup>e</sup>	117±2 <sup>cd</sup>	23,00±0,35 <sup>f</sup>	228±5 <sup>c</sup>
7C	65,16±0,18 <sup>a</sup>	750±9 <sup>e</sup>	564±7 <sup>f</sup>	684±6 <sup>d</sup>	186±15 <sup>e</sup>	24,80±1,70 <sup>e</sup>	120±1 <sup>d</sup>	17,59±0,26 <sup>d</sup>	205±9 <sup>b</sup>
8C	66,23±0,48 <sup>d</sup>	639±3 <sup>c</sup>	535±7 <sup>d</sup>	650±9 <sup>c</sup>	104±4 <sup>a</sup>	16,32±0,66 <sup>ab</sup>	115±3 <sup>c</sup>	17,69±0,26 <sup>d</sup>	256±3 <sup>gh</sup>
9C	65,89±0,27 <sup>cd</sup>	690±3 <sup>d</sup>	550±3 <sup>e</sup>	660±4 <sup>c</sup>	140±3 <sup>c</sup>	20,29±0,40 <sup>c</sup>	110±4 <sup>b</sup>	16,62±0,48 <sup>bc</sup>	249±4 <sup>fg</sup>

*Les valeurs (moy±écart type) affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$  ;  $n = 3$ )*

### III.1.2.2. Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des farines de manioc, patate et sorgho obtenues par analyse thermique différentielle (DSC), sont présentées dans le tableau 16. La farine de manioc fermenté présente les valeurs les plus faibles de  $T_o$ ,  $T_p$  et  $T_e$  (60,48 ; 65,49 et 71,76°C, respectivement) et la farine de sorgho présente les valeurs plus élevées de ces paramètres (70,22 ; 75,31 et 81,72°C respectivement). Les valeurs d'enthalpies sont comprises entre 11,98 J/g (farine de sorgho) et 20,21 J/g (farine de manioc fermenté). L'analyse statistique indique que tous les paramètres mesurés par DSC sont significativement différents ( $p < 0,05$ ) selon la source botanique. Les températures de gélatinisation, ainsi que les enthalpies sont reliées aux caractéristiques physiques du granule et sont caractéristiques de l'origine botanique (**Moorthy, 2002**). De plus ces paramètres étant hautement dépendants de la variété, de la source botanique, des facteurs environnementaux et des conditions opératoires, il est donc difficile de les comparer avec la littérature. Cependant une tendance similaire des résultats de DSC pour les farines de manioc fermenté et de sorgho a été obtenue par **Onyango et al.** (2011) (les températures de gélatinisation des farines de manioc fermenté sont inférieures à celles de la farine de sorgho et inversement pour l'enthalpie).

Les températures de gélatinisation peuvent être des indicateurs de stabilité des cristallites dans les granules d'amidon. Par conséquent, des valeurs élevées de ces paramètres peuvent signifier que les températures nécessaires pour le gonflement des granules doivent être plus importantes (**Moorthy, 2002**). Au regard des températures de gélatinisation des différentes farines et de leur enthalpie, il paraît donc intéressant de mélanger les différentes farines afin de minimiser l'énergie et le temps nécessaire pour une cuisson complète des pains.

**Tableau 16:** Paramètres DSC des différentes farines

Farine	$T_o$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_e$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
Manioc fermenté	60,48±0,36 <sup>a</sup>	65,49±0,41 <sup>a</sup>	71,76±0,21 <sup>a</sup>	20,21±0,71 <sup>b</sup>
Patate	62,44±0,0 <sup>b</sup>	70,19±0,35 <sup>b</sup>	78,36±0,04 <sup>b</sup>	13,72±0,05 <sup>a</sup>
Sorgho	70,22±0,32 <sup>c</sup>	75,31±0,05 <sup>c</sup>	81,72±0,29 <sup>d</sup>	11,98±0,14 <sup>a</sup>

*Les moyennes ± écart type dans la même colonne ayant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$  ;  $n = 2$ )*



## III.2. Panification

### III.2.1. Valeurs technologiques des mélanges de farines

L'analyse des paramètres physico – chimiques des différents points du mélange combiné avec la viscosité du pâton a permis de dégager différents modèles (Tableau 17) pour chaque réponse du plan. Les modèles ont été validés selon la stratégie suivante :

- Validation de l'ajustement entre les valeurs observées et prédites par le modèle ;
- Analyse de la variance 1 (ANOVA 1), selon la méthode des moindres carrés, pour déterminer les différences significatives entre les valeurs prédites par le modèle et la variance du modèle. Deux hypothèses sont formulées :

H0: variance du modèle = variance du résidu

H1: variance du modèle > variance du résidu

La validation de cette étape n'est possible que si la p-value est inférieure à 5% ou 10% selon le paramètre étudié (H1 acceptée).

- Analyse de la variance 2 (ANOVA 2) pour déterminer les différences significatives entre les erreurs du modèle (liées au manque d'ajustement) et les erreurs liées aux répétitions (liées à l'expérimentation). Deux hypothèses sont formulées:

H0: variance des erreurs du modèle = variance des erreurs liées aux répétitions

H1: variance des erreurs du modèle > variance des erreurs liées aux répétitions

La validation de cette étape n'est possible que si la p-value est supérieure à 5% ou 10% selon le paramètre étudié (H0 acceptée).

Le modèle sera retenu si ces trois étapes sont validées. Les résultats du plan d'expérience ont été ainsi exploités sous forme de surfaces de réponses spécifiques pour chaque paramètre. Cette présentation permet de visualiser l'évolution des paramètres prédits en fonction des différentes variables explicatives (proportions des farines de manioc, patate et sorgho).

**Tableau 17:** Modèles retenus et paramètres statistiques du " plan simplex centroïde avec contraintes"

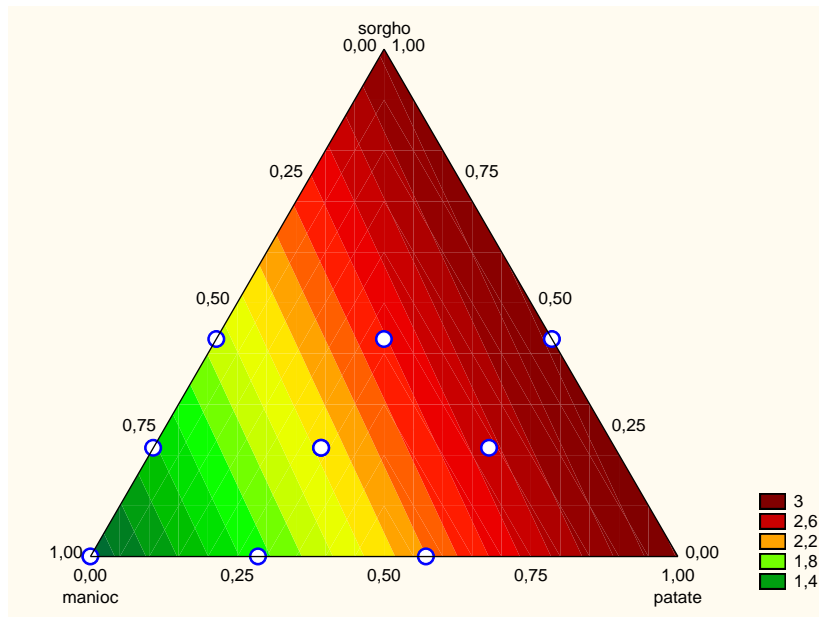
Réponses	Modèle	R <sup>2</sup>	P- value	Manque d'ajustement
Dureté de la mie	Linéaire	0,60	0,04**	0,42
Elasticité	Cubique spécial	0,98	0,02**	0,84
Adhérence	Linéaire	0,63	0,05*	0,80
Cohésion	Quadratique	0,96	0,07*	0,33
Volume spécifique	Linéaire	0,81	0,006**	0,09
LVE G'	Quadratique	0,99	0,02**	0,10

\*effet significatif pour  $p\text{-value} < 0,1$  ; \*\* effet significatif pour  $p\text{-value} < 0,05\%$

D'après les résultats du tableau 17, les modèles sont regroupés suivant les paramètres texturaux, physiques et rhéologiques.

❖ Sur le plan textural

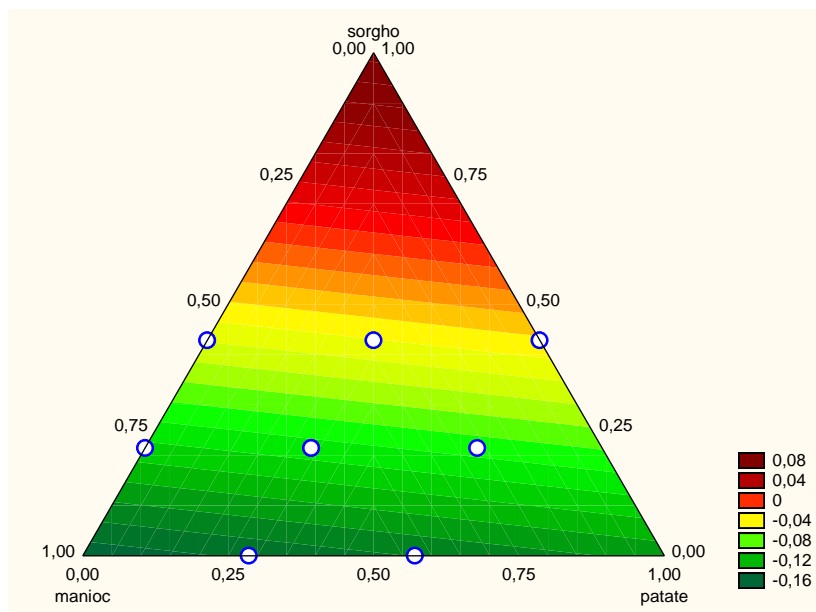
On peut remarquer que des modèles linéaires peuvent être retenus pour expliquer la variation de la dureté et de l'adhérence de la mie en fonction des différentes formulations. Bien que le modèle linéaire ait été choisi pour l'adhérence et la dureté de la mie, il reste à parfaire au vu leur R<sup>2</sup> (R<sup>2</sup> ≈ 0,63 et 0,60 respectivement). Selon la figure 15, la dureté semble être corrélée positivement avec les proportions de sorgho et patate et négativement avec la teneur en manioc. En effet, les formulations contenant moins de 45% de manioc ont une mie dure, ce qui laisse supposer que cette proportion serait une limite critique pour ce paramètre. Ces observations sont en accord avec la littérature (**Onyango et al., 2011**). Ces résultats permettraient d'orienter les formulations vers de plus hautes teneurs en manioc afin d'obtenir une mie qui soit souple et facilement maniable par le consommateur. En ce qui concerne la surface de réponse de l'adhérence (Figure 16), elle est corrélée positivement au sorgho et négativement à la patate et au manioc. Par conséquent, le caractère collant de la mie (adhérence ≥ 0) semblerait moins prononcé pour des proportions en sorgho supérieures à 50%.



**Figure 15** : Surface de réponse de la dureté de la mie

Equation du modèle:  $Y = 1,12*M + 3,01*P + 2,82*S$

( $M = \text{teneur en manioc}$  ;  $P = \text{teneur en patate}$  ;  $S = \text{teneur en sorgho}$ )



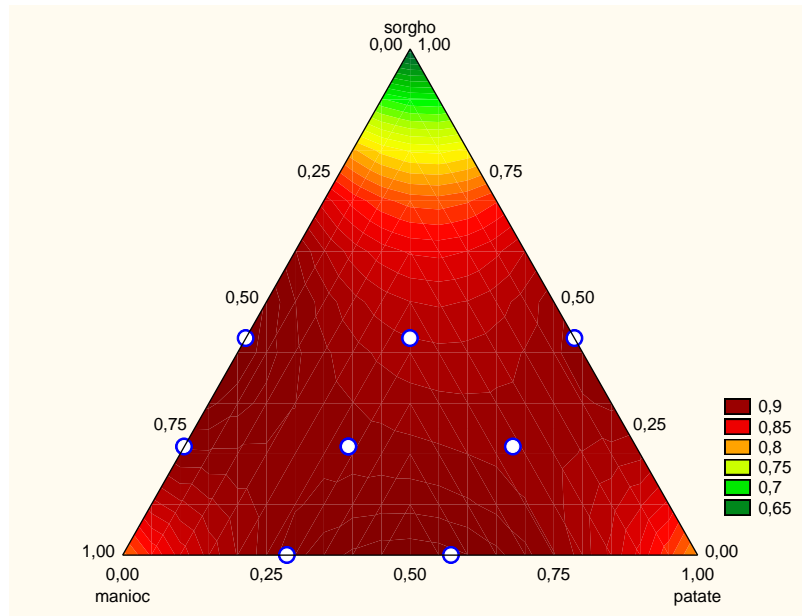
**Figure 16**: Surface de réponse de l'adhérence de la mie

Equation du modèle :  $Y = - 0,17M - 0,14P + 0,08S$

( $M = \text{teneur en manioc}$  ;  $P = \text{teneur en patate}$  ;  $S = \text{teneur en sorgho}$ )

Les modèles cubique spécial et quadratique ont été retenus respectivement pour expliquer l'élasticité et la cohésion de la mie. Dans le domaine expérimental étudié, l'élasticité

