HAL
open science

Production et caractérisation de farine de patate douce (Ipomoeabatatas.Lam) : optimisation de la technologie de panification

Chancelle Betty Ndangui

To cite this version:

Chancelle Betty Ndangui. Production et caractérisation de farine de patate douce (Ipomoeabatatas.Lam) : optimisation de la technologie de panification. Médecine humaine et pathologie. Université de Lorraine, 2015. Français. NNT : 2015LORR0059 . tel-01751669

HAL Id: tel-01751669

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751669v1

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITE DE LORRAINE
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires
Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules

UNIVERSITE MARIEN NGOUABI
Faculté des Sciences et Techniques
Laboratoire de Physicochimique et Biotechnologique Alimentaires

---

THESE EN CO-TUTELLE

Présentée devant l'Université de Lorraine et l'Université Marien Ngouabi
Pour obtenir le grade de Docteur

Spécialité : Procédés et Biotechnologiques Alimentaires

Par

Chancelle Betty NDANGUI

Production et caractérisation de farine de patate douce (*Ipomoeabatatas.*Lam) : optimisation de la technologie de panification

Soutenue publiquement le 13 avril 2015

Président :
Didier Montet Docteur HDR, CIRAD, Montpellier, France
Rapporteurs
Didier Montet Docteur HDR, CIRAD, Montpellier, France
Nicolas Njitang Maître de Conférences, HDR, Université de Ngaoundéré, Cameroun

Membres
Joël Scher Professeur, Université de Lorraine, France
Jean-Mathurin Nzikou Professeur, Université Marien Ngouabi, Congo-Brazzaville

Invités
Thomas Silou Professeur, Université Marien Ngouabi, Congo-Brazzaville
Jeremy Petit Maître de Conférences, Université de Lorraine, France

Remerciements

Cette thèse a été réalisée entre l'Ecole Doctorale Science et Ingénierie, Ressource Procédés Produits Environnement (RP2E) de l'Université de Lorraine (France) et la Formation Doctorale Transformation Alimentaires des Agroressources (T2A) de la Faculté des Sciences et Techniques de L'Université Marien Ngouabi (Congo-Brazzaville).

J'exprime mes sincères remerciements à l'Agence universitaire de la Francophonie pour le financement de cette thèse.

J'exprime mes remerciements aux membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

J'adresse mes remerciements au Pr. Joël Scher pour m'avoir accueillie et donné l'opportunité de mener à bien ce travail au sein de son équipe au Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules. Malgré ses multiples occupations, il s'est montré disponible pour l'encadrement de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude.

J'exprime mes remerciements au Dr. Claire Gaiani pour m'avoir fait bénéficier de ses nombreuses compétences, ainsi que pour son soutien et ses encouragements.

Toute ma reconnaissance au Dr. Jeremy Petit pour le travail accompli ;tes critiques, tes suggestions toujours et sans exception assorties de paroles d'encouragement, ta patience à toute épreuve notamment quand il fallait relire mes articles et ma thèse.

Je remercie le Professeur Jean Mathurin Nzikou, co-directeur de cette thèse, pour son encadrement.

Ma reconnaissance et ma profonde gratitude vont à l'endroit de Carole Jeandel et Carole Perroud pour leur disponibilité.

Je témoigne spécialement ma reconnaissance au Pr. Louis MATOS et au Dr. André KIMBOGUILA du Laboratoire Physicochimique et de Biotechnologie Alimentaires (LBPA) pour leurs multiples conseils et encouragements tout au long de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à tous les membres du corps enseignant de la FST, ainsi que de l'ENSP de l'Université Marien Ngouabi pour leur dévouement lors de notre formation, leurs conseils et suggestions.

Des remerciements particuliers à ceux qui m'ont soutenue durant la thèse et même depuis bien plus longtemps : mes parents, mes grands-parents, ma famille et belle-famille, mes amies et mes amis.

Un grand merci pour mes parents qui ont toujours été là pour moi. Veuillez trouver ici mes sincères remerciements pour votre soutien inconditionnel et vos encouragements qui m'ont permis de persévérer et terminer cette thèse.

Enfin, je remercie tous ceux dont je n'ai pas cité les noms et qui de quelque façon que ce soit ont contribué à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Un dernier merci, un des plus importants, à Steve Mvili mon mari pour son soutien sans relâche durant ces années de thèse et en particulier durant la période de rédaction.

Liste des communications

Article dans un journal à comité de lecture

Ndangui, C.B., Petit, J., Gaiani, C., Nzikou, J-M.,& Scher, J. (2014). Impact of thermal and chemical pretreatments on physicochemical, rheological, and functional properties of sweet potato (*Ipomea batatas* Lam) Flour. *Food and Bioprocess Technology,* vol.7 *(*12) : 3618 - 3628.

Communication orale

Ndangui, C.B., Gaiani,C., Nzikou, J.M., Scher J. (2012). Etude de l'effet de prétraitements sur les propriétés physicochimiques et rhéologiques de farines de patates douces. *ACIA-Journées Agoriales*, Paris, France, octobre 2012.

Communication par affiche

Ndangui, C.B., GaianiC., Nzikou J-M., Scher J. (2013). Influence de prétraitements de blanchiment sur les propriétés physicochimiques et rhéologiques de farines de patates douces. Séminaire de l'Ecole Dctorale RP2E, Université de Lorraine, Nancy, France, janvier 2013.

Table des matières

Résumé VVIII
Abstract VVIIII
Liste des abréviations IXIII
Liste des figures XIII
Liste des tableaux XIII
Introduction générale 1
Chapitre I : Revue bibliographique 7
I.1. La patate douce 7
I.1.1. Origine et taxonomie 7
I.1.2. Description botanique et culture 8
I.1.3. Production et utilisation 12
I.1.4. Composition chimique et valeur nutritive 14
I.1.5. Conservation 18
I.1.6. Traitements et prétraitements 21
I.1.6.1. Traitements chimiques 27
I.1.6.2. Traitement physique : le blanchiment 28
I.1.7 Transformation des tubercules de patate douce en farine 29
I.1.8. Séchage 30
I.1.8.1. Différentes méthodes de séchage 32
I.1.8.2. Modifications physicochimiques au cours du séchage 35
I.1.9. Broyage 35
I.1.9.1.Modifications physicochimiques au cours du broyage 37
I.1.10. Caractéristiques chimiques des farines 37
I.1.11. Caractéristiques physiques des farines 39
I.1.12. Caractéristiques fonctionnelles des farines 40
I.2. Applications des farines : technologie de panification 43
I.2.1. Généralités sur la panification mixte 43
I.2.2. Rôle des ingrédients 44
I.2.2.1. Farine 44
I.2.2.2. Eau 44
I.2.2.3. Sel 45
I.2.2.4. Levures 46
I.2.2.5. Améliorants 46
I.2.3. Etapes du procédé et leur rôle en panification 47
I.2.3.1. Pétrissage 47
I.2.3.2. Pointage 50
I.2.3.3. Division 50
I.2.3.4. Fermentation 51

I.2.3.5. Façonnage 53
I.2.3.6. Apprêt 53
I.2.3.7. Cuisson 53
I.2.4. Propriétés rhéologiques des pâtes 55
Chapitre 2 : Matériel et méthodes 59
II.1. Echantillonnage et production des farines 59
II.2. Composition chimique des farines 61
II.2.1. Teneur en eau 61
II.2.2. Teneur en protéines 61
II.2.3. Teneur en lipides 63
II.2.4. Teneur en sucres réducteurs 63
II.2.5. Teneur en amidon 64
II.2.6. Teneur en cendres 64
II.2.7. Teneur en minéraux 65
II.3. Propriétés physiques des farines 66
II.3.1. Couleur 66
II.3.2. Distribution granulométrique 67
II.3.3 Morphologie des particules 68
II.3.4. Microscopie électronique à balayage 70
II.4.Propriétés thermiques et rhéologiques 71
II.4.1. Analyse Thermique Différentielle (ATD ou DSC) 71
II.4.2. Analyses rhéologiques 72
II.5. Propriétés structurales et fonctionnelles 74
II.5.1. Analyse Spectrométrique Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) 74
II.5.2. Capacité d'absorption et indices de solubilité à l'eau 77
II.5.3. Isotherme d'adsorption d'eau par Sorption de Vapeur Dynamique (DVS) 77
II.6. Caractérisation des farines composées, pâtes et pains 80
II.6.1 Teneur en eau, protéines et cendres 81
II.6.2 Capacité de rétention d'eau 81
II.6.3. Préparation des pâtes 81
..... 82
II.6.4.Analyse texturale des pâtes et pains 82
II.6.5. Cinétique de montée de la pâte 84
II.6.6. Détermination du volume du pain 85
II.6.7.Analyse sensorielle 86
II.7. Analyses statistiques 86
III. Résultats et discussion 89
III. 1. Caractérisation physicochimique des farines 89
III.1.1 Composition chimique 89
III.1.2. Paramètres de couleur 90

III.1.3. Distribution granulométrique 92
III.1.4. Paramètres de forme 93
III.1.5. Microscopie électronique à balayage 95
III.1.6. Propriétés thermiques 96
III.1.8. Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier 99
III.1.9.Propriétés fonctionnelles des farines et isotherme d'adsorption d'eau des farines 102
Conclusion intermédiaire : impact des prétraitements sur les caractéristiques des farines de patate douce 105
III.2. Production de pain : impact de la substitution de la farine de patate douce sur la qualité du pain 106
III.2.1. Composition chimique 107
III.2.2.Capacité de rétention d'eau des farines 108
III.2.3. Paramètres de texture des pâtes 109
III.2.4. Cinétique de la montée de la pâte 110
III.2.5. Poids, volume, volume spécifique, couleur de la croûte des pains 112
III.2.6. Paramètres de texture des pains 115
III.2.7. Analyse sensorielle 116
Conclusion intermédiaire : aptitude à la panification mixte des farines de patate douce 117
Conclusion générale et perspectives 118
Références bibliographiques 122

Résumé

La patate douce est un tubercule appartenant à l'ordre des polémoniales et à la famille des convolvulacées. Il contient de l'amidon, qui est l'élément principal, des dextrines, du β-carotène, puis d'autres éléments nutritifs en quantités variables. L'objectif de la thèse a été de valoriser la patate douce sous forme de farines et de mettre en évidence les potentialités technologiques de ces farines. Deux études complémentaires ont été réalisées au cours de ce travail de thèse, la première concerne l'étude de l'impact des prétraitements thermiques et chimiques sur les propriétés physicochimiques, thermiques, rhéologiques et fonctionnelles des farines issues de patates douces ayant : TPD (tranche de patate douce non prétraitée), $TPDCaCl_2$ (tranche de patate douce prétraitée au $CaCl_2$) et enfin TPDB (tranche de patate douce prétraitée par blanchiment). Il en résulte une légère augmentation de la teneur en sucres réducteurs dans les farines $TPDCaCl_2$ par rapport aux farines TPDB et TPD. Cependant, la valeur de L^* (luminance) dans la farine TPDB était inférieure à celles des farines $TPDCaCl_2$ et TPD. La teneur en calcium était relativement élevée dans la farine $TPDCaCl_2$ (120,6 mg/100g) par rapport aux farines TPD et TPDB (respectivement, 77,8 et 67,6 mg/100g). Les valeurs d'enthalpie de gélatinisation et de module élastique (G') étaient supérieures dans la farine $TPDCaCl_2$. La capacité de gonflement était élevée dans les farines blanchies. Il a également été constaté une légère augmentation de la constante d'énergie de liaison d'eau du modèle BET dans les farines traitées au $CaCl_2$ et une augmentation marquée pour les farines blanchies. De cette étude, on déduit que les farines traitées au $CaCl_2$ possèdent les propriétés physicochimiques les plus intéressantes pour une application en panification et dans la formulation alimentaire.

Dans une seconde étude, les essais de panification ont été réalisés avec différents taux d'incorporation à la farine de blé (0, 10, 15, 20, 25 et 30 %) des farines de patate douce traitées au $CaCl_2$ afin de déterminer le taux d'incorporation optimal permettant de réaliser un compromis entre l'amélioration des propriétés nutritionnelles et la diminution des propriétés rhéologiques de la pâte à pain, suite à l'incorporation de farine de patate douce. Les paramètres texturaux des pâtes ont été déterminés. Il en résulte une diminution de la cohésion, la valeur de a* (échelle de couleurs rouge-vert) a augmenté avec l'augmentation du taux de substitution, contrairement aux valeurs de la luminance L* qui ont diminué. Finalement, la farine de patate douce pouvait être incorporée dans une formulation de panification jusqu'à 25 % sans dépréciation notable des qualités organosensorielles des pains.

Mots clés : patate douce, prétraitement, $CaCl_2$, blanchiment, propriétés physicochimiques, propriétés rhéologiques, optimisation, texture, pain.

Abstract

Sweet potato is an edible tuber belonging to the order of Solanales and Convolvulaceae family. It contains starch, which is the main component, dextrins, β-carotene, and other nutrients in varying amounts. The thesis aimed promoting the use of sweet potato as flour by highlighting its nutritional potential. Two complementary studies were carried out in this thesis work, the first concerned the study of the impact of thermal and chemical pretreatments on physicochemical, thermal, rheological, and functional properties of sweet potatoes flours obtained after different pretreatments : TPD (unpretreated sweet potato slices), TPD$CaCl_2$ ($CaCl_2$- pretreated sweet potato slices) and finally TPDB (bleached sweet potato slices). These results show a slight increase in reducing sugar content in TPD$CaCl_2$flour compared to TPDB and TPD flours. However, the value of L* (luminance) in the TPDB flour was below the ones ofTPD$CaCl_2$ and TPD flours. The calcium content was relatively high in TPD$CaCl_2$ flour (120.6 mg / 100 g) compared to TPD and TPDB flours (respectively, 77.8 and 67.6 mg / 100g). The gelatinization enthalpy and elastic modulus (G') were higher in the TPDCaCl2 flour. The swelling capacity was high in bleached flour. It was also noticed a slight increase in the water binding energy constant of the BET model in $CaCl_2$-pretreated and blanched. In this study, it was deduced that the flours pretreated with $CaCl_2$ have physicochemical properties interesting for bakery and food formulation applications.

In the second part of the thesis study, baking tests were carried out with different levels of incorporation to wheat flour (0, 10, 15, 20, 25 and 30 %) of the $CaCl_2$-pretreated sweet potato flour in order to determine the optimal incorporation level allowing the compromise between improved nutritional properties and the decreased rheological properties of the dough, due to the sweet potato flour incorporation. Textural parameters of doughs were determined. This resulted in a decrease in cohesion and an increase in the value of a* (red - green color scale) with increasing the degree of substitution, in contrast to the luminance L * values which felt. Finally, sweet potato flour could be incorporated into a bread formulation up to 25 % without significant impairment of sensory organic qualities of bread.

Keywords: Sweet potato, pretreatment, $CaCl_2$, bleaching, physicochemical, rheological properties, optimization, texture, bread.

Liste des abréviations

AACC	American Association of Cereal Chemists
APL	Acide polylactique
BET	Brennuer-Emmett-Teller
$CaCl_2$	Chlorure de calcium
CG	Capacité de gonflement
DMSO	Diméthylsulfoxide
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DNS	Acide 3, 5-dinitrosalicylique
FAO	Food and Agiculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FAOSTAT	Base de données statistique de la FAO
FTIR	Fourier Transform InfraRed spectroscopy (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier)
G'	Module élastique
G''	Module visqueux
IAE	Indice d'absorption d'eau
ISE	Indice de solubilité dans l'eau
MEB	Microscope électronique à balayage
TE	Teneur en eau
T_0	Température de début de gélatinisation
T_f	Température de fin de gélatinisation
T_p	Température du pic de gélatinisation
TPD	Tranche de patate douce non prétraitée
$TPDCaCl_2$	Tranche de patate douce prétraitée au $CaCl_2$
TPDB	Tranche de patate douce prétraitée par blanchiment
MS	Matière sèche
PPO	Polyphénol-oxydases

Liste des figures

Figure **1** : Schéma des différents types de racines. 9
Figure **2 :** Les différentes formes de patates douces 10
Figure **3** : Champ de patate douce 11
Figure **4 :** Tubercules de patates douces 11
Figure 5 : Taux relatifs de réaction des principaux agents de dégradation des matrices alimentaires en fonction de l'a_w (Labuza *et al*., 1972) 21
Figure **6** : Schéma réactionnel du brunissement enzymatique. 23
Figure **7 :** Etapes de la réaction de Maillard (Machiels & Istasse, 2002) 24
Figure **8 :** Isotherme de sorption d'eau. 31
Figure **9** : Distribution de taille des particules des farines de taro, d'igname et de patate douce (Aprianita *et al*., 2009). 40
Figure 10 : Action du pétrissage sur la réorientation des protéines du gluten (A) menant à la formation d'un réseau cohésif assurant une meilleure élasticité et rétention de gaz (B). Un pétrissage trop important forme une pâte cassante (C) sous l'effet des interactions fortes entre protéines. 50
Figure 11 : Évolution de la taille et de la forme (de sphérique à polyédrique) des cellules gazeuses dans une pâte en cours de fermentation (Van Vliet *et al*., 1992) 52
Figure 12 : Les différents types de contraintes imposées à la pâte (Berland & Launay, 1995). 57
Figure **13 :** Schéma de production des farines (TPD, TPD$CaCl_2$, TPDB) de patates douces. 60
Figure **14** : Espace chromatique CIE L*a*b* 67
Figure **15 :** Principe du Mastersizer de Malvern (Hussain, 2012) 68
Figure **16 :** Granulomorphomètre utilisé 69
Figure **17 :** Représentation du diamètre d'un cercle égal à la surface de projection (EQPC) (A) et les facteurs de formes : sphéricité (B) et convexité (C) (Gaiani *et al*., 2011) 70
Figure **18 :** Exemple de thermogramme obtenu par DSC (réaction endothermique). 72
Figure **19** : (a) Schéma d'un échantillon placé entre deux plaques d'un rhéomètre, (b) Exemple de réponse en contrainte à la déformation de cisaillement appliquée à un solide élastique, un liquide visqueux et un matériau viscoélastique (Meziani, 2012). 73
Figure **20** : Schéma de fonctionnement d'un spectromètre FTIR. 75
Figure **21** : Différentes zones des isothermes de sorption de Type II. 78
Figure **22** : Schéma de fabrication des pains blé/patate douce. 82
Figure **23 :** Analyseur de texture 83

Figure **24** : Courbe typique de profil de texture d'une pâte mixte blé/patate douce.....84
Figure **25 :** Illustration de l'utilisation du mesureur de pousse pour le suivi du niveau de fermentation d'une pâte à pain pour différentes durées de pousse à partir de l'ajout de la levure (a) 0 min, (b) 30 min et (c) 60 min (Lassoued-Oualdi, 2005). 85
Figure **26 :** Distribution granulométrique des différentes farines de patate douce.....92
Figure **27** : Evolution de la sphéricité en fonction de la taille des particules des différentes farines de patate douce.....93
Figure **28 :** Evolution de la convexité en fonction de la taille des particules des différentes farines de patate douce.....94
Figure **29** : Microscopie électronique à balayage des différentes farines de patate douces 95
Figure **30 :** Evolution du module de stockage (G') en fonction de la température des farines de patate douce.....98
Figure **31 :** Evolution du module de pertes (G'') en fonction de la température des farines de patate douce. 98
Figure 32 : Spectres FTIR des différentes farines de patates douce.....100
Figure **33** : Isothermes de sorption obtenues des différentes farines de patate douce à 25 °C. 103
Figure **34 :** Pains issus des différentes formulations. 106
Figure **35 :** Capacité de rétention des farines de blé et de patate douce. 108
Figure **36** : Profil de montée des pâtes.....110
Figure **37 :** Acceptabilité générale des différentes formulations à base de farine de patate douce, obtenue par analyse sensorielle. 116

Liste des tableaux

Tableau 1 : Statistiques de la production de patate douce (d'après FAOSTAT, 2008).....13
Tableau **2 :** Composition moyenne des tubercules de patates douces 15
Tableau **3 :** Productivité de la patate douce en termes de matière sèche et d'apport énergétique par rapport aux tubercules et céréales de consommation courante (Bell *et al*., 2000). 16
Tableau **4** : Les différents modes de séchage par la chaleur (Bimbenet *et al*. (2002)).....34
Tableau **5 :** Composition chimique des farines de patate douce par différents auteurs (g / 100 g).....38
Tableau **6** : Contribution nutritionnelle à l'apport quotidien recommandé de la farine patate douce.....39
Tableau **7 :** Exemples de produits de substitution utilisés en panification (Roussel & Chiron, 2002).....47
Tableau **8 :** Les principales méthodes empiriques utilisées pour la caractérisation de divers produits de boulangerie (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).....56
Tableau **9** : Les différentes farines obtenues et les codes utilisés.....80
Tableau **10** : Composition chimique des différentes farines de patates douces.....89
Tableau **11 :** Paramètres de couleur de farines de patates douces. 91
Tableau **12** : Paramètres de taille des particules des différentes farines de patate douce.....92
Tableau **13 :** Propriétés thermiques des farines de patates douces 96
Tableau **14 :** Rapports d'intensités des bandes à 1047 et 1022 cm^{-1}déterminés par spectroscopie infrarouge de transformée de Fourier (FTIR) des farines de patates douces. .102
Tableau **15 :** IAE, ISE, CG, paramètres du modèle BET des différentes farines de patate douce.....102
Tableau **16 :** Composition chimique des farines initiales.....107
Tableau **17 :** Propriétés texturales des pâtes formulées à partir d'un mélange de farines de blé et de patate douce.....109
Tableau **18** : Masse, volume, volume spécifique et paramètres de couleur des pains.....113
Tableau **19 :** Propriétés texturales des pains formulés farines composées. 115

Introduction générale

La sécurité alimentaire reste l'un des problèmes majeurs dans de nombreux pays en développement. Il est évident que la production alimentaire doit augmenter considérablement afin de répondre à la demande future d'une population croissante autour de 9 milliards en 2050. En Afrique subsaharienne, les racines et tubercules constituent les plus importantes cultures alimentaires. Ces racines et tubercules sont principalement le manioc (*Manihot esculenta*), la patate douce (*Ipomea batatas*), l'igname (*Dioscorea sp.*), la pomme de terre (*Solanum tuberosum*)et le taro (*Colocasia esculenta*). De nos jours, l'importance des tubercules dans la consommation des populations a conduit les acteurs de la filière (racines et tubercules) à adopter de nouvelles techniques de conservation, telles que la transformation, afin de garantir une disponibilité des produits toute l'année. La patate douce est une plante à racines tubérisées qui présente une grande importance économique dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées douces (Sihachakr *et al*., 1997). Elle représente la septième culture la plus importante dans le monde après le blé, le riz, le maïs, la pomme de terre, l'orge et le manioc. Néanmoins, la patate douce compte parmi les tubercules les plus consommés, bien que ses produits de transformation soient peu abondants.
La patate douce constitue une culture dite de subsistance dans les zones de production, car elle n'occupe pas une place de choix dans le commerce international en raison des difficultés de transport et de conservation.

Le Congo-Brazzaville, à l'instar des autres pays en développement, est confronté à un double fardeau nutritionnel et alimentaire, découlant de la coexistence de l'insécurité alimentaire quasi-permanente et de la faible diversité alimentaire. Au Congo-Brazzaville, les patates douces sont cultivées dans les régions du nord et sud du pays. Elles font partie des cinq cultures de base les plus importantes dans le monde (manioc, plantain, patate douce, igname et maïs). La patate douce est une culture essentielle en termes de sécurité alimentaire**.** Comparée à d'autres cultures, elle pousse dans des conditions agricoles variées et s'adapte bien à la chaleur, à la sécheresse, à de nombreuses maladies et ravageurs, de même qu'à des sols pauvres et inondés. Ses caractéristiques agronomiques, telles qu'une large adaptabilité, une forte productivité, un cycle de développement court et une valeur nutritionnelle élevée, font de la patate douce une culture particulièrement importante pour la sécurité alimentaire dans les pays soumis à de fortes pressions anthropiques et vulnérables aux changements climatiques.

En outre, selon les travaux d'Owori *et al.* (2007), la patate douce constitue une importante source de glucides (96 %), sous forme de glucides simples et fibres diététiques, qui jouent un rôle important dans les carences énergétiques. Hormis les glucides, la patate douce est une

bonne source de vitamines A et de minéraux indispensables au bon fonctionnement de l'organisme**.** Sa teneur élevée en vitamine A (jusqu'à 4000 U.I. pour 100 g de tubercules frais, selon la variété) est beaucoup plus importante que celle des autres racines et tubercules, et sa teneur en vitamine C (30 mg/100 g) est également remarquable (Bell *et al*., 2000).Le zinc et le calcium (32 %) sont les minéraux majoritaires. Les vitamines que renferme la patate douce incluent la vitamine C, celles du groupe B (B1, B2, acide folique) et la vitamine E. Les feuilles et les pousses tendres sont également une bonne source d'énergie, de vitamine A, de zinc, de calcium et de protéines.

La croissance démographique, les exigences relatives à la santé, à la qualité de la vie, aux applications industrielles et la flambée du prix de blé, nous poussent à nous orienter vers la recherche et l'exploitation des nouvelles sources de farines de produits amylacés à hauts rendements ou à haute fonctionnalité nutritionnelle. Ces dernières années, on assiste à un regain d'intérêt pour des cultures non conventionnelles présentant des atouts potentiels aussi bien pour le développement local des populations que pour l'industrie (Kapseu, 1993 ;Silou *et al.,* 2004).

En effet, plusieurs études ont été réalisées sur la farine de patate douce afin de mettre en évidence son intérêt nutritionnel et économique, et d'optimiser les procédés de transformations de la patate douce en farine. Ahmed *et al.* (2010) ont étudié les effets de prétraitements et des températures de séchage sur la farine de patate douce. Les résultats ont montré que la bonne qualité de la farine pourrait être produite après trempage dans une solution de chlorure de calcium et séchage à 65 °C. Les auteurs ont également mis en évidence l'influence de l'épluchage, de la température (55 - 65 °C) de séchage et des prétraitements sur les propriétés physico-chimiques et la qualité nutritionnelle de la farine de patate douce. On pourra aussi noter que les propriétés physico-chimiques et de gélatinisation de patates douces de la Papouasie-Nouvelle-Guinée et l'Australie ont été caractérisées (Waramboi *et al.,* 2011). En outre, ces résultats ont permis de dire que la farine de patate douce est un ingrédient prometteur dans de nombreuses préparations alimentaires traditionnelles et en industrie; par conséquent, leurs propriétés physico-chimiques, rhéologiques et fonctionnelles devraient être scrupuleusement caractérisées.

La consommation des produits de boulangerie, notamment celle du pain, occupe une place prépondérante dans le régime alimentaire des populations, même dans les pays non producteurs de blé. Ces derniers deviennent de plus en plus tributaires des nations productrices de blé, particulièrement lors des crises économiques où le blé revient très cher à l'importation (avec 500 francs Cfa, le prix au kilogramme de farine de blé au Congo-Brazzaville). Pour pallier cette situation, il se développe de plus en plus des technologies de substitution de la farine de blé par des farines provenant des ressources alimentaires locales (Balla, 1999). En effet, les farines panifiables mixtes sont généralement des mélanges de

farines de blé et de farines de céréales (riz, maïs, sorgho...) ou de racines et tubercules (pomme de terre, taro, manioc, patate douce...) dans des proportions variées (Balla, 1999). La farine de patate douce n'est pas panifiable du fait de l'absence du gluten. De ce fait, elle doit être incorporée à la farine de blé pour être utilisée en pâtisserie et boulangerie. De nombreux travaux décrivent l'impact des substitutions totales ou partielles de la farine de blé par de la pâte, de la farine ou de l'amidon de patates douces dans des applications de boulangerie et de confiserie, ainsi que pour la production de nouilles et de céréales pour le petit-déjeuner.

En effet, en 1970, les travaux de Sammy ont porté sur les substitutions de farine de patate douce à des taux de 15 % dans le pain et 20 à 30 % dans les produits de pâtisserie. Aucun effet néfaste n'a été démontré, mais une amélioration des paramètres de cuisson a été obtenue en utilisant du monostéarate de glycérol ou du monopalmitate de glycérol à 1 % (p/v). Collins & AbdulAziz (1982) ont préparé des beignets cuits au four en substituant la farine de blé par 7 à 21 % de farine ou de purée de patate douce. La texture et le volume spécifique ont été modifiés, mais dans l'ensemble la qualité sensorielle n'a pas été réduite. L'incorporation de 15 % de farine de patate douce a produit un bon volume de pain, ainsi que des caractéristiques acceptables de la croûte et de la mie. Parmi plusieurs produits à base de purée de patate douce, le pain produit à partir de farine composite blé-patate douce présente un bon niveau d'acceptabilité général (Trejo-González *et al.,* 2014).

L'objectif de cette thèse est de valoriser la patate douce sous forme de farines afin d'éviter les pertes post-récolte, et ainsi créer de nouvelles opportunités pour l'utilisation de la farine de patates douces. Pour atteindre cet objectif principal, ce travail de thèse se donne les objectifs suivants :

- Déterminer les modes de prétraitement et d'établirl'influencedes prétraitements sur les propriétés physicochimiques, fonctionnelles et thermiquesdes farines de patate douce ;
- Mettre au point de nouveaux produits à haute valeur ajoutée (farine,pain);
- Déterminer l'influence du taux de substitution sur les propriétés physico-chimiques et organoleptiques des pains composés (à base d'un mélange blé/patate douce).

Ainsi, la première partie de cette thèse est consacrée à l'état de l'art concernant les généralités sur la patate douce, les différents prétraitements utilisés avant le séchage et les modifications qu'ils peuvent apporter à l'aliment. Cette partie bibliographique présente également des généralités sur la panification mixte.

La deuxième partie concerne les matériels et méthodes et présente les appareils et les

différents les méthodes utilisés pour atteindre les objectifs de la thèse.

La troisième partie traite des résultats obtenus concernant l'influence des prétraitements sur les propriétés physicochimiques, fonctionnelles et rhéologiques des farines de patate douce, ainsi que l'effet du taux de substitution de la farine de blé par celle de patate douce.

La conclusion va permettre de statuer sur l'intérêt nutritionnel de la farine patate douce et sur le taux de substitution acceptable. Et enfin, quelques perspectives seront présentées afin de proposer des études permettant de répondre aux questions soulevées par ce travail de thèse.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1. La patate douce

I.1.1. Origine et taxonomie

La patate douce (*Ipomoea batatas.* Lam*)* est une dicotylédone gamopétale appartenant à l'ordre des Polémoniacées et à la famille des Convolvulacées (Cavalcante-Alves, 1996). Parmi les 400 espèces que comporte ce genre, la patate douce est la plus importante sur le plan économique. Cette herbacée est une vigne rampante qui est vivace dans les zones tropicales, mais qui se comporte comme une annuelle dans les régions tempérées. Elle est originaire d'Amérique tropicale, d'où Christophe Colomb l'a rapportée en Espagne en 1492 (Srisuwan *et al*., 2006). Les Portugais l'ont rapidement introduite dans leurs colonies d'Afrique. Les études taxonomiques et évolutives récentes, ainsi que les découvertes archéologiques des deux dernières décennies indiquent la domestication et la culture de cette espèce dans des centres de diversification. Le centre primaire de diversification se trouve au nord-ouest de l'Amérique latine (Colombie, Equateur et Pérou) et dans certaines parties de l'Amérique centrale, comme le Guatemala, où existe une grande diversité de patates douces autochtones. On trouve également des centres de diversification secondaires en Asie (particulièrement en Chine et dans le sud-est asiatique), en Océanie (Nouvelle-Guinée) et en Afrique de l'est (Huaman *et al.,* 1999). Actuellement, la patate douce est une culture que l'on rencontre partout sous les tropiques.

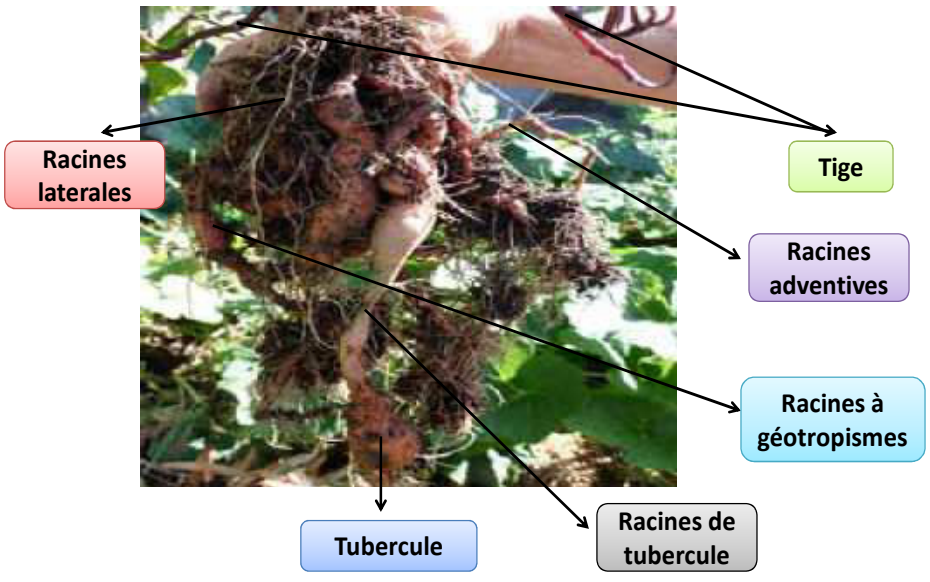
Cette plante, qui fournit un aliment de meilleure qualité que la plupart des autres plantes cultivées pour leurs racines et tubercules, a été et est encore un aliment de base traditionnel important pour les populations habitant les régions côtières et les îles du bassin de l'océan Pacifique (Bell *et al*., 2000).

I.1.2. Description botanique et culture

La patate douce se reproduit exclusivement par voie végétative, soit à partir de tubercules entiers ou de fragments de ceux-ci, soit à partir de portions de tiges de 20 à 50 cm de long comportant 3 à 4 nœuds (Cavalcante-Alves, 1996). Elle a un cycle végétatif court, entre 120 et 210 jours (Gura, 1991).

Les racines sont de plusieurs types (Figure 1), (Bouhassan, 1984) :

- les racines adventives : ce sont des racines qui se développent directement sur la tige. Elles comprennent les racines à géotropisme positif ou celles qui sont porteuses de tubercules (racines fines et épaisses) dont certaines peuvent accumuler des réserves pour former les racines tubérisées ;
- les racines latérales, qui apparaissent sur des racines déjà existantes ;
- les racines de tubercule, qui prennent naissance sur les tubercules.



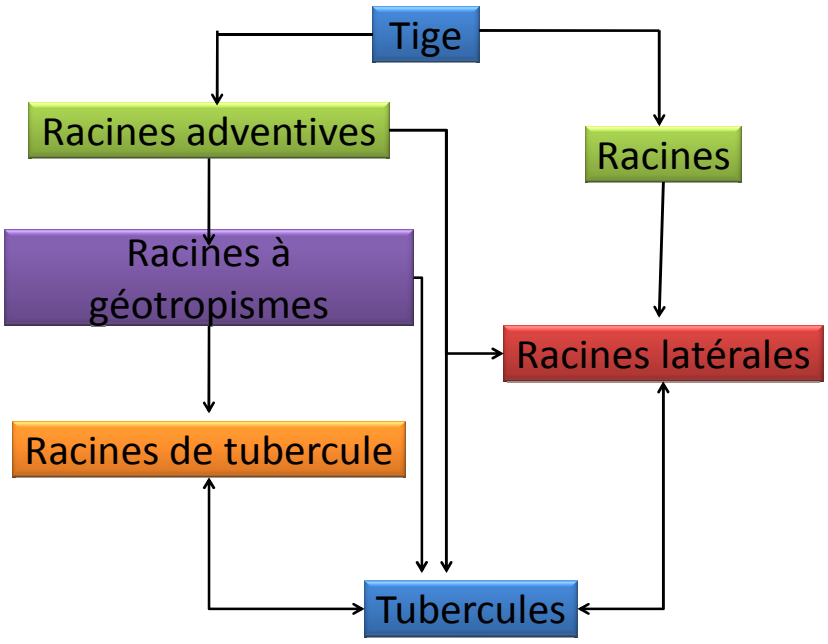


Figure 1 : Schéma des différents types de racines.

Les feuilles sont simples et alternées. Elles ont plusieurs formes : rondes, triangulaires, divisées… En conditions normales, la floraison de patate douce dépend des variétés : certaines ne fleurissent pas ou peu, tandis que d'autres donnent beaucoup de fleurs.

La formation des tubercules peuvent être en clusters autour de la tige, de manière disperse ou très disperse. On peut observer plusieurs types de forme de tubercules : ronde, ronde elliptique, ovale, subovale, oblongue, longue oblongue, longue elliptique, courbée. La Figure 2 présente les différentes formes de patate douce.

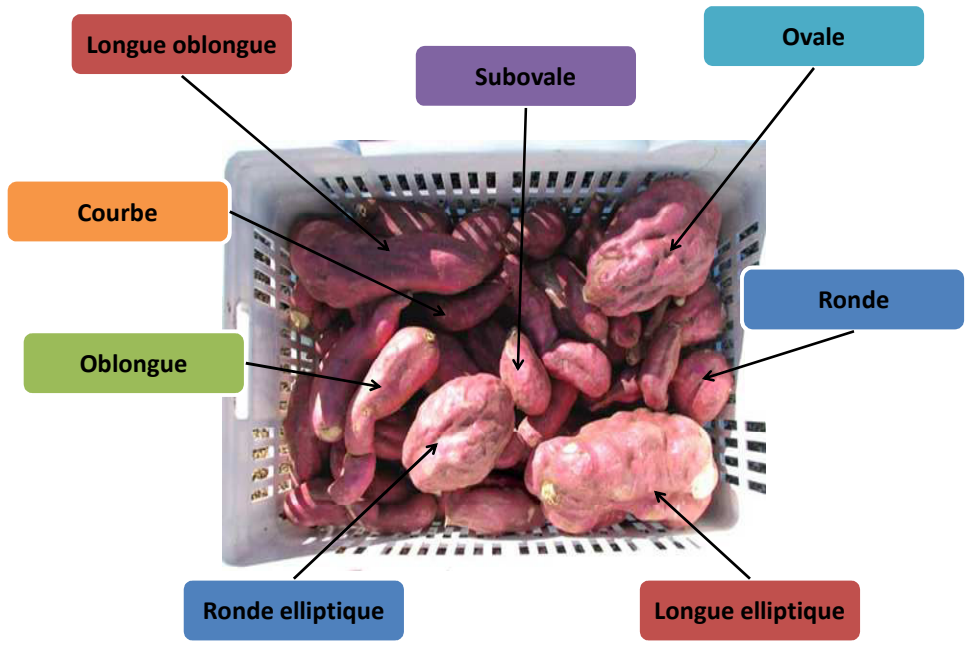


Figure 2 : Les différentes formes de patates douces

Sur le plan climatique, la patate douce est une plante extrêmement flexible (Cheikh, 1984). Elle peut être cultivée à des altitudes comprises entre le niveau de mer et des altitudes jusqu'à 2500 m, entre les latitudes 40°N et 32°S. Elle a besoin d'une pluviométrie abondante et régulière d'environ 600 mm/an, ainsi que d'un ensoleillement abondant. Elle exige une saison de croissance présentant 4 à 5 mois sans gel pour produire des racines tubérisées de gros calibre. Des températures de 15 °C ou moins donnent une croissance faible ou nulle (Chée *et al*., 1992). Elle est cultivable même sur les sols pauvres, mais elle préfère un sol profond, frais et riche en humus (Cavalcante-Alves, 1996) et pousse mieux sur des sols aérés de type sableux avec des pH compris entre 5 à 7,8 (Chée *et al*., 1992). Elle n'exige pas beaucoup de fertilisants et autres intrants et elle est relativement résistante aux stress environnementaux (Shimada & Otani, 2007).

