



HAL
open science

Optimisation des paramètres de production et de conservation de la farine de Taro (*Colocasia esculenta*)

Inconnu Aboubakar

► **To cite this version:**

Inconnu Aboubakar. Optimisation des paramètres de production et de conservation de la farine de Taro (*Colocasia esculenta*). Alimentation et Nutrition. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009. Français. NNT : 2009INPL005N . tel-01749430

HAL Id: tel-01749430

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749430v1>

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.



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>

NANCY-UNIVERSITE
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires
Laboratoire de Sciences et Génie Alimentaires

UNIVERSITE DE NGAOUNDERE
Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles
Laboratoire de Biophysique et Biochimie Alimentaire/Nutrition

THESE EN CO-TUTELLE

Présentée devant l'Université de Ngaoundéré et Nancy-Université

Pour obtenir les grades de

Docteur/PhD de l'Université de Ngaoundéré et de Docteur de l'INPL

Spécialités : Sciences Alimentaires et Nutrition/ Procédés Biotechnologiques et Alimentaires

Par

ABOUBAKAR

**OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DE PRODUCTION ET DE CONSERVATION DE LA
FARINE DE TARO (*Colocasia esculenta*)**

Soutenue publiquement, le 20 janvier 2009 devant la commission d'examen

Jury

Président du jury :

François-Xavier Etoa

Professeur Université de Yaoundé I

Rapporteurs :

Michel PARMENTIER

Professeur Nancy-Université

Didier MONTET

Docteur HDR INRA-Montpellier

Examineurs :

M. Carl Moses F. MBOFUNG

Professeur Université de Ngaoundéré (Directeur de thèse)

M. Joël SCHER

Professeur Nancy-Université (Co-directeur de thèse)

M. Nicolas Y. Njintang

Docteur HDR Université de Ngaoundéré (Co-directeur de thèse)

Remerciements

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Biophysique et de Biochimie Alimentaire et de Nutrition (département sciences alimentaires et nutrition) de l'Ecole nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles (ENSAI) de l'université de Ngaoundéré et du Laboratoire de Science et Génie Alimentaires (LSGA) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) de l'institut national polytechnique de lorraine (INPL).

Il a bénéficié du concours de la coopération française (Service de la Coopération et des Activités Culturelles (SCAC)) à qui je voudrais adresser mes sincères remerciements.

J'exprime mes remerciements à Monsieur Carl Moses F. MBOFUNG, Professeur à l'ENSAI et Responsable du Laboratoire de Biophysique et de Biochimie Alimentaire et Nutrition (LBBAN) de l'Université de Ngaoundéré, pour l'intérêt porté à ce travail. Je lui reconnais l'initiation à la recherche depuis mon mémoire de Maîtrise en Biologie Appliquée et la diversité de mes sujets.

Je tiens à remercier Monsieur Joël SCHER, Professeur à l'ENSAIA-INPL, Nancy Université (France), pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant m'accueillir au sein du Laboratoire de Sciences et Génie Alimentaires et pour avoir accepté de diriger cette thèse. Je lui suis reconnaissant pour son soutien scientifique et sa disponibilité durant mes années de thèse. Ses conseils m'ont été très précieux pour mener à bien ce travail de recherche.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Nicolas Y. NJINTANG, Chargé de cours à la Faculté des Sciences de l'Université de Ngaoundéré, pour la confiance qu'il m'a toujours accordée, pour avoir accepté de faire partie de l'équipe

principale qui m'a encadré depuis la Maîtrise jusqu'aujourd'hui. Je le remercie pour l'aide matérielle et scientifique apportée à ce travail.

Mes remerciements vont également :

- au Professeur Stéphane DESOBRY, Directeur du Laboratoire de Science et Génie Alimentaires de l'ENSAIA-INPL (France) pour l'accueil et le soutien à ce travail.

- au Professeur Robert NDJOUENKEU, Chef du Département de Sciences Alimentaires et Nutrition, pour sa confiance et ses nombreux conseils.

-aux Professeurs Michel PARMENTIER, Jean-Bernard MILLIERE, Jacques FANY Michel LINDER, Muriel JACQUOT, Sylvie BANON, pour avoir répondu à mes préoccupations et l'aide apportée à la réalisation de ce travail.

- à tous les Enseignants de l'ENSAI de Ngaoundéré et particulièrement aux Professeurs : Clergé TCHIEGANG, Richard KAMGA, Martin NGASSOUM, Jean Bosco TCHATCHUENG, qui ont tout mis en œuvre pour parfaire notre formation, et aux Docteurs Léopold TATSADJEU, Auguste MBAWALA, Edith FONBANG, EJOH, NSO Emmanuel, pour leurs participations à ma formation et aux multiples conseils qu'ils m'ont prodigué.

-au Professeur Balaam FACHO pour l'accueil, les conseils et le soutien durant les travaux effectués au Tchad.

-à mon Oncle et son épouse Daniel et Suzanne HAMADJODA. A divers titres ils ont contribué à la réalisation de ce travail. Qu'ils en trouvent un motif de satisfaction.

- aux Docteurs Guy Bertrand NOUMI, Hilaire WOMENI, Aboubakar DANDJOUA, Ludovic FEUZE, Djouldé DARMAN, Carole Hélène EDIMA, MOHAMADOU, Lili

TCHATCHOUANG, Gilles NKOUAM, Elie Baudelaire NJANTOU pour leurs conseils et encouragements.

-à Mesdames Marie Noëlle MAUCOURT, Carole JEANDEL, Anne LAPLACE du LSGA. Affables et disponibles, elles nous ont orienté et formé dans l'utilisation des équipements pendant notre séjour à Nancy. Notre gratitude leur sera permanente.

-à ma fiancé Nadège Ingrid KAMGANG GOUANLONG pour tous les efforts qu'elle n'a cessée de ménager pour me combler d'amour, de joie et pour le soutien moral.

- à mes camarades de l'Université de Ngaoundéré (Armand ABDOU BOUBA, Giscard KAPTSO, Désiré MBOUGUENG, Laurette MEZAJOUG, BEKA Robert, NGUIMBOU Richard, feu Carine NGO OUM, Claudine PASSO TAMO, Jacques HAFTI, Pogenet PABAME, EYENGUA Christèle, Juvenal, Joseph), à mes camarades du LSGA de Nancy (KASSEM, ATMANE, CHARBEL, Norbert AMOUGOU) pour l'ambiance toujours chaleureuse qui a toujours prévalu pendant nos travaux au laboratoire

-à mes frères et sœurs Emmanuel DALAÏLOU, Adamou DALAÏLOU, Hamadou TOURAKE DALAÏLOU Jérémie, Eric MBARGA HAMADJODA, Blandine DOUDOU, Prisca HAOUA, Fanta DALAÏLOU, Anne KONGA, Mariane HADIDJA, Hamadou HAMADJODA, MOHAMADOU, pour leur soutien et encouragement.