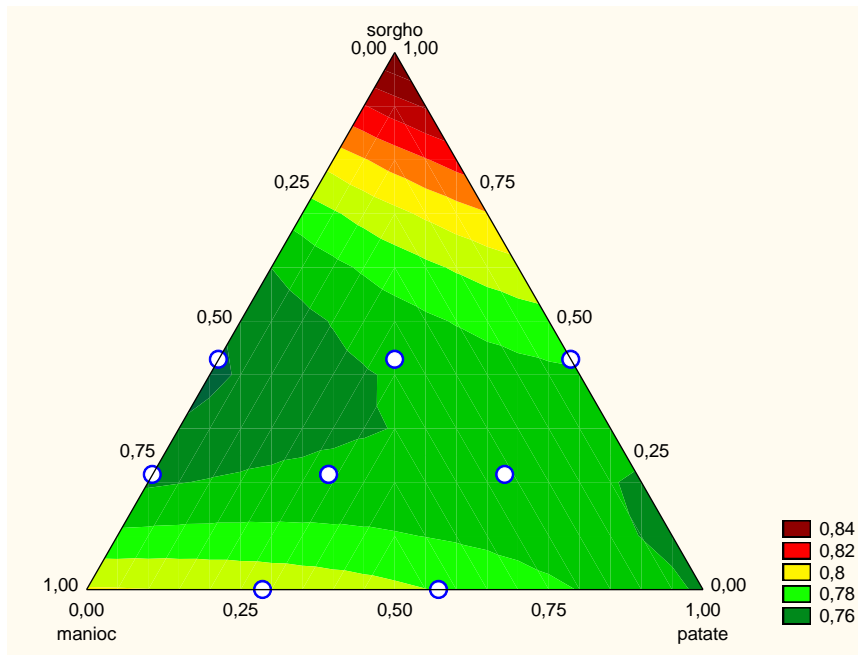
de la mie est élevée quelles que soient les proportions de farines. Cependant, d'après la surface de réponse (Figure 17), l'augmentation de la teneur en sorgho au-delà de 75% pourrait réduire la valeur de ce paramètre. La diminution de la quantité de sorgho semblerait réduire la valeur de la cohésion, mais compte tenu du domaine de variation cet effet est peu marqué (Figure 18).



**Figure 17:** Surface de réponse de l'élasticité

$$\text{Equation du modèle : } Y = + 0,81M + 0,80P + 0,61S + 0,54M*P + 0,88M*S + 0,76P*S - 2,43M*P*S$$

(*M* = teneur en manioc ; *P* = teneur en patate ; *S* = teneur en sorgho)



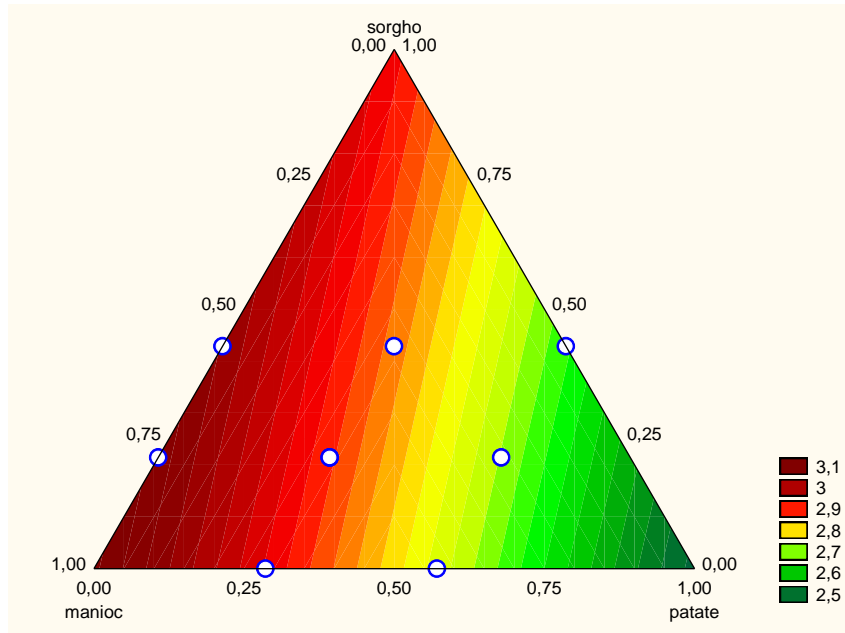
**Figure 18:** Surface de réponse de la cohésion

Equation du modèle :  $Y = + 0,79M + 0,76P + 0,85S + 0,03M*P - 0,28M*S - 0,11P*S$

( $M = \text{teneur en manioc}$  ;  $P = \text{teneur en patate}$  ;  $S = \text{teneur en sorgho}$ )

❖ Sur le plan physique

En ce qui concerne le volume spécifique, un modèle linéaire avec un  $R^2 > 0,8$  a été validé pour expliquer les différences observées. D'après la surface de réponse (Figure 19), les proportions de manioc et de patate jouent un rôle dans l'expansion du pain avec un effet plus important du manioc. En effet, quand la teneur en patate diminue et celle en manioc augmente, le volume spécifique augmente. Par conséquent, les formulations permettant d'obtenir un volume spécifique optimal devront intégrer des teneurs importantes en manioc et plus faibles en patate.



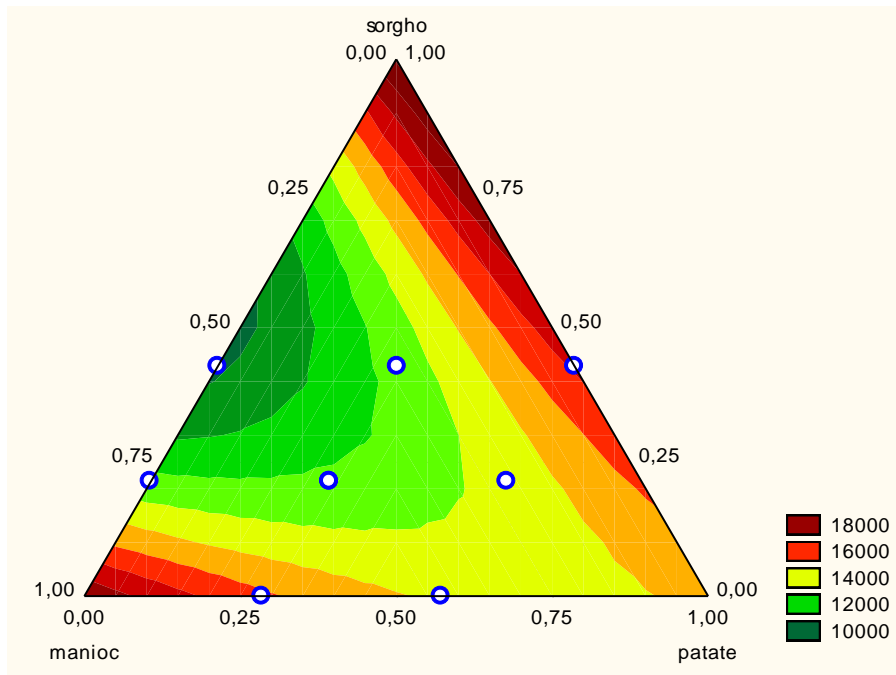
**Figure 19** : Surface de réponse du volume spécifique

Equation du modèle:  $Y = +3,11*M+2,46*P+2,91*S$

( $M = \text{teneur en manioc}$  ;  $P = \text{teneur en patate}$  ;  $S = \text{teneur en sorgho}$ )

❖ Sur le plan rhéologique

Il est question d'expliquer dans ce paragraphe le comportement viscoélastique des différents pâtons fermentés. Il s'agit de la limite de viscoélasticité marquant la fin du domaine linéaire du module visqueux  $G'$  (LVE  $G'$ ). L'analyse statistique a permis de retenir un modèle quadratique avec un  $R^2$  supérieur à 0,9 pour expliquer l'évolution du caractère solide du pâton en fonction de la formulation adoptée. D'après la surface de réponse du LVE  $G'$  en fonction des proportions des différentes farines (Figure 20), il apparait une proportion critique du sorgho de l'ordre de 5%. En effet, au-delà de cette valeur, la diminution de la proportion en manioc permet d'augmenter le caractère solide du pâton (LVE  $G'$  augmente). Par contre, en dessous de ce seuil critique, la diminution de la proportion en manioc fluidifie le pâton (LVE  $G'$  diminue).



**Figure 20** : Surface de réponse de la limite viscoélastique du pâton (LVE G')

Equation du modèle:  $Y = +17823,29*M+14316,59*P+19109,19*S-7986,64*M*P-34941,80*M*S-848,49*M*S$

( $M = \text{teneur en manioc}$  ;  $P = \text{teneur en patate}$  ;  $S = \text{teneur en sorgho}$ )

En ce qui concerne l'analyse texturale de la croûte, aucun modèle statistique n'a pu être retenu pour expliquer les différences observées au niveau de sa dureté en fonction des formulations réalisées. Le tableau 18 résume comment évolue les différentes réponses en fonction des farines utilisées.

**Tableau 18** : Récapitulatif de l'évolution des différentes réponses en fonction des proportions de différentes farines

Paramètres	Caractéristiques	Zone d'intérêt	Mélange correspondant
	Dureté de la mie	Minimale (1,4 - 1,8)	M : maximal (>50%) P : faible (<35%) S : faible (25%)
	Adhérence	Positive (>0)	M<50% P presque nulle S<50%
Textures	Elasticité	Maximale (0,85-0,9)	50% <M<75% 25%<P<50% 25%<S<50%
	Cohésion	Minimale (0,76 – 0,78)	30%<M<80% 25%<P50% S <25%
Physiques	Volume spécifique	Maximal (3 – 3,1)	M : maximal (>75%) P : minimale (<35%) S : minimale (<25%)
Rhéologiques	LVE G'	Moyenne (12000 – 14000)	25%<M<75% 25%<P<50% S<25%

### III.2.2. Compression – relaxation de la mie

Les paramètres de compression – relaxation sont résumés dans le tableau 19 avec PF (Pic Force) représentant la force du gel formé au cours de la cuisson et le rapport FF/PF une fonction de PF. PF est compris entre 0,24 kg (5C, 6C et 7C) et 0,49 kg (1S). Les proportions maximales de farines de sorgho et de patate dans la formulation 1S justifie le PF mesuré (plus élevé), et les proportions de manioc supérieures à 50% un PF faible excepté pour 3S et 8C, qui contiennent des proportions maximales de patate (30%) et de sorgho (20%), respectivement. K permet de caractériser la mie soit de fondante soit d'élastique. Une valeur faible de cette constante traduit une mie très élastique tandis qu'une valeur élevée traduit un caractère plutôt fondant de la mie. D'un point de vue statistique, les valeurs de K sont très peu variables. Ces



résultats semblent indiquer que la farine de manioc en forte proportion améliore le caractère fondant de la mie.

**Tableau 19** : Paramètres de compression – relaxation de la mie

Points	PF (kg)	FF/PF	K
1S	0,49±0,06 <sup>d</sup>	0,48±0,01 <sup>cd</sup>	0,042±0,005 <sup>a</sup>
3S	0,32±0,01 <sup>c</sup>	0,48±0,01 <sup>cd</sup>	0,044±0,001 <sup>abc</sup>
4S	0,27±0,03 <sup>ab</sup>	0,46±0,01 <sup>b</sup>	0,046±0,001 <sup>abc</sup>
5C	0,24±0,01 <sup>a</sup>	0,43±0,02 <sup>a</sup>	0,047±0,002 <sup>c</sup>
6C	0,24±0,02 <sup>a</sup>	0,50±0,01 <sup>e</sup>	0,047±0,001 <sup>abc</sup>
7C	0,24±0,02 <sup>a</sup>	0,46±0,01 <sup>b</sup>	0,046±0,002 <sup>bc</sup>
8C	0,34±0,01 <sup>c</sup>	0,48±0,01 <sup>cd</sup>	0,044±0,001 <sup>abc</sup>
9C (1)	0,26±0,03 <sup>ab</sup>	0,47±0,01 <sup>bc</sup>	0,044±0,001 <sup>ab</sup>
9C (2)	0,29±0,01 <sup>bc</sup>	0,46±0,01 <sup>bc</sup>	0,043±0,001 <sup>abc</sup>

*Les valeurs (moy ± écart type) affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$ )*

### III.3. Analyses physiques des pains du plan de mélange

#### III.3.1. Teneur en eau, taux de levée et rendement des pains formulés

Ces différents paramètres sont résumés dans le tableau 20. Le rendement de panification est compris entre 75,36% (1S) et 77,96% (9C) et le taux de levée entre 124 (3S) et 233,33 (2S). Les formulations 2S et 4S présentent les taux de levée les plus importants. Ces formulations contiennent une grande quantité de manioc et par contre une faible quantité de patate (85% - 10% et 70% - 10%, respectivement). Inversement, les taux de levée les plus faibles ont été mesurés pour les formulations 1S et 3S. Ces dernières sont constituées de peu de manioc (50% et 65%, respectivement) et d'une teneur maximale en patate (30%). Le taux de levée semble donc relié à la présence de manioc et de patate. En effet, un des facteurs influençant ce paramètre est le gonflement de la pâte qui est amélioré par le manioc et au contraire inhibé par la patate. La variabilité entre les taux de levée peut être due aux conditions opératoires de mesure.