La taille et la forme des feuilles de patate douce sont extrêmement variables (Figure 3). Chaque plante produit quelques tubercules sur le site de plantation (10 environ, cf. Figure 4). Ces tubercules pèsent entre 100 g et plus d'un kilogramme et contiennent un latex blanc et gluant. Selon la variété, ils sont de couleur variable, avec de nombreuses nuances de blanc, de jaune, de rose et de pourpre (Onwueme, 1978).

Figure 3 : Champ de patate douce

Figure 4 : Tubercules de patates douces

I.1.3. Production et utilisation

La culture de la patate douce est caractérisée par une production à petite échelle, en tant qu'activité économique secondaire, dans les unités agricoles de nombreux pays. Pour cette raison, la technologie utilisée a une faible productivité. En outre, l'apparition de maladies et de parasites et l'absence de cultivars présélectionnés peut conduire à la fois à une faible productivité et une qualité médiocre (Antonio *et al.*, 2011).

La culture de la patate douce est de faible coût et facile d'entretien, ce qui la rend très populaire auprès de la population rurale, et lui confère une grande importance sociale, puisqu'elle contribue de manière décisive à l'approvisionnement alimentaire des populations les plus pauvres. Bien que la patate douce soit encore utilisée de façon intensive dans les régions tropicales et sous-tropicales des Amériques et qu'elle soit devenue une culture importante dans les états du sud-est des États-Unis, sa production est maintenant concentrée en Asie.

Le tableau 1 résume les données statistiques de la production de patate douce de différentes régions du monde (FAOSTAT, 2008). Elle est cultivée dans 114 pays du monde, sa production s'élevant en 2006 à approximativement 123 millions de tonnes sur une surface totale cultivée d'environ 9 millions d'hectares (FAOSTAT, 2008). La Chine reste le plus grand producteur avec plus de 100 millions de tonnes sur une surface d'un peu moins de 5 millions d'hectares, soit environ 87 % de la production mondiale et 53 % des surfaces cultivées. En Afrique, la production totale est de 8,5 millions de tonnes, ce qui correspond à moins de 10 % de la récolte mondiale.

Les pays en voie de développement produisent 98,5 % de la production mondiale, ce qui justifie son statut de « culture des pauvres ». Les rendements varient largement en fonction des zones géographiques et oscillent entre plus de 21 t/ha en Chine et seulement 4 t/ha en Afrique. Sur le continent latino-américain, le Brésil apparaît comme le principal producteur, correspondant à une production annuelle de 500000 t sur 46000 ha (Soares *et al.*, 2002 ; Da Silva *et al.,* 2005; FAOSTAT, 2008).

Tableau 1 : Statistiques de la production de patate douce (d'après FAOSTAT, 2008)

	Production (t)	**Surface cultivée (ha)**	**Rendement par hectare (kg/ha)**
Monde	$1,2.10^9$	9.10^6	$1,4.10^4$
Asie	$1,1.10^8$	5.10^6	2.10^4
dont Chine	10^8	5.10^6	$2,1.10^4$
Afrique	$1,3.10^7$	3.10^6	$4,1.10^3$
Amérique du Nord	$7,4.10^5$	4.10^6	2.10^4
Amérique centrale	$6,3.10^4$	3.10^3	2.10^4
Amérique latine et Caraïbes	2.10^6	2.10^5	$8,3.10^3$
Europe	8.10^4	6.10^3	$1,2.10^4$
Pays développés	2.10^6	8.10^4	$2,2.10^4$
Pays en voie de développement	$1,2.10^6$	9.10^6	$1,4.10^4$
Pays les moins développés	9.10^6	2.10^6	$4,3.10^4$

Les plus grands producteurs africains sont (Bell *et al*., 2000) :

- l'Ouganda, avec plus de 2 millions de tonnes,
- le Nigeria, avec 1,5 million de tonnes,
- le Rwanda, avec 1 million de tonnes,
- le Kenya, avec plus de 700000 tonnes,
- et le Burundi, avec près de 600000 tonnes.

La patate douce est consommée de plusieurs façons, notamment directement sans transformation industrielle. La méthode la plus traditionnelle est une cuisine, où la patate douce est consommée avec ou sans assaisonnement, en remplacement du pain ou d'autres féculents. La cuisson et la réduction en purée sont utilisées comme ingrédient principal ou comme substitut partiel de la farine de blé dans la fabrication de conserves et plats salés, tels que purée, pâtisseries et tartes salées gâteaux, (Antonio *et al*.,2011).

La patate douce est largement utilisée en raison de sa facilité de culture, de sa rusticité et de sa grande capacité d'adaptation. En outre, la patate douce constitue une excellente alternative pour l'alimentation animale pour l'agro-industrie.

Parmi les différentes utilisations de la patate douce, le tubercule peut être inclus dans les produits «prêts à l'emploi», destinés à approvisionner le marché de la restauration rapide et la vente au détail (Moretti *et al*.,2002). La possibilité de produire des farines pré-gélatinisées et des céréales de petit-déjeuner (Borba, 2005) devrait également être envisagée. En Asie, particulièrement en Inde, au Japon et en Chine, il est fréquent de trouver des amidons du commerce obtenus à partir de divers tubercules tropicaux, tels que la patate douce, l'igname… (Cereda *et al*.,2001)

Au Congo-Brazzaville, les tubercules et les feuilles de la patate douce sont consommés. Dans le cas des tubercules, l'ébullition est le mode de cuisson dominant depuis des années. Presque 98% des ménages pratiquent ce mode de cuisson. La grillade est aussi utilisée mais de manière plus marginale.

Malgré le fait que la patate douce est meilleur marché que d'autres cultures, cette ressource abondante est encore mal utilisée. Cependant, dans la plupart des pays en voie de développement, la patate douce est principalement consommée cuite dans l'eau.
Les tiges et les feuilles servent aussi de fourrage vert ou sec, principalement pour les bovins, les tubercules des variétés très riches en amidon étant plutôt utilisées pour les porcs. Dans certains pays, cette utilisation est assez importante, ainsi par exemple à Madagascar, 30 % de la production est destinée à l'alimentation animale (Bell *et al*., 2000).
La patate douce peut également servir à la production d'alcool. En effet, outre l'amidon, les tubercules de patate douce contiennent aussi de l'ordre de 6 % de saccharose (Mathieu-Daudé *et al.,* 2001) qui peut servir à la production d'alcool par fermentation et distillation. La présence de saccharose rend également les tubercules aptes à la production de fécule qui, mélangée à du sucre, donne un sirop utilisé en brasserie (Mathieu-Daudé *et al*., 2001). Par ailleurs, la patate douce est utilisée dans la production d'acide lactique ou polylactique destiné à la fabrication des plastiques biodégradables (Adam, 2005).

I.1.4. Composition chimique et valeur nutritive

La composition chimique de la patate douce dépend de la variété, du type de sol et la période de culture (Ruiz, 1984). C'est un légume nutritif et une excellente source de vitamines. Le Tableau 2 présente la composition chimique et nutritionnelle de tubercules de patate douce.

Tableau 2 : Composition moyenne des tubercules de patates douces

Composés	Unité	Nepa (2006)	Unifesp (2008)	Soares *et al.* (2002)	Ruiz (1984)	Antonio (2006)
Energie	kcal/100g	114,0	105,0	110-125	68-70	70
Humidité	g/100 g	70,0	73,0	59,1 - 77,7	-	-
Protéines	g/100g	1,0	2,0	2,0 - 2,9	4,13	-
Lipides totaux	g/100g	0	0	0,3 - 0,8	0,87	-
dont Cholestérol	g/100g	0	-	-	-	-
Glucides	g/100g	28,0	24,0	13,4-29,2	90,13	33,5
Fibres	g/100g	2,6	3,0	1,3-3,8	2,19	2,9
Cendres	g/100g	0,9	1,0	0,6-1,7	2,68	1,0
Minéraux						
K	mg/100g	340,0	204,0	273,0	-	420,0
P	mg/100g	36,0	28,0	49,0	-	-
Ca	mg/100g	21,0	22,0	30,0	-	-
Mg	mg/100g	17,0	10,0	24,0	-	
Na	mg/100g	9,0	13,0	13,0	-	-
Fe	mg/100g	0,4	1,0	0,8	-	-
Mn	mg/100g	0,2	-	-	-	-
Zn	mg/100g	0,2	-	-	-	
Cu	mg/100g	0,11	-	-	-	-
Se	mg/100g	-	1,0	-	-	-
S	mg/100g	-	-	26,0	-	-
Vitamines						
Thiamine	mg/100g	0,06	-	0,10	-	-
Riboflavine	mg/100g	<0,02	-	0,06	-	-
Acide ascorbique	mg/100g	-	23,0	25,0-40,0	40,0	-
β-carotène	mg/100g	-	-	1,0-12,0	0,512	0,682

« - » : les valeurs n'ont pas été déterminées par les auteurs.

La patate douce est énergétique, riche en vitamines et en minéraux (potassium majoritairement), en fibres alimentaires et en protéines. En outre, elle est composée de plus de 80 % de glucides(en base sèche), principalement sous forme d'amidon. Selon les travaux de Nepa (2006).

Sa teneur en sucres et en amidon est fortement dépendante de la variété : les glucides varient de 13,4 à 29,2 % dont 4,8 à 7,8 % de sucres réducteurs, ce qui fait évoluer sa valeur nutritionnelle entre110 et 125 calories pour 100 g. C'est également une bonne source de vitamines A et B (cette dernière étant sous différentes formes chimiques : thiamine, riboflavine, niacine). Sa teneur en eau est importante (59,1 - 77,7 %) et elle contient peu de protéines (2,0 - 2,9 %) et de lipides (0,3 - 0,8 %).

La patate douce contient des minéraux variés : calcium (30 mg / 100 g), phosphore (49 mg / 100 g), potassium (273 mg / 100 g), magnésium (24 mg / 100 g), soufre (26 mg / 100 g) et sodium (13 mg / 100 g). Selon les données d'UNIFESP (2008), les feuilles de la patate douce sont également très nutritives et peuvent être consommées comme n'importe quel autre légume vert.

Les tubercules frais contiennent généralement une faible teneur en matières solides solubles, mais celle-ci tend à augmenter au cours du stockage sous l'effet de la déshydratation. La patate douce fraîche contient entre 16 et 40 % de masse sèche, composée principalement de glucides (entre 75 et 90 % de glucides totaux) sous forme d'amidon, de sucres, de cellulose, de pectine et d'hémicellulose (Bouwkamp, 1985).

D'un point de vue économique, la patate douce possède un avantage souvent négligé : son énorme productivité en termes de matière sèche et d'apport énergétique, qui dépasse celle des autres aliments de base répandus dans sa zone de production (Tableau 3).

Tableau 3 : Productivité de la patate douce en termes de matière sèche et d'apport énergétique par rapport aux tubercules et céréales de consommation courante (Bell *et al*., 2000).

Culture	Matière sèche (kg/ha/jour)	Apport énergétique (10^3 kcal/ha/jour)
Patate douce	**22**	**70**
Pomme de terre	18	54
Igname	14	47
Manioc	13	27
Riz	18	49
Blé	14	40

Si l'on considère le champ en tant que ressource à utiliser suivant des critères économiques, la productivité de la patate douce constitue un atout qui devrait jouer un rôle important dans la politique de promotion de la sécurité alimentaire, en particulier dans les régions où la nature du sol constitue un des facteurs limitant de la production agricole (Bell *et al*., 2000).

La patate douce joue un rôle secondaire dans la production agricole et la nutrition. Toutefois, l'adaptabilité de la patate douce à différentes zones climatiques, le peu d'intrants nécessaires à sa production, la facilité de sa culture, son cycle végétatif court et sa richesse nutritive en termes énergétiques offrent à cette plante des possibilités exceptionnelles de production pour générer de bons revenus. Pour obtenir un bon stockage des tubercules de patate douce, il faut également limiter les altérations biochimiques et donc éventuellement adapter les procédés de stabilisation ou tout au moins mettre en œuvre des procédés de prétraitement ; c'est pourquoi ils seront détaillés ci-dessous.

I.1.5. Conservation

Dans les pays développés, après la récolte des patates douces, on pratique le pré-stockage, qui s'effectue idéalement à 30 °C avec une humidité relative de 80 à 90 %. Ce dernier protège les racines de nombreuses maladies pendant le stockage et prolonge la durée de conservation après le stockage de la racine. Par ailleurs, le pré-stockage améliore la saveur et la texture de la racine. . Après le pré-stockage, les patates douces peuvent être stockées pendant 4 à 7 mois dans des conditions appropriées, notamment avec une bonne ventilation. On nettoie les patates douces en les brossant ou en les lavant et parfois même en les cirant avant de les empaqueter dans des boîtes, des caisses ou des paniers destinés au marché (Hayma, 2004).

Un des problèmes majeurs posés parla production de la patate douce sous les tropiques est celui de sa conservation. Les patates douces sont attaquées par un certain nombre de pourritures, dont la pourriture noire causée par le champignon *Ceratocystis fimbriata*. Ces derniers détériorent les patates douces après la récolte, lors du transport et durant la conservation, causant des pertes très importantes dans les lots expédiés (Bell *et al*., 2000).Le stockage dans les exploitations agricoles est difficile et les tubercules sont généralement ramassés et consommés au cours de la courte période de récolte. Cependant, une extension de la durée de conservation pourrait prolonger le délai de commercialisation de ces tubercules, ainsi qu'améliorer la sécurité alimentaire et les revenus des producteurs. Pour inhiber la dégradation et permettre une bonne conservation, plusieurs techniques ont été préconisées. Certaines (traitements chimiques, blanchiment…) visent à réduire la charge microbienne, d'autres à freiner les réactions d'altération biochimiques, ainsi que l'action des micro-organismes (procédés de déshydratation, tels que le séchage).Après la récolte, les patates douces sont soumises à des températures, humidité favorisant la cicatrisation des parties abîmées (après qu'on les ait sorties de terre, par exemple).

Dans certaines régions d'Afrique, les tubercules sont souvent épluchés, tranchés et séchés pour prolonger leur conservation (Antonio *et al*., 2011).La durée de conservation peut être prolongée lorsque les produits sont convenablement conditionnés avec un emballage étanche à l'eau, à l'air et aux arômes (Bit, 1980).

- ✓ ***Teneur en eau et activité de l'eau des aliments***

La teneur en eau, ou humidité, d'un aliment est la quantité d'eau perdue lorsqu'on l'amène en équilibre vrai avec une pression de vapeur nulle (humidité relative égale à 0 %). La quantité d'eau perdue est constituée de l'eau fixée par des liaisons hydrogène (eau de sorption, eau

retenue par effet capillaire ou osmotique, eau des solutions, eau occluse dans des mailles cristalline et eau de cristallisation), l'eau chimiquement liée par des liaisons covalentes étant exclue. Les tubercules à racine ou à tige ont des exigences de stockage particulières à cause de leur teneur en humidité élevée (60 à 80 % quand ils sont frais). Il faut éviter d'une part la dessiccation et d'autre part la pourriture causée par une humidité trop élevée de l'air environnant les tubercules. La teneur en eau est le principal facteur de variation de la densité énergétique et de la teneur en nutriments des tubercules. Elle détermine, en fonction des particularités anatomiques et physiologiques du tube digestif des consommateurs, les limites de quantités pouvant être ingérées. Les tubercules vivants continuent à respirer assez intensivement et cette respiration augmente avec la température. Si les tubercules sont stockés à une température élevée et selon une méthode étanche à l'air, le manque d'oxygène fait par exemple noircir le cœur des patates douces. Plus la température du produit est élevée, plus l'aération est nécessaire (Hayma, 2004).

Le concept d' « activité de l'eau (a_w) » a été défini dès 1953 par W. J. Scott (Scott, 1953) pour l'industrie agro-alimentaire afin de qualifier l'état hydrique des produits à humidité intermédiaire. C'est l'une des propriétés les plus importantes du traitement, de la conservation et le stockage des aliments. On quantifie le degré de liaison de l'eau avec le produit, et par conséquent, sa disponibilité pour agir en tant que solvant et participer à des réactions chimiques, biochimiques et microbiologiques (Labuza, 1980).

Contrairement aux mesures quantitatives comme la teneur en eau gravimétrique qui quantifie la quantité totale d'eau dans un produit, la mesure de l'a_w est un indicateur de l'intensité des interactions entre l'eau et les autres molécules de l'aliment, telles que les glucides, les lipides et les protéines ; il s'agit d'une analyse qualitative. Ainsi, l'a_w illustre le statut de l'énergie de l'eau et, par conséquent, son degré de disponibilité et sa mobilité dans un produit (Baldet & Colas, 2012).

- ✓ ***Altérations biochimiques pendant le stockage des aliments***

On entend par altération des aliments ou pourrissement toute modification qui leur fait perdre la qualité désirée et les rend impropres à la consommation. Les techniques de conservation alimentaire sont appliquées en vue de maîtriser et limiter la perte de la qualité des aliments.

Cette détérioration peut être provoquée par des microorganismes et/ou diverses réactions physico-chimiques qui ont lieu après la récolte ou l'abattage. Tout procédé de conservation a cependant pour priorité de réduire au minimum les risques d'apparition ou de développement des microorganismes provoquant l'altération des aliments ou des intoxications alimentaires (Alzamora *et al*., 2004).

L'altération post-cueillette des fruits et légumes peut prendre les formes suivantes : pourriture due aux moisissures brunes, bleues, roses ou grises; croissance superficielle de moisissures; noircissement des tissus (anthracnose); pourriture aigre; pourriture du bout de la tige ; pourriture due aux levures... L'apparition de la pourriture est généralement associée à la production microbienne d'enzymes dégradant les parois cellulaires. Au fur et à mesure que les tubercules mûrissent, ils deviennent plus sensibles aux effets des microorganismes provoquant l'altération, d'une part, parce que leur production de composants antifongiques diminue, et d'autre part, à cause de la dégradation des parois cellulaires. L'altération est également favorisée par des conditions de température d'humidité élevées après la récolte.

La disponibilité de l'eau (a_w), le pH et la température sont les principaux facteurs qui contrôlent la rapidité avec laquelle s'effectuent l'altération des aliments et la croissance des microorganismes (Alzamora*et al*.,2004). Lorsque l'a_w augmente, l'énergie de liaison entre l'eau et les autres molécules décroît. Celle-ci devient alors de plus en plus mobilisable pour les réactions chimiques indésirables ; il s'agit en particulier des phénomènes d'oxydation et du développement de bactéries ou de champignons (Figure 5). Ces réactions peuvent alors rapidement induire la dégradation ou simplement un vieillissement accéléré du produit (Baldet & Colas, 2012).

Le rancissement est une des principales réactions de détérioration des aliments à faible ou moyenne teneur en eau ; il s'observe même pour des activités d'eau comprises entre 0 et 0,2 environ. L'oxydation des lipides constitue souvent le facteur limitant de la conservation de certains aliments déshydratés ou à teneur moyenne en eau (Bolland & Gee, 1946).

La croissance des bactéries est généralement impossible lorsque l'a_w est inférieure à0,9. Les moisissures et les levures sont inhibées respectivement vers une a_w de 0,7 et 0,8, sauf certaines moisissures et levures osmophiles qui peuvent se développer jusqu'à des a_w de 0,6.

L'addition d'antioxydants ou une élévation de la teneur en eau peut agir sur les réactions d'altération, en particulier le brunissement non-enzymatique.

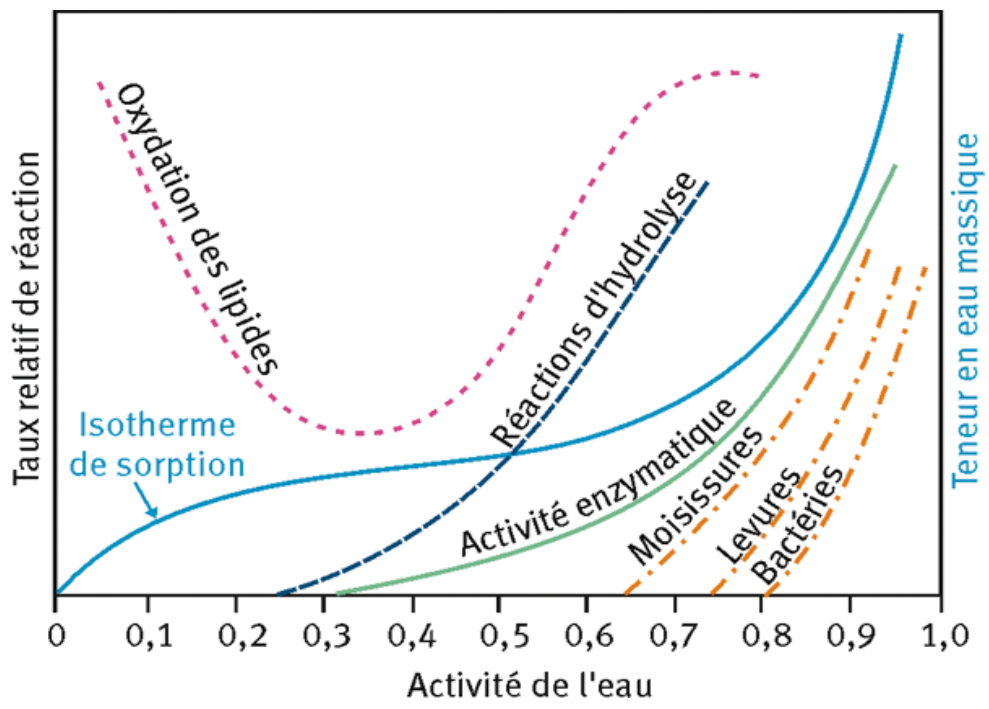


Figure 5 : Taux relatifs de réaction des principaux agents de dégradation des matrices alimentaires en fonction de l'a_w (Labuza *et al.*, 1972)

L'eau intervient dans les réactions chimiques (comme substrat dans les cinétiques de réaction) et dans de nombreux processus physiques d'évolution des aliments (facteur de mobilité dans l'évolution de la structure physique de l'aliment). Lorsqu'elle est rare ou inexistante, les micro-organismes ne peuvent pas se développer. C'est pourquoi le séchage est une des méthodes permettant d'empêcher la détérioration des aliments.

I.1.6. Traitements et prétraitements

La décoloration est un problème majeur dans la qualité des produits et est causée par deux mécanismes différents. Le premier mécanisme est le brunissement enzymatique, qui correspond à la formation de coloration brune par oxydation de groupements polyphénols par des enzymes, tandis que le second est le brunissement non-enzymatique qui intervient à température élevée lorsque les sucres réducteurs se condensent avec les groupements amines (Utomo *et al.*, 2008).

- ***Brunissement enzymatique***

Parmi les caractéristiques organoleptiques des aliments, la couleur est l'une des principales propriétés sur laquelle se base le consommateur pour évaluer la qualité des aliments.

Le brunissement enzymatique est l'une des réactions qui affecte le plus la couleur des fruits et des légumes. Cependant, le brunissement enzymatique est aussi une réaction très néfaste pour le marché des fruits et légumes. Mal contrôlé, ce phénomène est responsable de plus de la moitié des pertes économiques dans le secteur de la transformation des fruits et légumes (Whitaker & Lee, 1995). Ces lourdes pertes ont suscité un intérêt considérable dans la compréhension et le contrôle de l'activité de la polyphénol-oxydase dans les aliments. Les salades et autres légumes feuillus, les pommes de terre et autres tubercules riches en amidon tels que les patates douces et l'igname, de même que les champignons, les pommes, les bananes, les pêches et encore beaucoup d'autres fruits ou légumes sont particulièrement sensibles au brunissement enzymatique. Ces pertes sont d'autant plus cruciales que la détérioration des produits à lieu en fin de chaîne de production, peu de temps avant l'achat par le consommateur, alors que des coûts (stockage, manutention, transport) ont déjà été engendrés. Il est donc primordial de contrôler le brunissement enzymatique depuis la récolte jusqu'à l'achat par le consommateur afin de minimiser les pertes et maintenir la valeur économique du produit.

Les premières étapes du brunissement enzymatique correspondent à la transformation enzymatique de composés phénoliques en polymères colorés, le plus souvent bruns ou noirs. Les enzymes responsables du brunissement appartiennent au groupe des phénolases, qui ont le cuivre comme groupement prosthétique (Cheftel et Cheftel, 1984).

Ces enzymes ont en effet besoin du dioxygène pour être actives. La Figure 6 montre le chemin réactionnel du brunissement enzymatique. Ce mécanisme commence par une hydroxylation des composés phénoliques, suivie d'une oxydation enzymatique menant à la formation de quinones (orthoquinones de couleur rouge). Les quinones et les amines réagissent pour donner les composés bruns.

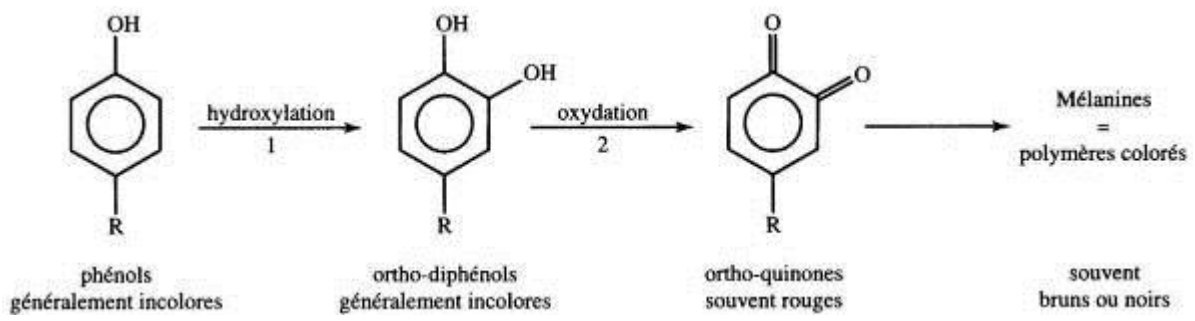


Figure 6 : Schéma réactionnel du brunissement enzymatique.

- ***Réaction de Maillard***

Le brunissement non-enzymatique ou encore réaction de Maillard (Maillard, 1912), désigne un ensemble complexe de réactions résultant d'une interaction entre les glucides (les sucres réducteurs) et les protéines (les acides aminés), provoquant la formation de pigments bruns ou noirs (mélanoïdes) et de substances volatiles et sapides influençant fortement les qualités sensorielles d'un produit (Figure7).

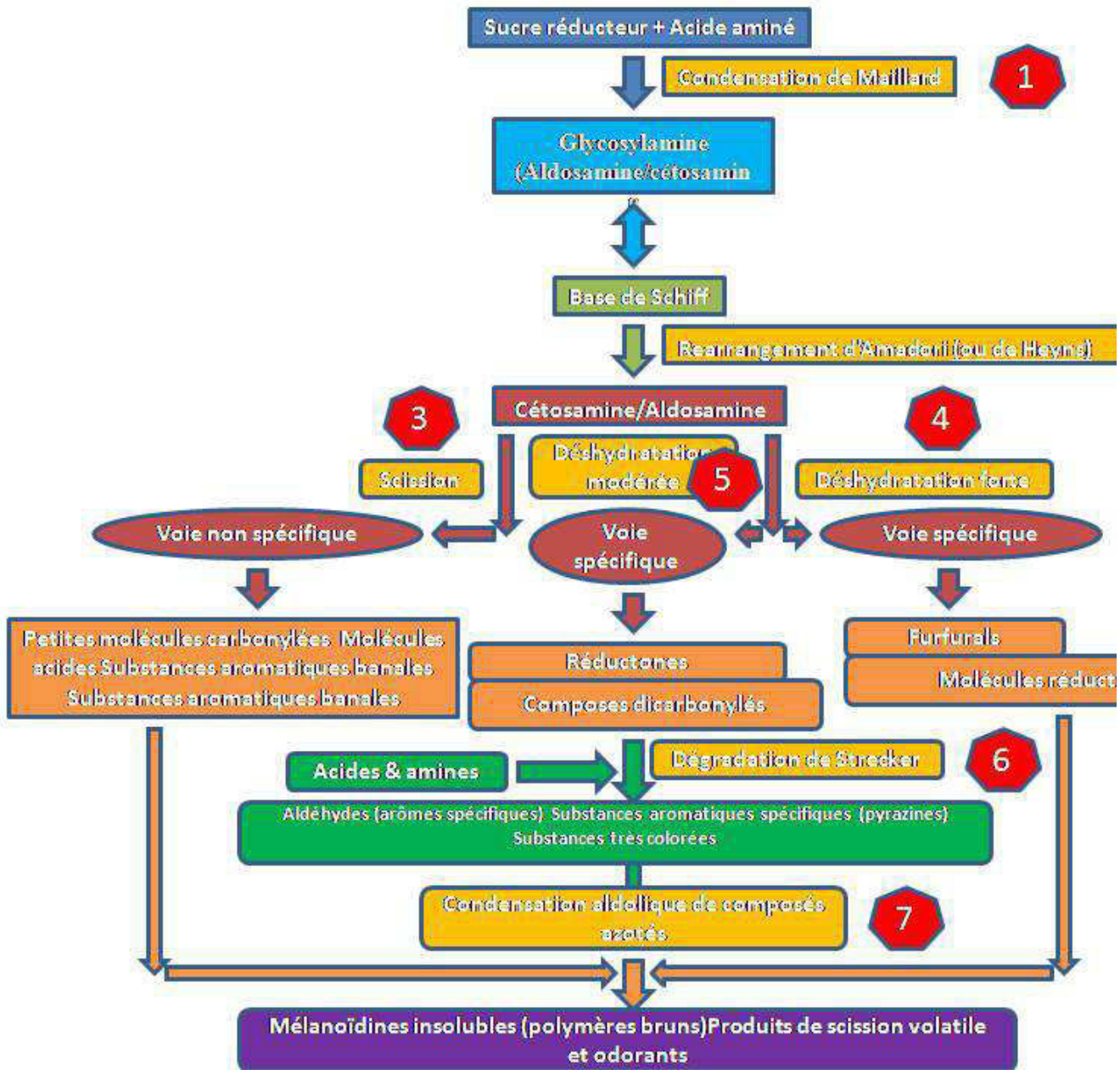


Figure 7 : Etapes de la réaction de Maillard (Machiels & Istasse, 2002)

Elle a lieu lors du stockage des aliments ou plus fréquemment lors de leur traitement par des processus thermiques. En plus de son rôle prépondérant dans le développement des flaveurs, il a aussi été démontré qu'elle est responsable de la formation de couleurs, d'antioxydants (Manzocco *et al*., 2011) et d'agents cancérigènes (Nagao *et al.,* 1979). Elle peut aussi réduire de manière drastique la valeur nutritionnelle des aliments en diminuant la teneur et donc la disponibilité des acides aminés essentiels (Kaanane &Labuza, 1989; Machiels & Istasse, 2002). La réaction de Maillard se déroule selon les étapes suivantes :

- ***Déshydratation modérée et dégradation de Strecker*** : Lorsque la déshydratation est plus modérée, des substances réductrices sont obtenues : réductones et déshydroréductones. Celles-ci réagissent avec des acides aminés et entraînent leur dégradation par décarboxylation et transformation en aldéhydes : c'est la réaction de Strecker. Elle implique une désamination oxydative et une décarboxylation d'un acide aminé en présence d'un dicarbonyle (Machiels *et al*., 2000). La condensation de deux aminocétones, produits secondaires de la réaction de Strecker, donne des pyrazines, substances aromatiques très actives. Elles sont très présentes dans les produits alimentaires auxquels elles donnent des arômes particuliers plus ou moins désirables. Les réductones donnent également, par réaction avec des acides aminés puis de multiples réactions intramoléculaires, des composés très colorés (Machiels & Istasse, 2002).

- ***Scission ou polymérisation*** : elle conduit à des produits volatils et odorants, par polymérisation : les mélanoïdines. Ces produits sont caractéristiques de la réaction de Maillard. Il s'agit de polymères bruns, de haut poids moléculaire qui contiennent des furanes et de l'azote et qui peuvent contenir des groupes carbonyle, carboxyle, amine, amide, pyrrole, indole, ester, anhydride, éther, méthyle et/ou hydroxyles (Tressl *et al*., 1998). Leur formation est le résultat de la polymérisation de composés très réactifs produits au cours de la deuxième étape, en particulier des composés carbonylés insaturés et du furfural. La polymérisation de ce dernier en présence d'amines donne des pigments bruns insolubles dans l'eau. En plus de leur contribution à la couleur brune des aliments, ces réactions de polymérisation participent au durcissement des aliments cuits et stockés.

La qualité des tuberculesde patate douce est considérablement affectée par l'activité des enzymes (oxydase de polyphénols). Plusieurs études ont été effectuées dans le but d'améliorer la qualité des sous-produits végétaux afin de faciliter leur utilisation dans les denrées alimentaires. C'est ainsi que les prétraitements sont généralement utilisés pour réduire le temps de séchage et aussi maintenir la qualité des fruits et légumes (Akyildiz *et al*., 2004). Les produits chimiques (par exemple, métabisulfite de sodium, hydroxyde de sodium, acide citrique) et les traitements hydrothermiques (tel que le blanchiment) sont généralement employés pendant le traitement pour préserver et maintenir la qualité des farines.

La durée du traitement est un facteur important à considérer, quels que soient les produits traités. La température et le temps de réaction, le pH et l'humidité du milieu, la présence de métaux, d'oxygène et d'inhibiteurs ainsi que la nature et la concentration des différents réactifs influencent la vitesse de la réaction de Maillard (Machiels & Istasse, 2002). En effet, la vitesse de la réaction est en moyenne doublée lorsque la température augmente de 10 °C. La température est certainement le facteur le plus influent. Mais il faut garder à l'esprit que la réaction a lieu même à 4 °C et donc prendre en compte le couple température-durée. En effet, plus le temps et la température sont élevés, plus l'intensité du brunissement sera importante. Le stockage des aliments à des températures inférieures à 0 °C permet de ralentir la réaction de Maillard. La réaction est également influencée par le pH du milieu et sa teneur en eau. Elle est optimale à des pH allant de 6 à 10 et dans des milieux ayant une humidité relative entre 30 et 70 %. Au-delà de ces valeurs, la réaction est ralentie. D'après Renn & Sathe (1997), le taux de réaction du glucose augmente lorsque le pH augmente. Généralement, la perte d'eau, la réduction de masse et le gain en matière sèche augmentent avec la durée de traitement (Rastogi & Raghavarao, 2004; Kowalska *et al.*, 2008).

I.1.6.1. Traitements chimiques

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour réduire la décoloration enzymatique. Certains auteurs comme Hoover & Miller (1973) ont utilisé un traitement chimique à base de pyrophosphate d'acide de sodium pour faire disparaître le brunissement. Olorunda & Kitson (1977) ont éliminé la coloration des chips de pommes de terre en les plongeant dans le metabisulfite de sodium. Ces prétraitements chimiques doivent être utilisés avec précaution, car selon VanHall (2000), les sulfites peuvent poser des problèmes de santé comme des réactions asthmatiques chez les individus sensibles.

Par contre, il a été démontré que le calcium joue un rôle important dans le maintien de la qualité des fruits et des légumes. Le chlorure de calcium ($CaCl_2$) a montré son efficacité dans la stabilisation de la couleur des tranches de pomme fraîchement coupées (Zhu *et al.*, 2007; Ahmed *et al.*, 2010). Selon Baloch *et al.* (1981), le chlorure de calcium peut réduire le brunissement des carottes séchées et est actuellement utilisé pour les tranches de tomates (Mehdi *etal.*, 2007). Il a été également démontré que le chlorure de calcium fournit ainsi un pouvoir oxydant (Lewicki, 1998). L'influence des prétraitements chimiques sur la qualité de farine de patate douce a été étudiée en utilisant 1% de sulfite d'hydrogène de sodium ou 1 % de chlorure de calcium à différentes températures de séchage (55, 60 et 65 °C).

Ces résultats ont montré que le prétraitement chimique au chlorure de calcium suivi d'un séchage à 65 °C permettait d'obtenir une farine de qualité optimale (Ahmed *et al*., 2010).

I.1.6.2. Traitement physique : le blanchiment

Le blanchiment est un traitement thermique, réalisé par immersion du produit dans un bain d'eau chaude, par passage dans une atmosphère de vapeur ou par chauffage ohmique. Sa durée est de quelques minutes, dans une gamme de températures de 85 à 100 °C. Il permet de détruire les enzymes susceptibles d'altérer les légumes ou les fruits avant leur traitement ultérieur. Il permet de limiter certaines pertes nutritionnelles comme la destruction des vitamines, et permet l'élimination de l'air et des gaz occlus dans les tissus des végétaux améliorant leur aptitude à la réhydratation (Dermesonlouoglou *et al*., 2008). Selon les travaux de Jangchud *et al*. (2003),les propriétés physico-chimiques des farines préparées à partir de deux variétés de patates douces sont affectées par le blanchiment : ce prétraitement limite un certain nombre de modifications sensorielles, tels que des changements de saveur et de couleur. Le blanchiment facilite la gélatinisation de l'amidon conduisant ainsi au changement de la structure interne et influence le taux et la qualité du produit après séchage (Senadeera *et al*., 2000). Le traitement des patates douces à 90 °C pendant 1min permet de supprimer complètement l'activité enzymatique (Lourenco *et al*.,1992).