-à Serge Emmanuel DAYIM, Hubert KEMOUE et Christian TCHOULA, Rev. Jean Henry BALOMOG, DJORET SOUGNABE Viviane, Alain YOUSOUFA, Jean BAÏGUELE, Amadou SARKAO, PANYO'O Emmanuel, KEMGANG Stella, pour leurs soutiens multiformes

- à Martial KAMGANG TALO, Christelle Corine KAMGANG DOMYEUM, Dany KAMGANG NOUBOUOSSIÉ, feuie Levie Mesmine KAMGANG MATEKAM, Larissa FOYET, Stacy LEMNOU pour leur encouragement.

- à tonton et tata Blaise et Isabelle SE-ONDOUA, pour leur amour et leur soutien.

- à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	II
SOMMAIRE	1
ABREVIATIONS	7
LISTE DES ABREVIATIONS	8
CHAPITRE I : INTRODUCTION	10
INTRODUCTION	11
CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	15
REVUE DE LA LITTERATURE	16
II.1-Utilisation du taro.....	16
II.2-Composition chimique du tubercule de taro	17
II.3-Transformations technologiques du taro en farine : aspects fondamentaux.....	22
II.3.1-Procédés culinaires en vue du pré-traitement du tubercule.....	23
II.3.2-Procédés de séchage et mouture.....	26
II.4-Conservation des produits alimentaires déshydratés	31
II.4.1-Quelques techniques de préservation et susceptibilité à la dégradation	31
II.5-Propriétés rhéologiques des aliments	38
II.6. État des connaissances sur la production et l'utilisation de la farine de taro	41
CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES.....	51
MATERIEL ET METHODES.....	52

III.1-Propriétés physicochimiques, thermiques et microstructure des poudres alimentaires de six variétés de taro	52
III.1.1-Echantillonnage et production des poudres alimentaires (farines et amidons).....	52
III.1.2-Extraction de l'amidon de taro	52
III.1.3-Analyse chimique et de quelques minéraux.....	55
III.1.3.1-Détermination de la teneur en eau	55
III.1.3.2-Détermination de la teneur en lipides totaux	55
III.1.3.3-Détermination de la teneur en cendres	56
III.1.3.4-Dosage des protéines totales.....	56
III.1.3.5-Dosage des sucres disponibles et solubles.....	58
III.1.3.6-Dosage des Minéraux	59
III.1.4- Analyse thermique Différentielle et détermination de la teneur en amylose	60
III.1.5-Détermination des paramètres de couleur des poudres alimentaires ..	61
III.1.6-Analyse granulométrique des poudres alimentaires (farines et amidons) de taro et propriétés d'empattage	63
III.1.7-Détermination de l'isotherme de sorption et de désorption des poudres alimentaires de taro	64
III.1.8- Analyse microstructurale des granules d'amidon par microscopie électronique à balayage (MEB)	65
III.1.9-Détermination de la capacité d'absorption d'eau et l'indice de solubilité dans l'eau des farines et des amidons de taro	66
III.1.10-Analyse spectroscopique infrarouge des farines et des amidons de taro	67

III.1.11-Analyse rhéologique des farines et amidons de taro	67
III.2- Modifications physico-chimiques et fonctionnelles pendant la cuisson des tubercules de taro (<i>Colocasia esculenta</i> L. Schott)	68
III.2-1-Matériel végétal	68
III.2-2-Préparation des tubercules	69
III.2-3- Production de la farine	71
III.2-4- Evaluation physicochimique des tubercules de taro pendant la cuisson	71
III.2-4-1- Evaluation des sucres réducteurs	71
III.2-4-2-Détermination des protéines solubles	71
III.2-4-3-Détermination de la teneur en amidons résistants	72
III.2-4-4- Détermination de la teneur en oxalate	72
III.2-4-5- Détermination de l'Indice valeur bleue	73
III.2-4-6- Détermination des produits intermédiaires et finaux des réactions de Maillard	74
III.2-4-7-Détermination du taux de séparation cellulaire (VICS)	74
III.2-4-8-Analyse de la dureté	75
III.2-5- Analyses sensorielles	76
III.3-Etude de l'influence du mode de cuisson des tubercules et du mode de reconstitution des pâtes sur le profil textural et l'acceptabilité de la pâte de taro	77
III.3.1-Matériel végétal.....	77
III.3.2- Production de la farine et préparation du « achu »	77
III.3.3-Analyses chimiques	78
III.3.4-Analyses physico-chimiques et microstructurales des farines	79

III.3.5-Analyse spectroscopique infrarouge et détermination de la couleur des farines précuites	79
III.3.6-Etudes des caractéristiques rhéologiques des farines.....	79
III.3.7-Détermination des caractéristiques texturales	80
III.3.8-Evaluation du profil sensoriel	82
III.3.8.1-Analyse descriptive	82
III.3.8.2-Analyse hédonique.....	82
III.4-Prédiction du degré favorable de séchage des tranches de taro par l'utilisation des marqueurs analytiques et de la courbe de sorption.	82
III.4.1-Matériel végétal.....	82
III.4.2-Vieillessement accéléré et détermination de la teneur en eau maximale	83
III.4.3- Détermination de la teneur en eau monomoléculaire par le modèle théorique de Brunauer-Emmet-Teller (BET).....	84
III.4.4-Détermination de la teneur en carbonyles	84
III.4.5-Détermination de la teneur en malonaldehyde total (MDA)	85
III.4.6 Influence de la teneur en eau de fin de séchage sur l'acceptabilité du achu et test de consommation de la pâte de taro	86
III.5-Etude des variations physicochimiques et rhéologiques de la farine de taro au cours du stockage.	86
III.5.1-Matériel	86
III.5.2-Méthodes	87
III.5.2.1-Préparation des échantillons	87
CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION	90

IV.1- Propriétés physicochimiques, thermiques et microstructure des poudres alimentaires de six variétés de taro (<i>Colocasia esculenta</i>).....	91
IV.1.1-Composition chimiques des farines de taro.....	91
IV.1.2-Paramètres de couleur et isotherme de sorption des farines et amidons de taro	96
IV.1.3-L'Analyse thermique Différentielle (ATD) des farines et amidons.....	100
IV.1.4-Microstructure et répartition granulométrique des farines et amidons de taro	102
III.3.5-Spectrophotométrie Infra rouge à transformé de Fourier.....	105
IV.1.6-Capacité d'absorption d'eau (CAE) et indice de solubilité (ISE)	108
IV.1.7-Viscosité des farines et amidons de taro	112
IV.1.8-Conclusion partielle	114
 IV.2-Modifications physico-chimiques et fonctionnelles pendant la cuisson des tubercules de taro (<i>Colocasia esculenta</i> L.Schott)	115
IV.2-1-Variation des caractéristiques physicochimiques	115
IV.2-2- Changements des paramètres de texture et des caractéristiques sensorielles.....	123
IV.2.3-Conclusion partielle	128
 IV.3- Etude de l'influence du mode de cuisson des tubercules et du mode de reconstitution des pâtes sur le profil textural et l'acceptabilité de la pâte de taro ...	129
IV.3.1-Composition chimique et propriétés physicochimiques des différentes farines précuites de taro.....	129
IV.3.2- Propriétés rhéologiques des farines précuites et des pâtes reconstituées	137
IV.3.3-Conclusion partielle	157