Les teneurs en eau de la mie sont comprises entre 47,10% (3S) et 53,99% (2S). Les formulations 3S et 2S contiennent la même quantité de sorgho minimale (0,05), la seule différence réside dans les proportions de manioc et patate. En effet, la formulation 2S (TE mie maximale) est constituée d'une forte teneur en manioc (0,85) et faible en patate (0,1), alors que c'est l'inverse pour la formulation 3S (manioc 0,65 et patate 0,3). Les teneurs élevées en manioc

et basses en patate semblent avoir un effet limitant sur l'évaporation de l'eau en cours de cuisson. Toutefois ces TE varient très peu d'un pain à un autre, aucune différence significative n'est observée entre les pains 1S, 4S, 5C, 6C, 7C, 8C et 9C. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues par **Pasqualone et al.** (2010) sur des pains à base de farine de manioc (TE = 53,3%) et différentes de celles de **Crocket et al.** (2011) sur les pains à base de farine de riz, de manioc et de xanthane (TE = 47,1%).

Les teneurs en eau de la croûte sont plus faibles et varient de 16,87% (1S) à 24,68% (3S). Aucune différence significative n'est observée entre les pains 1S, 2S, 5C, 6C, 7C 8C et 9C. Seules les formulations 3S et 4S se différencient des autres avec des TE maximales, ceci pourrait s'expliquer par une formation de la croûte plus rapide qui empêcherait l'eau de s'évaporer et serait de ce fait piégée au niveau de la surface des pains.

**Tableau 20:** Teneur en eau, rendement et taux de levée des pains

Points	TE de la croûte (%)	TE de la mie (%)	Rd	Taux de levée (%)
1S	16,87±0,27 <sup>a</sup>	51,65±0,82 <sup>b</sup>	75,82	133,33
2S	18,19±1,26 <sup>a</sup>	53,99±0,18 <sup>c</sup>	76,73	233,33
3S	24,68±4,57 <sup>c</sup>	47,10±4,04 <sup>a</sup>	77	124
4S	21,88±0,77 <sup>b</sup>	51,74±0,20 <sup>b</sup>	76,84	218,52
5C	17,85±1,59 <sup>a</sup>	52,68±0,28 <sup>bc</sup>	77,44	166,67
6C	17,24±1,68 <sup>a</sup>	52,55±0,16 <sup>bc</sup>	76,69	159,26
7C	19,67±0,97 <sup>ab</sup>	52,59±0,06 <sup>bc</sup>	77,08	150
8C	17,49±1,00 <sup>a</sup>	53,08±0,33 <sup>bc</sup>	76,36	168,97
9C	18,23±0,43 <sup>a</sup>	52,03±0,51 <sup>bc</sup>	77,96	178,57
9C.1	18,79±2,55 <sup>a</sup>	52,13±1,75 <sup>bc</sup>	77,52	159,26

*Les valeurs (moy±écart type) affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$ ,  $n = 3$ )*

### III.3.2. Couleur de la croûte et de la mie

La couleur est une caractéristique importante pour les produits panifiés, avec la texture et l'odeur, elle contribue également à la préférence des consommateurs. Elle dépend des caractéristiques de la pâte (teneurs en eau, sucres réducteurs et protéines) et des conditions opératoires appliquées durant la panification (température, humidité relative et mode de transfert) (**Esteller et Lannes, 2008**). Les valeurs de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  et  $\Delta E$  de la mie et de la croûte sont résumées dans le tableau 21.

Parmi les pains préparés, les formulations 3S, 6C et 8C présentent des croûtes plus sombres (valeur de  $L^*$  plus faibles : 34,17 ; 30,58 et 35,23 respectivement). Cette coloration est provoquée par la réaction de Maillard qui est une réaction entre les sucres et les protéines. Les formulations citées précédemment contiennent les taux cumulés de farines de patate et sorgho les plus élevés (35 - 42,5%). Les sucres contenus dans la patate vont réagir avec les protéines du blanc d'œuf et du sorgho. Si les mélanges contiennent beaucoup de sucres le brunissement sera poussé et conduira à une coloration sombre du pain qui sera moins apprécié des consommateurs. Les valeurs de  $a^*$  sont comprises entre 6,77 (6C) et 9,92 (9C) mais d'un point de vue statistique, il y a peu de différence entre les valeurs obtenues pour les différents pains. Les valeurs de  $b^*$  sont comprises entre 4,03 (3S) et 24,17 (7C) (le point 9C n'est pas considéré car trop de variabilité dans sa répétition).

Les valeurs de  $L^*$  de la mie sont comprises entre 58,16 (7C) et 62,23 (5C) et ne montrent pas de différences significatives ( $p < 0,05$ ). Les valeurs de  $a^*$  pour la mie varient entre 1,03 (2S) et 2,19 (9C) et semblent être corrélées négativement à la teneur en manioc et positivement à celle en patate. Les valeurs de  $b^*$  sont comprises entre 14,42 (2S) et 16,66 (9C) et montrent une faible variabilité. Néanmoins, ce paramètre semble augmenter avec la quantité totale de patate et de sorgho qui augmenteraient la teinte jaune de la mie.

**Tableau 21:** Paramètres de couleur des pains

Points	Croûte				Mie			
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
1S								
2S	42,44±2,49 <sup>cd</sup>	8,2±0,95 <sup>bcd</sup>	13,76±1,60 <sup>bc</sup>	3,52	59,68±2,05 <sup>ab</sup>	1,03±0,34 <sup>a</sup>	14,42±0,49 <sup>a</sup>	2,03
3S	34,17±0,74 <sup>ab</sup>	7,12±0,44 <sup>ab</sup>	4,03±1,17 <sup>a</sup>	6,56	58,68±1,63 <sup>ab</sup>	1,98±0,17 <sup>cd</sup>	15,34±0,74 <sup>ab</sup>	0,78
4S	46,90±8,42 <sup>d</sup>	9,87±0,64 <sup>e</sup>	17,24±0,16 <sup>c</sup>	8,67	61,31±0,08 <sup>ab</sup>	1,74±0,18 <sup>bc</sup>	15,76±0,76 <sup>ab</sup>	1,24
5C	37,56±2,20 <sup>bc</sup>	9,77±0,38 <sup>e</sup>	11,31±2,49 <sup>b</sup>	1,38	62,23±2,34 <sup>b</sup>	1,37±0,27 <sup>ab</sup>	14,56±0,69 <sup>a</sup>	1,69
6C	30,58±1,03 <sup>a</sup>	6,77±0,50 <sup>a</sup>	4,95±1,46 <sup>a</sup>	12,54	59,22±0,92 <sup>ab</sup>	2,06±0,17 <sup>cd</sup>	16,22±0,92 <sup>b</sup>	0,95
7C	53,6±3,58 <sup>e</sup>	9,18±0,87 <sup>de</sup>	24,17±3,38 <sup>d</sup>	13,80	58,16±0,52 <sup>a</sup>	1,65±0,37 <sup>bc</sup>	14,52±1,20 <sup>a</sup>	1,64
8C	35,23±3,12 <sup>ab</sup>	8,69±0,46 <sup>cde</sup>	11,66±2,21 <sup>b</sup>	6,61	59,62±2,85 <sup>ab</sup>	1,91±0,10 <sup>cd</sup>	16,24±0,41 <sup>b</sup>	0,576
9C	36,61±1,06 <sup>abc</sup>	7,62±0,40 <sup>abc</sup>	3,80±1,78 <sup>a</sup>	8,40	59,72±2,05 <sup>ab</sup>	1,90±0,13 <sup>cd</sup>	15,57±0,21 <sup>ab</sup>	0,72
9C.1	46,81±3,48 <sup>d</sup>	9,92±1,13 <sup>e</sup>	16,94±1,24 <sup>c</sup>	8,40	60,61±2,49 <sup>ab</sup>	2,19±0,08 <sup>d</sup>	16,66±1,43 <sup>b</sup>	0,72

*Les valeurs (moy±écart type) affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$ ,  $n = 3$ )*

### **III.4. Effet du vieillissement sur les caractéristiques de la mie**

Les paramètres texturaux (TPA) de la mie des pains ont été mesurés après 24h de stockage. Le vieillissement des formulations 2S et 6C n'a pas pu être évalué en raison des larges bulles formées dans le pain pendant la cuisson qui n'ont pas permis d'obtenir suffisamment de tranches pour le suivi du vieillissement.

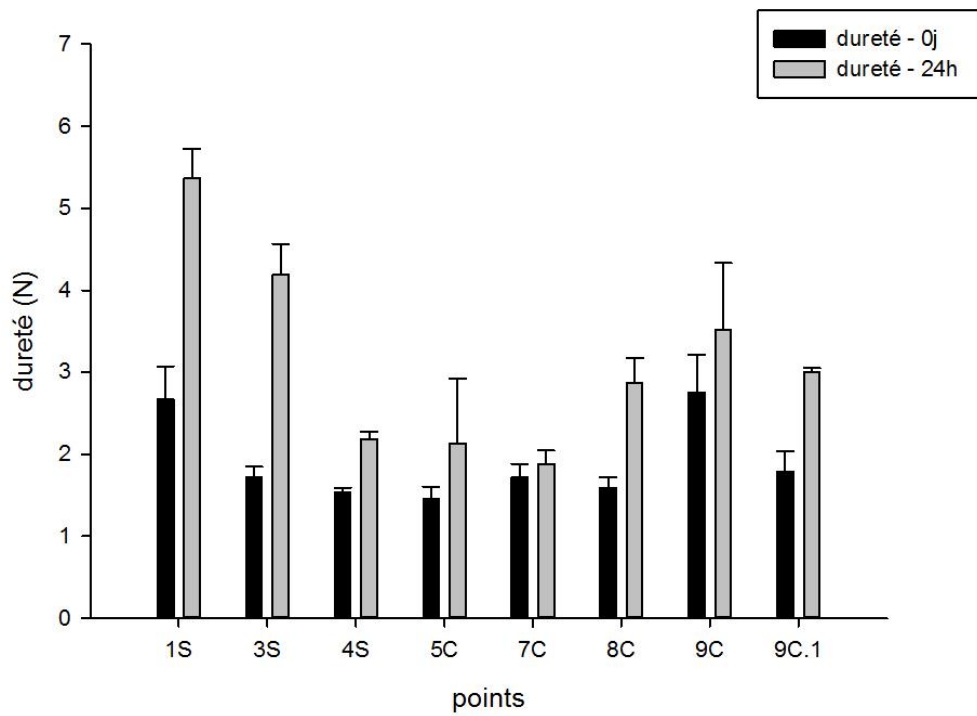
Les mesures de dureté de la mie montrent que ce paramètre augmente avec le temps (Figure 21). Cet effet est plus marqué lorsque les formulations contiennent une quantité maximale de patate et moins marqué pour des teneurs totales en sorgho et patate minimales. Ceci peut être expliqué par la quantité d'amylose présente et sa tendance à la rétrogradation après cuisson.

La figure 22 montre que la durée du stockage n'a pas d'influence significative sur la cohésion de la mie excepté pour le mélange 1S qui contient des quantités maximales de farines de patate et sorgho.

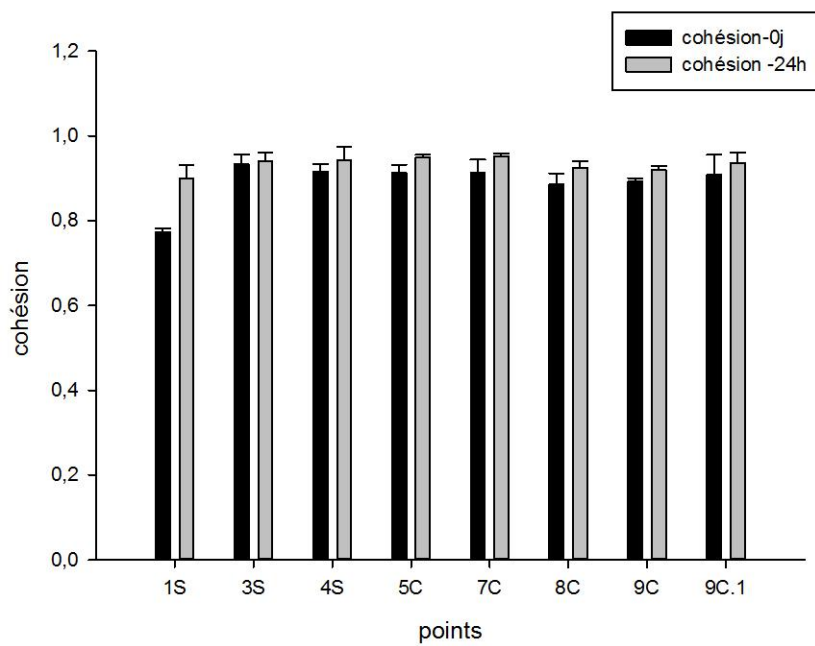
L'élasticité montre une tendance à l'augmentation au cours du temps (Figure 23). Cette évolution peut être expliquée par le dessèchement du produit pendant le stockage.

La masticabilité qui est une fonction dépendante de la dureté, de la cohésion et de l'élasticité augmente de façon plus ou moins notable au cours du temps (Figure 24). La masticabilité des produits devient donc plus difficile au cours du vieillissement, ce qui est essentiellement causé par l'augmentation de la dureté de la mie.