I.1.6.3. Modifications physicochimiques au cours des traitements

Les modifications qui peuvent survenir au cours des traitements des patates douces sont de plusieurs types et ont des effets soit favorables, soit défavorables sur l'aliment. On peut citer parmi ces modifications celles liées à la couleur, à la saveur et à la texture. On peut noter que les réactions de brunissement non-enzymatique se produisent au cours de traitements thermiques ou durant la conservation prolongée des aliments. Elles sont indésirables quand, suite à un traitement thermique, elles modifient le goût des produits, comme c'est le cas pour les jus de fruits stérilisés et les aliments déshydratés (Adrian *et al*., 2000). Lorsque le blanchiment est opéré à des températures trop élevées pour les constituants cellulaires, accroissant le risque d'altération qualitative et les pertes nutritionnelles par dissolution. Les modifications de couleur sont dues aux réactions de Maillard (brunissement non-enzymatique) qui ont lieu dans les produits lors des traitements technologiques ou de l'entreposage (Cheftel *et al.,* 1983). L'influence des traitements thermiques dépend du cultivar, de la morphologie et la taille du végétal, du stade de maturité, de la température et de la durée du traitement (Paull & Chen, 2000).

La patate douce est connue comme source de glucides, de bêta-carotène, d'acide ascorbique, et de minéraux. Malheureusement, plusieurs de ces nutriments sont altérés durant les traitements thermiques. Au cours de la production des flocons de patate douce, 20 % du bêta-carotène est dégradé, tandis que les pertes d'acide ascorbique s'élèvent à environ 50 – 70 % (Arthur & McLemore, 1955 ; Chandler & Schwartz, 1988). Selon les auteurs Walter *et al.* (1975) et Grabowski *et al.*(2008), la teneur en glucides change également pendant le traitement, car aux températures élevées l'action de l'amylase naturellement présente transforme l'amidon de patate douce en dextrines et sucres.

I.1.7 Transformation des tubercules de patate douce en farine

En Afrique, la patate douce se consomme avant tout à l'état frais. L'absence presque complète de transformations contraste fortement avec la situation en Asie, où les produits de transformation sont aussi variés et nombreux que ceux du manioc en Afrique. Ceci est certainement lié à la difficulté de transformer la patate douce en produits plus attrayants par les moyens traditionnels disponibles en Afrique. Pourtant, les excédents de production, le manque de rentabilité sur les marchés locaux et les pertes élevées lors du stockage exposent les producteurs à une activité peu rémunératrice, d'où la nécessité de réfléchir davantage aux possibilités de transformation. Deux formes de transformations sont répandues en Afrique (Bell *et al.*,2000) :

- ***Transformation en farine***

Le type de transformation le plus courant en Afrique est la conversion en farine. Les tubercules de patates douces, pelés et coupés en petits morceaux, puis séchés et broyés, donnent une farine de couleur diverse suivant les variétés. La patate douce est quelquefois découpée en tranches et séchée au soleil, puis réduite en farine pour la fabrication de pain et de confiseries (Hall *et al.,* 1998). L'incorporation de cette farine aux pâtes alimentaires reste limitée en Afrique. L'utilisation de la farine de patate douce en pâtisserie donne des résultats acceptables, mais difficiles à mettre en œuvre et à diffuser en raison des habitudes alimentaires (Bell *et al.*, 2000) . Au Congo-Brazzaville, des efforts sont entrepris dans ce domaine.

- ***Autres transformations de tubercules***

Il existe une forme de transformation consistant à couper les tubercules en rondelles, à les faire bouillir légèrement et à les sécher au soleil avant de les ensacher pour le stockage (Bell *et al*., 2000). Ces rondelles, qui se consomment ensuite sous forme de chips, peuvent également être servies après une seconde ébullition. La patate douce peut ainsi se conserver pendant 4 à 6 mois. On envisage actuellement l'amélioration de cette méthode et sa vulgarisation potentielle. Les techniques de transformation, telles que la mise en boîte, la congélation ou la déshydratation, ont été développées dans des pays industrialisés comme les Etats-Unis. Certains restaurants de la côte ouest des Etats-Unis proposent des frites de patate douce. Au Japon, une importante quantité de la production totale est utilisée pour la production d'amidon entrant dans le textile, le papier, le cosmétique, le sirop de glucose et en industrie alimentaire. La Chine possèdent en revanche une longue tradition de transformation artisanale de la patate douce en pâtes, cossettes, amidon, gâteaux, ainsi qu'en diverses friandises et autres produits, dont l'Afrique pourrait elle aussi profiter (Bell *et al*., 2000). La National Aeronautic and Space Agency (NASA) effectue des recherches sur la patate douce comme céréales pour le petit-déjeuner. La patate douce est également utilisée dans la production d'acide lactique ou d'acide polylactique (APL), employés dans la fabrication des plastiques biodégradables (Adam *et al.*, 2005).

I.1.8. Séchage

Le séchage provoque une réduction de l'activité d'eau du produit, c'est-à-dire que l'eau devient peu disponible pour les micro-organismes et les réactions chimiques. L'activité de l'eau est l'une des propriétés les plus importantes pour la transformation, conservation et le stockage des aliments. Elle quantifie le degré de liaison de l'eau avec le produit et par conséquent, sa disponibilité pour agir en tant que solvant ou réactif et ainsi participer aux transformations chimiques, biochimiques et microbiologiques (Labuza, 1980).

On considère généralement qu'un produit est stable lorsque son activité d'eau (a_w) est inférieure ou égale à 0,65 (Thebud & Santarius, 1982).

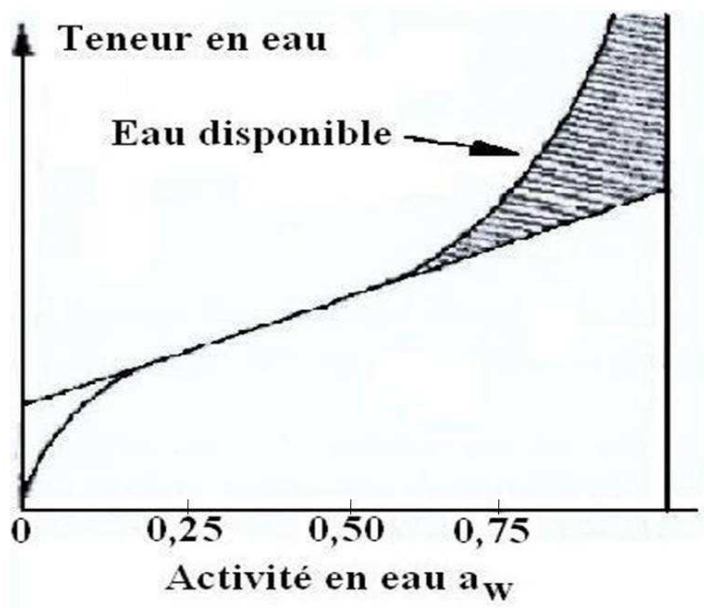


Figure 8 : Isotherme de sorption d'eau.

La courbe de sorption d'eau schématisée dans la Figure8permet de distinguer les fractions d'eau fixée au substrat et d' « eau disponible ». On remarquera qu'à partir d'une a_w de 0,65, aucun microorganisme ne peut se développer. Inversement, au-dessus de cette valeur se développeront des moisissures en fonction de leurs exigences en eau. On retiendra que la majorité des moisissures se forme à partir d'une a_w de 0,85.

Le séchage est probablement la plus ancienne et la plus importante méthode de conservation des aliments pratiquée par l'homme. Ce processus améliore la stabilité des aliments, puisqu'il réduit considérablement l'eau et l'activité microbiologique, ce qui permet de limiter les changements physiques et chimiques pendant le stockage (Hatamipour *et al*., 2007).

L'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaires a de multiples objectifs : accroître la durée de conservation des produits, stabiliser les produits agricoles (maïs, riz, lait...) pour amortir le caractère saisonnier de certaines activités, et transformer les produits par des réactions biochimiques ou biologiques (produits de salaison, touraillage de malt…). En dehors de son objectif premier qui est la conservation, l'élimination d'eau permet de réduire considérablement la masse et le volume des aliments, entraînant ainsi des économies substantielles d'encombrement et de transport.

I.1.8.1. Différentes méthodes de séchage

L'omniprésence du séchage dans les différents domaines d'activités industrielles conduit à ce que le vocable « séchoir » englobe une grande variété d'opérations unitaires différentes. A titre d'illustration, on peut citer le séchage solaire, par atomisation, à l'étuve et bien d'autres, tels que les séchages électriques.

- **Le séchage solaire**

Le séchage solaire est pratiqué depuis longtemps et c'est le séchage solaire direct à l'air libre qui a été adopté de par sa simplicité d'utilisation et sa gratuité. Cette méthode se pratique simplement en exposant directement les produits aux rayons solaires. Ainsi, le tubercule est étalé sur la terre, sur les rocs, les toits des maisons, à même le sol ou sur des nattes.
Cependant, le séchage solaire direct traditionnel présente plusieurs inconvénients :

- La forte dépendance vis-à-vis des conditions climatiques : sécher un produit en saison sèche donne de bons résultats. Lors d'une dégradation momentanée des conditions climatiques (augmentation de l'humidité relative de l'air par augmentation de l'humidité absolue), le séchage à l'air libre s'avère inopérant et les pertes (de produits) sont importantes ;
- La faible qualité nutritionnelle et microbiologique du produit séché, ainsi que ses caractéristiques organoleptiques ;
- Les effets cumulés d'une exposition directe au soleil (pertes en vitamines, brunissement non-enzymatique), de l'activité enzymatique (destruction du produit) et du développement microbien (risque de présence d'éléments pathogènes) donnent des produits finaux indésirables (Rozis, 1995).

- **Le séchage solaire amélioré**

Plusieurs types de séchoirs ont été mis au point dans le monde pour profiter de l'énergie solaire. Dans ces séchoirs solaires, les produits disposés sur des claies sont mis dans une enceinte plus ou moins fermée pour les protéger des souillures et contaminations potentielles. Dans les modèles les plus simples, les claies sont constituées d'un cadre en bois dont le bas est recouvert d'une toile de type moustiquaire en matière synthétique. Les produits à sécher sont posés sur la toile et le tout est recouvert par une autre claie de même type (Ouaouich *et al*., 2005).

Ces dispositions empêchent tout contact du produit avec le milieu extérieur (insectes…). Les claies ainsi recouvertes sont déposées sur un support d'environ 1 m de haut et exposées directement au soleil. Cette méthode possède elle aussi l'inconvénient d'être dépendante de la source d'énergie solaire. La nuit ou par temps nuageux, le processus de déshydratation ralentit et peut même s'arrêter ou s'inverser, allongeant la durée de séchage. De plus, les réhydratations multiples des produits influencent négativement leur qualité. Ceci a amené à concevoir des méthodes de séchage où l'air chaud est produit régulièrement et les paramètres de séchage maîtrisés. C'est le cas du séchage électrique (Ouaouich *et al.,*2005).

- ***Le séchage thermique***

Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermique, trois mécanismes de séchage peuvent être mis en œuvre pour extraire l'eau d'un produit : le séchage par ébullition, par entraînement et par sublimation (lyophilisation).

Le séchage par ébullition consiste à porter le produit à une température telle que la pression de vapeur (P_v) d'eau du produit devient supérieure ou égale à la pression totale ambiante (P_t) régnant dans le séchoir. La température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition.

$$P_v = P_t (\mathbf{1})$$

Il découle de cette définition que la température d'ébullition $T_{éb}$ dépend à la fois de la pression totale et de la pression de vapeur saturante de l'eau, selon la formule :

$$P_v = P_s\,(T_{eb}) = P_t (\mathbf{2})$$

Où P_s (T) est la pression de vapeur saturante de l'eau pure à la température T du matériau.

Le Tableau 4 présente les différents modes de séchage par la chaleur.

Tableau 4 : Les différents modes de séchage par la chaleur (Bimbenet *et al*. (2002)).

.

Modes de séchage		**Types de produits**	**Equipements**	**Fonctionnement**
Séchage par conduction	Evaporation de l'eau par transfert d'énergie thermique par conduction de la surface chauffée vers le produit	Liquide relativement pâteux (ex : purée), visqueux, ou solide divisé	Séchoir à cylindres chauffés de l'intérieur par la vapeur	Le produit est versé sur la surface externe d'un ou deux cylindres à axe horizontal chauffé lentement. La pellicule qui se forme sèche rapidement et elle est détachée par un couteau racleur.
			Séchoir à cylindres chauffés de l'extérieur par la vapeur	Le produit brassé à l'intérieur du cylindre tournant sec par contact avec la paroi interne du cylindre chauffé de l'extérieur.
Séchage par rayonnement	Evaporation de l'eau par absorption de l'énergie des rayonnements	Solide, suspension liquide, des états intermédiaires	Four micro-ondes	Le produit est exposé aux micro-ondes pendant une durée déterminée.
			Séchoir solaire direct	Le produit est exposé aux rayons solaires.
Séchage par sublimation ou lyophilisation	Evaporation de l'eau par sublimation, changement de l'état de glace à l'état vapeur causé par la différence de pression de vapeur à la surface du produit solide	Solide de taille moyenne ou suspension congelée	Lyophilisateur	Le produit est congelé par petites quantités dans une enceinte. Par effet de dépression par une pompe à vide, la vapeur se forme par sublimation, elle est ensuite entraînée dans une enceinte communicante pour y être condensée.
Séchage par entraînement à l'air chaud	Passage d'air chaudau travers	Solide de taille	Séchoir à flux d'air traversant	Claies grillagées superposées et traversées par un flux d'air chaud ascendant.

	d’une couche de produit étalée sur des claies	moyenne		

I.1.8.2. Modifications physicochimiques au cours du séchage

Le séchage, outre son objectif principal qui est d'éliminer l'eau du produit, apporte une modification structurelle du solide intéressante pour son usage ultérieur (création de pores par exemple). Toutefois, diverses réactions peuvent se produire pendant le séchage des patates douces, affectant considérablement les caractéristiques sensorielles et alimentaires du produit final. Le séchage, en raison de l'élévation momentanée de la teneur des solutés dans le produit en cours de déshydratation (Cheftel & Cheftel, 1984), accélère le phénomène de brunissement non-enzymatique. Le séchage accentue également la perte de substances aromatiques par volatilisation, la diminution de la capacité d'absorption d'eau suite à la dénaturation/agrégation des protéines, ou encore la destruction de l'amidon natif aux températures supérieures à 70 - 80 °C.

Il est donc très difficile de retrouver après réhydratation la texture initiale du produit. Tsai *et al*. (1981 a,b) ont prouvé que le taro cru et déshydraté aux températures intermédiaires (50 - 70 °C) est un milieu défavorable pour la multiplication de certains microorganismes. Ces températures permettent de plus d'obtenir un produit de capacité d'absorption d'eau plus élevée et de qualité ultérieure hautement appréciable. L'effet du séchage sur la valeur nutritionnelle des aliments est tout naturellement dû au couple durée /température du traitement. Les dommages thermiques se traduisent principalement par des dégradations nutritionnelles, biochimiques et organoleptiques. Généralement, la température du produit au début de l'opération de séchage, correspondant à la température humide de l'air ambiant, est nettement inférieure à celle de l'air du fait de la grande évaporation. Ce n'est que dans la dernière phase du séchage que les principales dégradations d'origine thermique interviennent (Albitar, 2010). Les réactions de dégradation des produits alimentaires dépendent fondamentalement de la température et de la teneur en eau du produit pendant le séchage (McMinn, 1997a,b ; Gögüs *et al*.,1998). Les travaux de Lizado & Guzman (1995) sur le séchage ont montré que les tranches de patate douce deviennent cassantes lorsque la masse du produit se stabilise à une valeur constante, ce qui pourrait être utilisé comme un critère empirique pour déterminer la fin du processus de séchage.

Le séchage parait un moyen incontournable pour conserver et transformer la patate douce. L'altération de la patate douce avant conservation est non seulement favorisée par la présence de champignons dans les champs, mais également par des conditions de température élevée et une grande humidité de l'air après la récolte. Les prétraitements interviennent généralement dans le but de réduire le temps de séchage mais aussi pour maintenir la qualité des produits. En effet, le séchage améliore la stabilité des aliments en réduisant l'eau et par conséquent la charge microbienne.

I.1.9. Broyage

Le broyage est une opération de réduction de taille très ancienne. Aujourd'hui encore, il se rencontre dans la plupart des procédés alimentaires. En Afrique subsaharienne, il constitue toujours la méthode la plus utilisée pour la fabrication des farines alimentaires. Le but technologique du broyage est de réduire les composants de la graine (ou d'un ensemble de matières premières) en particules de granulométrie désirée afin de permettre un mélange plus homogène et plus stable et une mise en forme plus aisée. Le broyage peut être réalisé sur des broyeurs à marteaux, à billes, à couteaux, à disques, à mortiers ou sur des appareils à cylindres de type meunerie (Kenmegne & Hardy, 1998)… Cette double hétérogénéité, matériau d'origine et mode de production, conduit à l'obtention de farines aux caractéristiques très différentes, que ce soit au niveau de la forme, de la taille, de la structure, de la composition ou des propriétés fonctionnelles.

Très souvent utilisé, le broyage des aliments a fait l'objet de très peu d'études comme le souligne Chakkaravarthi *et al.,*(1993). Le broyage implique des contraintes liées à la dimension de la taille des particules. Cette taille est contrôlée en utilisant des tamis de différentes mailles. Le type de moulin utilisé peut aussi avoir un impact majeur sur la qualité et le rendement des farines produites (Djantou - Njantou, 2006).

Le broyage comporte toujours deux aspects : d'une part, la dimension des particules obtenues, d'autre part, les modifications de la surface de ces particules. L'accroissement de surface dû à la fragmentation est susceptible d'augmenter la réactivité physique, chimique ou enzymatique des grains. En fracturant les structures cellulaires, il peut aussi accroître la disponibilité de certains composants nutritionnels. Du fait de l'élévation de température due à

l'énergie d'arrachement des molécules, certaines caractéristiques physico-chimiques peuvent également être modifiées (Melcion, 2000).

I.1.9.1. Modifications physicochimiques au cours du broyage

Les opérations de broyage peuvent provoquer des modifications significatives de texture, de structure, de forme et de surface (Chamayou & Phage, 2003). Ces transformations peuvent s'expliquer par le fait que l'énergie apportée lors des opérations de broyage augmente l'énergie libre du matériau broyé, qui peut alors se trouver activé. Le système devient alors transitoirement instable et l'énergie peut dans ce cas, se dissiper par le biais de transformations de nature physicochimique ou structurale (amorphisation, déformation plastique, agrégation...). Les modifications structurales surviennent en grande partie lorsque la température devient supérieure à la température de transition vitreuse du produit (Genin & René, 1995). Il y aussi le fait que la surface spécifique du matériau est significativement augmentée lors du broyage conduisant à des interactions accrues avec l'humidité de l'air et donc à des altérations biochimiques accrues.

I.1.10. Caractéristiques chimiques des farines

La farine de patate douce est une bonne source d'énergie. Lorsqu'elle est faite de cultivars à chair orange, la farine a une teneur élevée en β-carotène et des niveaux raisonnables de vitamine C, calcium, phosphore, fer et potassium. La composition des farines de patate douce provenant de différentes sources est présentée dans le Tableau 5. La contribution en éléments nutritifs de farine de patate douce aux besoins quotidiens est estimée dans le Tableau 6. La composition chimique et la valeur nutritionnelle de la farine de patate douce sont largement tributaires de la composition chimique des tubercules qui est liée à la période de la récolte. La teneur en eau de la farine de patate douce est comprise entre 4,4 et 13,2 %. Cette teneur est directement liée au procédé de séchage, en particulier au temps de séchage, ainsi qu'à la période et aux conditions de stockage. La teneur en humidité de la farine de patate douce est considérée comme une caractéristique de qualité pendant le stockage, car l'eau peut accélérer les altérations chimiques ou microbiologiques. Dans la farine de patate douce, les glucides représentent la majeure partie des nutriments : entre 84,6 et 94,8 % en base sèche. La teneur en amidon totale est comprise entre 57 et 90 % (Tableau 5).

La teneur en sucres réducteurs varie entre 1,2et 24,4 % ; les sucres réducteurs dans les tubercules doivent être aussi peu présents que possible (< 2%) pour prévenir la décoloration pendant le traitement thermique (Van Hall, 2000).

Tableau 5 : Composition chimique des farines de patate douce par différents auteurs (g / 100 g).

Couleur	Humidité	Protéines	Lipides	Glucides totaux	Amidons totaux	Sucres totaux	Sucres réducteurs	Cendres	Fibres Alimentaires	Sources
-	13,2	3,8	0,7	90,2	-	-	-	3,1	-	Woolfe (1992)
-	13,2	2,5	1,0	92,6	-	-	-	3,3	-	Woolfe (1992)
-	11,7	14,2	0,6	86	-	-	-	2,5	-	Woolfe (1992)
Blanche	-	2,6-3,2	-	-	57-68,4	4,0-11,8	2,2-6,1	-	-	Martin (1984)
Orange	4,4	6,6	1,3	84,6		-	-	3,2	5,1	Gurkin, (1988)
Crème	6,5-7,8	4,1-8,5	-	-	64-74	7,3-23,7	1,9 - 16,1	-	-	Collado etCorke (1974)
Blanche	5,6-6,0	-	-	-	72-90	-	6,2-24,3	2,5-3,9	3,6-7,1	Antarlina (1990)
Blanche	7,2	3,2	0,4	-	-	6,3	2,8	1,6	1,4	Sammy (1970)

« - » : information non fournie par les auteurs.

Tableau 6 : Contribution nutritionnelle à l'apport quotidien recommandé de la farine patate douce.

	Protéines	Vitamine A	Thiamine	Riboflavine	Niacine	Vitamine C	Fer
AQR*	37 g	600mg	1,2mg	1,8mg	30mg	19,8mg	5-15mg
Farine de patate douce 100g	10%	> 100%	20%	10%	8%	17%	20-40%

*Apport Quotidien Recommandé

I.1.11. Caractéristiques physiques des farines

La granulométrie est l'étude de la distribution de la taille des particules d'une farine. C'est une caractéristique fondamentale, en relation directe avec toutes les opérations unitaires de broyage, séparation, mélange et transfert, mais aussi avec les phénomènes physico-mécaniques liés à l'ingestion et au transit digestif des particules alimentaires. Elle joue également un rôle important sur les propriétés fonctionnelles : réhydratation, capacité d'absorption d'eau, aptitude à la panification… La granulométrie est aussi en relation avec les phénomènes d'échange et de réactivité, qu'ils soient physiques (migration d'eau, séchage, solubilisation), chimiques (oxydation) ou enzymatiques (digestion des aliments).

Les travaux de Scher *et al.*(1998) ont montré que la granulométrie est le principal facteur influençant les propriétés rhéologiques des farines. De façon générale, les propriétés d'usage (rhéologie, capacité d'absorption d'eau…) des poudres dépendent fortement de la taille, de la distribution de taille et de la forme des particules qui les composent. De nombreuses techniques permettent de déterminer la granulométrie et la morphologie des poudres. On peut ainsi citer le tamisage, les techniques de diffraction laser et l'analyse d'image (Pons *et al.,*1997). Le diamètre moyen d'une farine dépend de la technique mise en œuvre pour le mesurer et du mode de calcul utilisé (en nombre, en masse, en volume) (Baluais**,** 1998). Cette inconstance numérique trouve en général son explication dans :

- la définition retenue pour la taille à partir de la notion de sphère équivalente (Dodds, 1999) ;
- le mode de représentation des résultats sélectionnés (Baluais, 1998) ;
- la méthode de mesure adoptée : en 1994, l'IFTS répertoriait plus de 500appareils différents.
- le protocole d'échantillonnage utilisé.

La Figure9montre la distribution de la taille des particules des farines de patate douce, taro et igname. On remarque que la farine de patate douce présente une distribution essentiellement bimodale.

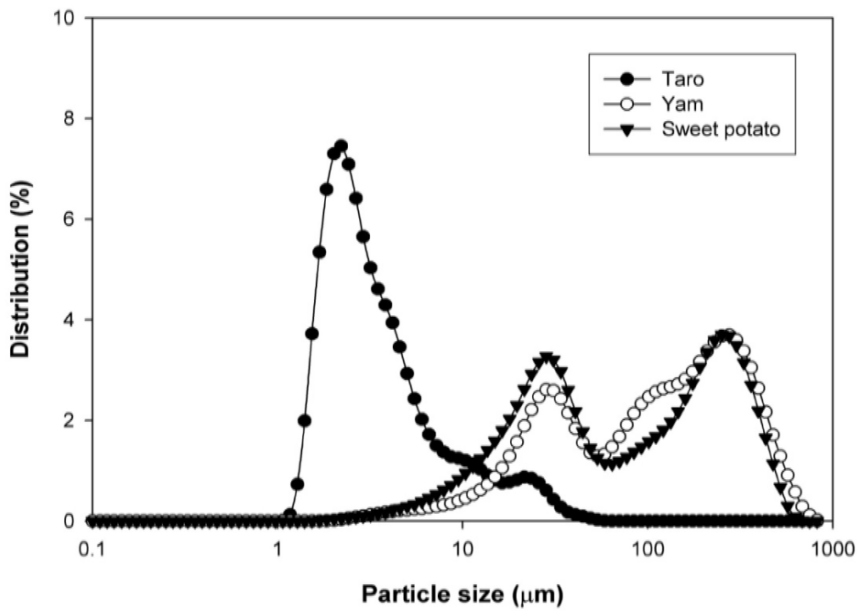


Figure9 : Distribution de taille des particules des farines de taro, d'igname et de patate douce (Aprianita *et al*. 2009).

I.1.12. Caractéristiques fonctionnelles des farines

Les propriétés fonctionnelles (solubilité, pouvoir moussant, aptitudes à la gélification et à l'émulsification) sont des caractéristiques physico-chimiques intrinsèques des poudres pouvant être affectées pendant le traitement et le stockage des produits alimentaires.
Les propriétés fonctionnelles fournissent des informations sur les applications futures des formulations alimentaires (Hermansson *et al*., 1979). Le développement des produits est généralement basé sur les propriétés fonctionnelles que l'on souhaite obtenir. La fonctionnalité des aliments est d'une grande importance et est au centre des préoccupations des producteurs, des acheteurs et des consommateurs. Les informations au sujet des propriétés fonctionnelles de la farine de patate douce sont basées sur sa fraction d'amidon (Tian, 1991).

La gélatinisation de l'amidon de farines de patate douce dans l'eau s'effectue à 50%, ce qui indique la gélatinisation partielle de l'amidon (Van Hal, 2000). D'après les travaux de

Collado *et al*.(1996), les températures de début et de pic de gélatinisation déterminées par DSC (Differential Scanning Calorimetry) varient respectivement de 69,9 à 72,9 °C et de 80,4 à 83,6 °C. La capacité d'absorption d'eau est un paramètre technologique indispensable permettant de maîtriser la consistance de la pâte. Il reflète la capacité d'hydratation de la pâte en présence d'eau liquide et dépend surtout de la teneur en eau et du taux d'endommagement de l'amidon. La capacité d'absorption d'eau est un paramètre technologique indispensable permettant de maîtriser la consistance de la pâte.

Il existe plusieurs méthodes de mesure de capacité d'hydratation de l'eau, à savoir :

- la centrifugation,
- le farinographe en déterminant le taux d'hydratation de la farine,
- la méthode de Baumann dont les résultats obtenus sont reproductibles et peu sensibles aux conditions extérieures.

La méthode par centrifugation détermine la capacité de rétention d'eau, c'est une technique qui consiste à mélanger la poudre à un excès d'eau puis centrifuger ce mélange. Une fois le surnageant éliminé, la quantité d'eau retenue est déterminée par pesée. Les paramètres de cette méthode sont fixés par les normes officielles AACC (1990).

Selon Olu Malomo *et al.* (2013), la capacité d'absorption d'eau des farines de patate douce et blé sont compris entre 232,2 et 171,4 % respectivement. Adebowale *et al*., (2005) ont rapporté que la capacité d'absorption d'eau élevée est attribuée à une perte de la structure d'amidon, tandis que la faible valeur indique la compacité de la structure.

Les propriétés d'absorption d'eau de la farine de patate douce sont considérées comme assez bonnes et stables, avec une capacité d'absorption d'eau de 5g/g (Hagenimana *et al.,* 1996). D'après Van Hal (2000), la capacité de gonflement moyenne de farines de patate douce obtenues à partir de différents génotypes est de15, 7mL/g, pour une gamme de variation entre 11,8 et 18,8 mL /g.

La composition chimique des farines de patate douce montre qu'elle contient des fibres, du fer, du potassium, de la vitamine C et du magnésium en quantités non négligeables. Elle est riche en vitamine A (β-carotène). Sa composition nutritionnelle varie en fonction du cultivar. Les glucides représentent la majeure partie des nutriments. Le diamètre moyen d'une farine dépend de la technique mise en œuvre pour le mesurer et du mode de calcul utilisé. La distribution de la taille des particules de farine de patate douce est essentiellement bimodale. La température de gélatinisation de la patate douce varie entre 80,4 et 83,6 °C.

I.2. Applications des farines : technologie de panification

La technologie de produits de panification comprend trois étapes essentielles : le pétrissage, la fermentation et la cuisson. La première étape assure l'hydratation des ingrédients, le développement de la structure de la pâte, ainsi que l'introduction de la phase gazeuse. La fermentation permet l'augmentation de la fraction volumique gazeuse. Au cours de la cuisson, il y a passage de la pâte de l'état liquide à l'état solide caoutchouteux (Davies, 1986).

I.2.1. Généralités sur la panification mixte

La panification à base de «farines composées » consiste à fabriquer des produits de boulangerie et de pâtisserie à partir d'un mélange de farine de blé panifiable et d'autres farines dites « non panifiables » en plus ou moins grandes proportions. Ces farines sont dites non panifiables parce qu'elles ne contiennent pas du gluten (Taga, 1995).

Ces vingt dernières années dans les pays en développement, d'importants espoirs ont été placés dans l'utilisation des farines composites en boulangerie. En effet, une substitution partielle de la farine de blé par des tubercules locaux tels que la patate douce peut constituer une alternative financièrement intéressante par rapport aux céréales importées. Les diverses tentatives dans cette voie furent le plus souvent des échecs, dus à l'hostilité de la filière minoterie-boulangerie classique, à l'incertitude d'approvisionnement régulier en céréales locales et aux habitudes alimentaires des consommateurs. Plusieurs auteurs ont en effet travaillé sur le développement des farines composites dans lesquelles une partie de la farine de blé est remplacée par d'autres sources amylacées (Dendy*et al.*, 1973 ; Berthelot,1990 ; Defloor, 1995).

Le niveau de substitution critique de la farine de blé par la farine de patate douce permettant de produire un pain de consommation acceptable diffère selon les chercheurs. Selon Greene et Bewell-Benjamin (2004), un niveau de substitution de 10-15 % de farine de blé par la farine de patate douce permet de produire des pains acceptables par le consommateur. En revanche, Coursey *et al*. (1978) ont jugé qu'un niveau de substitution de 20 % induisait des pains de volume, de flaveur et de texture inacceptables. Les résultats des travaux d'Idolo (2011) ont montré que la substitution de la farine de blé par de la farine de patate douce jusqu' à 25 % pouvait être adoptée car elle améliore la qualité nutritionnelle et réduit le coût de production dupain « Madiga » au Nigéria.

La détermination de la qualité technologique de pains (i.e., valeur boulangère) suppose la mise en œuvre d'un protocole normalisé de test de fabrication à l'échelle réduite.

La valeur boulangère (norme NF V03-716) intègre des notions distinctes :

- le rendement en pâte : quantité d'eau que peut absorber la farine pour une consistance donnée;
- la machinabilité de la pâte : aptitude à être travaillée sans difficulté de la panification jusqu'à la cuisson. Cette caractéristique qualitative prend en compte des notions de collant, d'élasticité, de stabilité, et d'aptitude à la déformation de la pâte;
- le développement de la pâte et du pain : aptitude à la rétention gazeuse et à la déformation;
- la qualité organoleptique de la mie du pain : couleur, odeur, texture (Jeantet *et al*., 2007) ;
- la fermentation *:* elle recouvre à la fois des actions microbiennes (levures et bactéries) et des modifications physico-chimiques de la pâte. Au cours de la fermentation, la pâte prend de la force ce qui correspond à une augmentation de l'élasticité, une diminution de l'extensibilité et du relâchement.

I.2.2. Rôle des ingrédients

I.2.2.1. Farine

La farine est l'ingrédient majeur de la pâte, elle est responsable de la structure finale du produit. Son utilisation très répandue est liée à la capacité de la pâte à retenir le gaz permettant ainsi son expansion lors de la cuisson (Gan *et al.,*1995). La farine est un composé complexe comportant différents constituants (protéines, lipides, glucides…) qui jouent un rôle direct ou indirect dans la structuration et l'aération de la pâte.

I.2.2.2. Eau

L'eau est un ingrédient important pour la formation de la pâte. Elle hydrate la farine, fournit la mobilité nécessaire aux constituants de la farine pour la réalisation des réactions chimiques. Au cours du pétrissage, la multiplication des contacts entre les granules d'amidon et l'eau induit la diffusion des molécules d'eau dans les particules de farine, qui se aux différents constituants et favorisent leurs interactions (Shehzad, 2010).

Une pâte panifiable contient typiquement 0,6 à 0,8 gramme d'eau par gramme de farine sèche, dont approximativement la moitié est de l'eau « non congelable », utilisée par le réseau protéique (Ablett *et al.*, 1986). La présence de l'eau est essentielle puisqu'elle intervient à trois niveaux dans le pétrissage :

- L'eau assure la dissolution des composés solubles et est donc essentielle pour assurer l'homogénéité et la cohésion de la pâte. Le sel solubilisé dans l'eau crée, par exemple, des liaisons ioniques avec les protéines de la farine, essentielles pour le développement de la pâte (Roussel & Chiron, 2002).

- L'eau détermine en grande partie les propriétés rhéologiques de la pâte (cohésion, consistance, viscoélasticité…) : l'énergie nécessaire à la déformation de la pâte diminue exponentiellement avec l'augmentation de la teneur en eau du mélange (Webb *et al.*, 1970). Elle joue le rôle de plastifiant : sa faible masse moléculaire favorise la mobilité des macromolécules (protéines…) par augmentation du volume libre et diminution de la viscosité (Levine & Slade, 1990b) ;

- L'eau influence, enfin, indirectement la rétention gazeuse : une pâte à teneur en eau totale inférieure à 35 % n'est pas capable de retenir les bulles gazeuses introduites en cours de pétrissage (Mac Ritchie, 1976). Cette capacité de rétention gazeuse augmente ensuite linéairement avec la teneur en eau de la pâte jusqu'à 44 %, teneur en eau classique d'une pâte à pain (Gan *et al.*, 1995).

I.2.2.3. Sel

Le sel alimentaire (NaCl) est présent dans la plupart des produits de boulangerie à raison de 2 % du poids de la farine en moyenne. Il est commercialisé sous forme de petits cristaux (dimension moyenne ≤ 800 µm) d'un blanc pur, obtenus par recristallisation après évaporation sous vide à haute température. C'est un exhausteur de goût et, parallèlement on considère qu'il diminue les arrière-goûts (Roussel & Chiron, 2002). Le sel améliore la saveur du produit et ralentit l'activité de la levure par inhibition des activités enzymatiques. Il a aussi tendance à limiter la disponibilité de l'eau et donc améliore l'aptitude à la conservation.

Comme indiqué précédemment, le sel solubilisé dans l'eau crée des liaisons ioniques avec les protéines de la farine en améliorant la capacité d'absorption d'eau. Le sel favorise également la coloration de la croûte, qui reste pâle en son absence.

I.2.2.4. Levures

La levure de boulangerie est un agent de fermentation de l'espèce « *Saccharomyces cerevisiae*», qui appartient à la famille des champignons. Son rôle majeur est de transformer les sucres fermentescibles (glucose, fructose, saccharose et maltose) en dioxyde de carbone et en éthanol, induisant aussi la production de composés aromatiques (Giannou et *al*., 2003). L'action de la levure dépend largement des conditions environnantes (température, pH, teneur en eau…). Par exemple, dans une plage de température entre 20 et 40 °C, une élévation de la température de la pâte d'un degré Celsius entraîne une augmentation de la vitesse de fermentation de 8 à12% selon le type de levure.

I.2.2.5. Améliorants

Ils sont utilisés dans les produits issus de panification afin de corriger les défauts de certaines farines, rendre plus constantes la qualité de celles-ci ou encore faciliter certains types de panification. Ils peuvent être d'origine naturelle ou de synthèse. Toutefois, leur utilisation est réglementée en termes de dose et d'étiquetage. Ils sont classés selon leur rôle technologique: adjuvants (gluten, malt, levure désactivée, farine de fève), additifs (acide ascorbique) et auxiliaires technologiques (enzymes).Par exemple, un améliorant peut aider la pâte à lever (activation de la fermentation), assouplir la pâte, augmenter sa force, lui donner une meilleure couleur, ou lutter contre les problèmes bactériologiques. Les améliorants les plus utilisés sont classés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Exemples de produits de substitution utilisés en panification (Roussel &Chiron, 2002).

Catégorie	Exemples	Rôle
Produits d'oxydation et de réduction	Acide ascorbique	Augmente l'élasticité et diminue l'extensibilité de la pâte, améliore la machinabilité et la tenue des pâtons
	Glucose oxydase	Augmente la consistance de la pâte et diminue le collant
	Levure désactivée(glutathion)	Augmente le développement du gluten et l'extensibilité de la pâte
	Farine de fève et de soja	Action sur les réactions de coloration de la croûte et de la mie
Emulsifiants	Lécithines, E322	Diminue de la porosité de la pâte
	Monoglycéride saturé, E471	Augmente la régularité alvéolaire
	Esters diacetyl-tartriques de monoglycérides, E47	Augmente le volume des pains
Produits enzymatiques d'hydrolyse	Farine de malt	Augmente l'activité fermentaire et la vitesse des réactions de coloration
	Hémicellulases	Augmente le volume des pains et la coloration de la croûte
	Lipases	Augmente le volume des pains et la régularité alvéolaire
Conservateurs	Acides sorbique et sorbates	Augmente la durée de conservation
	Acide acétique et acétates	Effet antimicrobien et propriétés organoleptiques
Gluten de blé	Gliadine, glutenines	Augmentation la rétention gazeuse, la fixation d'eau et diminue le rassissement du pain

I.2.3. Etapes du procédé et leur rôle en panification

I.2.3.1. Pétrissage

C'est la première étape ou opération unitaire, qui permet de mélanger de façon intime les ingrédients et d'incorporer de l'air dans la pâte pour favoriser la multiplication des levures. Le pétrissage permet l'hydratation du gluten et la formation de fibres emprisonnant l'oxygène et les grains d'amidon, ce qui mène à l'hydratation de l'amidon et à sa transformation enzymatique en sucres. D'après Giannou *et al.*(2003), le pétrissage doit être rapide, homogène et à température contrôlée, on obtient ainsi une pâte avec des bulles de gaz dont le

diamètre est compris entre 1 et 10 mm. Le nombre et la taille des bulles de gaz ont un effet significatif sur les caractéristiques finales du produit.
Toutefois, un pétrissage long peut augmenter l'oxydation des groupements thiols (-SH) des protéines dépolymérisées (Demiralp *et al.*, 2000). Il en résulte habituellement une pâte collante en raison des forces mécaniques appliquées à la pâte qui diminuent le poids moléculaire des protéines (Autio & Laurikainen, 1997).