IV.4- Prédiction du degré favorable de séchage des tranches de taro par l'utilisation des marqueurs analytiques et de la courbe de sorption.	158
IV.4.1-Teneur en eau monomoléculaire théorique et expérimentale.....	158
IV.4.2-Test d'acceptabilité de la farine de taro.	163
IV.4.3-Conclusion partielle	167
IV.5-Etude des variations physicochimiques et rhéologiques de la farine de taro au cours du stockage.	168
IV.5.1-Variation de la composition chimique au cours du stockage	168
IV.5.2-Variation des caractéristiques physiques des farines au cours du stockage	183
IV.5.4-Conclusion partielle	193
PERSPECTIVES	196
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	197

ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

A : Surface de contact, perpendiculaire au flux de la chaleur ;

A280: Absorbance à 280 nm

A420: Absorbance à 420 nm

ACP : Analyse en composante principale

AFNOR : Association Française de Normalisation

BET : Brunauer-Emmet-Teller

BVI : Indice Valeur Bleue

CAEa : Capacité d'absorption d'eau apparente

CAEr : Capacité d'absorption d'eau réelle

CE : Country Coco Ekona

CIE: Commission Internationale de l'Eclairage

CN : Country coco Ngaoundere

DJ: Dose journalière

DNS : Acide 3, 5 dinitrosalicylique

DO : Densité Optique

dQ/dt : Intensité du transfert de chaleur

DSC : Differentiel Scanning calorimetry

dW/dt : Vitesse de séchage ;

FAO : Food Agriculture Organisation

ISE : Indice de solubilité dans l'eau

k : Coefficient de transfert de matière ;

K_s : Coefficient de transfert "superficiel" de chaleur ;

KW : Kwanfré

MDA : Malondialdehydes

MEB : Microscope électronique à balayage

MS : Matière sèche

PPO: Polyphénol-oxydases

Pwa : Pression partielle de vapeur d'eau dans l'atmosphère de séchage.

Pws : Pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit ;

RIE : Reb Ibo Coco Ekona

RIN : Reb Ibo Coco Ngaoundere

RS : Amidons résistants

SS: Cuisson tranche à la vapeur

T₀: Température initiale de gélatinisation

T_a : Température de l'air (fluide) ;

T_c : Température finale de gélatinisation

T_p: Température de gélatinisation

T_s : Température à la surface du produit ;

VICS : Vortex Induced Cells Separation

WBT: Cuisson tubercule entier dans l'eau du robinet

WBTL: Cuisson tubercule entier dans la solution de citron

WBTT: Cuisson tubercule entier dans la solution de tamarin

CHAPITRE I : INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le taro (*Colocasia esculenta*) est une plante herbacée largement cultivée en Afrique centrale pour son tubercule souterrain. L'utilisation de ce tubercule varie selon les régions. Au Cameroun, il est utilisé à 80% pour la préparation du "achu" une pâte épaisse obtenue par cuisson du tubercule dans sa peau, suivi du pelage et pilage dans un mortier (Lyonga, 1979 ; Njintang, 2003). Au Tchad, en plus de son utilisation pour la préparation d'une pâte cuite appelée «foufou», ce tubercule est transformé en farine et en cossettes qui servent à la préparation de la bouillie et des beignets (Njintang *et al.*, 2000). Le tubercule de taro est pauvre en lipides, protéines et vitamines, mais il est une source importante de glucides (Tagodoe *et al.*, 1994), de minéraux spécialement le potassium, le magnésium et le calcium (Bradbury & Holloway, 1988). Environ 10,4% de mucilage ont été rapporté dans le taro et joueraient un rôle important dans la rhéologie de la pâte (Nip, 1997). L'amidon de taro a une bonne digestibilité et son utilisation pour la formulation des aliments pour enfants a été encouragée (FAO, 1991). L'utilisation de cet amidon dans la fabrication des films de polyéthylène et comme substituant de lipides a également été rapportée (Jane *et al.*, 1992).

Malgré l'importance nutritionnelle et technologique du taro ainsi que son rôle dans la sécurité alimentaire des populations, très peu d'études de valorisation technologique et post-récolte, lui ont été consacrées. A cet effet, le manque de technologie post récolte du taro au Cameroun a en partie contribué à la baisse de sa production qui est passée de $1,7 \times 10^6$ tonnes en 1978 à $0,56 \times 10^6$ tonnes en 1999 (Minagri, 1981; 1999; Njintang, 2003), cette baisse de productivité pourrait s'expliquer par le fait que le tubercule de taro se conserve difficilement à cause de sa

haute teneur en eau. Ceci à pour conséquence la perte de la quasi-totalité de la récolte des cultivateurs. Au Tchad, le manque d'intérêt par les institutions étatiques aux technologies traditionnelles limite la consommation des sous-produits de taro (Njintang *et al.*, 2000). D'autres contraintes associées à l'utilisation du tubercule de taro sont l'irritation du tubercule mal cuit dans la bouche, qui serait liée à la présence de cristaux d'oxalate de calcium (Bradbury et Nixon, 1998; Njintang, 2003), le temps de cuisson généralement élevé (2 à 4h) nécessaire pour éliminer l'irritation (Nip, 1997; Njintang, 2003), le temps élevé du pilage des tubercules qui varie de 1 à 4h en fonction de la quantité. C'est dans cette problématique que depuis 2000, des travaux conjoints Tchad-Cameroun sont menés en vue de la production de la farine de taro pour la préparation de produits dérivés comme la bouillie, la pâte de taro (achu) avec des caractéristiques proches de celles obtenues par la méthode traditionnelle (Njintang *et al.*, 2000 ; Soudy, 2002 ; Njintang et Mbofung, 2003a, Njintang et Mbofung, 2003b ; Njintang, 2003; Njintang et Mbofung, 2006 ; Njintang *et al.*, 2007 ; Njintang *et al.*, 2007, Njintang *et al.*, 2006 ; Mbofung *et al.*, 2007). Ces études ont visé trois points principaux:

- La couleur : la plupart des variétés de taro étudiées présentaient un brunissement dont l'intensité a été corrélée à la présence de phénols et proanthocyanidines (Njintang *et al.*, 2007) ;

- La texture: la pâte de taro est composée en général de cellules non fragmentées dispersées dans un gel d'amylose, d'amylopectine et de mucilages provenant de quelques cellules fragmentées (Njintang, 2003; Njintang *et al.*, 2006 ; Njintang *et al.*, 2007). L'ensemble de la pâte forme un mélange homogène, viscoélastique, collant et adhésif;