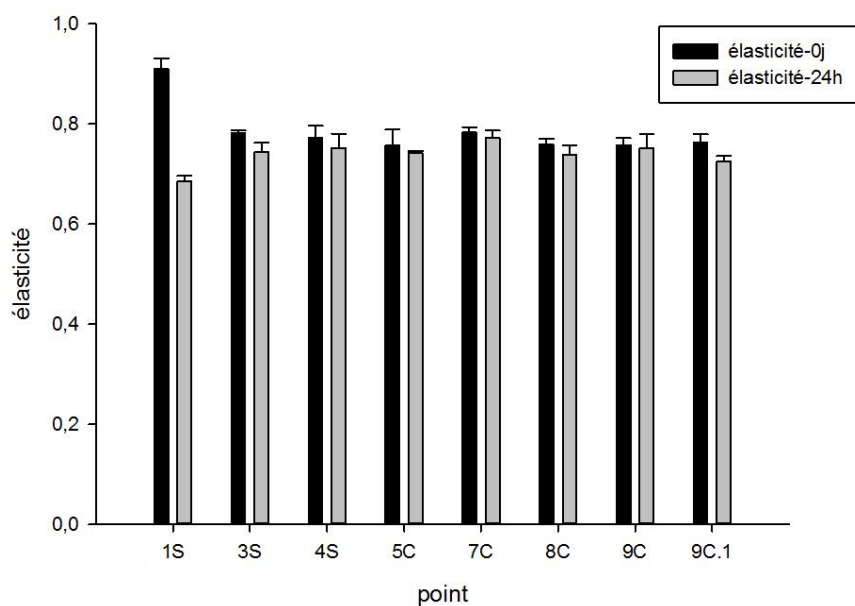
Le vieillissement "idéal" étant censé conserver les qualités organoleptiques du produit, il apparaît que la formulation permettant de modifier le moins possible les caractéristiques texturales après 24 heures est la formulation 7C (dureté +15%, cohésion -1%, élasticité +4% et masticabilité +17%).



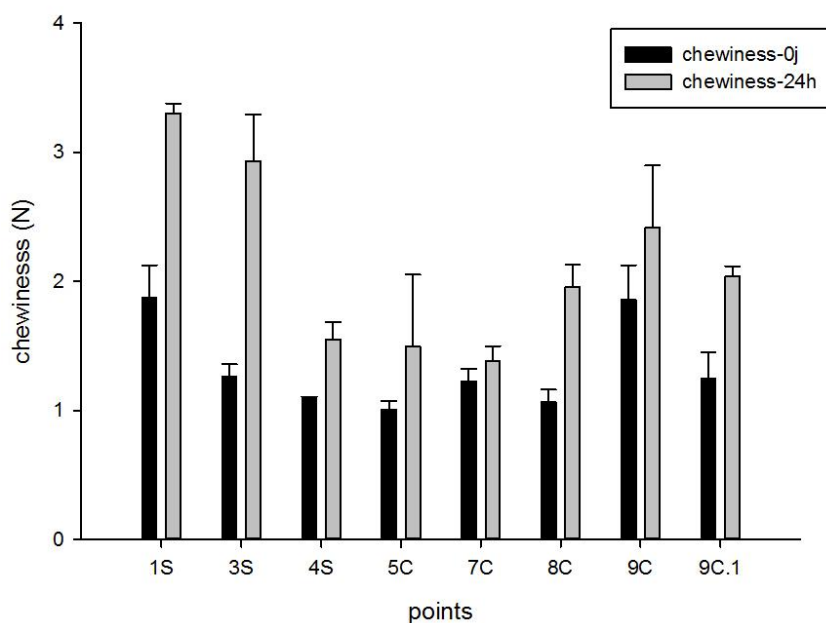
**Figure 21 :** Evolution de la dureté de la mie au cours du vieillissement



**Figure 22:** Evolution de la cohésion au cours du vieillissement



**Figure 23:** Evolution de l'élasticité au cours du vieillissement

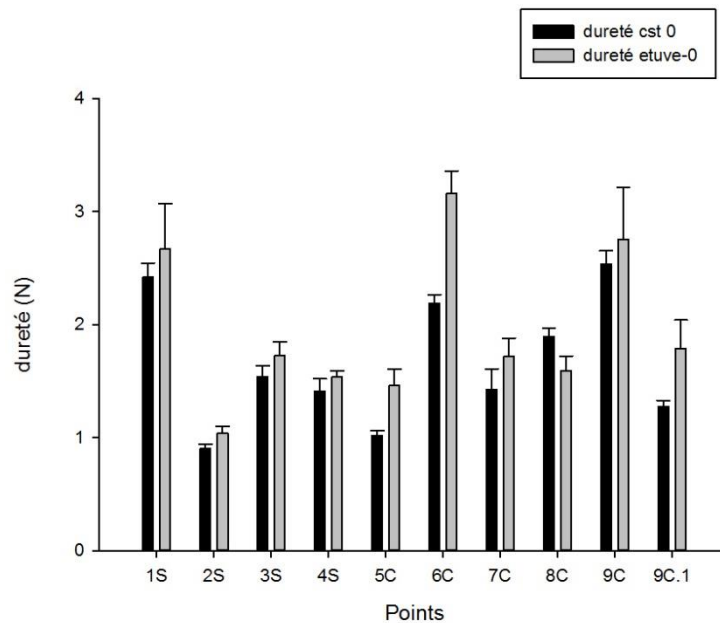


**Figure 24:** Evolution du chewiness au cours du vieillissement

### III.5. Impact du mode de fermentation sur la qualité des pains

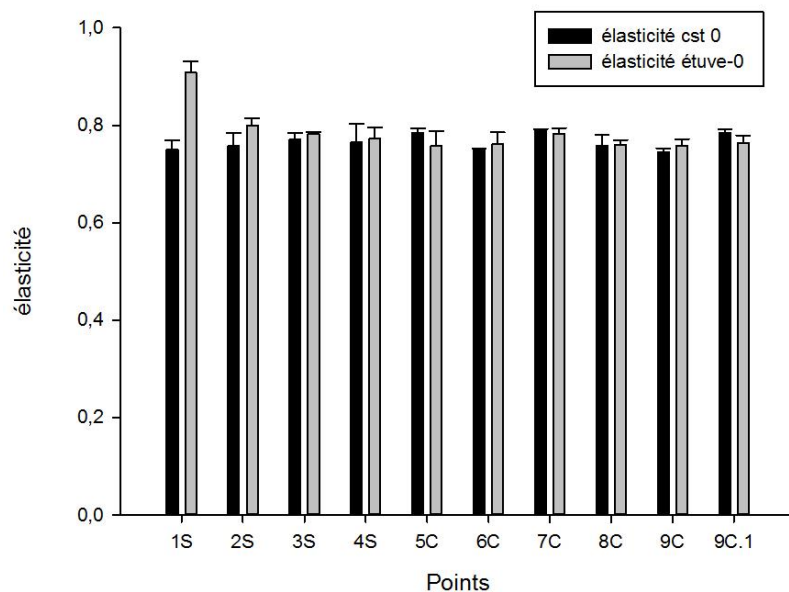
Deux types de fermentation ont été testés : la fermentation en étuve comme décrite dans la figure 11, Chap. II section II.2.2., et celle dans le four en mode CST à 35°C pendant 30 min. Les paramètres de texture et de teneur en eau de la croûte et de la mie ont été mesurés sur les pains ayant subi ces deux types de fermentation.

Comme mentionné plus haut la dureté de la mie est un paramètre de qualité et est présenté sur la figure 25. De façon générale, la fermentation en étuve montre une dureté plus importante comparée à la fermentation en chaleur sèche (mode CST), excepté pour la formulation 8C. Lors de la fermentation CST, un début de croûtage est observé, ce qui réduirait l'évaporation de l'eau du pâton au cours de la cuisson et donnerait une mie plus pâteuse.



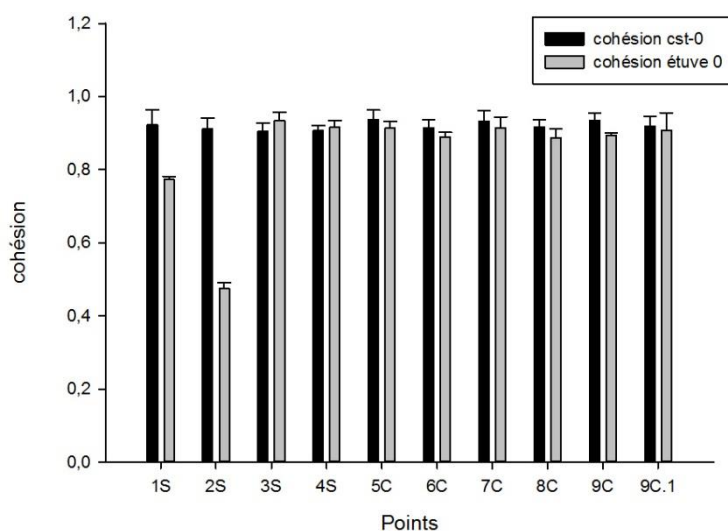
**Figure 25 :** Dureté de la mie en fonction du type de fermentation

Les valeurs d'élasticité mesurées en fonction du mode de fermentation ne diffèrent pas de façon significative ( $p < 0,05$ ) excepté pour le mélange 1S (Figure 26). Ce paramètre est essentiellement relié à la teneur en eau dans le mélange qui permettrait une meilleure hydratation des farines et améliorerait la viscosité et, par conséquent, conduirait à une meilleure évaporation et une élasticité désirable.



**Figure 26** : Elasticité de la mie en fonction du type de fermentation

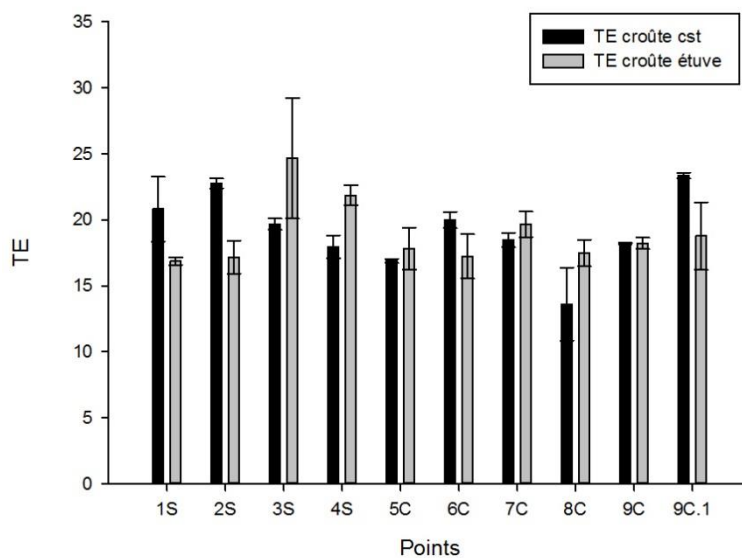
La cohésion, qualifiant la limite de déformabilité d'un matériau avant rupture, est présentée en fonction du mode de fermentation sur la figure 27. Le mode de fermentation n'a pas une influence significative ( $p < 0,05$ ) sur ce paramètre textural excepté pour les mélanges 1S et 2S pour lesquels le mode CST provoque son augmentation. Le phénomène de croûtage observé au cours de la fermentation CST ne serait donc pas le seul facteur qui influencerait la cohésion de la mie.



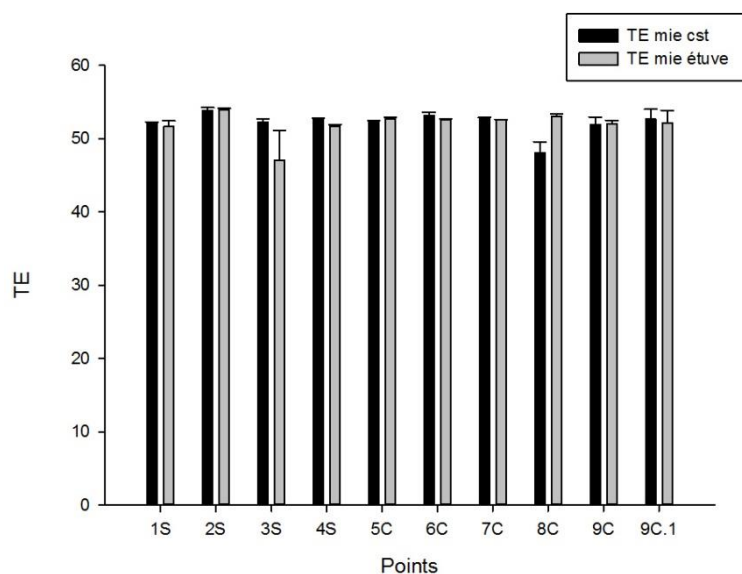
**Figure 27** : Cohésion de la mie en fonction du type de fermentation



La teneur en eau qui est un paramètre important dans l'appréciation de la qualité du pain, est présentée sur les figures 28 et 29 pour la croûte et la mie, respectivement. Quel que soit le mode de fermentation, la TE de la croûte varie de 13 à 25% et ne montre pas de différence significative ( $p < 0,05$ ) observée pour l'ensemble des mélanges excepté pour 1S, 2S et 4S. La TE de la mie présentée sur la figure 29 varie entre 48 et 54% et est proche de certaines valeurs obtenues de la littérature (**Pasqualone *et al.*, 2010 : 53,3%**). Le mode de fermentation n'influence pas significativement ( $p < 0,05$ ) ce paramètre. Par conséquent, le mode de fermentation aurait un impact limité sur la teneur en eau mais plus marqué pour la croûte que la mie.