L'étape de pétrissage assure trois fonctions intimement liées, essentielles pour l'obtention d'une pâte bien aérée :

- ***Le mélange des différents ingrédients en une pâte homogène*** : l'eau réalise les réactions enzymatiques permettant la transformation de l'amidon de la farine en sucres composés (maltose) et simples (glucose).Le pétrissage permet de répartir d'une manière homogène les constituants, favorisant ainsi leur contact, notamment celui de la farine avec l'eau, et donc leur hydratation. Le diagramme de pétrissage conventionnel en panification française (vitesse lente de 40 tr/min pendant 12 à 15 min) permet d'obtenir une masse macroscopiquement homogène à une échelle millimétrique (Roussel &Chiron, 2002);

- ***Le développement du réseau glutineux*** : l'eau intervient aussi dans l'agglutinement, l'assouplissement et l'allongement de certaines des protéines contenues dans la farine et insolubles dans l'eau. Il s'agit des gliadines et des gluténines qui forment une matière plus ou moins molle et élastique : le gluten. Suffisamment hydraté, le gluten donne à la pâte son imperméabilité et ses propriétés rhéologiques. Le mouvement des bras du pétrin permet simultanément l'homogénéisation et l'incorporation d'air dans la pâte sous forme de nuclei sphériques de petite taille (10 à 100µm) (Junge & Hoseney, 1981). Le pétrissage d'une pâte à pain sous vide (densité = 1,25) ou non (densité = 1,15) montre que la fraction gazeuse introduite occupe 8 % du volume total d'une pâte en fin de pétrissage à pression atmosphérique (Baker & Mize, 1941). L'indicateur du taux d'aération de la pâte est représenté par le volume relatif. Ce dernier est défini comme le rapport entre les volumes de pâte total et sans gaz. En fin de pétrissage, il serait de l'ordre de 1,1 (Bloksma, 1990);

- **Structuration du réseau protéique :** l'étirement du réseau de gluten constitué forme une fibre qui va se renforcer par incorporation et emprisonnement de bulles d'air. Pendant le pétrissage, l'oxydation des acides aminés soufrés des protéines entraîne la création des ponts disulfures (liaisons covalentes) intra- et inter-moléculaires. Le premier modèle adopté par la communauté scientifique concernant l'organisation du réseau protéique considérait essentiellement des liaisons intermoléculaires qui entraînent la formation d'un réseau allant d'un bout à l'autre de la pâte. Un second modèle, plus vraisemblable, considère désormais que les ponts disulfures sont intramoléculaires et les chaînes de protéines dépliées (gonflées par absorption d'eau) s'alignent plus ou moins pour former des faisceaux. La tenue du réseau serait donc due à des liaisons non covalentes, telles que les liaisons hydrogènes, hydrophobes, ainsi qu'à des enchevêtrements entre les chaînes (Ewart, 1977).

Ces trois actions conjointes aboutissent en fin de pétrissage à un mélange cohésif auxpropriétés viscoélastiques, c'est-à-dire possédant des propriétés visqueuses aux temps longs (écoulement) et élastiques aux temps courts (Bloksma, 1990). Les caractéristiques de base de la farine utilisée, le mode de panification préconisé, la quantité de pâte pétrie, ainsi que sa consistance souhaitée influent sur le mode et la durée de son pétrissage. On parle ainsi de pétrissages à vitesse lente, amélioré et intensifié.

Le pétrissage à vitesse lente permet de ne pas incorporer trop d'air dans la pâte, afin d'obtenir un réseau glutineux grossier et une pâte ayant peu de force. Les pains sont alors peu développés, avec une croûte plus épaisse et plus savoureuse. Elle est beaucoup utilisée pour le pain de seigle. Quant au pétrissage amélioré, elle permet d'apporter de la force à la pâte sans trop incorporer d'air. Elle est utilisée dans la majorité des boulangeries artisanales pour la fabrication du pain courant et de tradition française.

Contrairement au pétrissage à vitesse lente, le pétrissage intensifié permet d'incorporer beaucoup d'air afin d'obtenir un réseau glutineux très développé. Ce qui va entraîner un blanchiment de la pâte, une perte de goût, une mie aux alvéoles petites et très régulières, ainsi qu'une croûte fine.

Les pâtes issues de ces trois modes de pétrissage peuvent être fermes (hydratation < 60%), bâtardes (hydratation de 60 à 64 %), douces (hydratation > 64 %) ou liquides (hydratation proche de 100 %). La figure 10 illustre l'action du pétrissage sur la réorientation des protéines du gluten.

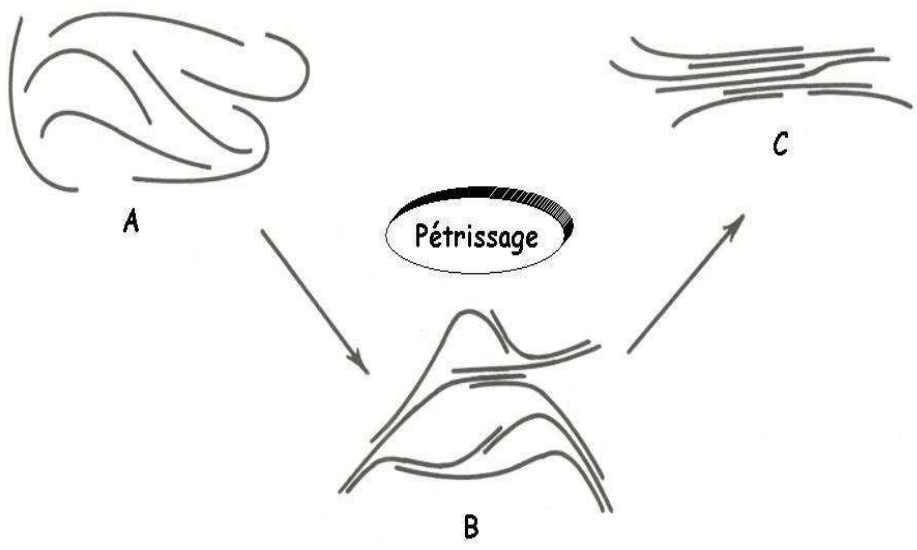


Figure10 : Action du pétrissage sur la réorientation des protéines du gluten (A) menant à la formation d'un réseau cohésif assurant une meilleure élasticité et rétention de gaz (B). Un pétrissage trop important forme une pâte cassante (C)sous l'effet des interactions fortes entre protéines.

I.2.3.2. Pointage

Le pointage ou piquage correspond à la toute première fermentation en cuve ou en bac, qui a lieu dès que la levure entre en contact avec le mélange farine /eau; il concerne l'ensemble de la masse de pâte. Le premier rôle du pointage est de donner de la force à la pâte. Cette prise de force correspond à une modification du gluten. La pâte devient plus tenace, plus élastique et moins extensible. Le tissu glutineux formé peut retenir le dioxyde de carbone. Ainsi, le boulanger doit veiller à ce que la pâte ne prenne pas trop de force. Le deuxième rôle du pointage est de favoriser le développement des arômes du pain (Langraf, 2006).

I.2.3.3. Division

La pâte initiale doit alors être divisée en pâtons de masse déterminée en fonction du produit fini désiré (baguette, bâtard, pain...). Le boulanger peut effectuer cette opération manuellement. Il dispose aussi de machines : les diviseuses, qui sont de deux types, les diviseuses hydrauliques à couteaux et volumétriques à piston.

Le premier type est le plus répandu en France. Le second type est utilisé dès que le boulanger veut automatiser une partie de sa fabrication. Après la division, les pâtons sont remis en forme de petites boules de pâte. On dit qu'ils sont boulés et l'opération s'appelle la mise en boule. Cela peut être réalisé à la main ou en machine, dans des bouleuses. Les pâtons sont ensuite mis au repos pour la phase de détente. Celle-ci s'effectue en général dans une chambre de repos à balancelles (Langraf, 2006).

I.2.3.4. Fermentation

La fermentation panaire est une fermentation alcoolique anaérobie, engendrée par l'action des ferments sur les sucres présents dans la pâte.

- ***Mécanismes de la fermentation***

La fermentation, étape spécifique aux produits de panification, a pour rôle d'enrichir la pâte en dioxyde de carbone. Elle provoque une perte en matière totale (de l'ordre de 2 à 3%) par transformation des sucres en alcool et acides carboniques volatils (Chargelegue *et al*., 1994).
Au cours du pétrissage, l'oxygène introduit permet à la levure boulangère d'établir un métabolisme respiratoire selon la réaction suivante (équation 3) :

Glucose (180g) + oxygène → gaz carbonique + eau + énergie (688 kcal à 27 °C) (3)

Elle se déroule en deux phases, dans un milieu qui n'est pas strictement anaérobie:

- la levure fermente les glucides libres dans la farine (environ 1 %). Pendant ce temps, la β-amylase attaque les granules d'amidon endommagés au cours de la mouture, et il se forme du maltose et des dextrines;
- la levure peut alors se développer grâce aux oses libérés. Dans la fermentation proprement dite, du gaz carbonique, de l'alcool et des acides organiques sont produits (Alias *et al*., 2003).

L'action de la levure dépend largement des conditions environnantes (température, pH, teneur en eau…). Considérant, une plage de température située entre 20 et 40 °C, une élévation de la température de la pâte de un degré Celsius entraînerait une augmentation de la vitesse de fermentation de 8 à 12 % selon le type de levure.

En panification française, une température de 22 à 24 °C est maintenue pour la fabrication des baguettes, tandis qu'une gamme de 30 à 35 °C est utilisée pour la fabrication du pain de mie en moule. La pression osmotique a une influence importante sur la fermentation et dépend essentiellement des concentrations en sucre et sel. Elle peut atteindre en panification 3,5 à 10 MPa, expliquant ainsi le ralentissement de l'activité de la levure dont le métabolisme ne peut alors s'effectuer normalement. Ce dysfonctionnement est dû à une différence de concentration entre le milieu intra- et extra-cellulaire, qui entraîne une diffusion de l'eau à l'extérieur de la cellule de levure et limite ainsi l'entrée des sucres fermentescibles (Chargelegue *et al*., 1994).

- ***Phase gazeuse***

Le gaz carbonique produit se dissout d'abord dans la matrice continue de la pâte. Dès que celle-ci arrive à saturation, il s'accumule sous forme gazeuse dans les nuclei et exerce une pression interne sur le réseau du gluten non perméable aux gaz. Au début de cette phase d'accumulation, l'espace disponible pour la fraction gazeuse est suffisant pour le maintien de la forme sphérique de l'ensemble des bulles gazeuses. Au-dessus d'un certain niveau d'accumulation, et sous l'effet de la force de compression induite par l'excès de pression à l'intérieur des cellules, la pâte entourant les bulles est étirée tangentiellement (parallèlement à la surface des bulles) dans les deux directions et compressée radialement (perpendiculairement à la surface des bulles). Une telle déformation est nommée «extension biaxiale». Les cellules gazeuses se déforment alors d'une manière prononcée et la pâte à cellules sphériques est transformée en une pâte à cellules plus ou moins polyédriques (Van Vliet *et al*., 1992). L'évolution de la taille et de la forme des cellules gazeuses dans une pâte en cours de fermentation est illustrée par la figure 11.

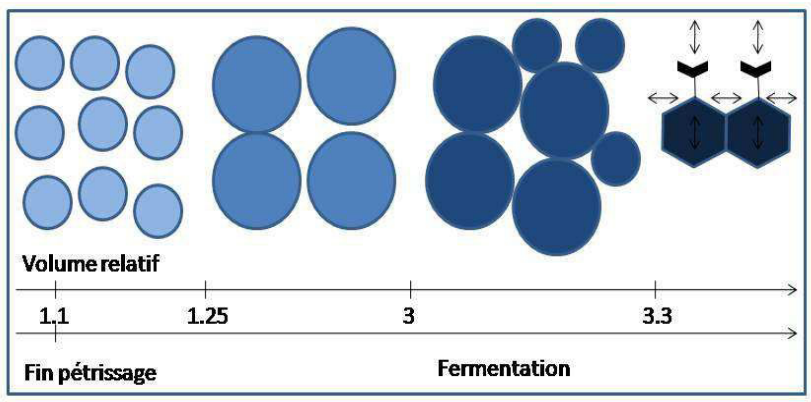


Figure11 : Évolution de la taille et de la forme (de sphérique à polyédrique) des cellules gazeuses dans une pâte en cours de fermentation (Van Vliet *et al*., 1992).

I.2.3.5. Façonnage

Le façonnage, ou mise en forme des pâtons, peut avoir une influence non négligeable sur le goût, ou plutôt sur la mâche et la flaveur de la mie et, par extension, sur celle du pain (Calvel, 1990).

Il se pratique manuellement ou à l'aide d'une machine. Il existe des façonneuses horizontales ou obliques. À l'intérieur, la pâte est laminée, enroulée, puis allongée. Dans le cas d'un façonnage manuel, chaque pâton est repris un par un par le boulanger. Selon le degré de fermentation et la consistance de la pâte, le serrage des pâtons est plus ou moins fort. Si une pâte manque de force, le serrage sera plus important. Le serrage consiste à expulser le maximum de gaz carbonique contenu dans la pâte, tout en donnant une certaine cohésion au réseau glutineux. Dans cette étape, le boulanger travaille la pâte pour la dernière fois et il donne la forme définitive au pâton (Langraf, 2006).

I.2.3.6. Apprêt

L'apprêt la deuxième étape de fermentation. Il se situe entre la fin du façonnage et la mise au four. Il est primordial pour donner un bon volume au pain. Il permet essentiellement la levée du pâton, due à la poussée du gaz carbonique. Une partie de l'amidon est transformée en sucres simples, lesquels vont être transformés par les enzymes de la levure en alcool et en gaz carbonique (Brochoire, 2003). Le temps d'apprêt varie selon les méthodes de fabrication : plus le temps de pointage est long, plus le temps d'apprêt est court. L'apprêt doit se dérouler dans de bonnes conditions de température et d'hygrométrie. Il est plus facile de maîtriser ces deux facteurs en réalisant l'apprêt dans des enceintes climatisées appelées chambres de pousse contrôlée (Langraf, 2006).

I.2.3.7. Cuisson

La cuisson est une étape complexe au cours de laquelle a lieu une série de transformations physiques, chimiques et biochimiques concomitantes, telles que l'expansion du produit, la perte d'eau par évaporation, la formation d'une structure alvéolaire plus ou moins développée, la dénaturation des protéines, la gélatinisation de l'amidon, la formation d'une croûte et les réactions de coloration (Sablani *et al.*, 1998). La température de cuisson varie d'un four à un autre et selon le produit, elle se situe entre 180 et 250 °C durant 20 à 30 min.

La température du four influence considérablement la qualité du produit. Une température de four trop basse provoque une diminution du volume du pain sous l'effet de l'effondrement de certaines cellules de gaz. Cependant, si la température du four est trop élevée, la croûte se forme rapidement tandis que l'intérieur est encore cru, provoquant ainsi une bosse (effet cheminée) sous la pression interne (Meziani, 2011).Lors de la cuisson de pains, des nutriments précieux peuvent subir des dommages, notamment la thiamine ainsi que la lysine qui donne avec les sucres réducteurs des complexes inutilisables par l'organisme humain (Favier, 1989).

La cuisson des pains se déroule en trois étapes :

- De 25 à 50 °C :

La température au cœur de la pâte passe assez rapidement de 25 à 50 °C. Les ferments de la levure dégradent les sucres en gaz carbonique. Cette dilatation gazeuse provoque un développement rapide du pâton. Cette action se développe jusqu'à ce que la température interne du pâton atteigne 50 °C. Les ferments sont alors détruits, c'est la fin de la fermentation.

- De 50 à 80 °C :

La pâte continue à se développer sous l'effet de la chaleur, les alvéoles se forment. Autour de 70° C, l'amidon se gonfle d'eau, se gélifie et les protéines se figent (il y a coagulation du gluten). Le pain atteint son volume définitif.

- De 80 à 100 °C :

Pendant la cuisson, la température intérieure des pains ne dépasse pratiquement pas 100 °C. En revanche, à la surface du pâton, la température peut atteindre jusqu'à 230 °C et dès 180 °C se produisent des réactions de caramélisation et de brunissement non-enzymatique de Maillard qui caractérisent la formation de la croûte. Les sucres simples situés à la surface du pâton réagissent entre eux et donnent, par caramélisation, d'une part des produits colorés de saveur légèrement amère et d'autre part une longue série de composés olfactifs variés (Brochoire, 2003).

I.2.4. Propriétés rhéologiques des pâtes

La rhéologie est l'étude des déformations (des écoulements) de la matière, elle est très développée dans le domaine des matériaux. La rhéologie alimentaire est alors l'extension de cette notion aux produits alimentaires. La détermination des propriétés rhéologiques d'un matériau consiste à mesurer sa déformation ,γ et/ou sa vitesse de déformation en fonction de la contrainte σ (stress exprimé en Pa) à laquelle il est soumis (Couarraze & Grossiord, 1991).

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

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

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

Les méthodes empiriques consistent souvent à reproduire à l'échelle du laboratoire une étape liée à la transformation de la pâte et à en tirer des paramètres discriminants et prédictifs des propriétés étudiées.

La texture est une propriété organoleptique majeure des produits alimentaires. Evaluée en analyse sensorielle mais également par des méthodes instrumentales dont la rhéologie, elle dépend directement des propriétés mécaniques des aliments, elles-mêmes fonctions de la structure du milieu. Pour l'industriel, la connaissance des propriétés structurales des produits, ainsi que de leurs effets sur la texture, devient donc nécessaire pour créer, modifier et produire des aliments avec des propriétés de texture maîtrisées.

Le Tableau 8résume la large gamme d'appareils utilisés dans la caractérisation rhéologique des pâtes comme les pétrins enregistreurs (mixographe et farinographe Brabender) mettant en jeu un étirement qui est en rapport avec des phénomènes intervenant lors de la mise en forme et la levée de la pâte (Rasper & Walker, 2000).

Tableau 8 : Les principales méthodes empiriques utilisées pour la caractérisation de divers produits de boulangerie (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

Dispositif utilisé	Propriétés caractéristiques
Mixographe	Temps de pétrissage
Farinographe	Viscosité apparente
Extensographe	Extensibilité
Alvéographe	Extensibilité biaxiale
Amylographe et RVA	Viscosité apparente et consistance
Fermentomètre	Volume de pâte
Pénétromètre	Dureté et fermeté
Texturomètre et TPA	Texture (élasticité, dureté, collant, adhérence)

Quant aux méthodes fondamentales, elles assurent une approche mieux définie du comportement des pâtes céréalières. Elles sont divisées en deux catégories : petites déformations (rhéologie dynamique ou oscillatoire) et grandes déformations.
Les essais aux petites déformations en régime dynamique (conditions non destructives) permettent de mettre en évidence le caractère viscoélastique des pâtes.

Les mesures par déformation dynamique oscillatoire dynamique sont effectuées avec l'un des dispositifs suivants (Figure 12) :

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

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

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

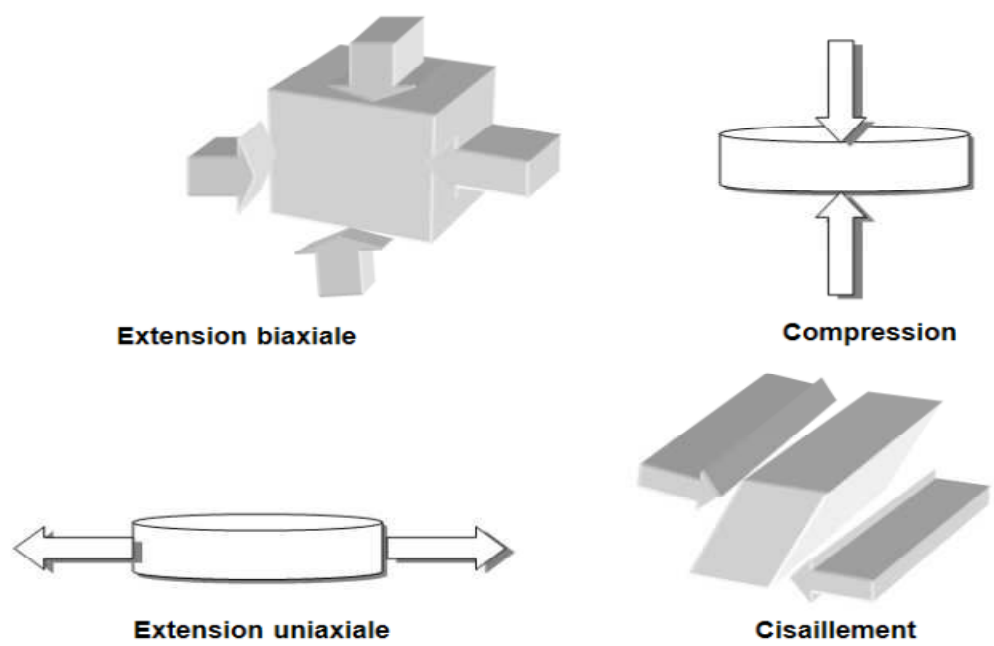


Figure12 : Les différents types de contraintes imposées à la pâte (Berland &Launay, 1995).

Chapitre 2

Matériel et méthodes

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

II.1. Echantillonnage et production des farines

Les patates douces (*Ipomea batatas* Lam) sont achetées au marché local dans la partie sud de Brazzaville au Congo-Brazzaville. Les tubercules (variété blanche) sont lavés à l'eau du robinet et épluchés. Ils sont coupés en tranches (de2 cm de longueur et de largeur, et 4mm d'épaisseur) à l'aide d'une trancheuse électrique (Bestron, EasyKitchen DSL 363, France). Ils ont été répartis en trois lots. Le premier lot n'a pas subi de prétraitement avant broyage pour servir de témoin. Ensuite, le second lot est plongé dans une solution de $CaCl_2$ (Sigma-Aldrich, Saint-Quentin Fallavier, France) à 1 % (p/v) pendant 1 min à 20 °C selon le protocole défini par Ahmed *et al.* (2010).Et enfin, le troisième lot a subi un blanchiment à l'eau du robinet à 90°C pendant 1min. Les échantillons sont codifiés de la manière suivante : tranche de patate douce sans prétraitement(TPD), tranche de patate douce prétraitée au $CaCl_2$ (TPD$CaCl_2$), tranche de patate douce prétraitée par blanchiment (TPDB). Les trois lots d'échantillons sont séchés dans un four électrique (Dasol Scientific Co. Ltd, Seoul, Corée du Sud) à 65 °C pendant 9 à 10 h. Les farines (7 - 8 % d'humidité) ont été obtenues par broyage (broyeur de type ZM200, Restch, Eragny sur Oise, France) et tamisées à 500 µm (tamis en inox NF, Fisher Scientific, Strasbourg, France).Les farines sont ensuite conditionnées dans des sachets en polyéthylène pour empêcher des échanges d'humidité et stockées dans un réfrigérateur à 4 °C avant utilisation pour analyse.

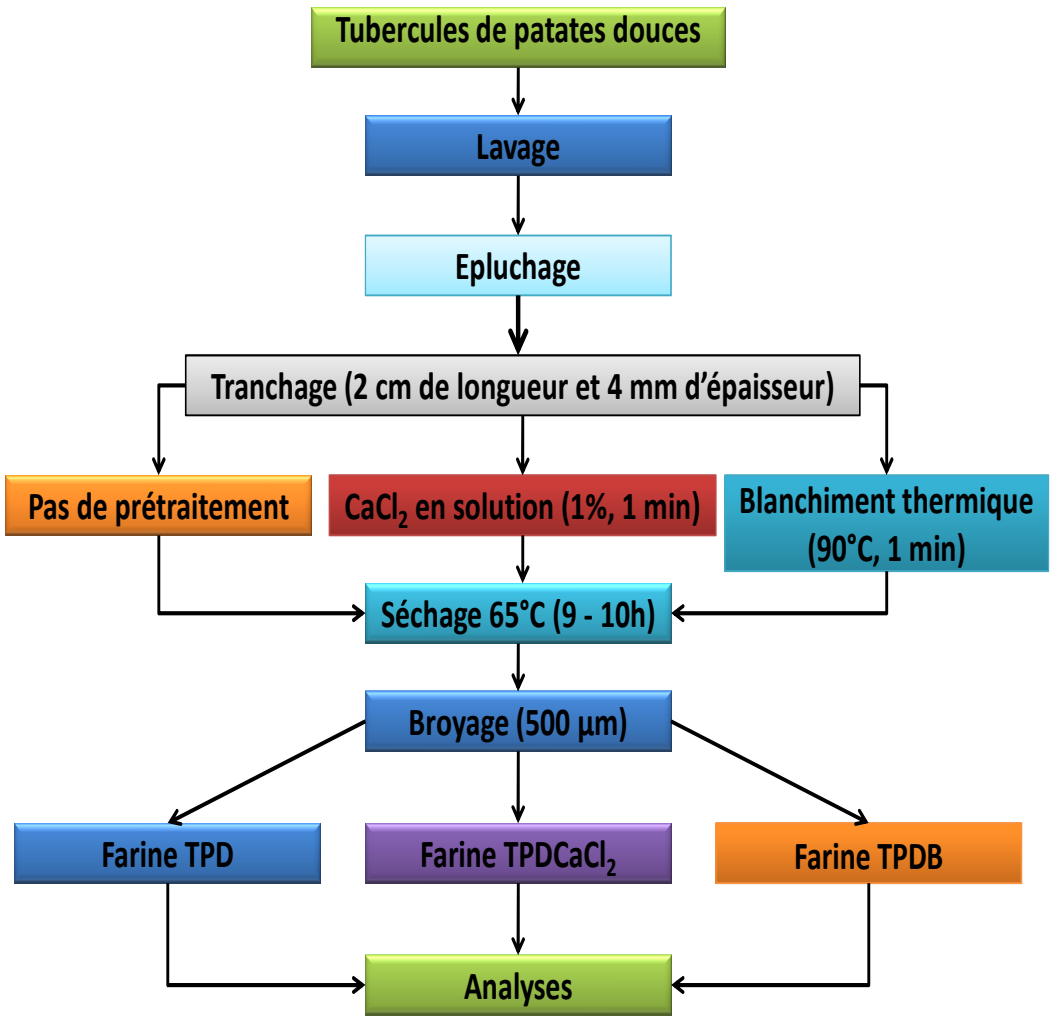


Figure 13 : Schéma de production des farines (TPD, $TPDCaCl_2$, TPDB) de patates douces.

II.2. Composition chimique des farines

II.2.1. Teneur en eau

La détermination de la teneur en eau (TE) est effectuée selon la méthode AOAC (1990) basée sur la mesure de la perte de masse des échantillons après étuvage à 105 ± 2 °C jusqu'à élimination complète de l'eau libre et des matières volatiles. La coupelle à vide est d'abord nettoyée, séchée et pesée (M_0). Une masse de 5 g d'échantillon est pesée (M_1) puis placée à l'étuve à 105 °C pendant 5 h. La coupelle est sortie de l'étuve, puis refroidie dans un dessiccateur avant d'être pesée (M_2) à nouveau. Les résultats exprimés représentent la moyenne de trois essais et la teneur en eau exprimée en pourcents est déterminée par la formule suivante :

$$TE = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \times 100 \quad (4)$$

II.2.2. Teneur en protéines

La teneur en protéines totale est déterminée par la méthode AOAC (1990), basée sur la transformation de l'azote organique en azote minéral sous forme ammoniacale $(NH_4)_2SO_4$ par l'action oxydative de l'acide sulfurique fumant sur la matière organique en présence d'un catalyseur.

Mode opératoire

1 g d'échantillon est introduit dans un matras de Kjeldahl, puis 2mL d'acide sulfurique concentré et une pincée de catalyseur de minéralisation (Na_2SO_4+ $CaSO_4$+ Se) (Sigma-Aldrich, Saint-Quentin Fallavier, France) y sont ajoutés. La minéralisation se fait sur une rampe électrique à 400 °C. Le liquide de minéralisation devient incolore au bout de 2 h.
Dans l'appareil à distiller semi-automatique Gerhardt (Vapodest 4S, Paris France), le contenu du matras de Kjeldahl est additionné de lessive de soude (soude à 10 N). Il se produit la réaction suivante :

$$(NH_4)_2SO_4 + 2\,NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + ½\,H_2O + 2NH_3 \quad (5)$$

L'ammoniaque dégagée se combine instantanément avec la vapeur d'eau pour donner l'hydroxyde d'ammonium. Celui-ci, entraîné par la vapeur, se condense dans le réfrigérant et est finalement récupéré dans une solution d'acide borique contenant un indicateur coloré (vert de bromocrésol et rouge de méthyle (3% (p/v) (Sigma-Aldrich, Saint-Quentin Fallavier, France), vert en milieu alcalin et rose en milieu acide). Il se forme le borate d'ammonium selon la réaction :

$$NH_3 + 2H_3BO_3 \rightarrow NH_4 + H_2BO_3 + H_3BO_3 \quad (6)$$

La solution vire au vert à cause du caractère alcalin du borate. Lors du dosage semi-automatique, le borate d'ammonium est déplacé par un acide fort (H_2SO_4, 0,01 N), et le sulfate d'ammonium est alors reformé selon la réaction:

$$2NH_4^+ + 2H_2BO_3 + 2H_2S \rightarrow H_2SO_4 + (NH_4)_2SO_4 + 2H_2BO_3 \quad \mathbf{(7)}$$

Le moindre excès d'acide sulfurique provoque le virage au rose de la solution. Le volume de H_2SO_4(0,01N) versé correspond à l'ammonium contenu dans le tube de départ. Un essai à blanc (sans échantillon) est effectué dans les mêmes conditions.

Le pourcentage d'azote dans la matière sèche est enfin déduit de la formule :

$$\%\,N = [(V_1 - V_0).0{,}14.10^{-3}.100].100/\,m \quad (8)$$

Avec : V_1= volume de H_2SO_4 utilisé pour la titration de l'échantillon (mL) ;

V_0= volume de H_2SO_4utilisé pour la titration de l'essai à blanc (mL);

m = masse de l'échantillon (g).

La teneur en protéines totale est calculée en utilisant le facteur de conversion 6,25 (AOAC 46-11A, 1990). Les résultats exprimés représentent la moyenne de trois essais.

II.2.3. Teneur en lipides

Les lipides sont déterminés par différence de poids après extraction au Soxhlet. Pour ce faire, 5 g de farine de patate douce sont placés dans une cartouche préalablement séchée pendant1 h dans une étuve à 105°C et refroidie dans un dessiccateur. Ensuite, les lipides contenus dans les farines de patate douce sont extraits durant 6 h, à l'aide d'éther diéthylique et d'éther de pétrole. Ensuite, le mélange de solvants est évaporé et les lipides extraits sont pesés. Les résultats exprimés représentent la moyenne de trois essais.

II.2.4. Teneur en sucres réducteurs

Les sucres réducteurs sont extraits par la méthode AACC 80-60 (AACC, 1999), spécifique aux farines et semoules, et dosés par la méthode colorimétrique utilisant le DNS (Acide 3, 5-dinitrosalicylique, Sigma-Aldrich, Saint-Quentin Fallavier, France).

Principe

En présence des sucres simples (réducteurs) et à chaud, l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS) donne un complexe rouge-brun (l'acide 3-amino-5-nitrosalicylique) qui présente un maximum d'absorption à 540 nm (Fischer et Stein, 1961).

Extraction

5g de farine sont introduits dans des erlenmeyers de 100 mL. Les erlenmeyers sont par la suite inclinés de sorte que toute la farine soit positionnée sur un côté de l'erlenmeyer et 5 mL d'éthanol à 95 °C sont ajoutés. Puis, 50 mL d'une solution de tampon acétate à pH 4,5 sont introduits dans l'erlenmeyeren maintenant le flacon incliné de sorte que la farine humide soit sur le côté supérieur. Les flacons sont ensuite agités pour ramener la farine dans la suspension, 2 mL de solution de tungstate de sodium à 12 % sont immédiatement ajoutés et l'ensemble est agité pendant 10 min et filtré.

Dosage

0,25 mL de filtrat est introduit dans un tube à essai, ainsi que 0,5 mL de NaOHà 1N et 0,25 mL de DNS. Le mélange est chauffé dans un bain d'eau bouillant pendant 5 min puis 4 mL d'eau distillée y sont ajoutés. Le mélange est agité et l'absorbance lue à 540 nm contre un blanc constitué d'eau distillée.

II.2.5. Teneur en amidon

La teneur en amidons totaux est déterminée par la méthode enzymatique décrite par Miller *et al*. (1997) avec de légères modifications.

Principe

La méthode est basée sur la conversion totale de l'amidon en D-glucose par les enzymes purifiées indiquées pour l'amidon, et le dosage du D-glucose libéré par une enzyme ou un réactif spécifique (acide 3, 5-dinitrosalicylique par exemple).

Mode opératoire

Une prise d'essai de 30 mg de farine est dispersée dans un tube contenant 6 mL d'éthanol 80 % (v/v). Après ajout de diméthylsulfoxide (DMSO), le tube est porté à ébullition dans un bain d'eau agitateur pendant 30min. L'amidon solubilisé estensuite hydrolysé par addition de 60µL d'α-amylase (40 mg/mL) d'*Aspergillus niger* (Roche, Bâle, Switzerland) puis, le tube est porté de nouveau à ébullition. Après 5 min, le tube est sorti du bain puis refroidi et 1 mL d'une solution tampon acétate (pH 4,5) et 40µL d'amyloglucosidase d'*Aspergillus Niger* (Roche, Bâle, Switzerland) y sont ajoutés et l'ensemble est porté à 50 °C. Les contenus des tubes sont par la suite centrifugés (3000g, 10 min), et la concentration en glucose dans le surnageant est déterminée par la méthode de Fischer et Stein (1961) utilisant l'acide 3-5-dinitrosalicylique (DNS). L'absorbance est lue à 540 nm et la concentration en glucose est par la suite convertie en teneur en amidon en utilisant un facteur multiplicatif de 0,9.

II.2.6. Teneur en cendres

La teneur en cendres brutes des farines est déterminée suivant la méthode AOAC(1990). Elle consiste à minéraliser de 3 à 5 g de farine (contenus dans des creusets en porcelaine préalablement séchés) dans un four à moufle. Le creuset de minéralisation à vide a d'abord été nettoyé, séché et pesé (M_0). Le creuset contenant le produit humide (3 à 5 g) est à nouveau pesé (M_1) et placé à l'étuve à 105°C pendant 24 h. Après séchage, le creuset est sorti de l'étuve, puis refroidi dans un dessiccateur (P_2O_5) avant d'être pesé (M_2). Une fois pesés, les creusets sont introduits dans le four à 550°C, pour incinération pendant environ 6 h, refroidis dans le dessiccateur et pesés à nouveau. La teneur en cendres (TC ; exprimée en%) est la masse de produit restant dans le creuset après incinération rapportée à la matière sèche totale du produit.

$$TC = \frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} \times 100 (9)$$

II.2.7. Teneur en minéraux

La teneur en minéraux (K, Na, Mg, Ca, Zn, Fe) est déterminée par spectroscopie d'absorption atomique après solubilisation des cendres en milieu acide. 1 g de cendres est solubilisé avec 10 mL d'acide chlorhydrique, puis la solution est complétée à 100 mL avec de l'eau distillée. L'appareil utilisé pour la détermination des teneurs minérales des échantillons est un spectromètre d'absorption atomique HGA 700 (Perkin-Elmer, USA) alimenté par une flamme air-acétylène. Pour l'extraction du calcium et du magnésium, 10 mL de chlorure de lanthane (18 g d'oxyde de lanthane + 250 mL d'HCl concentré à 99 %) sont ajoutés avant de compléter la fiole à 100 mL jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

- **La teneur en phosphore**

La teneur en phosphore des farines est déterminée selon la méthode colorimétrique décrite par Rodier (1978).

Principe

En milieu acide et en présence du molybdate d'ammonium ($(NH4)_6Mo_7O_{24}$, $4H_2O$, Sigma-Aldrich, Saint-Quentin Fallavier, France), les phosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développe une coloration bleue ayant un maximum d'absorption à 690 nm. Certaines formes du phosphore peuvent être hydrolysées au cours de l'établissement de la coloration et donner des phosphates, le développement de la coloration étant accéléré par l'utilisation d'un catalyseur : le tartrate double d'antimoine et de potassium.

Mode opératoire

La teneur en phosphore est déterminée après minéralisation d'environ 1g de farine de patate douce pendant 12 h à 550°C dans des creusets en porcelaine. Les cendres sont solubilisées dans 2,5mL d'acide sulfurique concentré. Cette solution est ensuite introduite dans une fiole jaugée de 50 mL complétée à l'eau distillée puis 2 mL de la solution réactive y ont été ajoutés.

La solution réactive est préparée en mélangeant 100 mL de H_2SO_4 5 N, 10 mL de tartrate double d'antimoine et de potassium, 30 mL de molybdate d'ammonium et 60 mL de solution d'acide ascorbique. L'ensemble est homogénéisé et laissé reposer pendant 30 min et l'absorbance est lue à 690 nm contre un blanc obtenu par addition de 2 mL de la solution réactive à 10 mL d'eau distillée. La concentration en phosphore d'une série de tubes est déterminée à partir de la gamme d'étalonnage de phosphate de 0 à 10 mg/L. La teneur de phosphore en g (T_P) pour 100g d'amidon sec a été calculée par la relation suivante :

$$T_P = \frac{X*100*V_c*TC}{V_i*m*1000} (10)$$

avec X : concentration en phosphore (mg/L); V_c : volume total de la solution des cendres (mL); TC : teneur en cendres (g/100g MS (matière sèche); V_i : volume de la solution d'essai (mL); m : quantité des cendres utilisées pour obtenir V_c (g).

II.3. Propriétés physiques des farines

II.3.1. Couleur

La couleur est un attribut perceptif, subjectif, élaboré dans notre système visuel à partir de la lumière renvoyée par les objets et leur environnement. La colorimétrie consiste en un ensemble de méthodes permettant de quantifier la couleur de façon objective. L'espace chromatique L*a*b* a été défini par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Les trois coordonnées correspondent à la luminance (L*), à la balance « rouge-vert » a* et à la balance« jaune-bleu » b* (Figure14).