- La flaveur: pendant la cuisson du tubercule de taro dans sa peau, une flaveur

spécifique doit partir de la pelure vers la partie comestible (Njintang *et al.* 2007 ; 2008). Au stade actuel des travaux, il a été identifié une variété, *Ibo coco*, qui présente un brunissement faible, qui irrite peu, et cuit vite. Les résultats ont aussi montré que pour maintenir les caractéristiques de la pâte traditionnelle, il faut cuire le tubercule dans sa peau avant de le transformer en farine. Les travaux récents de Njintang *et al.* (2007 ; 2008) ont montré que le broyage du tubercule précuit et séché dans un moulin à marteaux doté d'un tamis de mailles 500µm donne une pâte possédant une fermeté proche de la pâte traditionnelle. Cependant, la pâte de taro alors obtenue à partir de cette farine présente des caractéristiques d'élasticité légèrement différentes de la pâte traditionnelle. La méthode de reconstitution de la pâte utilisée a été incriminée d'une part, suggérant que l'étude de l'effet de la méthode de reconstitution sur les caractéristiques de la pâte est à envisager. D'autre part, le temps de cuisson des tubercules (30min) utilisé dans les études antérieures a été fixé de façon arbitraire. Or, pour une exploitation rentable du procédé qui voudrait que la cuisson rapide permet d'économiser en énergie entraînant la réduction des dépenses liées à la production de la farine, ce temps relativement long devrait être réduit au minimum. Dans cette perspective de réduction du temps de cuisson, la préparation des tubercules dans des solutions acides comme le citron, le tamarin et la cuisson des tranches sont à envisager, l'efficacité de ces procédés dans la réduction du temps de cuisson ayant été démontrée (Soudy, 2002; Njintang et Mbofung, 2006 ; Njintang *et al.*, 2008). Toutefois, l'effet de leur utilisation pour la production de farine, matière première pour la préparation d'achu devra être étudiée.

Un autre aspect de la recherche tout aussi important, mais non encore effectué dans les études sur le taro est la conservabilité de la farine précuite. Ceci est d'autant plus important que l'amidon est gélatinisé et donc très susceptible à fixer de

l'eau. En effet, cette conservabilité dépend non seulement de facteurs internes au produit comme l'activité de l'eau, mais aussi des conditions environnementales (température, humidité, etc.). De nombreux travaux ont montré que l'humidité d'équilibre en fin de séchage influence non seulement les propriétés d'usage de la farine (Ferrier et Lopez, 1979), mais aussi l'aptitude à la conservation. À cet effet, notre problématique est orientée sur l'analyse des paramètres physicochimiques et rhéologiques qui favoriseraient la cuisson de *Ibo coco* comparativement aux autres variétés de taro afin de rentabiliser sa production à grande échelle. À cet égard, les conditions optimales de production et de conservation de la farine exigent de prime abord la détermination de la valeur optimale de "l'humidité d'équilibre" à la fin de séchage.

L'objectif général de ce travail est donc multiple:

(1) Implémenter les données existantes sur la caractérisation physicochimique du tubercule de taro par la détermination des propriétés physicochimiques et thermiques des farines et amidons de six variétés de taro (nombre utiliser par Njintang, (2003) dans ses travaux préliminaires).

(2) Étudier l'influence du mode de cuisson sur les caractéristiques physicochimiques du tubercule.

(3) Étudier l'influence du mode de cuisson des tubercules et du mode de reconstitution des pâtes sur le profil textural et l'acceptabilité de la pâte de taro.

(4) Déterminer le degré d'humidité favorable pour un meilleur séchage et stockage des farines de taro.

(5) Étudier l'influence du mode et du temps de stockage sur les propriétés physicochimiques et rhéologiques des différentes fractions particulières de la farine de taro.

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

REVUE DE LA LITTERATURE

II.1-Utilisation du taro

Le taro (figure 1) est l'aliment de base traditionnel dans les îles du Pacifique, où on le transforme en une série de produits alimentaires semblables à ceux décrits pour le manioc et l'igname (Hong *et al.*, 1990). Il peut être bouilli, frit ou pilé en boule. Le *poi* est un aliment dérivé du taro, très populaire aux îles Hawaii et en Polynésie. On le prépare en faisant cuire à la vapeur les tubercules de taro (figure 2), qui sont ensuite épluchés, pilés jusqu'à ce qu'ils aient une consistance semi-fluide, et la pâte est passée à travers une série de passoires, dont la dernière a un diamètre d'environ 0,5 mm. On en fait aussi de la bouillie ou du potage, des chips et de la farine. La farine de taro présente l'avantage supplémentaire d'être très digestible, c'est pourquoi on la donne aux malades et on l'emploie comme ingrédient dans les aliments pour nourrissons (Jane *et al.*, 1992).

Dans le sud du Tchad et en particulier dans le Mayo Kebbi, les tubercules sont pelés, tranchés puis séchés et transformés sous forme de farine (Njintang, 2000). La farine composée de taro et de riz est utilisée pour la préparation des aliments tels que le «fufu» ou de la bouillie, qui servent à l'alimentation des enfants et des adultes. Les cossettes sèches sont préparées et consommées avec du sucre. Les cendres issues de l'incinération des épluchures de taro sont utilisées comme sels de cuisine (Njintang, 2000).

Colocasia esculenta est généralement consommé au Cameroun sous forme d'une pâte homogène appelée achi (figure 4) (Lyonga, 1979). Dans la préparation de cet aliment, les tubercules sont préparés pendant 2 à 3 heures de temps, pelés et pilés dans un mortier (figure 5). Cette pâte est consommée accompagnée d'une sauce

très épicée appelée *sauce jaune*. Cet aliment est d'une très grande valeur socio-culturelle dans les groupes ethniques Bamiléké et Ngemba de l'ouest et du nord-ouest du Cameroun respectivement. Pendant longtemps, le «achu» a été réservé pour des grandes cérémonies et pour des personnalités privilégiées.

II.2-Composition chimique du tubercule de taro

La composition chimique du tubercule de taro a été rapportée par de nombreux auteurs (Bradbury et Holloways, 1988 ; Njintang, 2003).

Dans toutes les variétés étudiées (tableau 1), le tubercule est essentiellement riche en glucides avec 60 à 90% (en matière sèche). L'amidon représente environ 73 à 80% de ces glucides (Payne *et al.*, 1941 ; Jane *et al.*, 1992). Le taro apparaît ainsi comme un aliment principalement énergétique.

Le taux d'amylose est variable (18-24 %). Il dépend notamment de la méthode de détermination. L'amylopectine représente 16,8-18,4% pour les courts branchements et 37,2-40,5% pour les longs branchements (Jane *et al.*, 1992). Ces proportions d'amylose et d'amylopectine sont souvent mises à profit dans l'étude des propriétés fonctionnelles du tubercule, de la farine ou de la fécule de taro, notamment la gélatinisation dont le pic de température se situe entre 69 et 72 °C (Nip *et al.*, 1997). Trèche (1989) a rapporté une température de début de gélatinisation de 73,5°C et le pic de viscosité est atteint à 80°C.

Le diamètre moyen du granule d'amidon est compris entre 2,6 et 3,76 µm de forme irrégulière et polygonale. Ces propriétés physiques sont favorables à la bonne digestibilité de l'amidon.