**Figure 28** : Teneur en eau de la croûte en fonction du mode de fermentation



**Figure 29:** Teneur en eau de la mie en fonction du mode de fermentation

### **III.6. Influence du couple temps-température de cuisson et de la scarification sur la qualité des pains**

La qualité des pains a été évaluée sur le plan physique et textural.

#### **III.6.1. Par rapport aux propriétés physiques des pains**

Certains paramètres du procédé de cuisson ont été modifiés (Tableau 13; Chap. II Sect. IV) dans le but d'ouvrir des perspectives d'optimisation. Parmi les caractéristiques à améliorer, deux ont été retenues: l'humidité de la mie trop importante et la couleur trop sombre de la croûte. C'est pourquoi, certains pâtons ont été scarifiés afin d'améliorer l'évaporation de l'eau et la deuxième phase de cuisson a été diminuée en température afin de limiter le brunissement de la croûte. Les paramètres chromatiques, teneurs en eau et paramètres physiques mesurés sont résumés dans le tableau 22.

Pour la croûte, les teneurs en eau sont fortement impactées par les paramètres du procédé. D'une part, l'augmentation du temps de cuisson entraîne une diminution de ce paramètre et d'autre part, la scarification du pâton permet d'obtenir une croûte moins humide. Les pains des essais réalisés présentent une meilleure clarté que les pains du plan de formulation. Les couples temps – températures des différents modes de cuisson améliorent les paramètres de couleur avec une croûte plus claire comparée à celle des pains du plan de mélange qui présentaient une couleur très sombre.

La teneur en eau de la mie est peu influencée par les paramètres du procédé. Le prolongement de la phase CST ne modifie pas la TE de la mie car l'évaporation se déroule principalement pendant la phase Mixte et une fois la croûte formée, elle empêche la sortie de l'eau qui se retrouve piégée sous la croûte. Les paramètres chromatiques de la mie ne montrent pas de différence notable en fonction du procédé ni avec ceux mesurés sur les pains réalisés à partir du plan de mélange.

Les calculs de rendement massique semblent indiquer que l'augmentation de la durée et de la température de cuisson ainsi que la scarification des pâtons favorisent la perte en eau des pains. Les taux de levée des pains montrent qu'une cuisson en trois phases avec une 1ère phase mixte courte suivie de deux phases CST avec des couples temps-température différents favorise le gonflement de la pâte (Tableau 22).

**Tableau 22:** Teneur en eau, paramètres chromatiques et paramètres physiques des pains de différents procédés

Essais	Croûte				Mie				Pain entier	
	TE (%)	L*	a*	b*	TE (%)	L*	a*	b*	Rendement	Taux de levée (%)
1	23,16±1,59 <sup>d</sup>	43,88±1,76 <sup>abc</sup>	12,72±1,21 <sup>c</sup>	14,51±0,92 <sup>c</sup>	51,78±0,34 <sup>a</sup>	58,60±2,79 <sup>a</sup>	1,82±0,24 <sup>a</sup>	13,89±0,84 <sup>a</sup>	83,67	117,24
2	20,04±0,65 <sup>c</sup>	39,59±2,02 <sup>ab</sup>	10,66±1,02 <sup>b</sup>	10,62±1,62 <sup>b</sup>	52,93±0,07 <sup>e</sup>	58,80±0,86 <sup>a</sup>	2,68±0,32 <sup>b</sup>	16,01±0,54 <sup>b</sup>	77,79	146,43
3	17,43±1,54 <sup>ab</sup>	38,06±5,08 <sup>ab</sup>	9,21±0,77 <sup>ab</sup>	6,21±1,26 <sup>a</sup>	51,97±0,19 <sup>ab</sup>	57,53±1,07 <sup>a</sup>	2,75±0,20 <sup>b</sup>	15,70±0,25 <sup>b</sup>	78,27	166,67
3.1	15,25±0,47 <sup>a</sup>	44,96±4,62 <sup>bc</sup>	10,43±1,80 <sup>ab</sup>	15,03±1,82 <sup>c</sup>	52,20±0,02 <sup>bc</sup>	55,86±1,56 <sup>a</sup>	2,64±0,25 <sup>b</sup>	15,71±0,55 <sup>b</sup>	77,79	146,43
4	18,70±1,01 <sup>bc</sup>	35,48±2,07 <sup>a</sup>	10,15±1,62 <sup>ab</sup>	28,97±1,33 <sup>d</sup>	52,41±0,18 <sup>cd</sup>	58,16±1,51 <sup>a</sup>	3,07±0,19 <sup>b</sup>	17,43±0,51 <sup>c</sup>	75,05	139,29
5	19,90±0,89 <sup>c</sup>	49,00±10,51 <sup>a</sup>	8,52±0,35 <sup>a</sup>	5,43±1,06 <sup>a</sup>	52,64±0,19 <sup>de</sup>	58,79±2,16 <sup>a</sup>	2,68±0,40 <sup>b</sup>	16,45±0,59 <sup>b</sup>	78,03	171,43

*Les valeurs (moy±écart type) affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$  ;  $n = 3$ )*

### **III.6.2. Par rapport aux propriétés texturales des pains**

Les caractéristiques texturales des pains sont présentées dans les tableaux 23 et 24 en fonction du procédé.

Les valeurs de dureté de la mie sont influencées par le procédé. D'une part, pour les pains non scarifiés (1 et 2), l'augmentation du temps total de cuisson et de la température de la phase CST conduit à un pain ayant une mie plus dure. D'autre part, la scarification (pains 2 et 3) pour les mêmes couples temps-températures de cuisson entraîne la diminution de la dureté. Enfin, pour les pains scarifiés (3 à 5), la modification des durées et températures de cuisson ne modifie pas notablement la dureté de la mie.

Le pain 2 présente une cohésion plus faible que les autres pains. Ceci pourrait être expliqué par un durcissement et un dessèchement de la mie liés à l'augmentation de la durée et de la température de cuisson.

Le caractère collant de la mie, représenté par l'adhérence, est impacté par les paramètres du procédé. En effet, pour les pains non scarifiés (1 et 2), l'augmentation de la durée et de la température de cuisson a un effet négatif sur le collant de la mie qui est accentué. Cependant, pour les pains scarifiés (3 à 5), malgré le manque de répétabilité de la mesure pour le pain 3, les modifications des paramètres temps-température de cuisson ne montrent pas de différence significative sur l'adhérence. Enfin, pour les mêmes conditions opératoires de cuisson, la scarification semble améliorer le collant de la mie.

Pour les pains non scarifiés, l'augmentation de la durée totale de cuisson et de la température de la 2<sup>ième</sup> phase entraîne une diminution de l'élasticité. Cependant, pour les pains scarifiés, l'augmentation de la température et de la durée uniquement pour la 2<sup>ième</sup> phase provoque une augmentation de ce paramètre. Il semblerait donc que les durées des 2 phases de cuisson aient des effets contraires sur ce paramètre.

La masticabilité (chewiness), relié à la dureté, l'élasticité et la cohésion, est influencée par la durée de cuisson. En effet, quels que soient les pains (avec ou sans scarification), ce paramètre augmente avec le temps de cuisson. De plus, si on compare les pains 2 et 3, élaborés dans les mêmes conditions de cuisson, on remarque que la scarification (pain 3) diminue la valeur du chewiness.

L'analyse des paramètres TPA en fonction du procédé semblerait indiquer que l'augmentation de la durée de cuisson n'a pas forcément un effet positif sur la qualité texturale de la mie mais la scarification l'améliore de façon notable.

**Tableau 23** : Paramètres TPA de la mie

Essais	Dureté (N)	Cohésion	Adhérence (N/mm)	Elasticité	Chewiness (N)
1	1,71±0,09 <sup>a</sup>	0,79±0,01 <sup>b</sup>	-0,07±0,01 <sup>c</sup>	0,92±0,03 <sup>b</sup>	1,25±0,11 <sup>a</sup>
2	7,53±1,30 <sup>b</sup>	0,63±0,04 <sup>a</sup>	-0,23±0,04 <sup>a</sup>	0,81±0,03 <sup>a</sup>	3,81±0,35 <sup>c</sup>
3	1,68±0,15 <sup>a</sup>	0,79±0,02 <sup>b</sup>	-0,01±0 <sup>d</sup>	0,92±0,02 <sup>b</sup>	1,23±0,13 <sup>a</sup>
3.1	2,03±0,29 <sup>a</sup>	0,79±0,01 <sup>b</sup>	-0,1±0,02 <sup>b</sup>	0,94±0,01 <sup>b</sup>	1,50±0,20 <sup>a</sup>
4	1,74±0,15 <sup>a</sup>	0,77±0,01 <sup>b</sup>	-0,05±0,01 <sup>c</sup>	1,82±0,03 <sup>c</sup>	2,42±0,15 <sup>b</sup>
5	1,88±0,20 <sup>a</sup>	0,80±0,03 <sup>b</sup>	-0,05±0,01 <sup>c</sup>	0,93±0,03 <sup>b</sup>	1,39±0,10 <sup>a</sup>

*Les valeurs (moy±écart type) affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$  ;  $n = 4$ )*

Les paramètres de compression-relaxation de la mie ne montrent pas de différence significative en fonction du procédé (Tableau 25). L'interprétation des valeurs de dureté de la croûte sont difficiles à cause du manque de répétabilité des mesures du pain 3. Cependant, la durée de cuisson semble augmenter ce paramètre (pains 2 et 4).

Les premières conclusions permettant d'ouvrir des perspectives sur une optimisation du procédé révèlent qu'une cuisson en trois étapes (phase mixte courte suivie de deux phases CST) et la scarification des pâtons améliorent notablement les propriétés des pains SG.

**Tableau 24** : Paramètres texturaux de compression – relaxation de la mie, et de pénétrométrie de la croûte

Essai	Mie			Croûte
	PF (kg)	FF/PF	K	Dureté (kg)
1	0,36±0,03 <sup>ab</sup>	0,48±0,02 <sup>b</sup>	0,045±0,001 <sup>b</sup>	6,07±0,30 <sup>a</sup>
2	0,40±0,02 <sup>b</sup>	0,45±0,02 <sup>a</sup>	0,044±0,001 <sup>ab</sup>	7,70±0,73 <sup>bc</sup>
3	0,33±0,02 <sup>a</sup>	0,47±0,01 <sup>ab</sup>	0,044±0,001 <sup>ab</sup>	8,10±1,04 <sup>c</sup>
3.1	0,33±0,01 <sup>a</sup>	0,48±0,01 <sup>b</sup>	0,044±0,001 <sup>ab</sup>	6,62±0,69 <sup>ab</sup>
4	0,34±0,02 <sup>a</sup>	0,46±0,02 <sup>ab</sup>	0,044±0,001 <sup>ab</sup>	8,72±1,21 <sup>c</sup>
5	0,32±0,04 <sup>a</sup>	0,47±0,01 <sup>ab</sup>	0,043±0,001 <sup>a</sup>	7,77±0,46 <sup>bc</sup>

*Les valeurs (moy±écart type) affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$  ;  $n = 4$ )*

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES



Dans l'objectif de valorisation du manioc (projet PDMACIM) et de farines locales du Cameroun (patate douce et sorgho), l'étude de la panification SG a conduit à la formulation de pains à haute teneur en manioc.

Les propriétés physiques et fonctionnelles des différentes farines (manioc fermenté, sorgho et patate), notamment, l'aptitude au gonflement de ces farines, déterminée par RVA, a montré que ce critère était faible pour les farines de patate et de sorgho qui doivent donc être utilisées en quantités modérées (sorgho < 20% et patate < 30%) pour ne pas inhiber la levée de la pâte au cours de la fermentation et de la cuisson. Les analyses effectuées sur les mélanges de farine ont confirmées qu'un taux de manioc supérieur à 70% améliorerait la capacité de gonflement. Cependant, l'évaluation de ces matières premières reste partielle et mériterait d'être complétée, pour une exploitation complète des résultats techniques, par des informations sur la taille des granules d'amidon dans les farines, et la composition chimique de ces dernières (phosphore, polyphénols...), voire également leur comportement alvéographique.

Les formulations de pains à haute teneur en manioc indiquent qu'une formulation optimale pourrait contenir une faible teneur en sorgho (< 5%), et en patate (<20%) et une teneur plus importante en manioc (>75%) afin d'augmenter à la fois le caractère solide du pâton et le volume spécifique du pain et réduire la dureté de la mie. Il conviendrait, toutefois, de s'assurer qu'une basse teneur en sorgho est suffisante pour garantir une bonne cohésion de la mie. L'étude du vieillissement du pain menée en complément de ce travail a confirmé la tendance des pains SG au rassissement et au dessèchement au cours du temps. Parmi les formulations étudiées, celle qui conserve au mieux les caractéristiques texturales initiales du pain après 24 heures est celle contenant 75% de manioc, 20% de patate et 5% de sorgho.