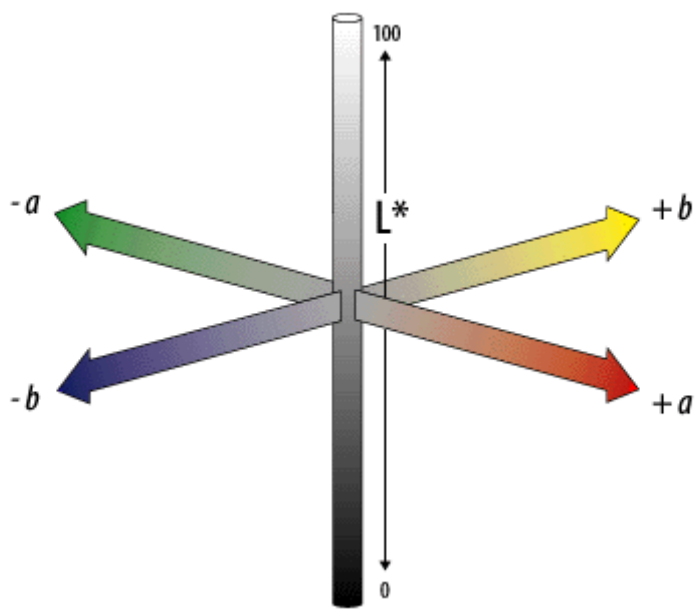


Figure 14 : Espace chromatique CIE L*a*b*

Les mesures sont effectuées sur des échantillons de farines de patate douce répartis dans des boites de pétri transparentes. Après une calibration de l'appareil avec des étalons noirs et blancs, la cellule de l'appareil est directement positionnée sous la boite de pétri contenant la farine pour effectuer la mesure. Les résultats représentent la moyenne de 3 mesures.
L'Indice de Blancheur(IB) a été calculé suivant l'équation de Nguimbou *etal.*(2012) :

$$IB = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \quad (11)$$

II.3.2. Distribution granulométrique

La distribution des tailles des particules à l'échelle micrométrique est déterminée par diffusion statique de la lumière grâce à un granulomètre Mastersizer S (Malvern Instruments Ltd, Royaume-Uni).

Principe

Le principe du fonctionnement du Mastersizer est illustré sur la figure 15. L'appareil est équipé d'un laser de type He/Ne d'une puissance de5mV et opérant à une longueur d'onde de 632,8 nm. L'optique est composée d'une cellule de mesure de 0,5 mm d'épaisseur sur laquelle est montée une lentille de type 300RF possédant une distance focale de 0,45 mm. L'intensité lumineuse diffusée par l'échantillon est récupérée par 42 photodiodes localisées à différents angles. La lumière étant diffusée par une particule avec un angle inversement

proportionnel à sa taille, les grosses particules dévient une quantité importante de lumière avec des angles faibles, alors qu'une petite particule va dévier peu de lumière avec des angles plus importants. L'acquisition est réalisée à l'aide du logiciel de traitement Malvern (Sizer Sv2.17) qui permet la récupération et l'analyse des données brutes.

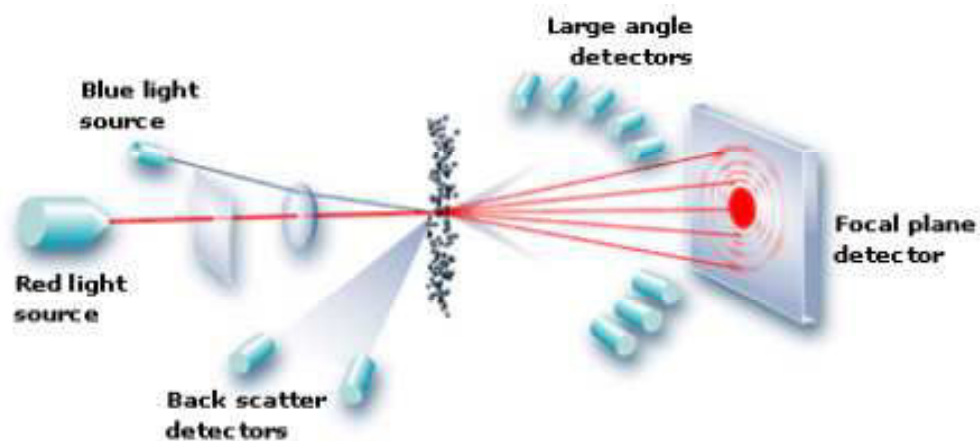


Figure15 : Principe du Mastersizer de Malvern (Hussain, 2012)

Mode opératoire

Pour les tailles des particules les plus importantes (comprises entre 0,1 et 1000 µm), environ 0,5 g de farine de patate douce est ajouté à 200 mL d'éthanol. Ce mélange permet d'obtenir une obscuration correcte (autour de 15 %). La dispersion obtenue était stable tout au long de l'expérience sous une agitation de l'ordre de 2000 $tr.min^{-1}$. Les résultats obtenus sont représentés par les diamètres moyens calculés selon la théorie de Mie. Toutes les mesures sont répétées six fois.

II.3.3 Morphologie des particules

Les mesures sont effectuées en utilisant un granulomorphomètre QicPic (Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld, Allemagne) équipé d'un module de Lixell (Sympatec GmbH) spécifique pour la dispersion de suspensions et les émulsions (Figure 16).

Figure16 : Granulomorphomètre utilisé

Principe :

Les particules granulaires (farines de patate douce) passent à travers un faisceau laser qui balaye une zone verticale. La caméra enregistre une séquence d'images correspondant à plusieurs millions de particules, puis le logiciel procède à l'analyse des images acquises afin de calculer les distributions de descripteurs de taille et de forme.

Mode opératoire

Pour chaque mesure, 0,25 g d'échantillon est dilué dans 75 mL d'éthanol en vue d'atteindre la bonne obscuration (environ 15 à 20 %) et d'éviter la superposition des particules. Trois mesures sont effectuées pour chaque échantillon de poudre. Le logiciel Windox (5,4 Windox 2007,Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld, Allemagne) est utilisé pour déterminer la forme des particules. Le diamètre d'un cercle égal à la surface de projection (EQPC) a été déterminé (Figure 17A). L'EQPC est défini comme le diamètre d'un cercle qui a la même surface que la surface projetée de la particule. A partir de l'EQPC, la sphéricité (Figure17B) est déterminée et définie comme le rapport du périmètre du cercle équivalent au périmètre vrai de la particule. La valeur de sphéricité est comprise entre 0 et 1. Lorsque S vaut 1, la particule est parfaitement sphérique, tandis que S très petit indique que la particule est très irrégulière. La convexité (Figure 17C) est aussi déterminée, sans régions concaves, le maximum théorique correspond à une convexité de 1.

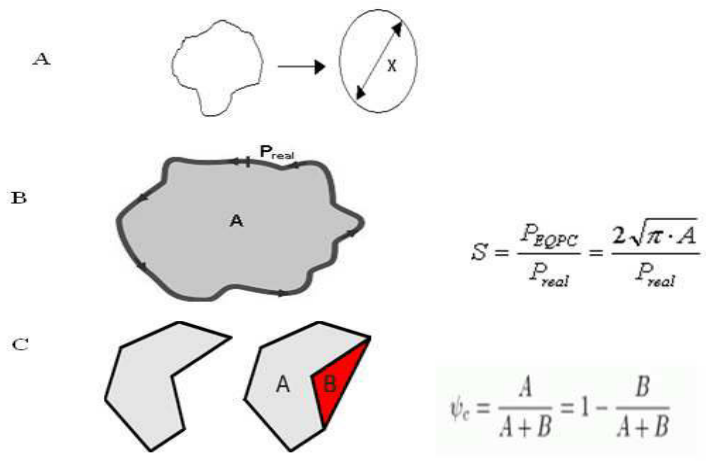


Figure17 : Représentation du diamètre d'un cercle égal à la surface de projection (EQPC) (A)et les facteurs de formes : sphéricité (B) et convexité (C) (Gaiani *et al*., 2011)

II.3.4. Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique permet d'identifier les conséquences sur la microstructure d'un échantillon de la variation d'un paramètre de procédé, mais pas les mécanismes ayant entraîné les modifications de sa microstructure. Elle ne permet pas, par exemple, de localiser un composé d'intérêt (amidon, matière grasse, protéines) dans le produit au cours de différentes étapes d'un processus de fabrication, mais simplement la topographie d'une surface d'une poudre par exemple. Les observations au microscope électronique à balayage sont effectuées au Laboratoire de Chimie Minérale à la Faculté des Sciences et Techniques (Université de Lorraine, Nancy).

Principe

La microscopie électronique à balayage repose sur le même principe que la microscopie optique, à la différence près que le rayon incident est constitué par un faisceau très fin d'électrons accélérés sous une tension de 10 à 30 kV au lieu d'un rayon de lumière visible. Les électrons rétrodiffusés et/ou secondaires sont recueillis en synchronisant la détection au balayage du faisceau incident. On obtient ainsi une image de la surface. On distingue deux types de contrastes :

- Le contraste topographique est lié au taux d'électrons rétrodiffusés et à leur accès au détecteur en fonction de la topographie. Cela permettra de distinguer la profondeur de l'échantillon.

- Le contraste chimique est lié au facteur de diffusion de l'atome donc à son numéro atomique. On distinguera un atome lourd d'un atome plus léger par la présence d'une zone brillante due au nombre élevé d'électrons rétrodiffusés.

Mode opératoire

Les farines à analyser sont fixées sur un ruban adhésif double face monté sur un support. Une couche de carbone de 10 nm, puis un mélange or/palladium sont déposés à la surface des particules de poudre. Cette préparation consiste à rendre l'échantillon conducteur. Les mesures sont réalisées sous vide secondaire (environ 10^{-5} torr) par rétrodiffusion des électrons secondaires avec un microscope électronique à balayage (Hitachi S2500, Japon).

II.4.Propriétés thermiques et rhéologiques

II.4.1. Analyse Thermique Différentielle (ATD ou DSC)

Les thermogrammes (figure 18) de l'ATD des farines de patate douce sont déterminés sur un calorimètre différentiel (DSC 204 F1, Netzch, Phoenix, USA).

Principe

L'analyse est dite « différentielle » car le flux énergétique mesuré au niveau de l'échantillon est soustrait de celui d'un point de référence constitué par une capsule vide. Un balayage de température permet de déterminer la température correspondant aux changements d'état, ainsi que la quantité d'énergie dégagée (transformation exothermique) ou consommée (transformation endothermique) lors du changement d'état.

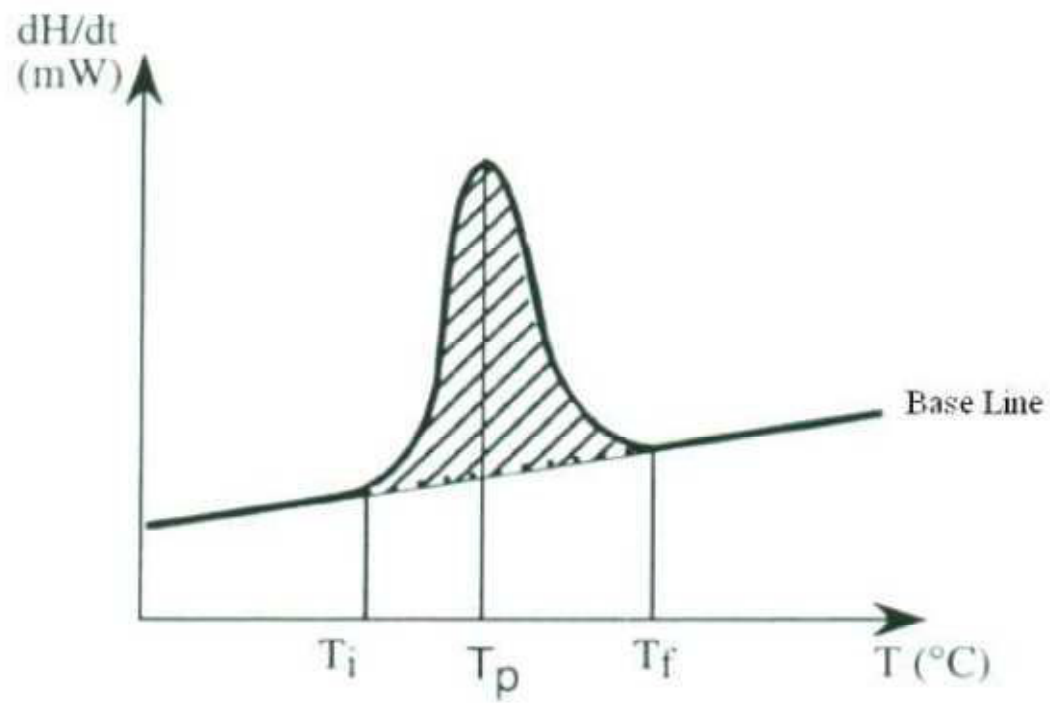


Figure18 : Exemple de thermogramme obtenu par DSC (réaction endothermique)**.**

Mode opératoire

Les thermogrammes de l'ATD des farines de patates douces sont enregistrés sur un calorimètre différentiel commandé par le logiciel Proteus1modèle Netzch (Pheonix,USA).

Les farines de patate sont dispersées dans de l'eau distillée (à 25 % (m/v)) dans une capsule d'aluminium hermétiquement scellée puis maintenue à la température ambiante à 20 °C pendant 15 min pour permettre une bonne homogénéisation. Les farines sont alors maintenues 5 min à 30 °C, puis chauffées de 30 à 100 °C à la vitesse de 10 °C. min^{-1}(Waramboi *et al.*,2011). L'appareil est calibré pour la température et la mesure d'enthalpie avec de l'indium (ΔH = 28,43 J/g) et une capsule vide est utilisée comme référence. Le logiciel Proteus1 est utilisé pour déterminer les températures de début (T_0), de pic (T_p) et de fin de gélatinisation (T_f), ainsi que ΔH_{Gel} l'enthalpie de gélatinisation.

II.4.2. Analyses rhéologiques

Dans les mesures d'oscillation dynamique, l'énergie potentielle et l'énergie dissipée sous forme de chaleur sont mesurées séparément en tant que module de stockage (élastique) G' et module de perte (visqueux) G" (Figure 19). La mesure est basée sur la déformation de cisaillement imposée à l'échantillon selon l'équation :

$$\gamma = \gamma_0 \, sin\,(\omega t) \quad (12)$$

qui répond à cette déformation avec une contrainte sinusoïdale selon l'équation :

$$\sigma = \sigma_0 \; sin\,(\omega t) (13)$$

avec :

ω : fréquence angulaire ;

γ_0 : déformation de cisaillement;

σ_0 : contrainte de cisaillement.

L'angle de perte δ (déphasage) est le rapport viscoélastique, il reflète l'importance relative du caractère élastique ou visqueux du produit.

Pour un solide élastique, la contrainte est en phase avec la déformation, indépendamment de la fréquence de sollicitation, toute l'énergie absorbée est transférée sous forme d'énergie potentielle (δ= 0), mais pour un liquide visqueux newtonien, la contrainte est en décalage de phase avec la vitesse de déformation (δ =$\pi/2$).

Si 0 < δ ≤ $\pi/2$, une partie de l'énergie fournie lors de la déformation est emmagasinée par le produit est l'autre partie est dissipée, ce qui confère à l'échantillon un comportement viscoélastique (Berland &Launay, 1995).

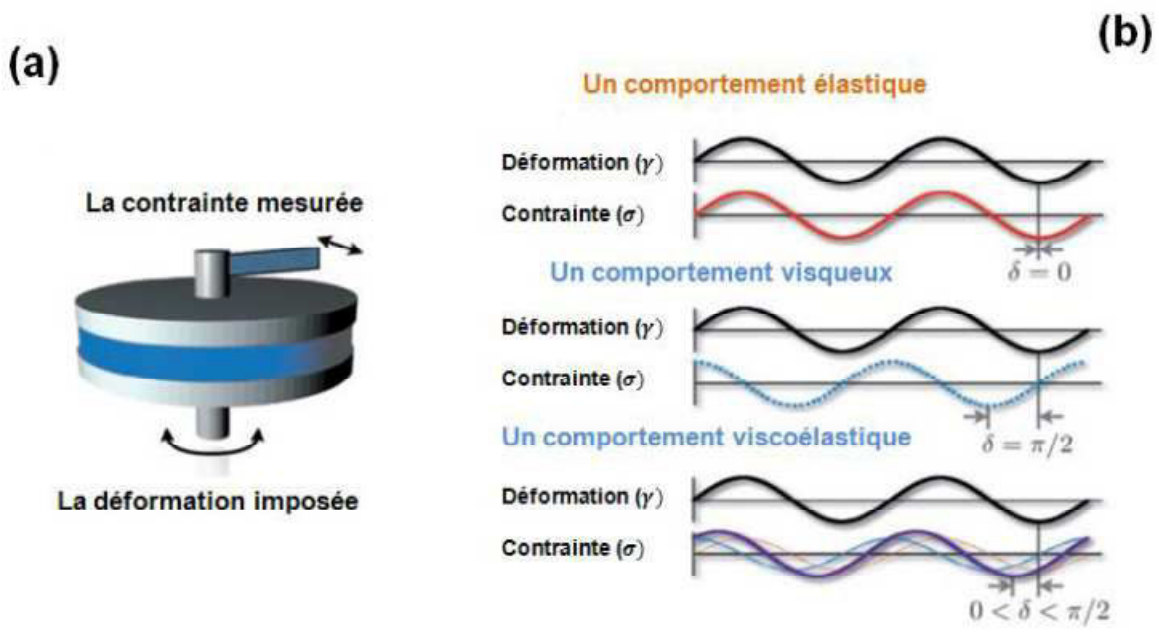


Figure19 : (a) Schéma d'un échantillon placé entre deux plaques d'un rhéomètre,(b) Exemple de réponse en contrainte à la déformation de cisaillement appliquée à un solide élastique, un liquide visqueux et un matériau viscoélastique (Meziani, 2012).

Mode opératoire

Des mesures rhéologiques par oscillations de petites amplitudes sont effectuées sur chaque échantillon de farine de patate douce avec un rhéomètre dynamique (Kinexus, Malvern Instruments) muni d'un système cône-plan parallèle (diamètre = 4 cm, angle = 2°). Le rhéomètre est équipé d'un régulateur de température (effet Peltier) permettant l'obtention d'une rampe de température très précise. La contrainte et la fréquence ont été placées à 0,5% et 1 Hz respectivement. Des suspensions de farines préparées à 10 % (m/v) sont soumises à une rampe de température de 30 à 100 °C à une vitesse de 2°C.min^{-1}. Les propriétés rhéologiques, telles que le module de stockage ou élastique (G'), le module de perte ou visqueux (G''), sont déterminées pendant le chauffage de chaque farine.

II.5. Propriétés structurales et fonctionnelles

II.5.1. Analyse Spectrométrique Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

Contrairement aux méthodes d'analyse par réaction colorée ou enzymatique qui ciblent une molécule donnée, l'analyse par infrarouge est une méthode d'analyse structurale qui révèle la nature des liaisons entre atomes dans une molécule. Les composés organiques ont en effet la particularité de posséder des liaisons interatomiques qui entrent en vibration sous l'action d'un rayonnement infrarouge à des longueurs d'onde caractéristiques.

Ce phénomène s'accompagne d'une consommation d'énergie lumineuse à la longueur d'onde considérée. Le FTIR permet de mesurer les absorbances d'énergie des liaisons chimiques (fonctions alcool, acide, méthyle, méthylène…) de tous les composants présents dans les produits analysés et de les corréler à leurs concentrations, puisque l'intensité de l'absorption est directement proportionnelle à la concentration de la molécule considérée.

Principe

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est l'une des techniques les plus couramment utilisées en chimie organique et inorganique. Elle mesure l'absorption des fréquences infrarouges par un échantillon placé dans le trajet d'un faisceau infrarouge.

L'objectif principal de l'analyse de FTIR est de déterminer les groupements chimiques fonctionnels dans un échantillon. Chaque groupement fonctionnel a une fréquence d'absorption caractéristique de rayonnement infrarouge. Une large gamme d'échantillons tels

que les gaz, liquides et solides peuvent être analysés par cette technique. La spectroscopie IR est un outil important et populaire pour l'élucidation de la structure et l'identification des composés.

Appareillage

Les spectromètres FTIR utilisent une méthode destinée à obtenir un spectre infrarouge en collectant d'abord l'interférogramme d'un signal échantillon à l'aide d'un interféromètre, puis en exécutant une transformation de Fourier de cet interférogramme afin d'obtenir un spectre infrarouge. Les spectromètres FTIR collectent et numérisent l'interférogramme, exécutent la transformation de Fourier et affichent le spectre. L'interféromètre le plus couramment utilisé est un interféromètre de Michelson. Le fonctionnement du spectromètre FTIR est présenté dans la figure 20.

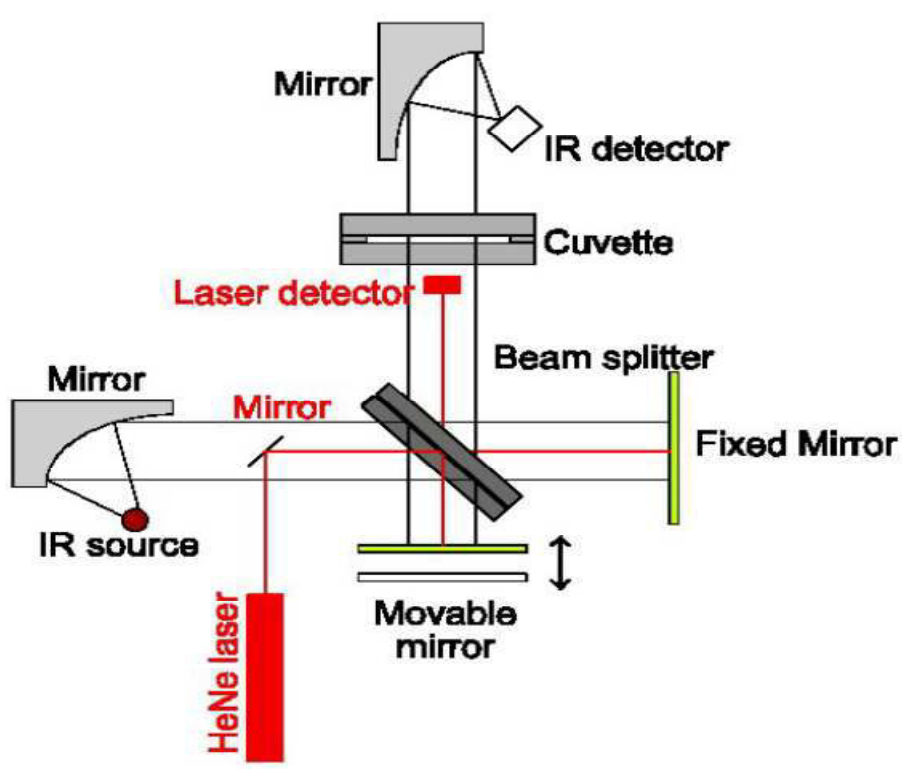


Figure 20 : Schéma de fonctionnement d'un spectromètre FTIR.

Comme son nom l'indique, l'interféromètre produisant des signaux d'interférences, qui contiennent des informations spectrales infrarouge générées après passage à travers un échantillon.
Les détecteurs les plus utilisés en spectrométrie FTIR sont le DTGS (Deuterated TriGlycine Sulfate) et le MCT (Mercury Cadmium Telluride). Le détecteur DTGS est un détecteur pyroélectrique qui fournit des réponses rapides, car il mesure les variations de la température plutôt que la valeur de la température. Le détecteur MCT est un détecteur de photons qui dépend de la nature quantique du rayonnement, il présente également des réponses très rapides.

Les analyses sont réalisées par réflexion totale atténuée. Ces dernières années, la spectroscopie par ATR a révolutionné l'analyse des échantillons solides et liquides. Cette technique permet une préparation des échantillons plus aisée et une meilleure reproductibilité spectrale.

- **Acquisition des spectres et premiers traitements**

Les analyses FTIR sont réalisées avec un spectromètre de Tensor 27 mi-FTIR Bruker (Bruker, Karlsruhe, Allemagne) équipé d'une cellule ATR (Réflexion Totale Atténuée)et d'un détecteur MCT. La vitesse de balayage est de 20 kHz, 200 scans sont utilisés à titre de référence et des échantillons entre 1050 et 850 cm^{-1}. La résolution nominale de l'instrument est de 2 cm^{-1}. Les références sont enregistrées sur les solutions salines en fonction de leurs concentrations, puis 0,1g de farine a été déposé sur le cristal ATR (ZnSe). Avant la mesure, la dispersion est maintenue pendant 5 min pour permettre aux protéines de s'adsorber sur le cristal. Ceci améliore considérablement le rapport signal/bruit.
L'équipement ATR est purgé en continu avec de l'air sec pendant toute la durée des mesures.Trois à cinq expériences distinctes ont été réalisées pour chaque échantillon de farine.

Le traitement de tous les résultats est effectué à l'aide d'un logiciel OPUS (Bruker, Karlsruhe, Allemagne). Tout d'abord, les traces d'eau et de CO_2 sont soustraites des spectres.
Ensuite, les spectres sont lissés en utilisant la méthode des neuf points. Pour terminer, une correction de la ligne de base élastique est réalisée à l'aide de 200 points, une normalisation et une conversion spectrale en unité d'absorbance.

- **Ajustement des modèles des courbes et procédure de déconvolution**

Pour initier la déconvolution spectrale, les spectres dérivés sont calculés sur des données centrées et normalisées. Ces spectres de dérivée seconde sont utilisés uniquement pour identifier les positions des pics individuels (Curley *et al*., 1998;Farrell *et al*., 2001).Une fois les positions définies, les spectres sont traités par un programme de déconvolution (Software Opus). Les aires intégrées de chaque pic ont été calculées.

II.5.2. Capacité d'absorption et indices de solubilité à l'eau

L'Indice d'Absorption à l'Eau (IAE) et l'Indice de Solubilité à l'Eau (ISE) ont été déterminés par Mahasukhonthachat *et al.* (2010) avec de légères modifications. Le principe de la méthode est de mettre en évidence la quantité d'eau en grammes retenue par 100 g d'amidon après saturation et centrifugation.

Environ1 g d'échantillon et 30 mL d'eau distillée sont agités pendant 40 min à 40 $tr.min^{-1}$ à l'aide d'un agitateur de type Bioblock Compsas et centrifugé à 2000g pendant 10 min (Firlabo, France). Le culot est pesé et le surnageant est récupéré puis séché à 105 °C. La teneur du surnageant et le poids du sédiment après centrifugation sont déterminés. L'IAE est calculé pendant que le poids du granule plein restant après centrifugation se divisait par le poids de l'échantillon sec.

$$IAE\ (g\ pour\ g\ \mathrm{M.S}) = masse\ du\ solide/masse\ d'échantillon\ sec \quad (14)$$

$$ISE\ (g\ pour\ 100g\ m.s) = \mathrm{M.S}\ du\ surnageant\ /\ masse\ d'échantillon\ sec (15)$$

La capacité de gonflement a été déterminée selon Lai &Cheng(2004) suivant l'équation :

$$CG = masse\ du\ culot\ /\ [masse\ d'échantillon\ sec \times (1 - ISE)](16)$$

Avec : M.S, matière sèche.

II.5.3. Isotherme d'adsorption d'eau par Sorption de Vapeur Dynamique (DVS)

Les isothermes de sorption d'eau sont des données majeures de la technologie alimentaire. Ces courbes traduisent macroscopiquement les états thermodynamiques de l'eau (eau solvant,

eau non solvant). Les isothermes de sorption des farines de patate douce sont déterminées par méthode gravimétrique en utilisant la technique de la sorption dynamique de la vapeur DVS (Surface Measurement Systems, London, Royaume-Uni).

L'appareil DVS permet la mesure des capacités de sorption d'humidité de farine de patate douce en fonction de l'humidité relative (RH).Environ 15-20 mg de l'échantillon sont chargés sur la coupelle de quartz. Les paliers d'humidité sont réglés, les temps d'attente et la température sont fixés. L'humidité varie entre 0 et 98 % avec des pas de 10 % et un temps d'attente de 12 h. Ce dernier permet d'atteindre l'équilibre. Pour chaque étape ou palier, l'évolution de la masse (m) et le taux de variation de la masse (dm/dt) sont tracés en fonction du temps. L'équilibre est considéré atteint quand dm/dt est inférieur à 0,002 %.min^{-1} (i. e.,2 g d'eau/100 g /jour). Toutes les expériences sont réalisées à 25 °C et deux répétitions sont effectuées pour chaque échantillon.

Modélisation des isothermes de sorption

Les isothermes sont généralement de type II. Ils correspondent à des milieux granulaires non poreux, selon la classification BET (Brennuer-Emmett-Teller), de forme sigmoïde (Figure 21).

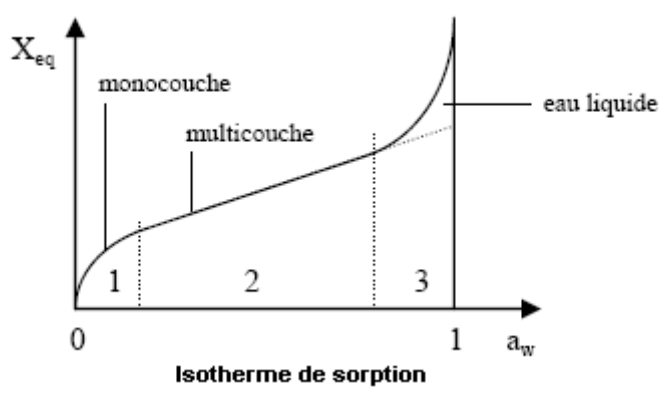


Figure 21 : Différentes zones des isothermes de sorption de Type II.

La courbe peut être décrite par un mécanisme d'adsorption d'eau en trois étapes. La première étape est celle de la constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit. Elle est caractéristique de l'action des forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles (des amidons, protéines ou pentosanes) et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe des pores du produit.

En effet, l'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Ainsi, le passage à l'étape suivante s'effectue quand toute la surface est saturée. La deuxième étape est celle d'adsorption des molécules sur la monocouche initiale. Au cours de cette dernière, les molécules d'eau supplémentaires se lient sur la monocouche d'eau et commencent à former des grappes. L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.

Enfin, la troisième étape correspond à la condensation de l'eau dans les pores. L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau microcapillaire constitue une phase continue. Des très légères différences des isothermes d'adsorption expérimentales ont été observées entre les échantillons prétraités et l'échantillon non prétraité.

Les isothermes d'adsorption de vapeur d'eau ont été décrites selon le modèle Brunauer-Emmet-Teller (BET) selon l'équation :

$$X = X_m \frac{C_{BET} a_w}{(1 - a_w)(1 - a_w + C_{BET} a_w)} \quad (17)$$

Avec X : teneur en eau à l'équilibre (g d'eau/100 g en base sèche),

X_m : la teneur en eau de la monocouche (g d'eau/100 g en base sèche),

C_{BET} : constante d'énergie de liaison d'eau,

a_w : activité d'eau des farines.

Ce modèle a été choisi pour sa fiabilité pour des activités d'eau inférieures à 0,5 (O'Connor & O'Brien, 1994).

II.6. Caractérisation des farines composées, pâtes et pains

Une substitution partielle de la farine de blé par les produits amylacés (tubercules et céréales) locaux peut constituer une alternative intéressante en termes de coûts-bénéfices par rapport aux grains importés, raison pour laquelle la FAO a lancé depuis 1964 un programme sur les farines composées pour substituer le blé dans divers produits alimentaires à base de farine (FAO, 1971).

En effet, plusieurs auteurs ont travaillé sur le développement des farines composées dans lesquelles une partie de la farine de blé est remplacée par d'autres sources amylacées (Dendy*et al*., 1973; Berthelot, 1990; Defloor, 1995 ; Mbofung *et al*.,2005). C'est dans cette optique que se situe le présent travail qui a pour objectif d'évaluer l'aptitude des farines produites à partir des tubercules de patate douce à substituer partiellement la farine de blé dans des formulations alimentaires, notamment la panification.

L'étude a été réalisée à partir des farines de patates douces traitées au $CaCl_2$. Une farine de blé type commercial sans additif, fournie par la société le Grand Moulin de Paris (Ivry-sur-Seine, France) est utilisée pour réaliser les farines composées en substituant la farine de blé par les farines de patate douce à des taux de 0, 10, 15, 20, 25 et 30 %. Les différentes farines obtenues et les codes utilisés sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Les différentes farines obtenues et les codes utilisés

Farine composée (%)	Farine de blé (%)	Patate douce (%)
100 : 0	100	0
90 : 10	90	10
85 : 15	85	15
80 : 20	80	20
75 : 25	75	25
70 : 30	70	30

II.6.1 Teneur en eau, protéines et cendres

La teneur en eau, protéines totale et cendres brutes des farines de blé et patate douce a été déterminée selon la méthode AOAC (1990) (cf.II.2.1 ;II.2.2 et enfin II.2.6).

II.6.2 Capacité de rétention d'eau

La capacité de rétention d'eau est déterminée selon la méthode de Chau *et al*. (1997) et est quantifiée par le pourcentage de rétention d'eau de l'échantillon. Il est exprimé en gramme d'eau par gramme d'échantillon. Pour le déterminer, l'échantillon est d'abord hydraté avec de l'eau distillée selon un rapport de 1 : 10 (p/p) et il est agité pendant 30 min à température ambiante. Par la suite, il est centrifugé à 2500 rpm pendant 20 min à 25 °C et on détermine le poids du surnageant. La différence représente le pourcentage d'eau absorbée par l'échantillon.

II.6.3. Préparation des pâtes

La formulation (figure 22) utilisée au cours de la panification est la suivante :

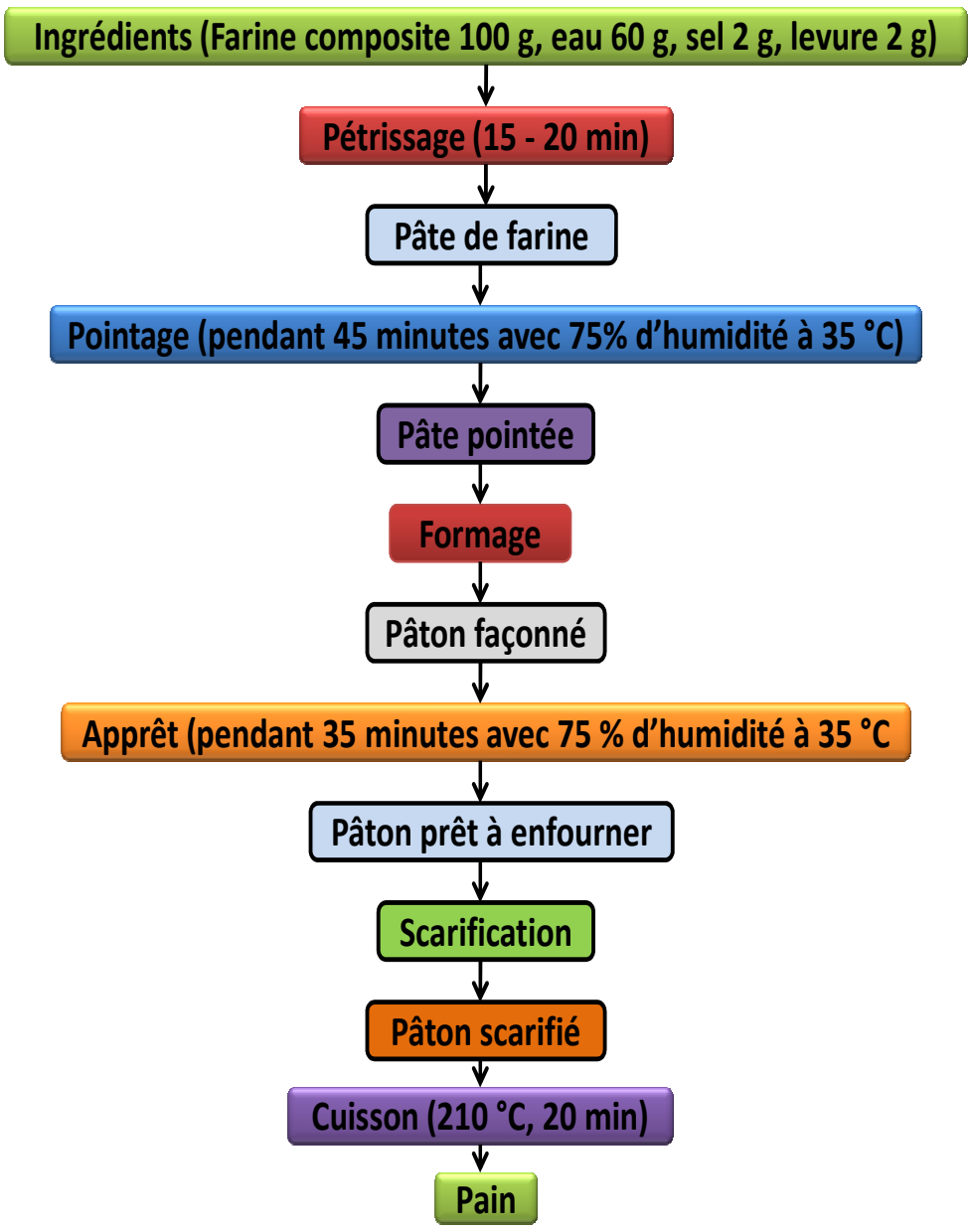


Figure22 : Schéma de fabrication des pains blé/patate douce.

II.6.4.Analyse texturale des pâtes et pains

La texture est l'ensemble des propriétés rhéologiques et structurales perceptibles par les récepteurs mécaniques, tactiles, visuels et auditifs. Elle représente une propriété de l'aliment perçue sur le plan sensoriel et qui évolue depuis la mise en bouche jusqu'à la formation du bol alimentaire propice à la déglutition (AFNOR, 1995). Les mesures des caractéristiques texturales de la pâte peuvent se faire de manière mécanique (figure 23) ou sensorielle.

L'analyse instrumentale du profil de texture d'un aliment permet d'obtenir plusieurs paramètres texturaux ayant une corrélation avec certains paramètres d'appréciation sensorielle. Le test à deux morsures est très utilisé dans le cas des fruits et légumes. Pour cela, un échantillon est soumis à deux déformations. Il est bien adapté à l'étude de la simulation de la morsure des canines (pénétration), de la morsure des molaires ou encore du sens du toucher (compression).

Les caractéristiques texturales des pâtes et des pains sont faites en soumettant chaque échantillon à un test de double compression en utilisant la machine universelle Lloyd (Lloyd instrument LRX, Allemagne) pilotée par le logiciel Nexygen plus (Lloyd Instruments materials testing system).