Les lipides et les protéines sont très peu abondants avec des teneurs qui vont de 0,23 à 0,52 % et 0,09 à 0,16 % respectivement. Toutefois, les lipides sont

extrêmement intéressants à cause de la proportion élevée des acides gras polyinsaturés.

Le taro contient aussi quelques polysaccharides autre que l'amidon comme les pectines, les hémicelluloses ainsi que les mucilages de l'ordre de 5,02 à 9,01% (Tagodoe *et al.*, 1994). L'importante quantité de gommés (mucilages) aurait une influence considérable sur la qualité culinaire et les propriétés technologiques du taro telles que la durée de cuisson, la couleur et le processus de séchage des cossettes, et la consistance de la pâte (Lim *et al.*, 1992).



Figure 1: Le taro (*Colocasia esculenta*)



Figure 2: Tubercules du taro



Figure 3: Feuille du taro



Figure 4: Achu (pâte cuite de taro).



Figure 5: Mortier contenant du achu.

Tableau 1: Valeur nutritive du poi* cuit, du taro chinois cuit, du poi frais d'Hawaii et d'Ibo coco du Cameroun

Nutriments	Poi cuit	Taro chinois cuit	Poi frais	Ibo coco
Teneur en eau (g)	65	62	72	67,81
Calories (kJ)	130	130	120	189,72
Calories lipidiques (kJ)	4	4	4	2,12
Lipides totaux (g)	1	1	1	0,53
Lipides saturés (g)	0	0	0	0
Cholestérol (mg)	0	0	0	0
Sodium (mg)	10	10	10	110
Glucides totaux (g)	36	36	31	47,78
Sucres (g)	2	2	2	33,4
Fibres (g)	4	4	4	0,35
Protéines (g)	1	1	1	2,66
Vitamine A (% DJ)	0	0	0	/
Vitamine C (% DJ)	14	14	12	/
Calcium (% DJ)	4	4	4	/
Fer (% DJ)	4	4	4	/

Source : Huang (1992); Njintang (2003).

DJ : Dose Journalière (pourcentage)

*poi : pâte fraîche de taro obtenu après pilage et fermentation du tubercule de taro

II.3-Transformations technologiques du taro en farine : aspects fondamentaux

Le taro est un produit très apprécié en zones tropicale et subtropicale, mais sa consommation sous forme de tubercule frais présente pour les consommateurs urbains des contraintes fortes liées au caractère saisonnier et périssable du produit. Ces contraintes le rendent souvent beaucoup plus cher que les autres aliments amylacés. Dans certains pays, il s'est développé en complément une filière originale de farine de taro, obtenue à partir de tubercules précuits, séchés et moulus (Vernier *et al.*, 2000).

En Asie, une large proportion de tubercules de taro est convertie en farine, utilisée pour l'élaboration des boissons traditionnelles et macaronis (Yen, 1974). En Inde, les tubercules sont transformés en farine après être blanchis et additionnés au bisulfate 2,5% (Nip, 1997).

En Afrique, où le fonctionnement de cette filière est resté longtemps mal connu (Onwueme, 1978), les tubercules frais ou précuits, entiers ou coupés en morceaux, sont davantage séchés au soleil ou fumés. Pour l'utilisation finale, ils sont transformés par mouture fine en farine, pouvant servir à la préparation de divers plats. Cette pratique a été identifiée au Bénin, au Nigeria occidental, au Togo et s'est approchée progressivement des autres pays de la sous-région d'Afrique centrale, moyennant les transferts de technologies appropriées. Au Tchad par exemple, la fine farine obtenue après mouture des cossettes est mélangée à du riz et du sucre pour la préparation d'une boule appelée «*fufu*» ou d'une bouillie (Njintang, 2003). Au Cameroun où la production de la farine de taro est encore peu développée, elle fait suite aux travaux préliminaires effectués à l'ENSAI de l'Université de Ngaoundéré (Njintang, 2003 ; aboubakar, 2002 ; Njintang *et al.*, 2006a ; Njintang *et al.*, 2006b ;

Njintang *et al.*, 2007a ; Njintang *et al.*, 2007b). Dans tous les cas, trois opérations fondamentales regroupées en deux procédés généraux régissent la technique de production de la farine précuite de taro. Ce sont : la cuisson, le séchage et la mouture.

II.3.1-Procédés culinaires en vue du pré-traitement du tubercule

La cuisson est l'opération par laquelle un aliment est transformé sous l'effet de la chaleur. Elle a pour objet de rendre digestible une grande variété de produits naturels (fruits, légumes, racines et tubercules, viandes et poissons, etc...). La transformation de l'aliment au niveau moléculaire ainsi opérée permet de modifier l'aspect, la couleur, l'odeur, le goût, la texture, la toxicité ou les qualités nutritives de l'aliment (Jean, 1994). Elle permet également de détruire les enzymes, les germes et les parasites susceptibles de détériorer le produit (Fellows, 1988). Le transfert de chaleur peut se faire par conduction, par convection ou par rayonnement. Les transformations subies par les aliments peuvent être de nature physique (évaporation, dilatation, dénaturation des protéines) ou chimiques (ruptures de liaisons, formation de nouvelles liaisons, caramélisation, réactions de Maillard, etc.) (Fellows, 1988). En matière de pratiques culinaires, il existe plusieurs modes de cuisson pouvant être regroupés en deux catégories :

-La cuisson humide qui peut se dérouler à la vapeur ou par ébullition. Dans ce cas, la solution est la source de chaleur ;

-La cuisson sèche où l'air assure la cuisson.

II.3.1.1 Cuisson humide

La cuisson humide consiste en l'immersion du produit dans un grand volume de solution bouillante. Le temps d'ébullition est variable. Il est court pour les traitements tels que le blanchiment et long pour la cuisson. La cuisson humide peut se faire dans l'eau ou dans une autre solution telle que les solutions acides (Soudy, 2001).

Dans le cas de cuisson dans l'eau, les aliments les plus concernés sont les légumes, les pâtes alimentaires, les céréales, légumineuses, viandes, poissons et quelques fois les racines et tubercules. Au cours du traitement, on assiste à une perte de substances solubles de l'aliment vers l'eau de cuisson. En effet, pendant l'opération, en même temps que l'eau de constitution diffuse, il se produit une diffusion des solutés propres à l'aliment tels que les vitamines, les sucres, les acides ou de la matière grasse dans le cas des produits initialement riches en graisses (Cheftel et Cheftel, 1977). On assiste également à une diffusion des composés phénoliques, substrat du brunissement enzymatique. Ce qui permet de limiter les pertes de couleur. Du fait de son action sur l'élimination de la microflore aérobie de surface, la cuisson dans l'eau a aussi un rôle anti-microbien. Ce qui justifie son utilisation dans le pré-traitement des tubercules pour la production des cossettes et farines de bonne qualité, à condition de limiter la durée de traitement pour le maintien de l'intégrité chimique et structurale de la denrée (Linsinska et Leszczynski, 1989).