Ce travail met également en évidence l'intérêt de prendre en compte l'optimisation des paramètres temps, température et mode de fermentation dans les différentes phases du procédé de panification des pains SG. A cet égard, la fermentation en étuve testée dans ce travail, se traduit par l'augmentation de la dureté de la mie qui peut être expliquée par une absence de croûtage dans ce cas favorisant l'évaporation de l'eau du pâton en cours de cuisson, et provoquant ainsi le durcissement de la mie. Dans ce contexte, l'essai d'ajustement du nombre de phases de cuisson et de leurs paramètres temps et températures sur des pâtons scarifiés ou non, conduit à des conclusions permettant d'ouvrir des perspectives sur une optimisation du procédé et révèlent que la scarification permet d'améliorer la teneur en eau du produit fini et que l'évaporation de l'eau se fait principalement dans les 15 premières minutes de la cuisson (phase mixte) où il n'y a pas encore le croûtage. De plus, il semblerait qu'une cuisson en trois

étapes (phase mixte courte suivie de deux phases CST) améliorerait notablement les propriétés des pains SG.

Enfin, des perspectives intéressantes pourraient s'ouvrir sur l'étude de différents hydrocolloïdes (nature et quantité), l'optimisation d'un procédé d'évaluation de la croustillance de la croûte qui est un attribut sensoriel important pour les consommateurs et la mise en place d'une étude sensorielle des produits finis permettant de quantifier, en terme d'acceptabilité et de désirabilité, les différentes caractéristiques texturales et physiques des produits SG à base de manioc.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

**Abdel-Aal, E-SM. (2009).** Functionality of starches and hydrocolloids in gluten-free foods. *In: E. Gallagher (Ed.) Gluten-free food science and technology.* Wiley-Blackwell, Oxford, 200-224.

**Abdelghafor, R.F., Mustafa, A.I., Ibrahim A.M.H. & Krishnan, P.G. (2011).** Quality of bread from composite flour of sorghum and hard white winter wheat. *Advanced Journal of Food and Science Technology.* 3: 9-15.

**Acs, E., Kovacs, Zs., & Matuz, J. (1996).** Bread from corn starch for dietetic purposes: I. Structure formation. *Cereal Research Communications.* 24: 441-449.

**Adebayo-Oyandoro, A.O., Oyewole, O.B., Obadina, A.O., & Omemu, M.A. (2013).** Microbiological Safety assessment of fermented cassava flour “Lafun” available in Ogun and Oyo States of Nigeria. *International Journal of Food Science.* Article Id 845324.

**Adebowale, A.A., Adegoke, M.T., Sanni, S.A., Adegunwa, M.O. & Fanduga, G.O. (2012).** Functional properties and biscuit making potentials of Sorghum-wheat flour composite. *American Journal Food Technology.* 7: 372 – 379.

**Agueguia, A., Apedo-Ama, A., Fontem, D.A., Manga, G.A., Mboua, J.C., Mouen, M., Ndzana, X., Ngeve, M.J., Pone, K.D., Tchuanyo, M., Tetka J., Tiki Mpondo, G., Wouamane, M. & Zok, S. (2000).** Le manioc un aliment pour tout le monde. *In Les richesses du sol. Les plantes à racines et tubercules en Afrique : Une contribution au développement des technologies de récolte et d’après-récolte.* Eds Bell, A. Mück, O. Schuler, B. Deutsche Stiftung Für Internationale Entwicklung (Dse). Zentralstelle Für Ernährung Und Landwirtschaft (Zel). 43 – 94.

**Ahlborn, G.J., Pike, O.A., Hendrix, S.B., Hess, W.M. & Clayton, S.H. (2005).** Sensory, mechanical, and microscopic evaluation of staling in low-protein and gluten-free breads. *Cereal Chemistry.* 82 (3): 328–335.

**Akubor, P. I. (1997).** “Proximate composition and selected functional properties of African breadfruit and sweet potato flour blends.” *Plant Foods for Human.* 51: 53–60.

**Altamirano-Fortoul, R., Le-Bail, A., Chevallier, S. & Rosell, C.M. (2012).** Effect of the amount of steam during baking on bread crust features and water diffusion. *Journal of Food Engineering.* 108: 128-134.

**American Association of Cereal Chemists (AACC) (1995).** Approved method of the AACC, 9th edn. Method 61–02 for RVA. AACC St. Paul, Minn.

**Anton, A.A & Artfield, S.D. (2008).** Hydrocolloids in gluten-free breads: A review. *International Journal Food Science and Nutrition*. 59(1):11-23.

**AOAC (1984).** Official method of analysis (14th ed.). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.

**Arendt, E.K., Morrissey, A., Moore, M. M. & Dal Bello, F. (2008).** Gluten-free breads, In E. K. Arendt and F. Dal Bello (Eds.), *Gluten-free cereal products and beverages*. Elsevier. 289-319.

**Asté M. (1994).** Evolution des propriétés physico-chimiques de l'amidon de manioc (McoI1522) au cours de la fermentation / Mise en évidence du rôle de l'acide lactique et de l'exposition au soleil sur l'acquisition du pouvoir de panification de l'amidon aigre - Programme. CEE/STD3 "Valorisation du manioc en Amérique Latine", CIRAD-SAR/CIAT

**Badifu, G.I.O. & Aka, S. (2001).** Evaluation of performance of shea fat as a shortening in bread making. *Journal of Food Science and Technology*. 39:149 – 151.

**Balla, A., Blecker, C., Oumarou, M., Paquot, M. & Deroanne, C. (1999).** “Mise Au Point de Pains Composites à Base de Mélanges de Farines de Sorgho-Blé et Analyse Texturale.” *Biotechnologie, Agronomie, Société and Environnement*. 3 (2): 69–77.

**Barak, S., Mudgil, D. & Khatkar, B.S. (2013).** Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties. *Food Science and Technology*. 51: 211-217

**Baxter, G., Blanchard, C. & Zhao, J. (2004).** Effects of prolamin on the textural and pasting properties of rice flour. *Journal of Cereal Science*. 40: 205–211.

**Bell, D.A. (1990).** Methylcellulose as a structure enhancer in breadmaking. *Cereal Foods World*. 35: 1001–1006

**Berghofer, E. (2000).** Brot als funktionales Lebensmittel. *Gandreide Mehl Brot* 54(3):175-179

**Berthelot J. (1990).** La panification des céréales tropicales : mise au point de recettes de brios à dominance de maïs ou de mil aisément transférables en Afrique noire. Rapport de fin de programme. Paris : ministère de la coopération and du développement. 64P

**Bertolini, A. C. & Colonna, P. (2000).** Rheological properties of acidified and UV – irradiated starches. *Starch – Stärken*. 52 (10): 340 – 344.

**Born, K., Langendorff, V. & Boulenger, P. (2002).** Xanthan. In A. Steinbüchel, E. J. Vandamme, S. De Baands (Eds.), *Biopolymers*. Weinheim: Wiley-VCH

**Bourne M.C. (1978).** Texture profile analysis. *Food Technology*. 32: 62–66.

**Bourne, M. C. (2002).** Food texture and viscosity: concept and measurement. 2nd ed. New York: Academic Press.

**Bovell-Benjamin, A.C. (2007).** Sweet potato: A review of its past, present, and future role in human nutrition. *Advances in Food Nutrition Research* 52(1): 1-59.

**Bugusu, B. A., Campanella, O. & Hamaker, B. R. (2001).** Improvement of sorghum-wheat composite dough rheological properties and breadmaking quality through zein addition. *Cereal Chemistry*. 78(1): 31-35.

**Camargo, C., Colonna, P., Buleon, A. & Richard-Molard, D. (1988).** Functional properties of sour cassava (*Manihot utilissima*) starch: polvilho azedo. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 45(3): 273–289.

**Cárdenas, O. S. & De Buckle, T. S. (1980).** Sour cassava starch production: a preliminary study. *Journal of Food Science*. 45(6): 1509–1512.

**Carson, L., Sandser, C. & Xiuzhi, S.S. (2000).** “Sensory Characteristics of Sorghum Composite Bread.” *International Journal of Food Science and Technology*. 35 (5): 465–71.

**Cato, L., Rafael, L.G.B., Gan, J. & Small, D.M. (2002).** The use of rice flour and hydrocolloid gums for gluten free breads. In *Proceedings of the 51<sup>st</sup> Australian Cereal Chemistry Conference*. 304 –308.

**Cauvain, S.P. & Young, S.L. (2002).** Fabrication de pain. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. 419.

**Cereda, M.P. (1973).** Alguns aspectos sobre a fermentação de fécula de mandioca. Tese doutorado, Faculdade de ciencias médicas e biológicas de Botucatu, Brasil, 89.

**Christiansson, D.D., Gardner, H.W., Warner, K., Boundy, B.K. & Ingrandt, G.E. (1974).** Xanthan gum in protein-fortified starch bread. *Food Technology*. 28: 23–26, 28–29.

**Chuzel, G. (1990).** Cassava starch: current and potential use in Latin America. *Cassava Newsletters*. 15 (1): 9-11.

**Chuzel, G. (1992).** Amélioration technique et économique du procédé de fabrication de l'amidon aigre de manioc. In Dufour Cd., Griffon D. éd: Amélioration de la qualité des aliments fermentés à base de manioc. Rapport final du contrat CEE/STD2 TS2A-0225, CIRAD, Montpellier, France.

**Collar, C., Andreu, P., Martinez, J. C. & Armero, E. (1999).** Optimisation of hydrocolloid addition to improve wheat bread dough functionality: A response surface methodology study. *Food Hydrocolloids*. 13: 467-475.

**Collin, P., Kaukinen, K., Valimaki, M. & Slami, J. (2002).** Endocrinological disorders and celiac disease. *Endocrine Reviews* 23: 464-483.

**CORAF/USAID/SONGHAI (2010).** Manuel de formation (draft) transformation du manioc en gari et farine panifiable de haute qualité en Afrique de l'ouest 36: 25

**Coussot, P. (1999).** Rheological aspects of the solid-liquid transition in jammed systems, in Jamming, yielding and irreversible deformation in condensed matter. *Lecture Notes in Physics*. 688.

**Crockett, R., Le, P. & Vodovotz, Y. (2011).** Effects of soy protein isolate and egg white solids on the physicochemical properties of gluten-free bread. *Food Chemistry*. 129: 84-91.

**Defloor, I. (1995).** Factors governing the breadmaking potential of Cassava (*Manihot Esculenta*) flour. Ph D. Thesis university of K.U. Leuven, Belgium.

**Della Valle, G., Chiron, H., Jury, V., Raitière, M. & Réguerre, A.-L. (2012).** Kinetics of crust formation during conventional French bread baking. *Journal of Cereal Science*. 56: 440-444.

**Demirkesen, I., Behic, M., Gulum, S. & Serpil, S. (2010).** "Rheological Properties of Gluten-Free Bread Formulations." *Journal of Food Engineering* 96 (2): 295–303.

**Dendy, D.A.V., Clarke, P.A. & James, A.W. (1973).** The use of blends of wheat and non-wheat flours in breadmaking. In Composite Flour Program. Rome: Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. 134

**Dewettinck, K., Van, Bockstaele, F., Kuhne, B., Van de Walle, Courtens, T. & Gellynck, X. (2008).** Nutritional value of bread: Influence of processing, food interaction and consumer perception. Review of Journal Cereal Science. 48: 243-257.

**Dufour, D., Braband, C., Zakhia, N. & Chuzel, G. (1995).** Influence of fermentation and solar drying on the breadmaking potential of cassava sour starch, in: Journal of the Science of Food and Agriculture.

**Dziedzoave, N.T., Abass, A.B., Amoa-Awua, W.K.A. & Sablah, M. (2006).** Quality Management manual for Production of High quality cassava flour. (Adegoke, G.O. and Brimer, L., Eds.). International Institute of Tropical Agriculture (IITA). 68.

**Dziezak, J. D. (1991).** A focus on gums. Food Technology. 45: 115–132.

**Edema, M.O., Sanni, L.O. & Sanni, A.I. (2005).** Evaluation of maize-soybean flour blends for sour maize bread production in Nigeria. African Journal of Biotechnology. 4: 911-918.

**Eggleston G., Omoaka P.E. & Ihedioha D.O. (1992).** Development and evaluation of products from cassava flour as new alternatives to wheaten breads: Journal of food science and Agriculture. 377.

**Encyclopaedia Britannica (2006).** Bread Britannica Concise Encyclopedia Britannica, Inc, [www.britannicaencyclopedia.com](http://www.britannicaencyclopedia.com)

**Eriksson, E., Koch, K., Tortoe, C., Akonor, P.T. & Baidoo, E. (2013).** “Physicochemical, functional and pasting characteristics of three varieties of cassava in wheat composite flours”. British Journal of Applied Science Technology, Vol. 4 (11): 1609-1621.

**Esteller, M.S. & Suzana Lannes. (2008).** “Production and characterization of sponge-dough bread using scalded rye.” *Journal of Texture Studies*. 39 (1): 56–67.

**FAO & IFAD. (2004).** Cassava for livestock feed in Sub-Saharan Africa: The global cassava development strategy.



**FAO/IFAD (2000).** The World Cassava Economy: Facts, Trends and Outlooks. Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Fund for Agricultural Development, Rome.