Principe

Le principe de mesure du test de double compression est de déterminer la force du capteur nécessaire pour avoir des compressions de la pâte à 60 % de son épaisseur (2,50 ± 0,02 cm). Pratiquement, chaque pâte est soumise à 2 déformations de 20 mm chacune à une vitesse de 10 $mm.min^{-1}$ à l'aide du capteur muni d'une tige cylindrique de section circulaire de 10 mm de diamètre, soit 78,54 mm^2de surface. La force maximale du capteur est de 10 N, avec une précharge de 0,5N. La précharge, ou zéro de la force, correspond à la force minimale de contact entre la tige et la surface de la pâte marquant le début de l'expérience.

Figure 23 : Analyseur de texture

La détermination des paramètres du profil de texture est basée sur les travaux de Singh *et al*. (2006). À partir des courbes de double compression (Figure 24), les paramètres physiques suivants ont été définis :

- la dureté en Newtons (N) : elle exprime la force maximale obtenue à la première déformation ou morsure;
- la cohésion est le rapport entre l'aire 2 (deuxième déformation) et l'aire 1(première déformation). Elle représente la force qui unit les molécules constituant l'échantillon;
- l'élasticité (1/L) représente la distance sur laquelle un matériel déformé tend à revenir à sa position initiale après que la force déformante (appliquée par la tige du capteur) ait été arrêtée.

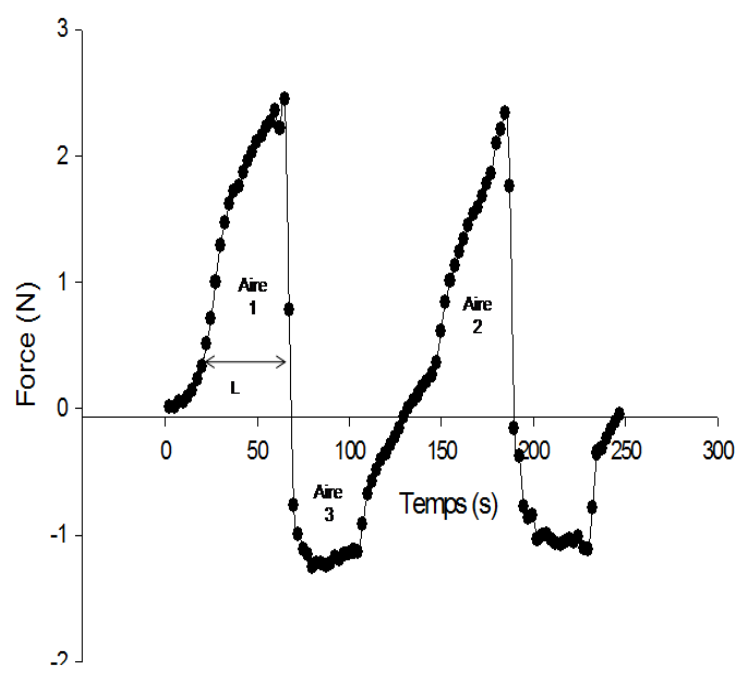


Figure 24 : Courbe typique de profil de texture d'une pâte mixte blé/patate douce

II.6.5. Cinétique de montée de la pâte

La montée de la pâte au cours de la fermentation est déterminée selon les méthodes publiées par Havet *et al*. (2000). Un mesureur de pousse assure le contrôle du niveau de fermentation. Il s'agit d'une éprouvette graduée de 50 mL, dans laquelle se trouve un pâton boulé de 100 g. Ce dernier est aplati dans le fond du mesureur et un disque est déposé dessus afin de

maintenir la surface de la pâte bien horizontale durant sa levée. Le disque coulissant au fur et à mesure de la fermentation joue le rôle d'indicateur du niveau de levée de la pâte.
Ensuite, l'ensemble est placé dans l'étuve à une température contrôlée à 30°C sous une humidité relative de 75 %, obtenue en y plaçant également une solution saturée de NaCl. Le volume de pâte au sein du mesureur est suivi toutes les dix minutes pendant une heure, temps au bout duquel le volume de pâte a doublé. La mesure de la pousse est illustrée sur la Figure 25.

Figure25 : Illustration de l'utilisation du mesureur de pousse pour le suivi du niveau de fermentation d'une pâte à pain pour différentes durées de pousse à partir de l'ajout de la levure(a) 0 min, (b) 30 min et (c) 60 min (Lassoued-Oualdi, 2005).

II.6.6. Détermination du volume du pain

Principe

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

Mode opératoire

On remplit avec des grains solides sphériques de volume spécifique (0,72 cm^3/g) connu un récipient plus grand que le pain. La mesure en elle-même consiste à vider à moitié le récipient de son contenu en grains sphériques. Ensuite, placer le pain et enfin couvrir l'échantillon avec le reste des grains. Après arasement de la surface du récipient de mesure à

l'aide d'une règle plate, récupérer les grains sphériques en excès. Leur volume correspond à celui des pains. Le volume spécifique des pains (V_{sp}) exprimé (cm^3/g) est le quotient du volume du pain (V) par sa masse (M) :

$$\boldsymbol{V_{sp}} = \frac{\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{M}} (18)$$

II.6.7.Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle est réalisée sur un panel constitué de 23 personnes non entraînées au sein du laboratoire d'analyses sensorielles de l'ENSAIA de l'Université de Lorraine. Nous avons présenté aux panélistes 6 pains réalisés à partir de formulations différentes, pour lesquelles il était demandé d'attribuer en fonction du goût et de l'aspect du pain une note sur une échelle de 1à 5, entre 1pour « je n'aime pas » à 5 pour« j'aime extrêmement ».

II.7. Analyses statistiques

Toutes les analyses sont répétées trois fois. Les résultats des trois échantillons de farines obtenus sont exprimés en moyenne ±écart-type et sont également soumis à une analyse de variances (ANOVA) afin de déterminer s'il existe une différence significative entre les différents paramètres des farines. Le test de comparaison multiple de Duncan est utilisé (la signification statistique est définie à $p < 0,05$) avec le logiciel Statgraphics Centurion XV.I (Stat Point Technologies, Warrenton, Etats-Unis). Le test de Duncan est une procédure de comparaison multiple qui permet de comparer toutes les paires de moyennes, en contrôlant le risque α général à un niveau défini. C'est une procédure par étape, reposant sur une <<*Studentized range distribution*>> qui indique quelles moyennes sont significativement différentes les unes des autres (Falissard, 2005). Une corrélation simple de Pearson et une corrélation linéaire multiple des propriétés mesurées de patate douce sont effectuées. Les graphes des courbes de distribution granulométrique, de morphologie (sphéricité et convexité), des spectres FTIR et enfin des paramètres du modèle BET sont tracés avec les logiciels graphiques Sigma Plot11.0 (Systat Software Inc., San Jose, États-Unis) et Microsoft Excel 2007 (Microsoft Corporation, Etats-Unis).

L'ajustement et la modélisation des isothermes d'adsorption des farines de patate douce sont faits avec le modèle mathématique BET en utilisant le logiciel Origin 6.1 (Origin Lab, Corporation, Northampton, USA).

Chapitre 3

Résultats et discussion

III. Résultats et discussion

III. 1. Caractérisation physicochimique des farines

L'objectif de cette partie est de caractériser les différentes farines de patate douce en évaluant l'influence des prétraitements sur la farine d'un point de vue physicochimique, thermique, microstructural, rhéologique et fonctionnel.

III.1.1 Composition chimique

Le Tableau 10 présente la composition chimique des différentes farines de patate douce.

Tableau 10 : Composition chimique des différentes farines de patates douces.

Echantillons	TPD	TPDPCaCl$_2$	TPDB
Teneur en eau (%)	8,0 ± 0,1^{b}	7,8 ± 0,6^{b}	7,3 ± 0,1^{a}
Protéines (%)	2,9 ± 0,1^{b}	2,8 ± 0,1^{b}	2,4 ± 0,1^{a}
Sucres réducteurs (%)	1,9 ± 0,2^{b}	2,8 ± 0,2^{c}	1,2 ± 0,2^{a}
Lipides (%)	0,9 ± 0,2^{a}	0,8 ± 0,2^{a}	0,6 ± 0,2^{b}
Glucides (%)	84,6 ± 0,4^{b}	82,4 ± 0,1^{a}	86,6 ± 0,3^{c}
Amidon (%)	64,8 ± 0,2^{b}	63,4 ± 0,8^{ab}	62,1 ± 0,3^{a}
Cendres (%)	1,7 ± 0,1^{b}	3,0 ± 0,2^{c}	1,2 ± 0,1^{a}
Ca (mg/100g)	77,8± 0,8^{b}	120,6± 0,6^{c}	67,6± 0,7^{a}
Na (mg/100g)	87,7 ± 0,5^{ab}	85,1 ± 1,1^{a}	88,5 ± 0,7^{b}
K (mg/100g)	147,7 ± 0,1^{ab}	148,4 ± 0,9^{b}	145,3 ± 0,5^{a}
Mg (mg/100g)	38,3 ±0,5^{b}	35,3±0,1^{a}	39,1±0,4^{c}
P (mg/100g)	26,8±0,8^{b}	27,2±0,7^{c}	24,9 ±0,9^{a}
Fe (g/100g)	37,1±0,1^{b}	40,6±0,1^{c}	35,4±0,3^{a}
Mn (g/100g)	0,3 ± 0,1^{a}	0,4 ± 0,1^{a}	0,3 ± 0,5^{a}

Les moyennes ± écarts-types suivies d'une même lettre dans la même ligne indiquent que les différences ne sont pas significatives ($p<0,05$, $n=3$).

La teneur en eau varie entre 7,3 et 8 %, les protéines entre 2,4 et 2,9 %, les sucres réducteurs de 1,2 à 2,8 %, les lipides entre 0,6 et 0,9 % et enfin les cendres sont comprises entre 1,2 et

1,9 % pour toutes les farines. Ces valeurs sont similaires à celles rapportées dans la littérature par van Hal (2000) et Ahmed *et al*. (2010).La teneur en eau est un paramètre crucial dans le stockage de farines. En effet, une teneur en eau des farines supérieure à 12 % favorise le développement des microorganismes. Dans notre étude, la teneur en eau est inférieure à 10 % pour tous les échantillons, pourrait permettre ainsi une bonne tenue lors du stockage. La teneur en protéines de la farine de patate douce est généralement faible, compris entre 1,0 et 8,5 % (VanHal, 2000), ce qui est en accord avec les valeurs obtenues dans cette étude. Aussi, on observe des différences significatives de teneurs en lipides, cendres, protéines, et sucres réducteurs entre tous les échantillons.

La teneur en sucres réducteurs des farines de patate douce varie entre 1,2 et 2, 8%, et elle est légèrement plus élevée dans les échantillons TPD$CaCl_2$ que dans les farines TPDB et TPD. Cette légère augmentation peut être due à la complexation des sucres par le calcium (Ahmed *et al*.,2010). Les glucides totaux, composés principalement d'amidon, sont les composants chimiques les plus importants dans les farines, tandis que les protéines et les lipides sont très peu présents. Cependant, on a noté de légères différences dans les glucides et l'amidon contenu dans tous les échantillons. D'après les travaux de Jangchud *et al*. (2003), le blanchiment peut provoquer une diminution de la teneur en amidon mais augmente la teneur en sucres réducteurs. Cette étude confirme bien que la farine TPDB est faible en amidon par rapport aux farines TPD$CaCl_2$etTPD, mais elle met également en évidence une légère diminution de la teneur en sucres due au blanchiment.

Les sucres réducteurs en effet jouent en effet un rôle important dans la fermentation panaire. On observe également une légère augmentation de la teneur en cendres dans l'échantillon TPD$CaCl_2$ (3,0 %) comparée aux échantillons TPD et TPDB (1,7 et 1,2 %), probablement en raison de l'addition du chlorure de calcium pendant le prétraitement.

Dans l'ensemble, les minéraux varient dans la gamme de 0,3 (fer) à 148,4 (calcium) mg/100g. Ces résultats montrent qu'indépendamment des prétraitements, le potassium, le sodium et le calcium sont les minéraux les plus abondants dans les farines de patates douces. Par contre, les farines de patate douces ont une faible teneur en fer. Comme on pouvait s'y attendre, la teneur en calcium est relativement élevée dans la farine TPD$CaCl_2$ (120,6 mg/100g) par rapport aux farines TPD et TPDB (respectivement, 77,8 et 67,6 mg/100g) du fait du prétraitement au $CaCl_2$. Les besoins en calcium sont importants pour les développements osseux et dentaires (Brody, 1994).

III.1.2. Paramètres de couleur

Tableau 11 : Paramètres de couleur de farines de patates douces.

Farines	L*	a*	b*	IB
TPD	84,4 ± 0,5[b]	2,2 ± 0,1[a]	12,7 ± 0,2[a]	86,9 ± 0,5[b]
$TPCaCl_2$	84,5 ± 0,6[b]	2,3 ± 0,2[a]	15,2 ± 0,4[b]	86,7 ± 0,1[b]
TPDB	81,5 ± 0,9[a]	1,2 ± 0,2[b]	12,6 ± 0,6[a]	83,3 ± 0,2[a]

L = clarté ou luminance ; a* = composante chromatique rouge-vert ; b* = composante chromatique jaune-bleu ; IB = Indice de blancheur.*
Les moyennes ± écarts-types suivies d'une même lettre dans la même colonne indiquent que les différences ne sont pas significatives (p<0,05, n =3).

L'aspect, principalement la couleur, est un attribut important de la qualité de la farine de patate douce, ce qui affecte la commercialisation de la farine et l'acceptabilité des produits alimentaires fabriqués à partir de cette farine (Collins & Gurkin, 1990). Les valeurs de couleur de la farine de patate douce obtenues après différents prétraitements sont présentées dans le Tableau 11. Toutes les caractéristiques de couleur sont du même ordre de grandeur : la valeur de luminance (L*) est comprise entre 81,5 et 84,5, tandis que les valeurs a* (composante chromatique rouge-vert) varient de 1,0 à 2,0 et celles de b*(composante chromatique jaune-bleu) varient dans la gamme de 12,2 à 15,2. Toute fois, la valeur de la luminance (L*) pour l'échantillon TPDB était inférieure à celle des farines $TPDCaCl_2$ et TPD. Ceci est accord avec les travaux de Jangchud *et al.* (2003), qui ont rapporté que le paramètre de la luminance L*a considérablement diminué après le blanchiment de deux variétés de patates douces. La valeur de a* (composante chromatique rouge-vert) était plus faible dans la farine TPDB (1,2) que dans les autres farines TPD et $TPDCaCl_2$ (2,2 et 2,3) respectivement. La valeur b* (composante chromatique jaune-bleu) était plus élevée pour les échantillons $TPDCaCl_2$ (15,2) par rapport aux farines TPDB et TPD (12,1). Les valeurs b* étaient plus élevées dans la farine $TPDCaCl_2$ et pourraient être liées à une plus grande quantité de β-carotène (Michael et Wilson, 1997; Ahmed *et al.*, 2010).Ces résultats suggèrent que le prétraitement au $CaCl_2$ augmente la quantité de β-carotène dans la farine, ce qui est cohérent avec son effet prouvé de protection contre l'oxydation (Lewicki,1998), étant donné que le β-carotène est très sensible à l'oxydation. Ainsi, le prétraitement au $CaCl_2$ pourrait contribuer à maintenir la qualité de la farine de patate douce pendant le stockage.

L'indice de blancheur (IB) varie entre 83,3 et 86,9 pour tous les échantillons de farine. Il représente la blancheur globale des produits alimentaires et peut indiquer le degré de décoloration au cours de l'opération de séchage (Nguimbou *et al.*, 2012). La présente étude

montre que le prétraitement au $CaCl_2$a permis de mieux conserver la couleur de la farine. En effet, la couleur de la farine est très importante car elle détermine dans une large mesure la couleur de la croûte du pain dans les procédés de la panification.

III.1.3. Distribution granulométrique

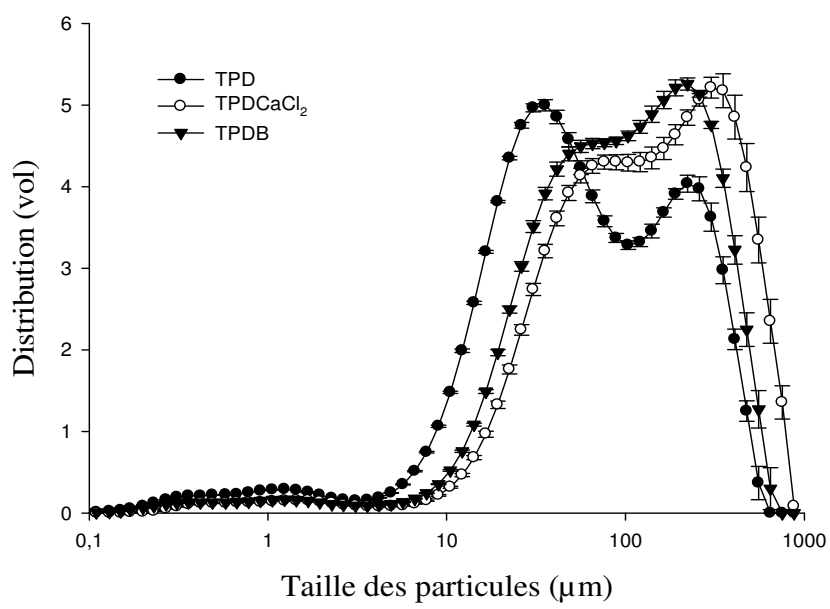


Figure 26 : Distribution granulométrique des différentes farines de patate douce**.**

Tableau 12 : Paramètres de taille des particules des différentes farines de patate douce.

Echantillons	D (v : 0,10), µm	D (v : 0,50), µm	D (v : 0,90), µm
TPD	19,9 ± 0,2	91,4 ± 2,4	314,1 ± 10,7
$TPDCaCl_2$	27,5 ± 1,4	175 ± 5,7	448,5 ± 12,8
TPDB	21,5 ± 0,4	104,1 ± 4,0	370,5 ± 16,7

La distribution granulométrique et les paramètres de tailles des différentes farines de patate douces sont présentés dans la Figure 26 et le Tableau 12. Le diamètre des particules varie entre 0,11 et 878 µm avec un diamètre moyen (D_{50}) compris entre 91,4 et 175 µm pour toutes les farines. La distribution de la taille des particules présente une allure trimodale. Le premier mode comprend les particules en-dessous de 10 µm avec les pics variant entre 2,1 - 3,4 µm. Les particules du deuxième mode s'échelonnent entre10 et 100 µm avec des pics se situant

entre 30 - 56 µm. Et enfin le troisième mode se situe entre 100 et 878 µm avec des pics entre 190 et 260 µm. Par contre, certains auteurs ont rapporté la présence de deux modes distincts autour de 28,3 et 251 µm pour des farines et les amidons de patate douce (Aprianita *et al.*,2009). D'autre part, les travaux de Chen *et al.* (2013) ont aussi rapporté que la distribution des particules des farines de patate douce est essentiellement bimodale. En effet, les auteurs ont utilisé deux types de broyeurs (broyeur marteau et cryobroyeur). Ceci s'explique par le fait que ces auteurs n'ont pas observé la présence du premier pic correspondant aux petites particules, probablement à cause de leur faible proportion. La présence de ce pic dans cette étude peut provenir des étapes de broyage et de tamisage.

III.1.4. Paramètres de forme

L'évolution des paramètres de forme (sphéricité et convexité) en fonction de la taille des particules des farines prétraitée au $CaCl_2$ et blanchie sont présentées dans les Figures 27 et 28 respectivement.

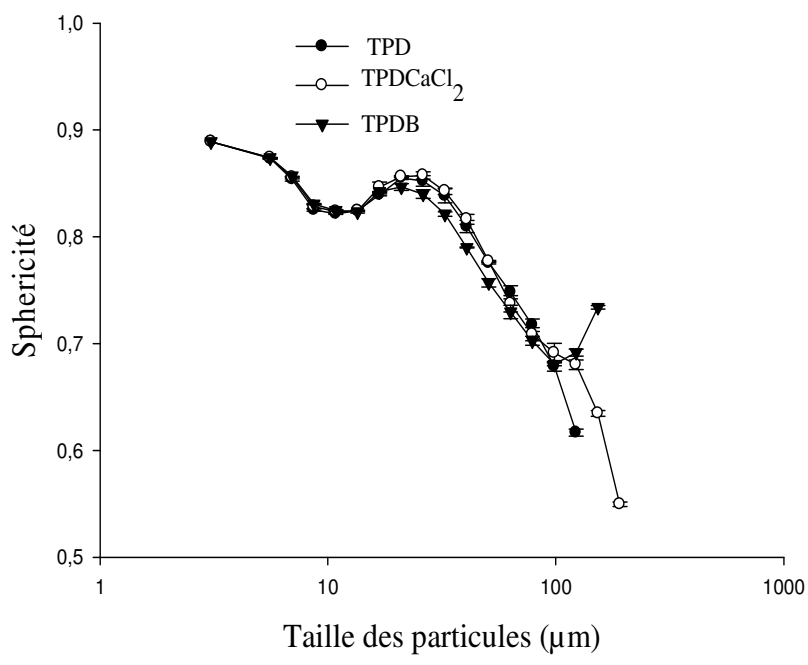


Figure 27 : Evolution de la sphéricité en fonction de la taille des particules des différentes farines de patate douce.

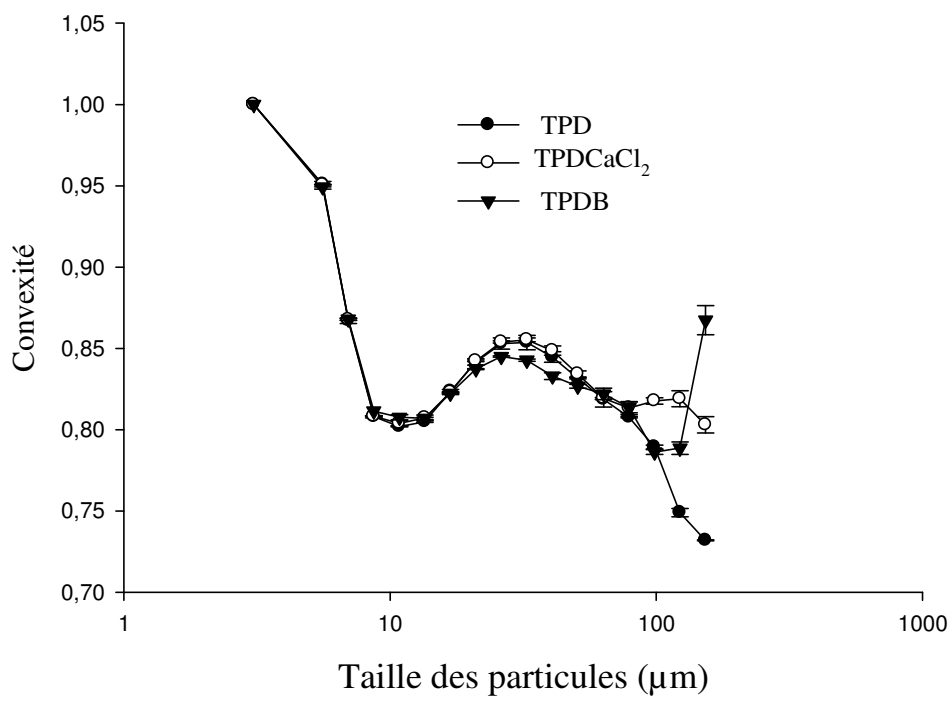


Figure 28 : Evolution de la convexité en fonction de la taille des particules des différentes farines de patate douce.

La structure des courbes ont montré bien que trois populations différentes composent la farine : l'amidon, les cellules individualisées et les fragments de cellules.

On a observé une forte diminution des facteurs de forme de 1 à environ 0,78 - 0,80 lorsque la taille des particules était plus grande. Une tendance similaire a été observée pour les amidons de taro variété Sosso en fonction du degré de maturité par Himeda (2012). La diminution de sphéricité et convexité suppose que les petites particules de farine avaient une forme plus régulière et une plus faible rugosité de surface que les grandes particules. Ensuite, pour toutes les farines, on observe un changement de sphéricité et de convexité des particules au-dessus de 20 µm, valeur correspondant au début du deuxième mode de distribution. Les prétraitements $CaCl_2$ et blanchiment semblent empêcher la séparation cellulaire pendant le broyage et privilégier l'agrégat d'où la fraction plus élevée pour la troisième population (à partir de 80 µm).Des valeurs plus élevées de sphéricité sont obtenues par la farine TPDB, tandis que la sphéricité inférieure par la farine TPD. La diminution de la sphéricité et la convexité de la taille des particules peut aussi être liée à l'opération de broyage et aux forces appliquées sur les tranches de patate douces sèches. Ces forces appliquées entraînent la rupture des tissus conduisent à la formation d'agrégats et de fragments des cellules. En effet, Saad *et al*. (2011) ont suggéré que les différents mécanismes de rupture pourraient dépendre des conditions de broyage et produire des poudres cassées au bord du grain et d'autres brisés

au niveau des particules d'amidon. Gaiani *et al.* (2011) ont rapporté que la sphéricité et la convexité ont une influence sur les propriétés d'hydratation des farines telles que la solubilité et la dispersibilité.

III.1.5. Microscopie électronique à balayage

Les images de la microscopie électronique à balayage des farines de patate douce après différents prétraitements sont illustrées par la Figure29, qui montre que la forme des particules est irrégulière.

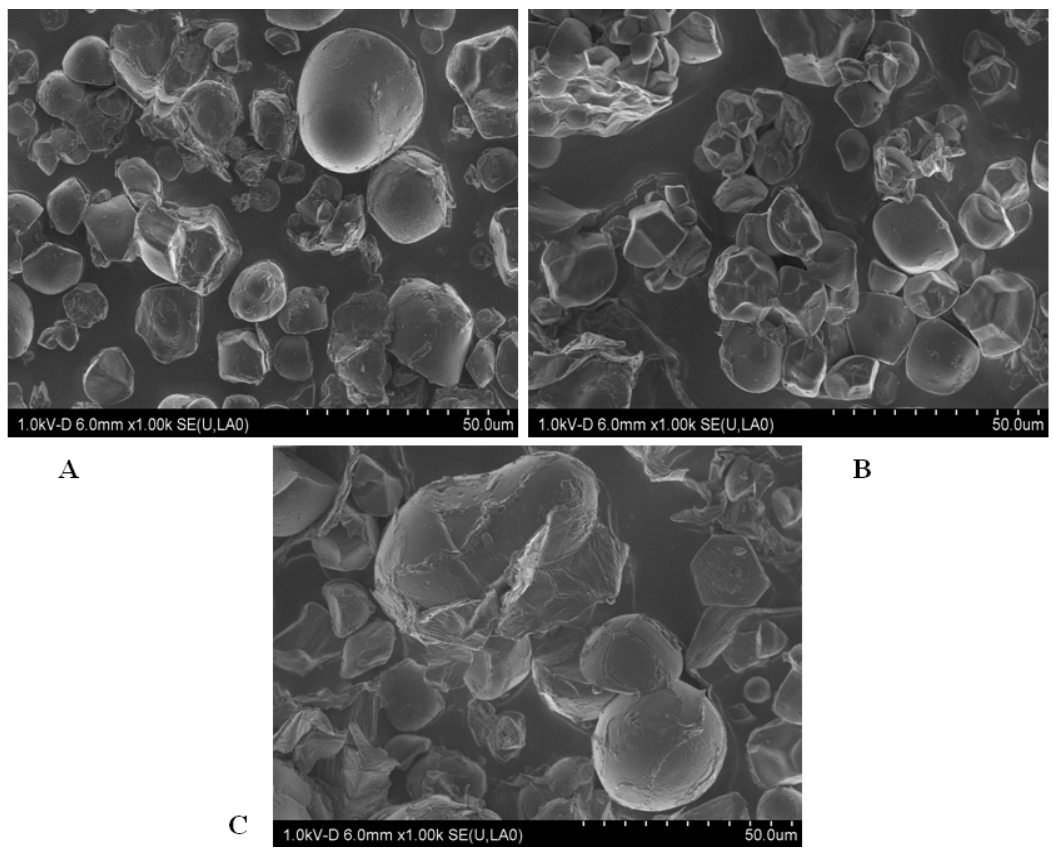


Figure 29 : Microscopie électronique à balayage des différentes farines de patate douces

Avec :

A= farine de patate douce non prétraitée

B= farine de patate douce prétraitée au $CaCl_2$

C= farine de patate douce prétraitée par blanchiment

La surface de l'ensemble des farines était tout à fait irrégulière, présentant des dents. Huang (2009) a trouvé des particules de forme ovale (igname, pomme de terre), angulaire (patate douce), et polygonale (taro). L'irrégularité était observée sur les particules plus grosses, résultante d'une faible séparation cellulaire et donc fracture cellulaire et conduisant à des agrégats. Aucun effet évident des prétraitements ne peut être déduit des images MEB. Toutes les farines ont présenté des populations mixtes composées de grands, moyens et petits granules d'aspect lisse, de forme, ronde et sphérique.

III.1.6. Propriétés thermiques

Les propriétés de gélatinisation des farines de patate douce sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Propriétés thermiques des farines de patates douces

Farines	T_o (°C)	T_p(°C)	T_f(°C)	ΔH_{GEL} ($J.g^{-1}$)
TPD	$75,8 \pm 0,4^b$	$77,2 \pm 0,1^a$	$84,4 \pm 0,6^b$	$11,8 \pm 0,5^b$
$TPDCaCl_2$	$77,9 \pm 0,1^c$	$82,0 \pm 0,8^c$	$85,8 \pm 0,7^c$	$13,2 \pm 0,6^c$
TPDB	$74,4 \pm 0,1^a$	$80,5 \pm 0,1^b$	$82,2 \pm 0,3^a$	$9,5 \pm 0,4^a$

T_0 : Température de début de gélatinisation ; T_p : Température de pic de gélatinisation ; T_f : Température de fin de gélatinisation ; ΔH_{Gel} : Enthalpie de gélatinisation. Les moyennes ± écarts-types suivies d'une même lettre dans la même colonne indiquent que les différences ne sont pas significatives (p<0,05, n =3).

Les paramètres de gélatinisation (T_0, T_p, T_c et ΔH_{GEL}) des farines étudiées étaient comparables aux valeurs classiques rapportés par Ahmed *et al*.(2008), qui notent la présence d'un seul pic endothermique. Ce dernier est typique de la gélatinisation de l'amidon en présence d'un excès d'eau. Cette transition endothermique continue indique le gonflement du granule et la perturbation progressive du réseau cristallin de l'amidon dans la gamme de températures de gélatinisation.

Les températures de début (T_0), pic (T_p) et fin (T_f) de gélatinisation des différents échantillons (TPD, $TPDCaCl_2$ et TPDB) étaient respectivement comprises dans les gammes suivantes : 74,4 - 77,9°C ; 77,2 – 82 °C ; et enfin 82,2 - 85,8 °C. La température de pic de gélatinisation de l'échantillon TPD (77,2 °C) était significativement plus faible que celle obtenue pour les farines $TPDCaCl_2$ et TPDB (respectivement 82 et 80,5 °C). Cependant, les travaux de Shinoj *et al*. (2006) ont rapporté que des températures de transition élevées

peuvent résulter d'un haut degré de cristallinité, ce qui confère aux granules d'amidon une structure stable et plus résistante à la gélatinisation. Aussi, Barichello *et al*.(1990) ont mentionné que ces températures de transition peuvent également refléter des régions amorphes plus stables ou un plus faible degré de ramification. Ainsi, les farines TPD$CaCl_2$ et TPDB avaient une structure plus stable et résistante à la gélatinisation. Le prétraitement au $CaCl_2$ conduit à la plasmolyse de la cellule causée par un phénomène osmotique. L'osmose correspond à un phénomène de diffusion des molécules du solvant eau induit par des différences de concentrations en solutés de part et d'autre d'une membrane. En effet, le calcium joue au niveau des jonctions cellulaires et empêche la séparation des cellules. L'enthalpie de gélatinisation est un indicateur de la perte d'ordre moléculaire dans le granule, qui augmente avec le déclin du degré de cristallinité de l'amidon (Tester & Morrison, 1990; Aprianita, 2009).L'enthalpie de gélatinisation a varié entre 9,5 et 13,2 $J.g^{-1}$selon les farines. La farine TPDB avait une enthalpie de gélatinisation inférieure par rapport aux farines TPD et TPD$CaCl_2$ (13,2 et 11,8 $J.g^{-1}$, respectivement). Cette baisse d'enthalpie peut s'expliquer par une légère diminution de la teneur en sucres due au blanchiment.

III.1.7. Propriétés rhéologiques

Le module élastique de stockage dynamique (G') est une mesure de l'énergie stockée dans le matériau, tandis que le module visqueux de perte (G") correspond à l'énergie dissipée lors de chaque cycle. Les Figures 30 et 31 illustrent l'évolution des modules de stockage (G') et de perte (G") des différentes farines de patate douce pendant le chauffage jusqu'à 90 °C.

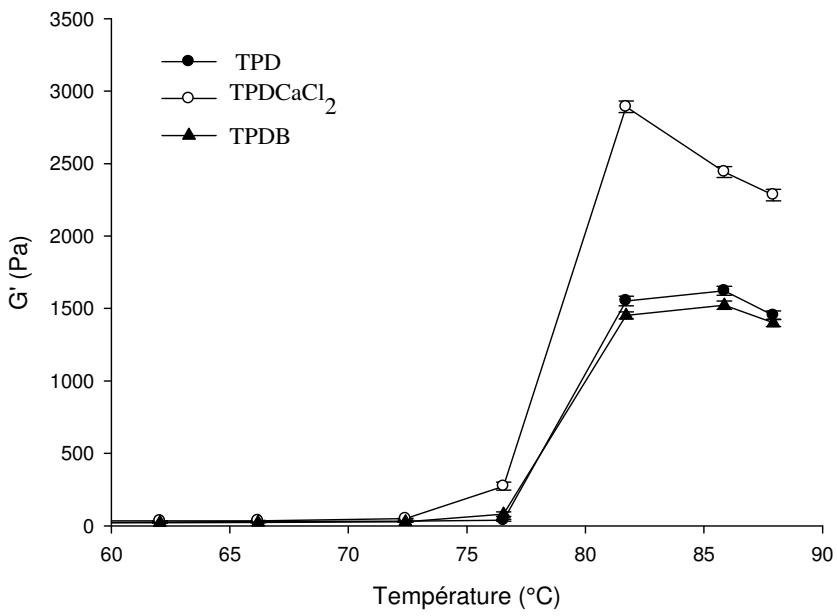


Figure 30 : Evolution du module de stockage (G') en fonction de la température des farines de patate douce.

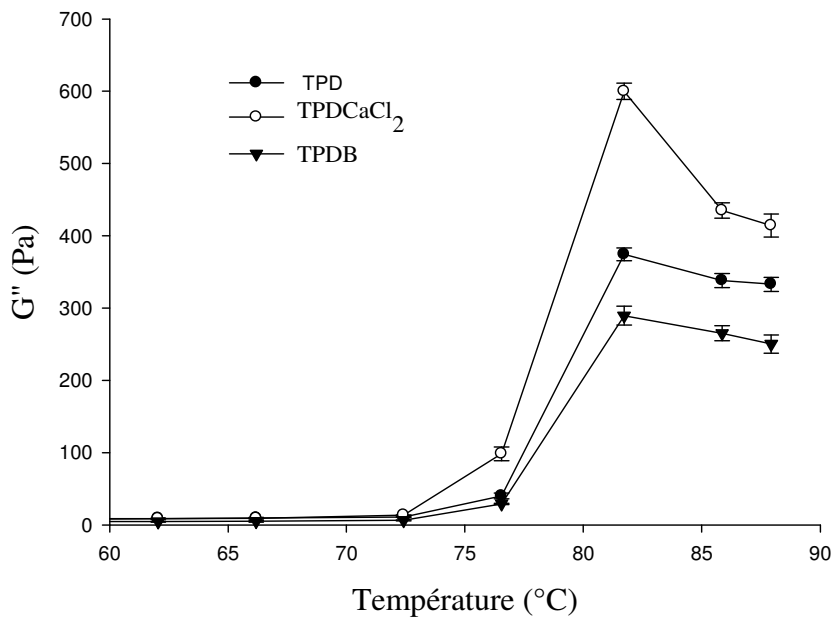


Figure 31 : Evolution du module de pertes (G'') en fonction de la température des farines de patate douce.

D’une manière générale, G' et G" ont montré une augmentation progressive pendant le chauffage jusqu’à l’atteinte d’un maximum (72 à 87 °C), suivi d’une chute lorsque le chauffage est prolongé au-delà de 87 °C. Une tendance similaire a été observée pour les farines de taros par Panyoo *et al.* (2013). L'augmentation initiale de G' pour les farines s'est produite aux températures autour de 72°C pour les farines TPD$CaCl_2$ et 76 °C pour les deux autres et pour qui sont proches des valeurs de températures de début de gélatinisation (T_0) mesurées par DSC : 74,4 ; 77,9 et 75,8 °C respectivement pour les farines TPDB, TPD$CaCl_2$ et TPD. Le module élastique était invariablement supérieur au module de pertes à tous les stades de chauffage, ce qui suggère la formation de matrices élastiques. L'augmentation rapide de G 'et G" à des températures plus basses est généralement attribuée à l'hydratation et au gonflement du réseau par contact inter-granulaire (Loubes *et al.*, 2012). La déformation ou la rupture des granules d'amidon a eu lieu aux valeurs maximales de G' (G'_{max}), correspondant à des niveaux de température proches des températures de pic de gélatinisation (T_p) (77, 80 et 82°C respectivement pour les farines TPDB, TPD et TPD$CaCl_2$). Par contre, suite au chauffage prolongé au-dessus de 87 °C, on assiste à la diminution de G' et de G",ce qui indiquerait la destruction de la structure du gel (Gonzalez-Reyes *et al.*, 2003). En effet, cette destruction de la structure du gel peut être attribuée à la fusion des régions cristallines restantes dans le granule d'amidon gonflé ou résultant du désenchevêtrèrent des molécules d'amylopectine (Ahmed *et al.*, 2008). Les valeurs de G' et G" étaient significativement plus élevées dans l’échantillonTDP$CaCl_2$que dans les échantillons TPD et TPDB. Cette observation montre que le calcium joue un rôle important dans la formation du gel, probablement en formant des liens ou ponts intermoléculaires entre les molécules et les fragments présents. Lors de la fabrication du pain, les farines produisant des pâtes extensibles et élastiques sont nécessaires pour assurer une cuisson optimale (Lazaridou *et al.*, 2009). Ainsi, les propriétés de gélatinisation et rhéologiques des farines prétraitées au $CaCl_2$ont confirmé son aptitude à la panification.