La cuisson en milieu acide est un traitement couramment utilisé dans la partie septentrionale du Cameroun et au Tchad où les tubercules et plusieurs autres denrées sont généralement cuits dans une infusion de tamarin ou de citron. Cette

technique de cuisson présente l'avantage de neutraliser plus rapidement l'âcreté et l'irritation, par réduction des oxalates en présence d'acide (Souidy, 2001).

II.3.1.2-Cuisson à la vapeur

La cuisson à la vapeur d'eau est un traitement thermique couramment appliqué aux denrées alimentaires. Elle consiste ordinairement à immerger le produit pendant un temps (variable avec la nature du produit) dans de la vapeur d'eau au voisinage de 100°C (Philipon, 1984). Cette technique de cuisson concerne tous les aliments traditionnellement pochés ou cuits à l'anglaise. Mais elle s'applique aussi à la décongélation, à la remise et au maintien en température des plats cuisinés à l'avance, à la cuisson des aliments conditionnés sous vide, au blanchiment de certaines viandes et de certains légumes. De même, la peau des petits oignons est facilement enlevée grâce à une simple montée en pression dans un cuiseur à vapeur. Au regard de la nécessité de limiter les risques de brunissement des tranches avant séchage, voir du produit séché lui-même, la cuisson à la vapeur a pour objet de détruire, par la chaleur, les systèmes enzymatiques des denrées alimentaires notamment les polyphénol-oxydases (PPO). De ce fait, ce mode de cuisson permet de ralentir fortement les pertes de qualité, notamment de la couleur. En outre, cette technique de traitement favorise une diffusion modérée des sucres libres dans la vapeur d'eau. En effet, une forte teneur en sucres réducteurs provoque un brunissement des tranches au séchage suite aux réactions de Maillard. Les sucres les plus impliqués sont le glucose et le fructose (Lisinska et Leszczynski, 1989).

II.3.2-Procédés de séchage et mouture

II.3.2.1-Le séchage

Le séchage est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des denrées alimentaires. La technique consiste à éliminer par évaporation partiellement et progressivement l'eau contenue dans les produits (Okos *et al.*, 1992). L'objectif majeur du séchage est de réduire la teneur en eau du produit. Cette réduction de la teneur en eau va rendre le produit stable sur une longue période. De même, le séchage permet la réduction de la masse, du volume, minimisant ainsi que le coût de l'emballage, du stockage et du transport.

Les mécanismes de séchage sont complexes à décrire car les transferts de chaleur et de masse y sont étroitement imbriqués. L'apport d'énergie va servir à augmenter la température du produit et à évaporer l'eau. Il peut être généré par séchage avec un gaz chaud, par contact avec une surface chauffée ou par rayonnement. L'eau migre de l'intérieur vers l'extérieur du produit où elle est évacuée par convection naturelle ou forcée vers le milieu ambiant. Plusieurs théories et modèles ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage et appréhender les lois physiques qui contrôlent les transferts. La complexité des mécanismes mis en jeu et le caractère variable des produits (nature, forme, propriétés physiques) empêchent de trouver un modèle unique digne de représenter toutes les situations. Il n'est pas étonnant dans ces conditions que les courbes caractéristiques de la cinétique des séchages présentent plusieurs étapes qui, individualisent et au cours d'une même opération, sont contrôlées par différents phénomènes de transfert. Il est habituel de considérer l'existence d'une succession d'étapes au cours de l'opération de séchage. Après une période de mise en régime dite période d'initiation, on observe souvent une période de séchage à vitesse

constante, puis une ou deux périodes à allure décroissante.

- **Les cossettes de taro**

La transformation du taro en cossettes donne un produit intermédiaire stabilisé, plus facile à conserver que les tubercules frais. Avant consommation, les cossettes sont concassées puis broyées en farine. Pour la fabrication des cossettes de taro, les tubercules cuits ou non cuits sont épluchés, découpés et séchés au soleil ou en utilisant un séchoir électrique (Nip *et al.*, 1997; Njintang, 2003).

Les procédés de séchage peuvent être classés en trois catégories principales :

- le séchage sous vide : L'évaporation de l'eau est facilitée à pression réduite. La vapeur d'eau est généralement enlevée par condensation à l'état liquide ou par aspiration (éjecteur de vapeur).

- la cryo-dessiccation ou lyophilisation : La vapeur d'eau est enlevée le plus souvent par condensation à l'état de glace.

- **La vitesse de séchage**

La vitesse de séchage varie pendant le cycle de séchage et reflète les modifications qui interviennent dans la composition de l'aliment. Au début du séchage, le transfert de masse est suffisamment rapide et la vitesse de séchage dépend de la vitesse d'évaporation de l'humidité superficielle. La teneur en eau critique est atteinte lorsque le flux de liquide de l'intérieur vers la surface n'est plus suffisant pour maintenir la surface humide. L'aliment atteint un degré hygrométrique d'équilibre lorsque sa teneur en eau tombe à un niveau où il n'y a plus d'échange entre l'air et la surface.

La vitesse de chacune des phases du séchage dépend en grande partie des caractéristiques propres de l'aliment.

Une teneur élevée en eau accélère la vitesse initiale de séchage. Une concentration élevée en constituants polymériques tels que protéines, amidons (surtout gélatinisé) et en sucres amorphes augmente la proportion d'eau liée et prolonge la deuxième phase du séchage (Cheftel et Cheftel, 1977). Avec les pommes de terre par exemple, on n'observe pratiquement pas de phase de déshydratation à vitesse constante. Au contraire, les sels, les sucres cristallins, et les lipides n'absorbent que très peu d'eau : la première phase du séchage (phase à vitesse constante) peut alors prendre proportionnellement plus d'importance. Le transfert de vapeur d'eau pendant la première phase du séchage est proportionnel à l'étendue de la surface de l'aliment. Deux demi-tranches sécheront donc environ 1,33 fois plus vite qu'une tranche unique de même poids (Cheftel et Cheftel, 1977). Le fractionnement des aliments favorise encore plus vite la vitesse de séchage. Toutefois, une vitesse raisonnable de séchage ne peut être obtenue que pour une épaisseur de produit inférieure à environ 5 cm, étant donnée la sensibilité thermique des aliments et la température maximale utilisable.

Par ailleurs, les paramètres du séchage influencent de façon notable la qualité des aliments déshydratés.

- La perte par évaporation des substances aromatiques volatiles dépend non seulement de la faible masse moléculaire et de la pression de vapeur d'eau de ces substances, mais surtout de leur solubilité dans l'eau.

- La diminution de la capacité de rétention d'eau qui se manifeste à la réhydratation peut être due à une dénaturation et à une agrégation des constituants polymériques (protéines en particulier) sous l'effet de la chaleur, de l'augmentation

de la concentration en sels et de la désorption d'eau ou encore de la destruction des gels (pectines, amidons).

- La perte de valeur nutritionnelle : certaines vitamines (A et C) peuvent être partiellement détruites par oxydation au cours du séchage par l'air chaud. L'addition de sulfites ou d'acides peut provoquer une baisse de cette oxydation.