**Faostat. (2005).** Agricultural Data, Fao Statistical Database. [Http://Www.Fao.Org](http://www.fao.org)

**Feillet, P., Guinet, R., Morel, M.H. & Rouau, X. (1994).** La pâte : Formation et développement. *In* : la panification française. GUINET R., GODON B. Tec. et Doc. Lavoisier. Paris. 226-276.

**Fennema, O. R. (1996).** Food Additives-Flour Bleaching Agents and Improvers. In: "Food Chemistry" 3rd (Ed.): Dekker, M., New York. 808-810.

**Frandsen, J.P. (1990).** La farine dans le pétrin Agriculture Magazine. 50: 92-98.

**Frederick, E.J. (2009).** Effect of sorghum flour composition and particle size on quality of gluten-free bread. Master thesis.

**Friedman, H.H., Whitney, J.E. & Szczesniak, A.S. (1963).** The Texturometer – A new instrument for objective texture measurement. Journal of Food Science. 28: 390–396.

**Gallagher, E., Gormley, T. R. & Arendt, E. K. (2003).** "Crust and Crumb Characteristics of Gluten Free Breads." Journal of Food Engineering. 56 (2): 153–61.

**Gallagher, E., Gormley, T.R & Arendt E.K. (2004).** "Recent Advances in the Formulation of Gluten-Free Cereal-Based Products." Trends in Food Science and Technology 15 (3-4): 143-52.

**Gambus, H., Nowotna, A., Ziobro, R., Gumul, D. & Sikora, M. (2001).** The effect of use of guar gum with pectin mixture in gluten-free bread. EJPAU, 4:<http://www.ejpau.media.pl/series/volume4/issue2/food/art-09.html>.

**Giraud, E., Brauman, A., Keleke, S., Gosselin, L. & Raimbault, M. (1995).** Contrôle de la fermentation du manioc pour un meilleur gari : Utilisation d'un starter de *Lactobacillus plantarum* à activité linamarase et amylase. In : Agbor-Egbe *et al.*, (eds) Transformation Alimentaire du Manioc, ORSTOM, Paris. 353-365.

**Godon, B. (1991).** Biotransformation des produits céréaliers Paris: Tec and Doc-Lavoisier, APRIG. 221.

**Guarda, A., Rosell, C.M., Benedito, C. & Galotto, M.J. (2004).** “Different Hydrocolloids as Bread Improvers and Antistaling Agents.” *Food Hydrocolloids* 18 (2): 241–47.

**Gujral, S.G. et Rosell, C.M. (2004).** Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Research International*. 37: 75–81.

**Hager, A.S., Elke, K. & Arendt, E.K. (2013).** Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids*. 32: 195-203.

**Haque, A. & Morris, E.R. (1994).** Combined use of ispaghula and HPMC to replace or augment gluten in breadmaking. *Food Research International*. 27: 379–393.

**Hasmadi, M., Faridah, S.A., Salwa, I., Matanjun, P., Abdul Hamid, M. & Rameli, A. S. (2014).** The effect of seaweed composite flour on the textural properties of dough and bread. *Journal of Applied Phycology*. 26: 1057–1062.

**Hershey, C., Henry, G., Best, R., & Iglesias, C. (2000).** Cassava in Latin America and the Caribbean Resources for Global Development (1-57).

**Heuze V., Tran G., Bastianelli D., Archimede H., Lebas F. & Regnier C. (2012).** Cassava Tubers, Feedipedia.Org.

**Hoefler (2004).** Effect of Hydrocolloid: Incorporation on the Quality Characteristics of Bread. *Food Processing and Technology*. 29: 237-241

**Holm, J. & Bjorck, A. N. (1985).** A Rapid method for the analysis starch. *Starch/stärke*. 38.

**Hoseney, R. C. (1990).** Minor constituents. *In Principles of cereal science and technology*. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN. 102-105.

**Houben, A., Höchstätter, A. & Becker, T. (2012).** Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: An overview. *European Food Research and Technology*. 235(2): 195-208.

**Hugo, L. F., Waniska, R. D. & Rooney, L. W. (1997).** Production of bread from composite flours. In Proceedings: Harnessing cereal science and technology for sustainable development (100-114). Prandoria: CSIR ICC-SA Symposium.

**Hugo, L. F., Rooney, L. W. & Taylor, J. R. N. (2000).** Malted sorghum as a functional ingredient in composite bread. *Cereal Science*. 79(4): 428-432.

**IRAD/DONATA Cameroun - Point focal (2013).** Dépliant ; « diffusion de nouvelles technologies en Afrique ».

**Institut de Technologie Alimentaire (2010).** Guide pour la valorisation de la patate douce en Mauritanie. 24(6) : 1-24.

**Jensen, S., Skibsted L.H., Kidmose, U. & Anandte K.T. (2015).** “Addition of Cassava Flours in Bread-Making: Sensory and Textural Evaluation.” *Food Science and Technology*. 60 (1): 292–99.

**Jisha, S., Padmaja, G., Moorthy S. & Rajeshkumar, K. (2008).** Pre-treatment effect on the nutritional and functional properties of selected cassava-based composite flours. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 9 : 587–592.

**Jory, M. (1989).** Contribution à l'étude de deux processus de transformation du manioc comportant une phase de fermentation : le gari au Togo. L'amidon aigre en Colombie. Mémoire de maîtrise en technologie alimentaire régions chaudes, 45 p., ENSIA/CIRAD, Montpellier, France.

**Julianti, E., Rusmarilin, H., Ridwansyah & Yusraini, E. (2015).** “Functional and Rheological Properties of Composite Flour from Sweet Potato, Maize, Soybean and Xanthan Gum.” *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*.

**Kadan, R.S., Robinson, M.G., Thibodeux, D.P. & Pepperman, A. (2001).** Texture and other physicochemical properties of whole rice bread. *Journal of Food Science*. 66: 940–944.

**Kakou, A.C., Koussemeon, M., Koffi, R.N., Toka, M., Guédé-Guina, F., Dosso, M., Zinsstag, J. & Agbassi, B.R. (2007).** Etudes Physico-chimique et microbiologique de la Pâte de manioc au cours de sa conservation. *In* : Actes du 1<sup>er</sup> atelier international sur potentialités à la transformation du manioc (*Manihot Esculenta*) en Afrique de l'ouest Abidjan-Cote D'ivoire, 256 – 260.

**Kang, M. Y., Choi, Y. H. & Choi, H. C. (1997).** Korean Journal of Food Science and Technology. 29: 700–704.

**Kaur, L., Jaspreand, S. & Narpinder, S. (2005).** Effect of glycerol monostearate on the physico-chemical, thermal, rheological and noodle making properties of corn and potato starches. Food Hydrocolloids. 19: 839–849.

**Kaur, M. & Singh, N. (2005).** Studies on functional thermal and pasting properties of flours from different chickpea (*Cicer arietinum L.*) cultivars. Food Chemistry. 91: 403–411.

**Khalil, A.H., Mansour, E.H. & Dawood, F.M. (2000).** Influence of malt on rheological and baking properties of wheat-cassava composite flours. Journal of Food Science Technology. 33: 159-164.

**Kittisuban, P., Pitiporn, R. & Manop. (2014).** “Optimization of Hydroxypropylmandhylcellulose, Yeast  $\beta$ -Glucan, and Whey Protein Levels Based on Physical Properties of Gluten-Free Rice Bread Using Response Surface Methodology.” Food Science and Technology. 57 (2): 738–48.

**Kobylanski, J.R., Perez, O.E. & Pilosof, A.M.R. (2004).** Thermal transitions of gluten-free doughs as affected by water, egg white and hydroxypropylmethylcellulose. Thermochimica Acta 411: 81–89.

**KomLaga, G. A., Glover-Amengor, M., Dzedzoave, N. T. & Hagan. L. L. (2012).** “Consumer Acceptability of Wheat Cassava Composite Bread.” World Rural Observation 4: 78–81.

**Kulamarva, A. G., Venkatesh R. S. & Raghavan. V.G.S. (2009).** “Nutritional and Rheological Properties of Sorghum.” International Journal of Food Properties. 12 (1): 55–69.

**Lamacchia, C., Camarca, A., Picascia, S., Di Luccia, A. & Gianfrani, C. (2014).** Cereal-based gluten-free food: how to reconcile nutritional and technological properties of wheat proteins with safety for celiac disease patients. Nutrients. 6: 575-590.

**Lan Lin (2014).** Étude des phénomènes physico-chimiques mis en jeu et optimisation de la formulation lors de la panification sans gluten. Mémoire d’ingénieur. CIRAD, UMR QualiSud : Centre de recherche français Avenue Agropolis, 34398 MONTPELLIER cedex 5, France.

**Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N. & Biliaderis, C. G. (2007).** Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*. 79: 1033-1047.

**Lazaridou, A. & Biliaderis, C.G. (2009).** Gluten-free doughs: rheological properties, testing procedures – methods and potential problems. In: E. Gallagher (Ed.) *Gluten-free food science and technology*. Wiley-Blackwell, Oxford, 52-82.

**Lebot, v. (2008).** Améliorer les plantes a racines et tubercules tropicales. Cirad. 2 P.

**Liu, H., Long, Y., Chen, L. & Lin Li. (2007).** “Retrogradation of Corn Starch after Thermal Treatment at Different Temperatures.” *Carbohydrate Polymers*. 69 (4): 756–62.

**Mäkinen, O.E., Zannini, E. & Arendt, E.K. (2013).** Germination of oat and quinoa and evaluation of the malts as gluten free baking ingredients. *Plant Foods Human Nutrition*. 68(1): 90-95.

**Mancebo, C.M., Miguel, M.S., Martínez, M.M. & Gómez, M. (2015).** “Optimisation of Rheological Properties of Gluten-Free Doughs with HPMC, Psyllium and Different Levels of Water.” *Journal of Cereal Science*. 61: 8–15.

**Mandala, I., Karabela, D. & Kostaropoulos, A. (2007).** Physical properties of breads containing hydrocolloids stored at low temperature. Effect of chilling. *Food Hydrocolloids*. 21: 1397–1406.

**Marcon, M. J. A., Kurtz, D. J., Raguzzoni, J. C., Delgadillo, I., Maraschin, M., Soldi, V. & Amante, E. R. (2009).** Expansion properties of sour cassava starch (polvilho azedo): variables related to its practical application in bakery. *Starch - Stärke*. 61(12): 716–726.

**Mariotti, M., Pagani, M.A. & Lucisano, M. (2013).** The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food Hydrocolloids*. 30(1): 393-400.

**Maziya, D.B., Adebawale, A. A., Onabanjo, O. O. & Dixon, A. G. O. (2005).** Effect of variety and drying methods on physico-chemical properties of high quality cassava flour from yellow cassava roots. *African Crop Science Conference Proceedings*. 7: 635-641.

**McCarthy, D. F., Gallagher, E., GormLey, T. R., Schober, T. J. & Arendt, E. K. (2005).** Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. *Cereal Chemistry*. 82: 609-615.

**McWatter, K.H., Philips, R.D., Walker, S.L., McCullough, S.E., Mensah-Wilmot, Saalia, F.K., Hung, Y.C. & Patterson, S.P. (2004).** Baking performance and acceptability of raw extruded cowpea flour breads. *Journal Food Quality*. 27: 337-351.

**Meredith P. (1964).** A theory of gluten structure. *Cereal Science Today*. 54P.

**Mestres, C., Matencio, F., Pons, B., Yajid, M. & Fliedel, G. (1996).** A rapid method for the determination of amylose content by using differential scanning calorimetry. *Starch/Starke*. 48: 2-6.

**Mestres, C. & Rouau, X. (1997).** Influence of natural fermentation and drying conditions on the physicochemical characteristics of cassava starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 74(2): 147–155.

**Mezaize, S., Chevallier, S., Le Ball, A. & Lamballerie, M. (2009).** Optimization of gluten-free formulations for French-style breads. *Journal of Food Science*. 74: 140-146.

**Milde, L.B., Ramallo, L.A. & Puppo, M.C. (2012).** “Gluten-Free Bread Based on Tapioca Starch: Texture and Sensory Studies.” *Food and Bioprocess Technology*. 5 (3): 888–96.

**Miyazaki, M. & Morita, N. (2005).** Effect of heat-moisture treated maize starch on the properties of dough and bread. *Food Research International*. 38: 369–376.

**Mohammadi, M., Sadeghnia, N., Mohammad-Hossain A., Tirang-Reza N. & Mortazavian. A.M. (2014).** “Development of Gluten-Free Flat Bread Using Hydrocolloids: Xanthan and CMC.” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20 (4): 1812–18.

**Moorthy, S. N. (2002).** Physicochemical and functional properties of tropical tuber starch: a review. *Starch/Stärke*. 54: 559-592.

**Nabubuya, A., Namutebi, A., Byaruhanga, Y. & Narvhus, J. (2012).** Potential use of selected sweet potato (*Ipomea batatas lam*) varieties as defined by chemical and flour pasting characteristics. *Food and Nutrition Science*. 3: 889-896.

**NEPAD (2004).** *Le Manioc En Afrique Tropicale. Un Manuel De Reference*. Ibadan, Nigeria, 190p.

**Nishita, K.D., Roberts, R.L. & Bean, M.M. (1976).** Development of a yeast leavened rice flour formula. *Cereal Chemistry*. 53: 626–635.