III.1.8. Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier

La spectroscopie infrarouge nous renseigne sur la conformation des macromolécules et sur les états de l'eau en interaction avec elles. Pour pouvoir étudier l'influence du prétraitement de la farine de patate douce sur les propriétés structurales par spectroscopie infrarouge, il est nécessaire d'identifier chaque bande de vibration correspondant aux différents constituants de

la farine. Les spectres infrarouges des différentes farines de patates douces sont représentés par la Figure32.

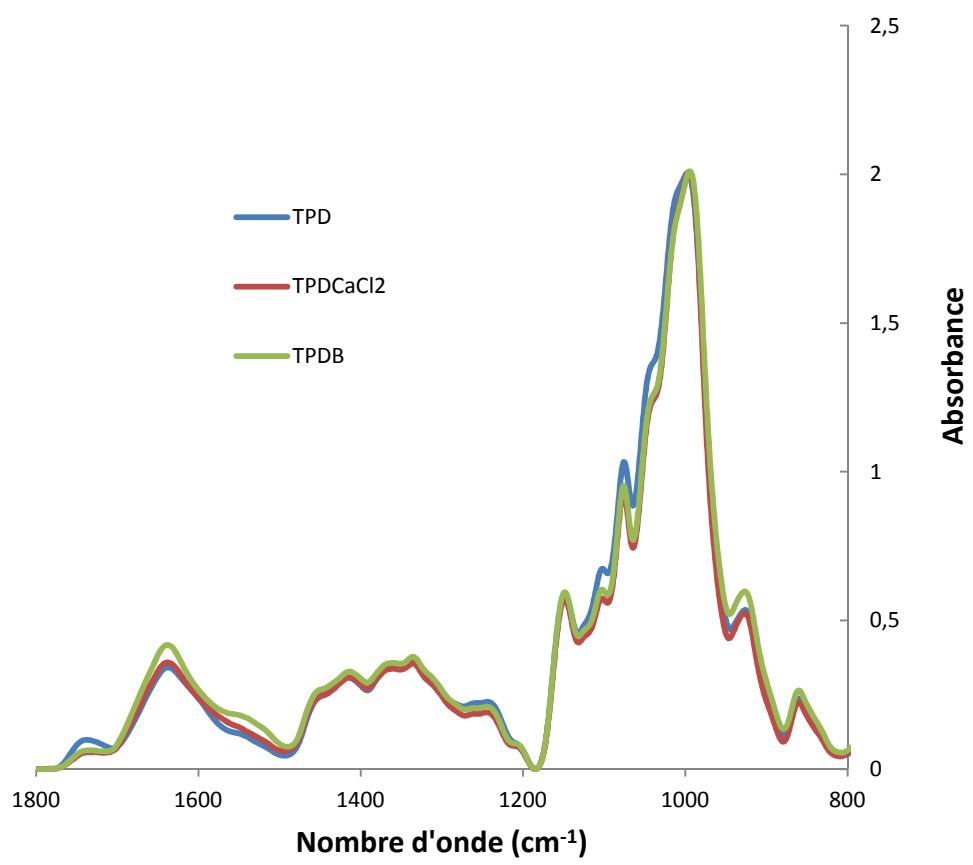


Figure 32 : Spectres FTIR des différentes farines de patates douce.

Les spectres obtenus mettent en évidence les différents modes vibrationnels des groupements chimiques des molécules présentes dans la farine, en particulier les polysaccharides, les protéines et 1'eau. Dans cette étude, nous nous sommes focalisés sur les vibrations d'élongations et de déformations relatives aux polysaccharides et en particulier à l'amidon. En effet, l'amidon intervient de différentes manières au cours de la panification. C'est d'abord une source de sucres fermentescibles pour les levures. Pour certains auteurs, l'amidon n'aurait qu'un rôle de remplissage de la matrice protéique ; pourtant, il joue également un rôle essentiel dans l'absorption de l'eau (Wade, 1988).

Ce rôle est d'autant plus important que la quantité de grains d'amidon endommagés mécaniquement au cours de la mouture est élevée (capacité d'absorption: 0,5 à 3g H_2O/g d'amidon endommagé selon Kent & Evers, (1994)).

Selon Rubens *et al*. (1999), les vibrations d'élongation C-C et C-O sont fortement couplées, rendant leur distinction impossible. L'intensité et la position des pics de cette région comprise entre 1200 et 870 cm^{-1} dépend essentiellement de la structure cristalline et de la conformation de l'amidon (Berton, 2002).
D'après les travaux effectués par Van Soest *et al.* (1995), les bandes à 1047 et 1022 cm^{-1}mettent en évidence les phases cristallines et amorphes de l'amidon, respectivement, et leurs rapports indiquent le degré d'organisation de l'amidon (Sevenou *et al*., 2002). Dans cette étude, de telles bandes apparaissent, mais celle à 1047 cm^{-1}est assez peu visible (Figure 32). On observe que les groupements chimiques dans les farines ne sont pas modifiés de façon notable par les traitements, de légères perturbations dans le profil probablement liées à des réactions biochimiques minoritaires pendant les traitements.

Comme indiqué ci-dessus, le rapport d'intensité des bandes permet de renseigner sur le degré d'organisation de la structure de l'amidon dans la farine (Van Soest *et al*., 1995; Sevenou *et al*., 2002). Nos résultats suggèrent que le degré d'organisation de la structure du granule d'amidon (cristallinité) n'a pas été affecté par les prétraitements de blanchiment et de $CaCl_2$, d'autant plus que le rapport des valeurs d'absorbance à 1047 et 1022 cm^{-1} ne varient pas significativement entre les différents modes de prétraitement (Tableau 14). La farine obtenue par le blanchiment des tranches de patate douce a un faible ratio (0,72), tandis que la farine obtenue sans prétraitement a une valeur légèrement plus élevée (0,76). Cela met en évidence l'hypothèse selon laquelle les prétraitements ont principalement influencé les propriétés structurales des farines de patates douces.

Tableau 14 : Rapports d'intensités des bandes à 1047 et 1022 cm^{-1}déterminés par spectroscopie infrarouge de transformée de Fourier (FTIR) des farines de patates douces.

Echantillons	Bandes infrarouges		Ratio des bandes
	1047 cm^{-1}	1022 cm^{-1}	I (1047cm^{-1})/I(1022cm^{-1})
TPD	1,302 ± 0 ,001[c]	1,704 ± 0,001[b]	0,764 ± 0,001[a]
TPD$CaCl_2$	1,162 ± 0,001[a]	1,586 ± 0,001[a]	0,732 ± 0,002[c]
TPDB	1,183 ± 0,001[b]	1,594 ± 0,001[a]	0,741± 0,001[b]

Les moyennes ± écarts-types suivies d'une même lettre dans la même colonne indiquent que les différences ne sont pas significatives(p<0,05, n =3).

III.1.9.Propriétés fonctionnelles des farines et isotherme d'adsorption d'eau des farines

L'Indice d'Absorption d'Eau (IAE), l'Indice de Solubilité à l'Eau (ISE), la Capacité de Gonflement(CG) et les isothermes de sorption sont présentés dans le Tableau 15 et la Figure 33.

Tableau 15 : IAE, ISE, CG, paramètres du modèle BET des différentes farines de patate douce.

Farines	TPD	TPD$CaCl_2$	TPDB
IAE (g/g)	3,5 ± 0,9[a]	3,1 ± 0,1[a]	2,9 ± 0,1[a]
ISE (%)	16,6 ± 0,1[a]	20,8 ± 0,1[b]	20,9 ± 0,8[b]
CG (%)	3,8 ± 0,1[b]	3,3 ± 0,7[a]	4,5 ± 0,1[c]
X_m (g/100g)	4,7 ± 0,3[b]	3,5 ± 0,1[a]	3,6 ± 0,1[a]
C_{BET}	9,4 ± 0,3[a]	12,4 ± 1,4[b]	19,3 ± 4,4[c]
R^2	0,999	0,997	0,995
Erreur relative (%)	0,16	1,40	3,10

Les moyennes ± écarts-types suivies d'une même lettre dans la même colonne indiquent que les différences ne sont pas significatives (p<0,05, n =3).
X_m : Teneur en eau de la monocouche (g d'eau /100 g de base sèche); C_{BET} : Constante liée à l'énergie de liaison de l'eau; erreur relative (%) : moyenne de la différence relative entre les données expérimentales et les prédictions du modèle BET.

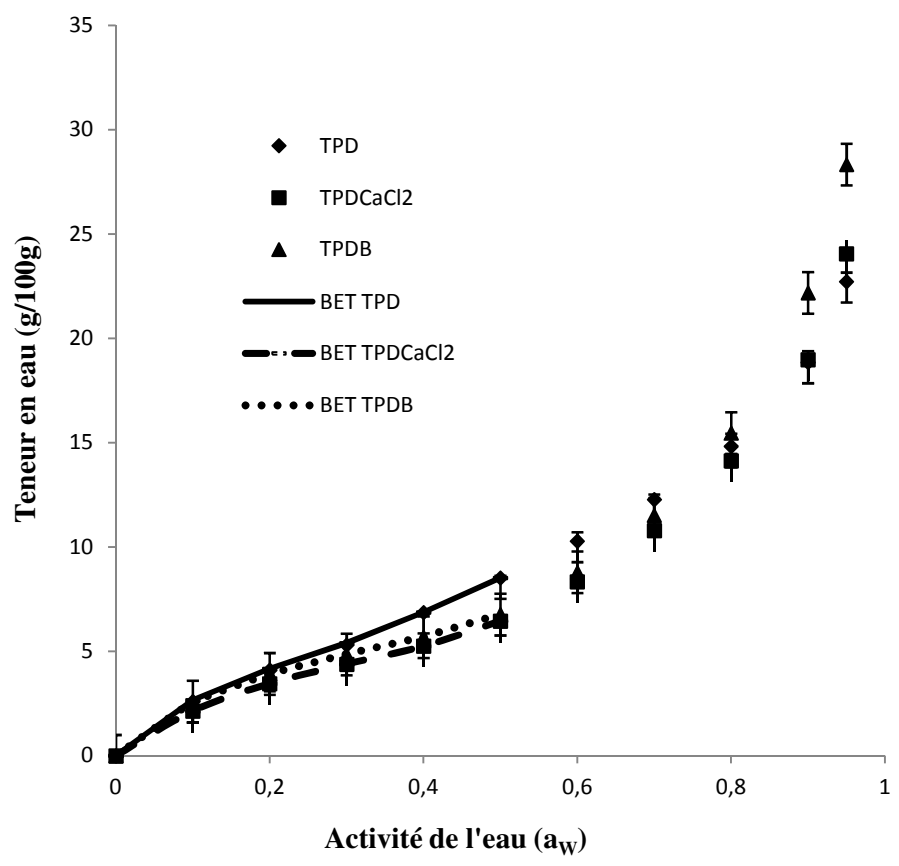


Figure 33 : Isothermes de sorption obtenues des différentes farines de patate douce à 25 °C.

L'IAE mesure le volume occupé par l'amidon après gonflement dans un excès d'eau et indique l'intégrité de l'amidon en dispersion aqueuse. Il n'y avait pas de différence nette entre tous les échantillons. Cependant, l'échantillon TPD(3,5 g/g) a présenté un IAE légèrement plus élevé que les échantillons TPD$CaCl_2$et TPDB (3,1 et 2,9 g/g respectivement).Après le blanchiment, on s'attendait à avoir une IAE plus élevée, mais la méthode utilisée n'a pas permis d'obtenir ce résultat, car la fraction de farine soluble réduit la quantité d'eau absorbée.).

L'Indice de Solubilité à l'Eau (ISE) reflète l'ampleur de la dégradation d'amidon; il était plus élevé dans les farines TPD$CaCl_2$ et TPDB (20,8 % et 20,9 %) que dans les farines TPD (16,6%). L'augmentation de l'ISE dans la farine prétraitée peut être attribuée à la différence de structure granulaire. En effet, l'intérieur de plus grands granules devrait être plus difficile à gélatiniser en raison de la limitation de la diffusion d'eau à l'intérieur de la particule (Ahmed *et al.*, 2010). Il est évident que la gélatinisation de l'amidon induite par le blanchiment devrait augmenter la fraction d'amidon soluble, d'où ce résultat.

La faible capacité de gonflement est provoquée par la présence d'un grand nombre de cristaux, ce qui augmente la stabilité des granules en réduisant l'étendue du gonflement des granules. Lorsqu'on gélatinise à une certaine température, l'organisation des molécules est perturbée dans les granules et les interactions de l'amidon avec l'augmentation de l'eau, ce qui entraîne une augmentation substantielle de la capacité de gonflement (Gunaratne & Hoover, 2002; Ahmed *et al.*, 2010). La capacité de gonflement(CG) de tous les échantillons de farines était hautement significative. Dans cette étude, la faible valeur de la capacité de gonflement a été obtenue pour l'échantillon TPD et ceci peut être attribué peut être dû à sa faible taille de particules plutôt que l'ampleur de la dégradation de l'amidon. Au contraire, la dégradation de l'amidon induite par le prétraitement chimique semble ne pas augmenter la capacité de gonflement de la farine. En effet, ceci est cohérent avec l'hypothèse formulée précédemment selon laquelle le calcium fait le lien intercellulaire et empêche l'absorption d'eau par les agrégats cellulaires.

Selon Yussof *et al.*(2013), une augmentation de la température de gélatinisation est associée à une diminution de la capacité de gonflement. Cette observation confirme les résultats obtenus dans cette étude pour l'échantillon prétraité au $CaCl_2$, montrant que la farine avec une température de gélatinisation supérieure a une capacité de gonflement inférieure. Une faible capacité de gonflement cause des difficultés de gélatinisation de l'amidon et augmente l'énergie mécanique nécessaire pour rompre les zones cristallisées de l'amidon.

Les isothermes d'adsorption de vapeur d'eau de la farine de patate douce (Figure 33) ont montré les allures sigmoïdes typiques des constituants alimentaires, ce sont des isothermes de type II basées sur la classification de Brunauer-Emmet-Teller (Al-Muhtaseb *et al.*, 2002).

Les paramètres du modèle de BET sont présentés dans le Tableau 13. Le modèle BET est le plus couramment utilisé dans les sciences de l'alimentation parce que ses paramètres ont un sens physique, car la chaleur de sorption et la teneur en humidité de la monocouche (X_m) sont indicatifs de la stabilité du produit. Le modèle BET permet une modélisation correcte des isothermes d'absorption d'eau jusqu'à $a_w = 0,5$ (O'Connor & O'Brien, 1994). Le coefficient de corrélation (R^2) permet de renseigner sur la précision de la modélisation de l'isotherme de sorption avec l'équation du modèle BET (équation 17).On note une bonne corrélation entre les données expérimentales et les valeurs prédites ($R^2 = 0,99$ et erreur relative comprise entre 0,16 et 3,10 %) pour tous les échantillons. On a observé des différences significatives entre les valeurs de teneur en eau de la monocouche (X_m) de l'ensemble des farines varié entre 3,6 et 4,2 g/100 g en base sèche. Ces valeurs de X_m étaient inférieures pour les farines prétraitées ($TPDCaCl_2$ et TPDB). D'une part, les valeurs obtenues pour les farines de patate douce

étaient inférieures à celles obtenues par Saad *et al.* (2009) pour les farines de blé (6,28 - 6,47 g / 100 g en base sèche. D'autre part, Labuza (1984) a souligné que la teneur maximale monocouche des aliments correspond à 10 % (en base sèche), parce que la stabilité du produit est compromise au-dessus de cette valeur. Compte tenu des résultats obtenus, les farines de patate douces ont une stabilité acceptable. On remarque que les valeurs C_{BET} ont varié entre 9,36 et 19,3.

Nous avons observé une légère augmentation des valeurs de C_{BET} pour la farineTPD$CaCl_2$ et une augmentation marquée pour la farine TPDB. En d'autres termes, la constante de l'énergie de liaison de l'eau (C_{BET}) a augmenté sous l'effet des prétraitements. Ce comportement peut être expliqué par la libération des sites hydrophiles pendant le processus de broyage, du fait de la dégradation de l'amidon. Cette dernière est d'une grande importance dans le processus de la fabrication du pain, car il est nécessaire de bien contrôler le niveau de dégradation de l'amidon. Mais lorsque l'amidon est trop endommagé, il conduit à des pâtes collantes et peut modifier la couleur du produit final.

Conclusion intermédiaire : impact des prétraitements sur les caractéristiques des farines de patate douce

Ce chapitre avait pour objectif de déterminer l'impact des prétraitements de $CaCl_2$ et de blanchiment sur des propriétés physicochimiques, rhéologiques, structurales et fonctionnelles des différentes patates douces. Les résultats ont montré l'influence du $CaCl_2$ et du blanchiment sur la qualité de farine de patate douce. Les cendres et les sucres réducteurs étaient légèrement plus élevés après un prétraitement de $CaCl_2$. La teneur en amidon était plus faible dans les échantillons de farine blanchie. La luminosité (L*) a diminué après le blanchiment par contre la valeur de b* (composante chromatique jaune - bleu) était plus élevée après un prétraitement de $CaCl_2$.

Les particules étaient plus grosses après blanchiment et prétraitement au $CaCl_2$, probablement à cause de la gélatinisation induite parle blanchiment, avec pour conséquence l'augmentation de l'absorption d'eau et du gonflement. Par contre, le renforcement du réseau intercellulaire dans le cas du $CaCl_2$ avait pour conséquence la réduction de l'absorption d'eau et du gonflement.

III.2. Production de pain : impact de la substitution de la farine de patate douce sur la qualité du pain

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de substitution de la farine blé par de la farine de patate douce sur les caractéristiques des pâtes à pain et des pains (figure 34).

Figure 34 : Pains issus des différentes formulations.

Cette figure montre l'apparence des pains réalisés à partir des différentes farines mixtes. Visuellement, il semble que le volume spécifique du pain diminue avec l'incorporation de farine de patate douce.

III.2.1. Composition chimique

La composition chimique des farines de blé et patate douce sont présentées dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Composition chimique des farines initiales.

Farines	Teneur en eau (%)	Protéines (%)	Cendres (%)
Blé	12,4 ± 0,4	11,9 ± 0,7	0,9 ± 0,8
Patate douce	8,9 ± 0,2	3,2 ± 0,9	2,8 ± 0,1

Les moyennes ± écarts-types suivies d'une lettre différente dans la même colonne indiquent que les différences sont significatives (p<0,05, n =3).

L'analyse de variance a montré une variation significative des différents paramètres analysés entre les farines de blé et de patate douce. La connaissance de la teneur en eau des farines est déterminante pour leur bonne conservation en raison de leur hygroscopicité, qu'il est nécessaire d'abaisser jusqu'à 14 %, 12 %, voire 7 % selon les utilisations (Colas, 1998). En outre, plus la teneur en eau de la farine est faible, plus il est possible de l'hydrater au pétrissage pour arriver à une consistance optimale de la pâte (Grandvoinet & Prat, 1994). La teneur en eau varie de manière significative de 8,9 à 12,4 % respectivement pour les farines de patate douce et blé.

La teneur en cendres est un indicateur de la pureté pour la farine de blé. Elle est en relation avec son taux d'extraction et la minéralisation des grains mis en mouture. Elle définit, en outre, les types commerciaux des farines (Colas, 1998; Feillet, 2000). Les teneurs en cendres des farines de blé et patate douce étaient significativement différentes (0,9 - 2,8 %, respectivement). La teneur en protéines de farines de patate douce et de blé était respectivement de 3,2 et 11,9 %. Cette teneur pour le blé est supérieure à 7 %, correspondant au minimum fixé par le Codex Alimentarius (FAO, 1996). La teneur en protéines de la farine

de blé utilisée dans cette étude pourrait permettre de compenser le déficit protéique de la farine de patate douce.

III.2.2.Capacité de rétention d'eau des farines

La capacité de rétention d'eau affecte les propriétés rhéologiques de la pâte et les propriétés du pain. En effet, il influence le caractère viscoélastique en augmentant ou en diminuant son élasticité et sa viscosité. La Figure 35 présente la capacité d'adsorption d'eau et montre que la farine de patate douce (210 %) a une rétention d'eau supérieure à celle de blé.

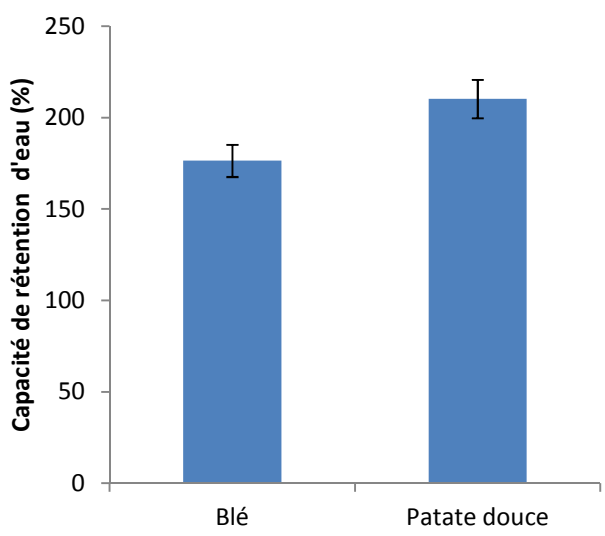


Figure 35 : Capacité de rétention des farines de blé et de patate douce.

L'absorption d'eau de la farine de la patate douce était de 176 %, très proche de celle obtenue par Singh *et al*.(2008), 172 %. Ce pourcentage peut être dû aux fibres et sucres contenus dans la patate douce.

III.2.3. Paramètres de texture des pâtes

L'évolution des différents paramètres de texture, dureté, élasticité, cohésion et adhésivité, selon le taux de substitution de la farine de patate douce sont présentés dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Propriétés texturales des pâtes formulées à partir d'un mélange de farines de blé et de patate douce.

Taux de substitution	Dureté (N)	Elasticité (mm)	Adhésivité (N.s)	Cohésion (kPa)
100 : 0	15,76±0,51^{d}	5,74±0,20^{d}	33,6±1,4^{e}	0,54±0,08^{c}
90 : 10	15,15±0,30^{d}	5,46±0,30^{d}	31,6±0,4^{de}	0,53 ±0,06^{c}
85 : 15	14,34±0,26^{c}	4,63±0,44^{c}	28,3±0,7^{cd}	0,49 ±0,03^{bc}
80 : 20	13,63±0,13^{bc}	4,15±0,11^{bc}	26,0±1,7^{bc}	0,42± 0,20^{ab}
75 : 25	13,00 ±0,12^{b}	3,00 ± 0,12^{b}	25,8±0,9^{ab}	0,39 ±0,09^{ab}
70 : 30	11,56 ±0,20^{a}	2,17±0,12^{a}	23,6 ±0,3^{a}	0,37 ±0,06^{a}

Les moyennes ± écarts-types suivies d'une même lettre dans la même colonne indiquent des différences non significatives (p<0,05, n =3).

La dureté des pâtes est comprise entre 11,56 et 15,76N pour toutes les formulations. De façon globale, la dureté des formulations diminue avec le taux d'incorporation la farine de patate douce.

L'élasticité est une propriété que possèdent certains corps à reprendre leur forme ou volume quand la force qui les déformait a cessé d'agir. Elle varie entre 2,17 et 5,74. L'élasticité des formulations diminue avec le taux de substitution de la farine de patate douce.

La cohésion est la propriété d'un ensemble de molécules dont toutes les parties sont intimement unies. Les valeurs des cohésions des pâtes vont de 0,37 à 0,54. La cohésion diminue avec le taux d'incorporation de la farine de patate douce, en accord avec Supradip *et al.*(2011), qui indiquent que la cohésion de la pâte augmente avec la teneur en gluten provenant de la farine de blé.

L'adhésivité exprime l'aspect collant, qui est lié à la viscosité de la pâte. Celle-ci diminue avec l'augmentation de la farine de patate douce dans tous les échantillons. L'analyse statistique montre qu'il ya des différences significatives entre les échantillons. La plus grande valeur est obtenue pour la farine témoin (100% blé) avec la valeur de 33,6 N.s et la plus petite valeur avec du taux de substitution de 30 % de patate douce (23,6 N.s).
L'influence notable du taux de substitution de la farine de blé par de la farine de patate douce a été mise en évidence pour presque tous les paramètres de textures (Tableau 17).

III.2.4. Cinétique de la montée de la pâte

La Figure36 présente les cinétiques de fermentation exprimées par les évolutions des expansions gazeuses des pâtons au cours du temps.

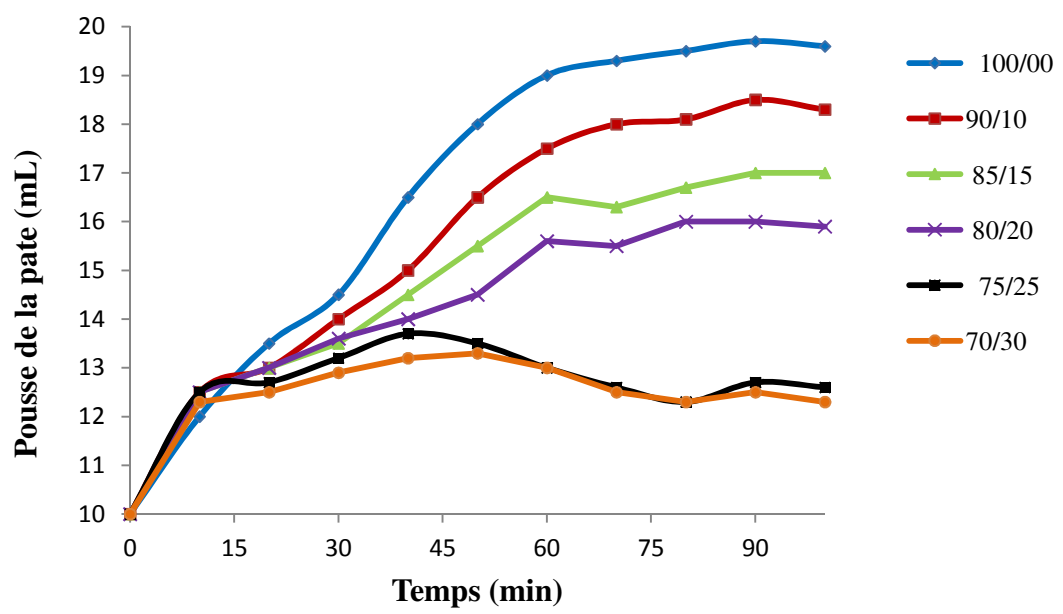


Figure 36 : Profil de montée des pâtes.

Pour les cinétiques des farines de patates douces au taux de substitution de 0 et 10 %, trois phases se distinguent :

- La première phase, entre 0 et 60 min, correspond à une croissance rapide, liée à une forte production de CO_2 et une bonne rétention de celui-ci. A 60 min, l'expansion atteint par exemple 18 mL pour la farine témoin et 16 mL pour la farine substituée à 10 %.

- Une deuxième phase de 60 à 80 min, pendant laquelle la pâte continue son expansion, mais à une vitesse réduite, qui s'explique par l'épuisement du substrat et par conséquent par une plus faible production de CO_2.Pour cette phase, les expansions se situent autour de 19 mL pour la farine témoin (100 % blé) et 17 mL pour la pâte au taux de substitution 10 % de farine de patate douce.

- Une troisième phase de 80 à 105 min, qui se caractérise par une stabilisation générale de l'expansion jusqu'à la fin des cinétiques.

La première phase correspond à la phase d'initiation de la fermentation. Elle est caractérisée par une production continue et intense en CO_2. Les levures s'adaptent rapidement à leur milieu et commencent la synthèse des enzymes nécessaires à la production de gaz carbonique à partir des sucres préexistants dans la pâte (glucose, saccharose) apportée par la farine. Entre temps, l'α- et la β-amylase de la farine hydrolysent l'amidon en maltose. Ce dernier pénètre dans la levure où il est hydrolysé en glucose, qui subira par la suite une glycolyse et une fermentation produisant du CO_2 (Feillet, 2000). La seconde phase est la phase d'acidification rapide. Lors de cette dernière, la production de CO_2se poursuit mais diminue, ce qui indique un début d'appauvrissement du milieu en éléments nutritifs nécessaires au développement des bactéries responsables de la fermentation. Dans ce cas, les levures prennent plus de temps pour produire une même quantité de CO_2.

D'après les résultats obtenus au cours des deux premières phases, on remarque que les farines témoin et au taux de substitution de 10 % présentent une meilleure cinétique d'expansion gazeuse que les autres farines. Ceci pourrait être dû à la différence de composition biochimique due au taux d'incorporation de la farine de patate douce des échantillons avec les taux de substitution de 15,20, 25 et enfin 30 %. L'activité fermentaire des levures est favorisée par la richesse en sucres préexistants et en amidon endommagé dans la farine.

La troisième phase indique la phase de stabilisation du pH qui marque la fin de la fermentation. On effet, on observe une stabilisation de l'expansion gazeuse. Avec le temps, la vitesse d'expansion est ralentie et la levée de la pâte tend vers une limite. Ce ralentissement

résulte de la rupture de certaines membranes alvéolaires et de la diffusion du CO_2 à travers d'autres membranes devenues plus minces.

Une pâte doit être extensible et élastique tout en présentant une certaine rigidité, capable d'assurer la stabilité des alvéoles enchâssées dans les mailles du réseau protéique et où le CO_2 s'accumule.

Pour les taux de substitution de 25 et 30 % de farine de patate douce (Figure 36), on observe deux phases d'expansion. La première allant autour de 0 à 45 min, est ascendante avec un optimum d'expansion de 13 et 13,5 mL pour les deux pâtes. Et enfin la deuxième phase est relativement stable entre 45 à 105min où on remarque une chute des volumes de des pâtons probablement en raison de la fragilité de leur structure alvéolaire. La baisse de volume est due à la faible quantité au gluten dans les deux formulations de pates (25 et 30 % de farine de patate douce). Cette diminution de la proportion de gluten de blés e traduit par une augmentation de la proportion en amidon. Ces résultats sont en accord à d'autres études sur l'incorporation l'amidon des tubercules dans la pâte à pain (Chandra-Shekara & Shurpalekar, 1983; Hathorn*et al.*,2008). En effet, le gluten donne la fermeté dans la matrice de la pâte et parvient à emprisonner l'air des cellules afin de produire des pâtes de grand volume (Chong & Noor Aziah, 2008).

III.2.5. Poids, volume, volume spécifique, couleur de la croûte des pains

Le volume des pains, leur masse, leur volume spécifique et leurs paramètres de couleur sont présentés dans le Tableau18.

Tableau 18 : Masse, volume, volume spécifique et paramètres de couleur des pains

Taux de substitution	Masse (g)	Volume (cm^3)	Volume spécifique (g/cm^3)	L* (croûte)	a* (croûte)	b* (croûte)
100 : 0	554,0 ±1,8^{f}	1119,2±3,2^{e}	3,3±0,5^{a}	66,7±1,5^{d}	7,7 ±1,7^{a}	23,6±1,4^{a}
90 : 10	424,1±3,2^{b}	1107,9±2,4^{d}	3,9±1,2^{ab}	58,9±0,8^{c}	8,7 ±0,6^{b}	24,6±0,4^{ab}
85 : 15	441,0 ±3,6^{c}	1090,9±3,6^{c}	3,8±0,1^{ab}	58,9±0,7^{c}	10,2±0,7^{c}	25,3±0,7^{b}
80 : 20	497,5±1,5^{e}	1034,4±4,1^{b}	3,6±0,8^{a}	65,6±1,7^{d}	10,7±1,1^{cd}	28,0 ±1,7^{bc}
75 : 25	412,7±2,2^{a}	1034,5±4,8^{b}	3,9 ±0,5^{ab}	57,7±0,6^{b}	11,5 ±0,5^{d}	30,8±0,9^{d}
70 : 30	477,5±1,2^{d}	977,9±1,5^{a}	3,5±0,3^{a}	51,2± 0,4^{a}	12,7±0,6^{e}	33,6±0,3^{e}

Les moyennes ± écarts-types suivies d'une même lettre dans la même colonne indiquent que les différences ne sont pas significatives (p<0,05, n =3).

Des différences significatives ont été observées entre les différents pains concernant leur volume, masse et volume spécifique. Lamasse des pains varie de manière significative entre 412 et 554 g. Le volume des pains est compris entre 977 et 1119,2 cm^3.On a observé une diminution significative des volumes des pains. Ces résultats sont similaires à ceux de Greene& Bovell-Benjamin (2004) pour lesquels le volume des pains diminue avec l'augmentation du taux de substitution de farine de patate douce. Par contre, Burton (1989) a rapporté que les pains issus des substitutions de farine de pomme de terre ont produit de plus gros volumes comparés aux pains de blé. Les pains aux volumes élevés sont un avantage sur le plan commercial. Par conséquent, la réduction de masse du pain par rapport au taux

d'incorporation de la farine de patate douce est une qualité économique indésirable pour les boulangers, puisque souvent les consommateurs sont attirés par un pain de poids et de volume élevés. La variation de volume du pain peut être attribuée principalement à différents niveaux de production de gaz carbonique et au degré de gélatinisation de l'amidon. Il faut aussi mentionner que la température et la durée de cuisson affectent la capacité de rétention d'eau du pain et de la mie. Le volume spécifique varie dans la gamme de 3,3 à 3,9 cm^3/g

L'utilisation de l'hydratation commune du mélange des farines conduit à une dilution du gluten dans le milieu farineux. Les protéines du gluten se trouvent alors dispersées et ont moins de chance de s'associer et de former un réseau viscoélastique capable de retenir le gaz de fermentation, ce qui donne un pain moins développé. En revanche, une hydratation préalable de la farine de blé avant l'ajout de la farine de patate pourrait améliorer le réseau protéique car la dispersion du gluten serait moindre. Les valeurs sont en accord avec celles de littérature obtenues par Shittu *et al*. (2007).

Les résultats montrent également que la couleur de la croûte du pain provient essentiellement des pigments rouges et jaunes. Des travaux antérieurs ont montré que la mesure instrumentale de la couleur de produits de boulangerie est un contrôle de qualité nécessaire pour déterminer l'influence d'un ingrédient ou de la formulation du produit, ainsi que des conditions de stockage des produits de boulangerie (Erkan *et al*., 2006). Les valeurs de luminance L* varient entre 66,7 et 51,2 lorsque le taux de substitution augmente de 0 à 30 %. Dans l'ensemble, les valeurs de la luminance L*ont diminué avec l'augmentation des niveaux de substitution de la farine de patate douce. Cette diminution pourrait être liée aux réactions de brunissement de Maillard et de caramélisation, qui sont influencées par la distribution de l'eau et la réaction de sucres réducteurs et d'acides aminés (Greene& Bovell-Benjamin, 2004).

Les valeurs de a* varient de 7,7 à 12,7 respectivement pour les échantillons à 0 % et 30 % des taux de substitutions). La valeur a*pour le pain à 30 % de substitution était significativement plus élevée que dans les autres pains. On observe une augmentation de la valeur de a* avec l'augmentation du taux de substitution de farine de patate douce. Ce résultat indique que le plus faible pourcentage de farine de patate douce et ainsi la plus faible teneur en β-carotène (90 : 10) sont nécessaires pour avoir une couleur de croûte la moins rouge possible parmi les farines composées. Les aliments riches en caroténoïdes donnent généralement aux aliments des colorations rouge, orange, et/ou jaune (Simon, 1997).

Les valeurs de b*pour tous les pains étaient significativement différentes. Elles ont varié entre 23,6 et 33,6 pour les pains aux taux de substitutions de 0 et 30 % respectivement.

III.2.6. Paramètres de texture des pains

Les paramètres de textures de pains en fonction du taux d'incorporation de la farine de patate douce sont regroupés dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Propriétés texturales des pains formulés de farines composées.

Taux de substitution	Dureté (N)	Elasticité (mm)	Adhésivité (N s)	Cohésion (kPa)
100 : 0	13,40 ± 0,24[d]	5,77 ± 0,20[d]	14,6 ± 1,2[c]	0,54 ± 0,08[d]
90 : 10	13,09 ± 3,20[d]	5,82 ± 0,01[d]	15,6 ± 0,4[d]	0,43 ± 0,06[bc]
85 : 15	12,53 ± 0,02[c]	5,03 ± 0,06[c]	14,9 ± 0,7[cd]	0,43 ± 0,03[bc]
80 : 20	10,23 ± 0,29[ab]	4,80 ± 0,08[c]	16,0 ± 0,8[e]	0,42 ± 1,02[bc]
75 : 25	10,43 ± 0,06[b]	4,15 ± 0,11[b]	11,8 ± 0,9[b]	0,39 ± 0,09[ab]
70 : 30	9,83 ± 0,12[a]	3,83 ± 1,13[a]	10,6 ± 0,3[a]	0,37 ± 0,06[a]

Les moyennes ± écarts-types suivies d'une même lettre dans la même colonne indiquent que

Les différences ne sont pas significatives (p<0,05, n =3).

La dureté est souvent utilisée comme un indice de détermination de la qualité du pain, et en plus le changement de la dureté est souvent accompagné d'une perte de la résistance au cours du stockage (Spices, 1990).Elle varie entre9,83 et 13,40 N pour toutes les formulations. Des différences significatives entre tous les pains ont été observées pour les valeurs de dureté.

De façon générale, la dureté de la mie des formulations diminue avec l'augmentation du taux de substitution de la farine de blé par de la farine de patate douce. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Wu *et al*. (2009).

L'élasticité est une propriété que possèdent certains corps à reprendre leur forme ou volume quand la force qui les déformait a cessé d'agir. L'élasticité des formulations diminue avec le taux d'incorporation de farine de patate douce (Tableau 19). Cette diminution de la valeur de l'élasticité serait liée à celle de la dureté telle qu'observée pour les pâtes.

La cohésion est la propriété d'un ensemble de molécules dont toutes les parties sont intimement unies. Les valeurs des cohésions des pâtes vont de 0,37 à 0,54 kPa. La cohésion diminue avec le taux de substitution de la farine de patate douce.

Lorsque le taux de substitution est au-delà de 25 %, un défaut majeur apparaît : la mie des pains manque de cohésion. Cette dernière a une structure grossière, non homogène. La dilution du gluten dans la farine composite peut difficilement faire face à l'expansion au four des pâtons, si bien que les grosses alvéoles d'air présentent des déchirures par lesquelles le gaz s'échappe (Lassoued- Oualdi, 2005).

III.2.7. Analyse sensorielle

L'acceptabilité des pains par le consommateur a été mesurée à travers l'épreuve hédonique. Les résultats sont représentés par la Figure 37.