- La réduction du nombre de micro-organismes résultant des opérations de déshydratation est faible. Dans certains cas, la température de séchage favorise même la croissance de micro-organismes. L'inactivation des enzymes n'est également que partielle. Pour ces raisons, on effectue souvent un broyage ou une mouture fine des tranches séchées préalables au stockage.

II.3.2.2-La mouture

Un programme de farines instantanées n'est viable que si l'industrie meunière est capable de produire des quantités suffisantes de farines de haute qualité à partir des productions végétales locales. Les différentes céréales sont moulues de manière différente. La farine de blé est normalement obtenue à l'aide de cylindres, le taux d'extraction se situant entre 73 et 85% (Bricas *et al.*, 1997). La farine de riz destinée à l'utilisation ménagère est généralement obtenue en broyant des grains blanchis ou des brisures de riz blanchies dans des moulins à percussion ou à cylindres. Contrastant avec ces procédés relativement sophistiqués, les procédés actuels de mouture mis en oeuvre pour obtenir des farines ménagères de maïs, de sorgho ou de mil font normalement appel aux moulins à percussion. Ces appareils n'autorisent qu'un décorticage et un dégermage partiel. Les farines ainsi obtenues sont impropres à la confection de pain, de pâtes ou de biscuits. De nombreuses tentatives ont été envisagées en vue d'améliorer la technologie de mouture des mils, des sorghos et

des cossettes de tubercules séchés. Des progrès considérables ont été obtenus à l'échelon pilote, permettant l'obtention de farines de haute qualité.

La farine de cossette ou «télibo-lifin» au Bénin est obtenue par concassage puis mouture fine des cossettes d'igname séchées. Les concasseurs mécaniques utilisés au Bénin sont des broyeurs à marteaux mobiles de fabrication artisanale et donnant des morceaux de la taille maximum d'un grain de maïs. Des essais concluants de concassage dans des broyeurs industriels, identique à ceux classiquement utilisés pour la mouture des céréales, mais équipés de tamis à très gros trous ont été réalisés au Nord-Cameroun. Les morceaux de cossettes issus de ce concassage sont ensuite réduits en farine à l'aide d'un moulin à meules ou d'un broyeur à marteau équipé d'un tamis fin (Bricas *et al.*, 1997).

Les farines précuites de taro ont également été reportées au Nigeria. Dans ce cas, les cossettes ou « achicha » sont pilées dans un mortier pour obtenir des morceaux de faible taille. Ces morceaux sont par la suite réduits en farine à l'aide d'un broyeur à marteau doté d'un tamis fin. Le rendement est de 24% avec une teneur en eau de 11% (Nip, 1997).

La première caractéristique importante d'une farine est sa granulométrie, qui doit être voisine de celle de la farine de blé, de préférence inférieure à 130 microns, de façon à empêcher une séparation durant le transport et le stockage. Les farines obtenues sont bien entendu périssables.

II.4-Conservation des produits alimentaires déshydratés

La conservation des aliments déshydratés dépend de plusieurs facteurs, dont le principal est l'étalement de la consommation des produits récoltés ou transformés ponctuellement dans l'année. En plus de l'étalement s'ajoutent de nombreux facteurs socio-économiques dont l'importance pour le revenu des paysans est énorme. Lorsqu'on regarde ces phénomènes de plus près, on constate qu'entre une production localisée sur un laps de temps très court, et une consommation annuelle, une partie non négligeable (certains auteurs parlent de plus de 30%) de produits disparaît à la suite de diverses dégradations (Bradbury and Holloway, 1988) Le stockage des produits alimentaires déshydratés n'est donc pas une opération neutre.

II.4.1-Quelques techniques de préservation et susceptibilité à la dégradation

Diverses réactions de détérioration peuvent se produire au cours du stockage des aliments à l'état déshydraté : développement d'insectes, en premier lieu, contre lequel des précautions générales d'hygiène, ainsi qu'un emballage protecteur, sont nécessaires ; croissance de certains microorganismes, ensuite, qui ne peut se faire qu'à l'occasion d'une reprise d'humidité. Un emballage imperméable à la vapeur d'eau, ou la conservation dans des conditions hygrométriques convenables, sont donc nécessaires, du fait de l'hygroscopicité des aliments déshydratés (Cheftel et Cheftel, 1977). Avec les grains de céréales et les farines stockées en silos, un transfert localisé d'humidité peut entraîner le développement de moisissures. Pour empêcher de tels transferts, les silos sont souvent isolés thermiquement.

À l'état déshydraté, les réactions enzymatiques, le brunissement non enzymatique, diverses réactions d'hydrolyse, la recristallisation des sucres avec

prise en masse (cas courant de certaines poudres), ne se produit que très lentement, à condition bien entendu que le bas niveau de l' a_w atteint à la fin du séchage soit maintenu à l'aide d'un emballage approprié. Il est important également que la température d'entreposage reste inférieure à 25°C pour la conservation sous atmosphère ambiante ou proche de 4°C pour la conservation froide (Cheftel et Cheftel, 1977).

En raison de leur fragilité, les aliments déshydratés, notamment les poudres doivent être protégées aussi contre les chocs. Mais ce sont surtout les facteurs physico-chimiques et microbiologiques qui gouvernent la stabilité des aliments pendant la conservation.

II.4.2-Facteurs physicochimiques influençant la stabilité des aliments au cours du stockage

Plusieurs facteurs influencent la stabilité des aliments au cours de leur conservation, aussi bien chez les paysans qu'à l'industrie alimentaire. Ces facteurs sont généralement liés à l'aliment ou à son environnement.

II.4.2.1-Les facteurs liés à l'aliment

- **L'activité de l'eau**

L'activité de l'eau (a_w) indique la disponibilité de l'eau d'un milieu pour des réactions chimiques, biochimiques, un changement d'état ou un transfert au travers d'une membrane semi perméable.

L'activité de l'eau (a_w) correspond au rapport entre *la pression de vapeur d'eau* de l'aliment (pression de vapeur d'eau à la surface du produit) et *la pression de vapeur de l'eau pure* à la même température \varnothing° :

$$a_w = \frac{\text{Pression de l'eau dans l'aliment à } \varnothing^\circ}{\text{Pression de l'eau dans l'aliment à } \varnothing^\circ}$$

(1)

La valeur de l'activité varie entre 0 (produit sec au point que toute l'eau est liée à l'aliment, et donc sans qualité réactive) et 1 (eau pure et sans soluté, difficile à atteindre et surtout à maintenir).

L' a_w d'une solution peut être calculée par *la formule de RAOULT* :

$$a_w = n_1 / (n_1 + n_2) \quad (2)$$

n_1 est le nombre de moles du solvant (eau);

n_2 est le nombre de moles du soluté.