**Noda, T., Takahataa, Y., Satoa, T., Suda, I., Morishitaa, T., Ishigurob. K. & Yamakawab, O. (1998).** Relationships between chain length distribution of amylopectine and gelatinization properties within the same botanical origin for sweet potato and buckwheat. *Carbohydrate polymers*. 37: 153-158.

**Norton, I. T. & Foster, T. J. (2002).** Hydrocolloids in real food systems. In *Gums and stabilisers in the food industry II (187–200)*. Royal Society of Chemistry.

**Nweke, F.I. (2004).** New challenges in the cassava transformation in Nigeria and Ghana. Discussion Paper N° 118. Environment and Production Technology Division International., Food Policy Research Institute. Washington.

**Ogunjobi, M.A.K. & Ogunwolu, S.O. (2010).** Physicochemical and sensory properties of cassava flour biscuits supplemented with cashew apple powder. *Journal of Food Technology*. 8: 24 – 29.

**Olatunji, O., Koleoso, O. A. & Oniwinde, A. B. (1992).** Recent experience on the milling of sorghum, millet and maize for making non-wheat bread, cake, and sausage in Nigeria. In M. I. Gomez, L. R. House, L. W. Rooney, and D. A. V. Dendy (Eds.), *Utilization of sorghum and millet* (pp. 83-88). International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.

**Olatunji, O., Osibanjo, A., Bamiro, E., Ojo, O. & Bureng, P. (1992).** Improvement in the quality of non-wheat composite bread. In *Proceedings of fifth quadrennial symposium on sorghum and millet (45-54)*. International Association for Cereal Science and Technology.

**Oluwalana, I.B, Malomo, S.A. & Ogbodogbo, E.O. (2012).** “Quality Assessment of Flour and Bread from Sweet Potato Wheat Composite Flour Blends.” *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 6 (1): 65-76.

**Onyango, C., Unbehend, G. & Lindhauer, M. G. (2009).** Effect of cellulose-derivatives and emulsifiers on creep-recovery and crumb properties of gluten-free bread prepared from sorghum and pre-gelatinised cassava starch. *Food Research International*. 42: 963-975.

**Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G. & Lindhauer, M. G. (2010).** Rheological and baking characteristics of batter and bread prepared from pre-gelatinised cassava starch and sorghum and modified using microbial transglutaminase. *Journal of Food Engineering*. 49: 465-470.

**Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G. & Lindhauer, M. G. (2011).** Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch. *Food Science and Technology*. 44: 681-686.

**Osakwe, J.A., Chuku, E.C. & Harry S.A. (2008).** Relationship between cyanogens and foliar diseases in cassava (*Manihot esculenta*). *Indian Journal of Agriculture Science*. 78: 997-999.

**Osungbaro, Taiwo, O., Jimoh, D. & Osundeyi, E. (2010).** Functional and pasting properties of composite Cassava-Sorghum flour meals. *Agriculture and biology journal of North America*. 1(4): 715-720.

**Owuamanam C. I. (2007).** Quality of bread from wheat/cassava flour composite as affected by strength and steeping duration of cassava in citric acid. *Nature and Science*. 5(4).

**Papadakis, S.E., Abdul-Malek, S., Kamdem, R.E. & Yam, K.L. (2000).** A versatile and inexpensive technique for measuring color of foods. *Food Technology*. 54: 48– 51.

**Pasqualone, A., Caponio, F., Summo, C., Paradiso, V.M., Bottega, G. & Pagani, M.A. (2010).** “Gluten-free bread making trials from cassava (*Manihot Esculenta*) flour and sensory evaluation of the final product.” *International Journal of Food Properties*. 13 (3): 562–73.

**PNDRT(2007).** Etude sur l'observatoire des racines et tubercules. Rapport de première phase. Programme national de développement des racines and tubercules. Minader, Cameroun. 143.

**Polaki, A., Xasapis, P., Fasseas, C., Yanniotis, S. & Mandala, I. (2010).** Fiber and hydrocolloid content affect the microstructural and sensory characteristics of fresh and frozen stored bread. *Journal of Food Engineering*. 97: 1–7.

**Qazi, I.M., Sudip K.R., Thierry T., Javid, U. & Zafarullah, K. (2014).** “Effect of Blending Selected Tropical Starches on Pasting Properties of Rice Flour.” *Journal of Agriculture*. 30 (3): 357–68.

**René Taga.** Ingénieur du génie industriel © Bulletin du Réseau TPA n°10 - Juin 1995. Panification, Les farines composées : une technologie facile à maîtriser.

**Rodriguez-Amaya, D.B., Nutti, M.R. & Viana de Carvalho, J.L. (2011).** Carotenoids of sweet potato, cassava, and maize and their use in bread and flour fortification. *In* Preedy,



V.R., Watson, R.R., Patel, V.B. (Eds.). *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention*. 301-311. London: Academic Press.

**Rojas, J.A., Rosell, C.M. & Benedito de Barber, C. (1999).** Pasting properties of different wheat flour hydrocolloids systems. *Food Hydrocolloids*. 13: 27–33.

**Rosales-Juarez, M., Gonzalez-Mendoza, B. & Lopez-Guel, E.C. (2008).** Changes on dough rheological characteristics and bread quality as a result of the addition of germinated and non-germinated soybean flour. *Food and Bioprocess Technology*. 1: 152–160

**Rosell, C. M., Rojas, J. A. & Benedito, C. (2001).** Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*. 15: 75–81.

**Rosell, C.M., Barro, F., Sousa, C. & Mena, M.C. (2014).** Cereals for developing gluten-free products and analytical tools for gluten detection. *Journal of Cereal Science*. 59, 354-364.

**Roudot, A.C. (2002).** *Rhéologie et analyse de texture des aliments*. 1st ed. Paris: Technique et Documentation. 200P.

**Sanchez, H.D., Osella, C.A. & De La Torre, M.A. (2002).** Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour, and cassava starch. *Journal of Food Science*. 67(1): 416-419.

**Sanni, L.O., Onadipe, O.O., Ilona, P., Mussagy, M.D., Abass, A. & Dixon, A.G.O. (2009).** Successes and challenges of Cassava enterprise in West Africa: A case study of Nigeria, Benin and Sierra Leone. *International Institute of Tropical Agriculture*. Ibadan. Nigeria. 9-11.

**Sanz-Penella, J.M., Wronkowska, M., Soral-Smiandana, M. & Haros, M. (2013).** Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *Food Science and Technology*. 50(2): 679-685.

**Sarkar, N. & Walker, L.C. (1995).** Hydration dehydration properties of méthylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose. *Carbohydrate Polymers*. 27(3): 177-185.

**Satin, M. (1988).** Bread without wheat. *New Scientist*. 56 – 59.

**Saunders, J. (2010).** Physicochemical properties of select western Canadian wheat starches and their relationship to liquefaction and fermentative bio-ethanol performance. University of Manitoba. Winnipeg, Manitoba: M.Sc. Thesis.

**Schober, T. J., Messerschmidt, M., Bean, S. R., Park, S.H. & Arendt, E. K. (2005).** Gluten-free bread from sorghum: quality differences among hybrids. *Cereal Chemistry*. 82: 394-404.

**Schober, T.J., Bean, S.R. & Boyle, D.L. (2007).** Gluten-free sorghum bread improved by sourdough fermentation: biochemical, rheological, and microstructural background. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 55 (13): 5137–5146.

**Schober, T.J. (2009).** Manufacture of gluten-free specialty breads and confectionary products. *In: E. Gallagher (Ed.) Gluten-free food science and technology*. Wiley-Blackwell, Oxford, 130-180.

**Schoenlechner, R., Mandala, I., Kiskini, A., Kostaropoulos, A. & Berghofer, E. (2010).** Effect of water, albumen and fat on the quality of gluten-free bread containing amaranth. *International Journal of Food Science and Technology*. 45(4): 661-669.

**Sciarini, L.S., Ribotta, P.D., León, A.E. & Pérez, G.T. (2010).** Effect of hydrocolloids on gluten-free batter properties and bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*. 45(11): 2306-2312.

**Sciarini, L.S., Ribotta, P.D., León, A.E. & Pérez, G.T. (2010).** “Influence of Gluten-Free Flours and Their Mixtures on Batter Properties and Bread Quality.” *Food and Bioprocess Technology*. 3 (4): 577–85.

**Sciarini, L. S., Ribotta, P. D., Leon, A. E. & Perez G. T. (2012).** Incorporation of Several Additives into Gluten Free Breads: Effect on Dough Properties and Bread Quality. *Journal of Food Engineering*. 111: 590–597.

**Shittu, T.A., Raji, A.O. et Sanni. L.O. (2007).** “Bread from Composite Cassava-Wheat Flour: I. Effect of Baking Time and Temperature on Some Physical Properties of Bread Loaf.” *Food Research International*. 40 (2): 280–90.

**Shittu, T.A., Rashidat, A. & Evelyn O. A. (2009).** “Functional Effects of Xanthan Gum on Composite Cassava-Wheat Dough and Bread.” *Food Hydrocolloids*. 23 (8): 2254–60.

**Sinmenou (2008).** Projet et pilote d'utilisation des farines locales en panification et en pâtisserie au Bénin.

**Sivaramakrishnan, H.P., Senge, B. & Chattopadhyay, P.K. (2004).** “Rheological Properties of Rice Dough for Making Rice Bread.” *Journal of Food Engineering*. 62 (1): 37–45.

**Storck, C.R., Elessandra, D.R.Z., Marcia, A.G., Moacir, C.E., Cristina, M. R. & Alvaro, R.G.D. (2013).** “Protein Enrichment and Its Effects on Gluten-Free Bread Characteristics.” *Food Science and Technology*. 53 (1): 346–54.

**Szczesniak, A.S. (1963).** Classification of textural characteristics. *Journal of Food Science*. 28: 385–389.

**Szczesniak, A.S. (1975).** General Foods Texture profile revised – Ten years perspective. *Journal of Texture Studies*. 6 : 5–17.

**Taupier Bruno (2006).** Allergies alimentaires liées au blé. Institut Technique de l'agriculture biologique. Paris : Office International Interprofessionnel des Grandes cultures, Interventions et synthèse des débats

**Technical, AACC. (2009).** “Measurement of Bread Firmness--Compression Test.” *In* AACC International Approved Methods, 11th ed. AACC International., <http://methodss.aaccnand.org/summaries/74-10-02.aspx>.

**Thomas, D. & Atwell, W. A. (1999).** Gelatinization, pasting and retrogradation. *In* D. Thomas, W. A. Atwell (Eds.), *Starches* (28–29). St Paul, MN: Eagan Press.

**Thompson, T. (2009).** The nutritional quality of gluten-free foods. *In* E. Gallagher (Ed.), *Gluten-free food science and technology* (42-51). Oxford, UK: Wiley-Blackwell.

**Tiki Mpondo, G. (1995).** Traitement du manioc, propriété des farines et qualité du foufou. *Cahiers Agricultures*. 4(1): 57-59.

**Torbica, A., Miroslav H., & Tamara D. (2010).** “Rheological, Textural and Sensory Properties of Gluten-Free Bread Formulations Based on Rice and Buckwheat Flour.” *Food Hydrocolloids*. 24 (6-7): 626–32.

**Toufelli, I., Dagher, S., Shadarevian, S., Nouredine, A., Sarakbi, M. & Farran, M. T. (1994).** Formulation of gluten-free pocket-type flat breads: Optimization of methylcellulose, gum arabic, and egg albumen levels by response surface methodology. *Cereal Chemistry*. 71: 594–601.

- Weigang Chad. (2011).** Wheat import projection towards 2050. U.S wheat associate.
- Winger, M., Khouryieh, H., Aramouni, F. & Herald, T. (2014).** Sorghum flour characterization and evaluation in gluten-free flour tortilla. *Journal of Food Quality*.
- Woolfe, J.A. (1992).** Sweet Potato. An untapped food source. Cambridge: Cambridge University Press.
- Xu, A., Chung, O.K. & Ponte, J.G. (1992).** Bread crumb amylograph studies. I. Effects of storage time, shortening, flour lipids, and surfactants. *Cereal Chemistry*. 69: 495–501.
- Yamamoto, H., Worthington, S.T., & Hou, P.K.W. (1996).** Rheological properties and baking qualities of selected soft wheats grown in the United States. *Cereal Chemistry*. 73: 215–221.
- Yu, L., Christov, V., Christie, G., Beh, H., Smyth, R. & Gray, J. (1998).** Mechanical properties and microstructures of PLA/thermoplastic starch blends. In: *Proceedings of the IUPAC world polymer congress, Brisbane, Qld, Australia*; 420.
- Zaidul, I.S.M., Norulaini, N.N.A., Mohd, A.K., Omar, H., Yamauchi, T. & Noda. (2007).** “RVA Analysis of Mixtures of Wheat Flour and Potato, Sweet Potato, Yam, and Cassava Starches.” *Carbohydrate Polymers*. 69 (4): 784–91.
- Zhou, M., Robards, K., Glennie-Holmes, M. & Helliwell, S. (2000).** Effects of enzyme treatment and processing on pasting and thermal properties of oats. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 80: 1486–1494.