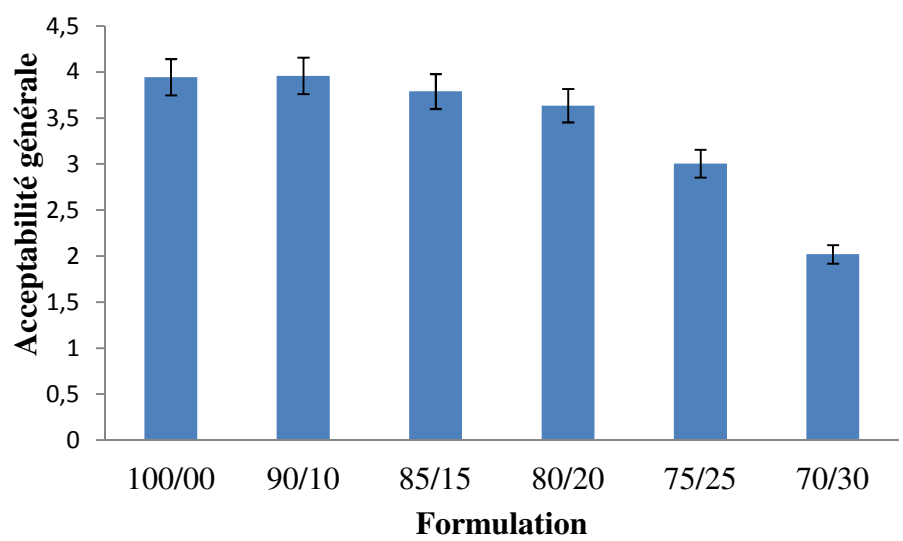


Figure 37 : Acceptabilité générale des différentes formulations à base de farine de patate douce, obtenue par analyse sensorielle**.**

On peut constater l'inexistence de différences significatives dans l'acceptabilité générale des échantillons. Les pains issus de 10 % et 15 % de substitution ont une appréciation similaire comparée à celle du pain fait uniquement à base de blé. L'analyse sensorielle a montré que les panélistes ont rejeté la formulation à 30 % de substitution de farine de patate douce, mais ont accepté toutes les autres formulations.

Conclusion intermédiaire : aptitude à la panification mixte des farines de patate douce

Les résultats ont montré l'impact du taux d'incorporation de la farine de patate douce à la farine de blé. La farine de patate douce seule n'est pas panifiable. Elle peut toutefois être associée à une farine de blé commerciale pour produire des pains de qualité acceptable.
On a observé une baisse du volume de la pâte avec l'augmentation du taux de la substitution, puis une rupture au-delà de 20 %. Une réduction de la dureté, cohésion et du taux de la pâte, réduction du volume de pain, de la dureté, de l'acceptabilité est également observé. Aucune différence significative n'est observée sur l'acceptabilité du pain jusqu'à 20 % d'incorporation de la farine de patate douce.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de cette étude était de trouver une voie de valorisation des tubercules de patates douces afin de réduire les pertes post-récolte. Dans un premier temps, nous avons caractérisé la farine de patate douce. L'étude a consisté à déterminer l'impact des prétraitements de blanchiment et au chlorure de calcium sur les propriétés physicochimiques, thermiques, rhéologiques et fonctionnelles des farines. Ces propriétés sont susceptibles d'être modifiées partiellement ou totalement pendant le procédé de production et de stabilisation de la farine (lavage, découpe, prétraitement, séchage, broyage). En effet, trois farines ayant subi différents prétraitements ont été étudiées, et il en ressort que les prétraitements ont influencé la composition des farines. Les teneurs en cendres et sucres réducteurs ont légèrement augmenté après le prétraitement au chlorure de calcium. La teneur en amidon était plus faible dans les échantillons de farine blanchie. Les paramètres de couleur L* (luminosité) a diminué après le blanchiment. La valeur de b* (composante chromatique jaune - bleu) était plus élevée après le prétraitement au $CaCl_2$. L'enthalpie de gélatinisation était inférieure dans la farine TPDB par rapport aux farines TPD et TPD$CaCl_2$. Le module de conservation (G') de la pâte était supérieur au module de pertes, ce qui suggère la formation de matrices élastiques. La farine prétraitée au $CaCl_2$ a présenté un module d'élasticité plus élevé que les farines TPD et TPDB.

Les isothermes d'adsorption d'eau des farines suivent le modèle classique de type II de la plupart des poudres alimentaires. Les prétraitements ont montré une augmentation de la valeur de C_{BET} (constante de l'énergie de liaison de l'eau) qui suggère une dégradation de l'amidon. Ceci peut être intéressant pour les applications ultérieures de la farine particulièrement en panification. En effet, l'endommagement de l'amidon favorise notablement le potentiel d'hydratation de la farine et intervient également pendant la fermentation. D'où la nécessité de déterminer le taux d'amidon endommagé. Cette étude a révélé que la farine prétraitée au $CaCl_2$ présente un potentiel intéressant en panification, notamment pour ses propriétés thermiques et rhéologiques.

Enfin, dans un deuxième temps, nous avons déterminé par des essais de panification l'impact du taux de substitution de la farine de blé par la farine de patate douce sur la qualité des pains. Six formulations de pains ont été fabriqués avec les taux de substitution de 0,10, 15, 20, 25 et enfin 30 % de la farine de patate douce. Les résultats de l'étude ont montré que la teneur en eau de la farine de blé est supérieure à celle de patate douce. En effet, plus la teneur en eau de la farine est faible, plus il est possible de l'hydrater au pétrissage pour arriver à une

consistance optimale de la pâte. Par contre, la teneur en cendres des farines de patate douce était supérieure à celle du blé. La teneur en protéines de la farine de blé dans cette étude pourrait permettre de compenser le déficit protéique de la farine de patate douce. La capacité d'adsorption d'eau a montré que la farine de blé a une rétention d'eau supérieure (210 %) à celle de la patate douce (176 %).

L'étude de l'évolution des expansions gazeuses des pâtons au cours du temps, en d'autres termes la cinétique de fermentation, a révélé la présence de trois phases pour les pâtes aux taux de substitution de 0 et 10 %. D'après les résultats obtenus au cours des deux premières phases, ces farines présentent une meilleure cinétique d'expansion gazeuse que les autres farines. On remarque une chute des volumes des pâtons probablement liée à la fragilité de leur structure alvéolaire. La baisse de volume serait due à la faible quantité au gluten dans les deux formulations de pates (25 et 30 % de farine de patate douce) comparé aux formulations à 0 et 10 % de taux de substitution.

Le volume des pains diminue avec l'augmentation du taux de substitution de farine de patate douce. La cohésion des pains diminue avec le taux de substitution de la farine de patate douce. Aux taux de substitution de 25et 30 %, un défaut majeur apparaît : un manque de cohésion de la mie des pains. En effet, celle-ci a alors une structure grossière, non homogène. L'analyse sensorielle a montré que les panélistes ont accepté tous les pains (de 0 à 25% du taux de substitution), sauf la formulation à 30 % de substitution par de la farine de patate douce.

Au-delà de 25 % de taux de substitution, les pains issus de farines composites présentent certaines imperfections comme une mauvaise cohésion de la mie.

Au regard des résultats obtenus, la farine de patate douce s'intègre bien dans les politiques de valorisation des tubercules locaux en Afrique afin de produire des pains à moindre coût.

Dans le but d'une meilleure valorisation, il serait intéressant d'étudier :

- ✓ L'impact des prétraitements sur le profil chimique des caroténoïdes pour une caractérisation plus complète des farines ;
- ✓ Les propriétés d'écoulement des farines car elles constituent des enjeux majeurs pour l'industriel.

La perspective de substitution d'une partie de blé par la patate douce nous semble intéressante à deux titres. Elle permet de diversifier les sources d'aliments et s'intègre dans les politiques de valorisation de la filière patate douce en produisant de meilleurs pains.

Des études futures devront être menées dans le but de comparer l'intérêt d'une hydratation préalable séparée de la farine de patate douce avant l'addition de la farine de blé, avec la méthode consistant à mélanger dès le départ les deux types de farine. Il faudrait également définir les conditions optimales de fermentation des pâtes.

Pour compenser la perte de volume résultant de l'absence du gluten dans la farine de patate douce, les enzymes comme les hémicellulases, lipases et amylases peuvent être également utilisées afin d'activer la fermentation, améliorer la coloration de la croûte et aussi la conservation du pain. En effet, les lipases améliorent la tolérance de la pâte, le volume des pains, la finesse de la mie. Quant aux hémicellulases, elles vont permettre une meilleure expansion du réseau glutineux améliorant ainsi la qualité de la pâte.

Mais, il serait tout de même intéressant de déterminer auparavant l'activité amylasique de la farine par l'indice de chute de Hagberg afin de redresser le niveau enzymatique des farines composites (blé/ patate douce).

Références bibliographiques

AACC (American Association of Cereal Chemists) (1990). Approved methods of the AACC (7th ed.). St. Paul. MN : *The Association*.

Ablett, S., Attenburrow, G.E. & Lillford, P.J. (1986). The significance of water in the baking process. In Chemistry and Physics of Baking. Materials, processes and products. Blanshard, J.M.V., Frazier, P.J. and Galliard, T.(eds). *Royal Society of Chemistry*, Londres, 30-41.

Adam L K. (2005). La production biologique de la patate douce: cultures horticoles, Jed NCAT, 19 p.

Adebowale, A. A., Sanni, L.O. & Awonarin, S.O. (2005). Effect of texture modifies on the physicochemical and sensory properties of dreid fufu. *Food Sci. technol. Int*, (11) 373 - 385.

Alais C. & Linden, G. (1997). Biochimie alimentaire. ABREGES. *2ème édition*, Masson, 254 p.

Albitar Nsren (2010). Etude comparative des procédés de séchage couplés à la texturation par détente instantanée contrôlée DIC, en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle. Applications à la valorisation des déchets agro-industriels. Thèse de l'Université de la rochelle 191p.

Ahmed, J., Ramaswamy, H.S., Ayad, A. &Alli, I. (2008). Thermal and dynamic rheology of insoluble starch from basmati rice. *Food Hydrocolloids,* (22), 278-287.

Ahmed, M., Akter, M.S., Lee, J.C. & Eun, J.B. (2010).Encapsulation by spray drying of bioactive components, physicochemical and morphological properties from purple sweet potato.*LWT - Food Science and Technology*, (43), 1307-1312.

Al-Muhtaseb, A.H., McMinn, W.A. & Magee, T.R. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Food and Bioproducts processing,* (80), 118-127.

Al-Muhtaseb, A.H., McMinn, W.A. & Magee, T.R. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Food and Bioproducts processing,*(80), 118 - 127.

Alzamora S. M, Guerrero S. N., Nieto A. B., Vidales S. L. (2004).Technologies combinées de conservation des fruits et des légumes. *Manuel de formation*, FAO. Rome, Italie.

Antarlina, S. (1990). In UPWARD proceedings of the inaugural planning workshop on the user's perspective with agricultural research and development Baguio City, Office Region VII, Philippines, 68 p.

Antonio, G.C., Takeiti, C.Y., Augustus de Oliveira, R. & Park K.J. (2011). Sweet Potato : production, morphological and physicochemical characteristics, and technological

process. *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*. Global Science Books, 5(2), 1-18.

AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (1990) Official methods of analysis (13thed.) Washington, D.C : *Association of Official Analytical Chemists*.

Aprianita, A., Purwandari, U., Watson, B. & Vasiljevic, T. (2009). Physico-Chemical properties of flours and starches from selected commercial tubers available in Australia. *International Food Research Journal*, (4), 507-520.

Baker, J.C.,&Mize, M.D. (1941). The origin of the gas cell in bread dough. *Cereal Chemistry*, (18) 19 - 34

Baldet, P., & Colas F. (2012). Utiliser la mesure de l'activité de l'eau pour mieux conserver les semences forestières : une coopération fructueuse entre Irstea et la Direction de la Recherche Forestière au Québec. Sciences Eaux & Territoires - Cahier spécial.

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. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*., 3(2), 69-77.

Baluais G., (1998). Caractérisation de la taille des particules. Formation permanente 6ème circonscription de CNRS. Nancy 24-28 octobre 1998.

Barichello, V., Yada, R.Y., Coffin, R.H. & Stanley, D.W., (1990). Low temperature sweetening in susceptible and resistant potatoes : starch structure and composition. *Journal of Food Science*, (4), 1054-1057.

Bell, A., Mück, O.,& Schuler, B., (2000). Les plantes à racines et tubercules en Afrique : Une contribution au développement des technologies de récolte et d'après-récolte. Les richesses du sol. *Deutsche Stiftungfür internationale Entwicklung* (DSE), Feldafing, Germany.

Berland, S.& Launay, B. (1995). Rheological properties of wheat-flour doughs in steady and dynamic shear - effect of water-content and some additives. *Cereal chemistry*, (72) 48-52.

Berton, B.M. (2002). Hydratation par adsorption de vapeur d'eau ou par immersion des farines de blé et de leurs constituants. Thèse INPL, Nancy, 215 p.

Bimbenet J.J., Duquenoy A. & Trystram G.(2002). Génie des procédés alimentaires: des bases aux applications. *Librairie Dunod*, Paris.

BIT., (1980). Conservation des légumes à petites échelles. Série Technologie. DossierN° 13, *1ère édition*, Lavoisier. Paris 420 p.

Bloksma, A.K., (1990). Dough structure, dough rheology and baking quality. *Cereal Foods World*, (35) 237-244.

Bolland, J. L., Gee, G. (1946). Kinetic studies in the chemistry of rubber and related material. II. The kinetics of oxidation of unconjugated olefins. Transactions of the Faraday Society, 42, 236-243, DOI :10.1039/TF9464200236.

Bouhassan, A., (1984). Analyse du polymorphisme des néoformations obtenues in vitro à partir de divers tissus de Patate douce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam., Convolvulacées). Thèse 3ème Cycle, Univ. Paris Sud, Orsay, 167 pp.

Bouwkamp, J.C.,(1985). Sweet Potato Products: A natural resource for the tropics (Part II), Library of Congress Cataloging, Florida, 137-259.

Borba, A.M., Sarmento, S.B.S., Leonel, M., (2005). Effect of extrusion parameters on sweet potato extrudates.*Ciênciae Tecnologia de Alimentos* 25(4), 835- 843.

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

Burton, W.G.(1989). The potato 3rd ed. London, U.K. :Longman. p 338.

Brody, T.(1994). Nutritional Biochemistry, *Academic Press*, New York.

Calvel, R., (1990). Le gout du pain : comment le préserver, comment le retrouver.Éditions Jérôme Villette, ISBN 2 - 86547 - 016 - 4.

Cavalcante Alves, J.M. (1996). L'embryogenèse somatique chez la patate douce (ipomoea batatas (L.) convolvulacées) : Induction et maintien des structures embryogènes, caractérisation de protéines associées. Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur es-sciences de l'université Paris XI Orsay. 183p.

Cereda, M.P., Franco, C.M.L, Daiuto, E.R, Demiate, J.M., Carvalho, L.J.C.B., Leonel, M.,Vilpoux, D.F, Sarmento, S.B.S., (2001). Propriedades gerais do amido,Fundação Cargill, Campinas, 221 pp.

Chandra-Shekara, S.,&Shurpalekar, S.R., (1983). Optimum formulations and processing conditions for wheat-tuber breads. *Lebensmittel Wissenschaftund Technologie,* 16(6), 332-337.

Chargelegue, A., Guinet, R., Neyreneuf, O., Onno, B.,& Poitrenaud, B., (1994). La fermentation, In : La panification française. *Lavoisier-Apria, Tec et Doc*, Paris, 283-325.Vol. 528

Chée, R.P., Schultheis, J.R. & Cantliffe, D.J., (1992). Micropropagation of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). High-Tech and Micropropagation III. Ed. Y. P. S. Bajaj-Birkhäuser, 107-117.

Cheftel, J.C., & Cheftel, H. (1984). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments.Volume 2. Technique et document *Lavoisier.*

Cheikh, R., (1984). Etude d'un virus de la patate douce (*Ipomoea batatas* L.) et essai de son élimination par la méthode de culture d'apex in vitro. Mémoire de fin d'étudeprésenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur horticole. *Institut agronomique et vétérinaire Hassan II*. 30p.

Chen, G.,& Sopade, P., (2013). In vitro starch digestion in sweet potato (*Ipomoea Batatas* L.) flours. *International Journal of Food Science and Technology,* (48),150-156.

Chong, L.C.,& Noor Aziah, A.A., (2008). Influence of partial substitution of wheat flour with Banana (*Musa paradisiaca var. Awak*) flour on the physicochemical and sensory characteristics of Doughnuts. *International Food Research Journal,* 15(2), 119-124.

Colas, A., (1991). Définition de la qualité des farines pour différentes utilisations In : Les industries de première transformation des céréales. *Tec et Doc, Lavoisier*, 679 p.

Collado, L.S. &Corke, H. (1996). Use of wheat-sweet potato composite floursin yellow-alkaline and white-salted noodles.*Cereal Chemistry,* 73(4) : 439-444.

Collado, L.S., Mabesa, L.B. &Corke, H. (1997). Genetic variation in colorofSweetpotato flour related to its use in wheat-based composite flour products. *Cereal Chemistry,*74(5), 681-686.

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*, Vol. 688.

Curley, D.M., Kumosinski, T.F., Unruh, J.J., Farrell Jr, H.M., (1998). Changes inthesecondary structure of bovine casein by Fourier Transform Infrared Spectroscopy : Effects of calcium and temperature. *Journal of Dairy Science*, 81, 3154-3162.

Da Silva J.B, Lopes C.A., Magalhães J.S., (2005). Cultura da batata doce. Embrapa.Available online : http : //www.cnph.embrapa.br/sistprod/batatadoce/index.htm.

Djantou-Njantou, E.B., (2006). Optimisation du broyage des mangues séchées (*Manguifera indica*var Kent) : Influence sur les propriétés physicochimiques et fonctionnelles des poudres obtenues. These INPL-Nancy, 149 p.

Defloor, I. (1995). Factors governing the breadmaking potential of cassava (Manihot esculentcrantz). PhD thesisUniversity of K.W.L., Leuven, Belgium, p 155.

Dermesonlouoglou, E.K., Pourgouri, S. & Taoukis, P.S. (2008).Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment to the shelf life of frozen cucumber. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (9) 542-549.

Dobraszczyk,B.J. & Morgenstern, M.P.(2003). Review: rheology and the breadmaking process.*Journal of Cereal Sciences*(38) 229-245.

Dodds, J.A.,(1999). Granularité des poudres (taille et forme). *In Récents progrès en génie des procédés.*13(63), 21-25.

Erkan, H., Çelik, S., Bilgi, B.& Köksel, H., (2006). A new approach for the utilization of barley in food products : Barley tarhana. *Food Chem.* 97(1), 12-18.

Ewart, J.A.D. (1977). Proteine und Proteasen beider Brotherstellung.*Getreide Mehl Brot* (31)131-144.

Falissard, B. (2005). Comprendre et utiliser les statistiques dans les sciences de la vieAbrégés. *Masson*, 3ème*edition*, Paris.

FAO, (1971). Composite flours programme. *Documentation Package*, Vol I.Rome : Food and Agriculture Organization.

FAOSTAT (2008). Agricultural production. Available online : http : //faostat.fao.org/site/567/default.

Farrell, H.M., Wickham, E.D., Unruh, J.J., Qi, P.X. & Hoagland, P.D., (2001).Secondary structural studies of bovine caseins :Temperature dependence of betacasein structure as analyzed by circular dichroism and FTIR spectroscopy andcorrelation with micellization. *Food Hydrocolloids,* 15, 341-354.

Feillet,P., (2000). Le grain de blé, composition et utilisation. Edit Institut National de la Recherche Agronomique (*INRA*), paris, 308 p.

Gaiani, C., Boyanova, P., Hussain, R., Murrieta Pazos, I., Karam, M.C., Burgain, J.,& Scher, J., (2011). Morphological descriptors and colour as a tool to better understand rehydration properties of dairy powders. *International Dairy Journal* (21)462-469.

Giannou, V., Kessoglou, V. & Tzia, C. (2003). Quality and safety characteristics ofbread made from frozen dough. *Trends in Food Science and Technology*, 14(3) 99- 108.

Genin N. & René F., (1995). Analyse du rôle de la transition vitreuse dans les procédés de conservation agro-alimentaire. *Journal of food Engineering* (26) 391- 407.

Grandvoinnent & Praty (1994). Farines et panification mixtes : la panification française. Edit. *Lavoisier-Apria, Tec et Doc*, Paris, 534 p.

Greene, J.L. & Bovell-Benjamin, A.C. (2004). Macroscopic and sensory evaluation ofbreadsupplemented with sweet-potato flour. *Journal of food science,* (69)4.

Gura, S. (1991). Sweet potato-No longer to be neglered.*Entwicklung und landlicker raun.*1, 20-23.

Gurkin, U. (1988). The Effect of storage conditions on selected quality attributes of Sweetpotato flour. Thesis of the University of Tennessee, Knoxville.

Hagenimana. V., Carey, E., Low, J., Gichuki, S., Owori, C., Oyunga, A.,& Malinga, J.N., (1996). Sweet potato post harvest in East Africa, *CIP Sub project Annual Progress Report*.

Hatamipour, M.S., Kazemi, H., Nooralivand, A.,& Nozarpoor, A., (2007). Drying characteristics of six varieties of sweet potatoes in different dryers.*Food and BioproductsProcessing*, 85, 171–177.

Hathorn, C.S., Biswas, M.A., Gichuhi, P.N., & Bovell-Benjamin, A.C. (2008). Comparison of chemical, physical, micro-structural, and microbial properties of breads supplemented with sweet potato flour and high-gluten dough enhancers. *Lebensmittel Wissenschaftund Technologie,*41(5), 803-815.

Havet, M., Mankai, M., & Le Bail, A., (2000). Influence of the freezing condition on the baking performances of French frozen dough. *Journal of Food Engineering*, 45(3), 139-145.

Hayma J. (2004).Le stockage des produits agricoles tropicaux, Agrodok 31 FondationAgromisa, Wageningen, 200 , the Netherland ISBN : 90-77073-69-8.

Huamán, Z., Aguilar, C.& Ortiz, R., (1999).Selecting a Peruvian sweet potato core collection on the basis of morphological, eco-geographical, and disease and pest reaction data. *Theoretical and Applied Genetics,* 98, 840-845.

Huang, C., (2009). Physico-chemical, pasting and thermal properties of tuber starches as modified by guar gum and locust bean gum. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 50-57.

Hussain, R. (2012). Caractérisation multi-niveau de protéines laitières : influence de l'environnement ionique et de la température. Thèse Université de Lorraine, Nancy. 205 p.

IFTS., (1994). Granulomètres et compteurs de particules. Inventaire des appareils disponiblesen France de l'Institut de Filtration et des Techniques Séparatives, Agen.

Jangchud, K., Phimolsiripol, Y. & Haruthaithanasan, V. (2003). Physicochemical properties of Sweet potato flour and starch as affected by blanching and processing.*Starch-Stärke*, (6) 258-264.

Junge, R.C. and Hoseney, R.C. (1981).A mechanism by which shortening and certin surfactants improve loaf volume in bread. Cereal Chemistry, 58, 408-412.

Kaanane A.& Labuza T.P. (1988). The Maillard reaction in food :The Maillard reaction in aging, diabetes and nutrition : proceedings of a NIH Conference on the Maillard reaction in Aging, Diabetes, and Nutrition, held in Bethesda, Maryland, September 22-23, New York, 301-327.

Kapseu C. (1993), Improvement of new sources of vegetable oil in Cameroon, Final technical report of ATLAS/AAI project, Dairy Science Department, OARDC/OSU, Wooster, Ohio, USA, 60.

Kenmegne K.A.T., Hardy J., 1998. Influence of Various Conditions on meat grinding characteristics. *Journal of Food Engineering (*25) 179 - 196.

Kowalska H., Lenart A. & Leszczyk D. (2008). The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. *Journal of food engineering (*86) 30 - 38.

Labuza, T.P. (1984). Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement anduse. *American Association of Cereal Chemists*, St. Paul, *Minnesota*.

Labuza T. P., McNally, L., Gallagher, D., Hawkes, J., and Hurtado, F. (1972), Stability ofintermediate moisture foods.Lipid oxidation, *Journal of Food Science*, (37), 154 - 159 p.

Lai, H.M. & Cheng, H.H. (2004).Properties of pregelatinized rice flour made by hot airor gumpuffing.*International Journal of Food Science and Technology*, (39), 201 - 212.

Langraf F. (2002). Produits et procédés de panification. Edit. *Technique de l'ingénieur*, traité Agroalimentaire, Rouen, 7 p.

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

Lazaridou, A. & Biliaderis, C.G. (2009).Gluten-Free doughs: rheological properties, testing procedures - Methods and potential problems. Gluten-Free Food Science and Technology, pp 52 - 82. *British Library, London UK.*

Lewicki, P. (1998). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties :a review. *International Journal of Food Properties*, (1), 1-22.

Loubes, M.A., Calzetta Resio, A.N., Tolaba, M.P. & Suarez, C. (2012).Mechanical andthermal characteristics of amaranth starch isolated by acid wet-milling procedure.*LWT - Food Science and Technology,* (46), 519-524.

Mac Ritchie, F. (1976).The liquid phase of dough and its role in baking.*Cereal Chemistry*, (53) 318 - 326.

Machiels, D. & Istasse, L. (2002). La réaction de Maillard : importance et applications en chimie des aliments. *Ann. Méd. Vét.*, 146, 347-352.

Mahasukhonthachat, K., Sopade, P.A & Gidley, M.J. (2010). Kinetics of starch digestion in sorghum as affected by particle size. *Journal of Food Engineering*, (96), 18 - 28.

Maillard, L.C. (1912). Action des acides aminés sur les sucres : formation des mélanoïdines par voie méthodique. C R Hebd. *Séances Academy Sciences* (154) 66-68.

Manzocco, L., Calligaris, S., Mastrocola, D., Nicoli, M. and Lerici, C. (2011). Review non enzymatic browning and antioxidant capacity in processed food. Trends in *Food Science and Technology*11 :340-346.

Martin, F.W. (1984). Techniques and problems in small scale production of flour from sweet potato. *J Ag Univ Puerto Rico*, Vol 68 (4) 423-432 p.

Mathieu-Daudé C., Barrot L, Chevallier P. (2001). Produits végétaux riches en carotènes : fiches descriptives et pratiques à l'usage des pays sahéliens. *IRD/OMS*, 27 p.

McMinn W.A.M., Magee T.R.A. (1997a). Kinetics of ascorbic acid degradation and non-enzymaticbrowning in potatoes. *Food and Bioproducts Processing* (75) 223-231.

McMinn W.A.M., Magee T.R.A.(1997b) Physical characteristics of dehydrated potatoes -Part I. *Journal of Food Engineering*, (33) 37 - 48.

Meziani,S. (2012) Influence du procédé de congélation sur les levures et les propriétés techno-fonctionnelles des pâtes sucrées (type Kougelhopf). Thèse Université de Lorraine, Nancy. 122 p.

Moretti CL, Araújo AL, Marouelli WA, Silva WLC.(2002). Respiratory activity and browning of minimally processed sweet potatoes. *Horticultura Brasileira* 20 (3) 497-500.

Nagao.M., Takahashi Y., Yamanaka H., Sugimura.T. (1979). Mutagens in coffee and tea. *Mutat. Res*. 68 (101-106).

Nepa (Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentos). (2006). Tabela Brasileira de Composiçãode Alimentos(2ndEdn), Fórmula Editora, Campinas, 113 pp.

Nguimbou, R.M., Njintang, N.Y., Himeda, M., Gaiani, C., Scher, J. & Mbofung, C.M.F. (2012). Effect of cross-section differences and drying temperature on the physicochemical, functional and antioxidant properties of giant taro flour. *Food and Bioprocess Technology*, (6), 1809 - 1819.

O'Connor, T. P. and O'Brien, N. M., (1994) Lipid oxidation, in : Fox P.F. (Ed.), Advanced Dairy Chemistry-2 : Lipids, Chapman and Hall, London, UK, pp. 309-347.

Oluwalana, I.B., Malomo, S.A., and 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.

Olu Malomo, Jimoh M. O., Adekoyeni O. O., Soyebi O. E, & Alamu E. A.(2013). Effect of blanching and unblanching on rheological properties of sweet potato bread. *Academic Research International;* Vol (4) 3 : ISSN 222-9944.

Onwueme, I.C. (1978). The Tropical Tuber Crops. Chichester, United Kingdom, 234 p.

Ouaouich, A., Osakwe, A. & Chimi, H. (2005). Guide du constructeur du séchoir hybride. Cas de Boeuadel-Taounate-Maroc. Organisation des Nations unies pour le Développement Industriel, 26 pages.

Owori, C, Bergal, L, Mwanga R.O.M, Namutebi, A et Kapinga, R. (2007). Sweet potato recipebook : Sweet potato processed products from Eastern and Central Africa. *Kampala-Uganda*, 93 p.

Panyoo E A., Njintang N.Y. , Hussain R., Gaiani C., Joel Scher & C.M F Mbofung (2013). Physicochemical and rheological properties of taro (*Colocasia esculenta*) flour Affected by cormels weight and method of peeling. *Food and Bioprocess Technology* Vol 7 (5) 1354 – 1363 p.

Paull, R. E.Jung Chen, N. (2000). Heat treatment and fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology*, (21) 21-37.

Pons M.N., Vivier H., Belaroui, K., Bernard-Michel B., Cordier F., Oulhana D., Dodds J.A.(1997). Particle morphology from visualisation to measurement. *Power Technology*. 103, 44 - 57.

Rastogi N.K. & Raghavarao K.S.M.S. (2004). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple considering Fickian diffusion in cubical configuration.*Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 37, 43-47.

Rodier, J. (1978). L'analyse de l'eau : chimie, physico-chimie, bactériologie. *6ème édition,* Dunod Technique, Paris, France, 1136 p.

Rozis, J. F. (1995). Sécher les produits alimentaires. Techniques, procédés, équipements. Collection le point sur. *Editions GRET, CTA., GERES.FAO*. Paris, France, 344 p.

Ruiz FS. (1984). Estudo das variáveis envolvidas no processo d'obtenção de farinhaspré-gelatinizadas de batata doce, por desidratação com rolos aquecidos (Doubledrum-dryer). MSc thesis, *Campinas State University*, 106 pp.

Saad Mohamad, M., Gaiani, C., Scher, J., Cuq, B., Ehrhardt, J.J. & Desobry, S. (2009). Impact of re-grinding on hydration properties and surface composition of wheat flour. *Journalof Cereal Science*, (49), 134 -140.

Sammy, G.M. (1970). Studies in composite flours. I. The use of sweet potato flour in bread and pastry making. *Tropical Agriculture* (Trinidad) (47) 115-125.

Scher J., Da Costa J.M.C., Hardy. J., (1998). Influence de la granulométrie sur les propriétés d'écoulement de la farine de blé. Deuxième colloque solides divisés, *Lyon*. 291-298.

Scott, W.J., (1953). Water relations of Staphylococcus aureus at 30 °C. *Australian Journal Biology Science*, n° 6, 549 - 56 p.

Sevenou, O., Hill, S. E., Farhat, I. A., and Mitchell, J. R. (2002). Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectrescopy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 31:79-85.

Shenoy .V.R. (1993). Maillard reaction and its applications.*Journal. Sci.Ind.Res*, (52) 684 - 689.

Shimada T & Otani M. (2007). Sweet Potato. Biotechnology in Agriculture and Forestry Transgenic Crops IV (ed. by E.C. Pua and M.R. Davey) Springer- *Verlag Berlin Heidelberg* (59) 337- 353.

Shinoj, S., Viswanathan, R., Sajeev, M.S. & Moorthy, S.N. (2006). Gelatinisation and rheological characteristics of minor millet flours. *Biosystems Engineering,* (95) 51 - 59.

Shittu,T, Raji A.O. & 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) 280 -290.

Sihachakr D, Haïcour R, Cavalcante Alves JM, Umboh I, Nzoghé D, Servaes A & Ducreux. (1997). Plant regeneration in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.,Convolvulaceae). *Euphytica* (96) 143 - 152.

Simon PW. (1997). Plant pigments for color and nutrition. *Hort. Science* (32) 12 - 25.

Srisuwan S, Sihachakr D & Siljak-Yakovlev S (2006). The origin and evolution of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) and its wild relatives through the cytogenetic approaches. *Plant Science* (171) 424 - 433.

Soares K.T, Melo AS, Matias E.C. (2002). A cultura da batata doce (*Ipomoea batatas*Lam.). Documento 41, Emepa-PB (Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba SA), João Pessoa, Brazil, 26 pp

Sopade, P. A., Halley, P. J., & Junming, L. (2004). Gelatinization of starch in mixturesof sugars. 1. Dynamics rheological properties and behaviours of starch-honeysystems. *Journal of Food Engineering* (61) 439 - 448.

Sukhcharn Singh, C. S. Riar and D. C. Saxena (2008). Effect of incorporating sweet potato flour to wheat flour on the quality characteristics of cookies. *African Journal of Food Science*.Vol (2) 065 - 072.

Spices, R., (1990). Application of rheology in the bread industry, dough rheology and baked Product Texture, New York, Van *Nostrand Reinhold*, 343-361 p.

Svensson, E. & Eliasson, A.-C. (1995). Crystalline changes of native wheat and potato starches at intermediate water levels during gelatinization, *Carbohydrate Polymers*, (26) 171-176.

Taga R., (1995). Panification : les farines composées une technologie facile à maîtriser *Bulletin du Réseau* TPA n°10-Juin.

Thebud R. & Santarius K.A. (1982). Effects of high-temperature stress on various bio-membranesof leaf cells in situ and in vitro. Plant Physiology, (70) 200 - 205.

Tress.R., Wondrack G.T., Garbe L.A., Kruger R.P., Rewicki. D. (1998). Pentoses andhexoses as sources of new melanoidin like Maillard polymers. *Journal Agriculture and Food Chemistry* (46) 1765 - 1776.

Unifesp (2008).Universidade Estadual De São Paulo.Tabela de Composição de Alimentos. Available online :http : //www.unifesp.br/dis/servicos/nutri/nutri.php id=2597.

Utomo, J-S., Cheman, Y.B., Rahman, R.A. & Sadd, M.S. (2008). The effect of shape, blanching methods and flour on characteristics of restructured sweet potato stick. *International Journal of Food Science and Technology*, (43) 1896 - 1900.

Van Hal, M.V. (2000). Quality of sweet potato flour during processing and storage. *Journal of Food Reviews International*, (16) 1 - 37.

Van Soest, J. J. G., Tournois, H., deWit, D., and Vliegenthart, J. F. G. (1995). Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydrate Research* (279) 201-214.

Van Vliet, T., Janssen, A.M., Bloksma, A.H. and Walstra, P. (1992). Strain hardening of dough as a requirement for gas retention. *Journal of Texture Studies* (23) 439 - 460.

Wang, R., Zhou, W., & Isabelle, M., (2007). Comparison study of the effect of green teaextract (GTE) on the quality of bread by instrumental analysis and sensory evaluation. *Food Research International* (40) 470 - 479.

Waramboi, J.G., Dennien, S., Gidley, M.J. & Sopade, P.A. (2011). Characterisation of sweet potato from Papua New Guinea and Australia : Physicochemical, pastingand gelatinisation properties. *Food Chemistry*, (126), 1759-1770.

Whitaker J., Lee C. Y. (1995). Recent advances in chemistry of enzymatic browning. In enzymatic browning and its prevention. J. Whitaker,C. Y. Lee (Eds). Washington, *American Chemical Society*: 2-7.

Woolfe, J.A. (1992). Sweet Potato : An Untapped Food Resource. Cambridge, UK: *Cambridge University Press*.

Yussof., N.S., Utra, U. & Alias, A.K. (2013). Hydrolysis of native and cross-linked corn, tapioca, and sweet potato starches at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes *Starch-Starke*, (65) 285 - 295.

Zhu, Y.I., Pan, Z. & Mchugh, T.H. (2007). Effect of dipping treatments on color stabilization and texture of apple cubes for infrared dry-blanching process. *Journal of Food Processing and Preservation* (31) 632 - 648.

Résumé

La patate douce est un tubercule appartenant à l'ordre des polémoniales et à la famille des convolvulacées. Il contient de l'amidon, qui est l'élément principal, des dextrines, du β-carotène, puis d'autres éléments nutritifs en quantités variables. L'objectif de la thèse a été de valoriser la patate douce sous forme de farines et de mettre en évidence les potentialités technologiques de ces farines. Deux études complémentaires ont été réalisées au cours de ce travail de thèse, la première concerne l'étude de l'impact des prétraitements thermiques et chimiques sur les propriétés physicochimiques, thermiques, rhéologiques et fonctionnelles des farines issues de patates douces ayant : TPD (tranche de patate douce non prétraitée), TPD$CaCl_2$ (tranche de patate douce prétraitée au $CaCl_2$) et enfin TPDB (tranche de patate douce prétraitée par blanchiment). Il en résulte une légère augmentation de la teneur en sucres réducteurs dans les farines TPD$CaCl_2$par rapport aux farines TPDB et TPD. Cependant, la valeur de L^* (luminance) dans la farine TPDB était inférieure à celles des farines TPD$CaCl_2$et TPD. La teneur en calcium était relativement élevée dans la farine TPD$CaCl_2$ (120,6 mg/100g) par rapport aux farines TPD et TPDB (respectivement, 77,8 et 67,6 mg/100g). Les valeurs d'enthalpie de gélatinisation et de module élastique (G') étaient supérieures dans la farine TPD$CaCl_2$. La capacité de gonflement était élevée dans les farines blanchies. Il a également été constaté une légère augmentation de la constante d'énergie de liaison d'eau du modèle BET dans les farines traitées au $CaCl_2$ et une augmentation marquée pour les farines blanchies. De cette étude, on déduit que les farines traitées au $CaCl_2$ possèdent des propriétés physicochimiques intéressantes pour une application en panification et dans la formulation alimentaire.

Dans une seconde étude, les essais de panification ont été réalisés avec différents taux d'incorporation à la farine de blé (0, 10, 15, 20, 25 et 30 %) des farines de patate douce traitées au $CaCl_2$afin de déterminer le taux d'incorporation optimal permettant de réaliser un compromis entre l'amélioration des propriétés nutritionnelles suite à l'incorporation de farine de patate douce et la diminution des propriétés rhéologiques de la pâte à pain. Les paramètres texturaux des pâtes ont été déterminés. Il en résulte une diminution de la cohésion, la valeur de a* (échelle de couleurs rouge-vert) a augmenté avec l'augmentation du taux de substitution, contrairement aux valeurs de la luminance L* qui ont diminué. Finalement, la farine de patate douce pouvait être incorporée dans une formulation de panification jusqu'à 25 % sans dépréciation notable des qualités organosensorielles des pains.

Mots clés : patate douce, prétraitement, $CaCl_2$, blanchiment, propriétés physicochimiques, propriétés rhéologiques, optimisation, texture, pain.