L'activité de l'eau d'un aliment dépend de la température. Un changement de 10°C peut causer un changement dans l' a_w de 0,03 à 0,2 dépendant du type du produit. Ainsi, la modification de la température peut avoir un effet sur la stabilité d'un produit et joue un rôle important dans la conservation d'un produit dans un emballage hermétique. La notion d'activité de l'eau revêt une importance considérable dans la détermination de la vitesse des réactions d'altération des aliments au cours de la conservation. De nombreux chercheurs ont montré l'influence de ce paramètre sur les réactions enzymatiques (Acker, 1969), les oxydations lipidiques des aliments (Quast et Karel, 1972), le brunissement non enzymatique (Eichner et Karel, 1972), etc. La plupart de ces réactions ont tendance à diminuer de vitesse en dessous d'une gamme intermédiaire d' a_w allant de 0,75 à 0,85 (Owen et Steven, 1996). En général, les farines tirées des céréales et

tubercules séchés ont une a_w très faible pour permettre un développement microbien. Toutefois, de mauvaises conditions de stockage (locaux humides, denrées exposées à fortes variations de température, et par conséquent à des condensations d'humidité, voisinage avec des produits pouvant céder de l'humidité) peuvent amener l' a_w au dessus de 0,70 et rendre possible le développement des moisissures. On observera par exemple la prolifération de *Staphylococcus aureus* et de plusieurs moisissures sur la farine de riz et des légumes secs, une fois que l' a_w est ramenée à 0,80-0,87 (Mossel, 1975).

Une humidification encore plus forte va permettre le développement de levures et des bactéries; mais il faut des circonstances exceptionnelles : par exemple, aux a_w les plus élevées, ce sont toutefois les bactéries qui prennent en général le dessus, car elles prolifèrent plus vite que les levures et les moisissures (excepté aux pH acides) (Cheftel et Cheftel, 1977). Pour une espèce donnée, l'intervalle de l' a_w permettant le développement est plus étendu lorsque les autres conditions du milieu sont optimales.

- **Teneur en eau**

La teneur en eau, ou l'humidité, d'un aliment est la quantité d'eau perdue par la substance 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 hydrogènes (eau de sorption, eau retenue par effet capillaire ou osmotique, eau des solutions, eau occluse dans des mailles cristallines et eau de cristallisation (hydrate); l'eau chimiquement liée par des liaisons covalentes est exclue. La teneur en eau d'un échantillon d'aliment s'exprime en % de la masse

d'eau rapportée, soit à la masse de matière sèche contenue dans l'échantillon, soit à la masse totale de la matière humide de l'échantillon.

Il existe une relation mais non parfaite entre la teneur en eau des aliments à une température transitoire précise et leur périssabilité au cours de la conservation. Ainsi, les processus de concentration et de déshydratation sont souvent menés dans le but de baisser la teneur en eau de l'aliment tout en augmentant simultanément la concentration des solutés et par là diminuer son caractère périssable (Owen et Steven, 1996). Ce paramètre renseigne par ailleurs sur les propriétés physiques des aliments congelés ou séchés, sur les conditions appropriées de séchage, sur les changements physiques entraînant la cristallisation, la recristallisation, la gélatinisation et la rétrogradation de l'amidon, sur d'autres réactions chimiques telles les hydrolyses et sur la sécurité microbiologique des aliments.

En pratique, la teneur en eau des graines de céréales ou des cossettes d'igname la plus favorable au stockage est de 10-15% (Cheftel et Cheftel, 1977 ; Vernier *et al.*, 2000). Une teneur en eau inférieure à 9% peut être nécessaire pour un entreposage prolongé à une température supérieure à 20°C (Cheftel et Cheftel, 1977). Vernier *et al.* (2000) rapportent qu'en général, la conservation des farines requiert une teneur en eau idéale de 13%. Au dessus de ce seuil, il peut y avoir développement des moisissures, en dessous, c'est l'oxydation des lipides qui pourrait être favorable.

Dans tous les cas, la stabilité de l'aliment et sa sécurité ne peuvent être prévisibles à partir de la seule notion de teneur en eau, car il a été observé que plusieurs types d'aliments ayant la même teneur en eau diffèrent significativement par leur degré d'altération (Owen, 1996). Cette situation est due en partie à l'état de l'eau présente dans l'aliment. En effet, les constituants chimiques présents dans

l'aliment peuvent fixer partiellement l'eau et diminuer sa capacité à se vaporiser et probablement sa réactivité chimique, augmentant parallèlement sa capacité à supporter les activités dégradatrices telles que la prolifération des moisissures et les réactions chimiques hydrolytiques (Cheftel et Cheftel, 1977). Ainsi, le fait que l'*aw* soit utilisée dans la régulation des bonnes pratiques manufacturières des aliments aux Etats-Unis atteste son utilité et sa crédibilité (Johnson et Lin, 1987).

- **La composition de l'aliment**

La composition du produit est un important facteur de stabilité car elle détermine les réactifs disponibles pour les transformations chimiques et/ou enzymatiques. Son importance du point de vue de la qualité des produits relève de la relation qui existe entre la composition du matériel brut (matière première) et celle du produit fini. Par exemple, la manière par laquelle les tubercules sont traités (blanchiment, cuisson, séchage) ou tenus après la récolte (exposition aux températures élevées qui entraînent des modifications physiologiques telles que la perte d'eau causée par la respiration et la transpiration, le durcissement et la décoloration) peut influencer la teneur en sucres et groupements aminés et par conséquent, le degré de brunissement de la farine dérivée (Njintang et Mbofung, 2003). De même, la manière par laquelle la farine est produite (par exemple la cuisson et le séchage prolongés aux températures élevées qui modifient profondément l'amidon) peut également influencer la stabilité au stockage et à la conservation notamment en modifiant la capacité d'absorption de l'eau, la résistance, la flaveur et la couleur de celle-ci. De plus, le mélange d'agents conservateurs comme le sel et le sucre cause des interactions inattendues dans l'aliment. Par

exemple, la vitesse d'oxydation peut augmenter ou diminuer selon le taux de sel présent (Owen et Steven, 1996).

La plupart des germes qui interviennent dans l'altération des aliments trouvent en général dans ceux-ci tous les nutriments nécessaires pour leur croissance (sources d'énergie, source d'azote, facteurs de croissance, sels apportant divers éléments chimiques indispensables). Glucides, lipides et protides peuvent tous servir comme sources d'énergie et les facteurs de croissance indispensables sont surtout les vitamines du groupe B, et des acides aminés que certaines espèces sont incapables de synthétiser (Cheftel et Cheftel, 1977).

- **Le pH**

Le pH est une autre variable qui influence les vitesses de plusieurs réactions chimiques et enzymatiques dans les aliments conservés. Les valeurs extrêmes de pH sont souvent requises pour inhiber la croissance microbienne ou les processus enzymatiques (Owen et Steven, 1996). De nombreuses moisissures se développent à des pH de 2,0 ou supérieurs à 9,0 ; les levures entre pH 2,5 et pH 8,5 ; rares sont en revanche les bactéries capables de proliférer à des pH inférieurs à 4,5 ou proches de 4,0 (Cheftel et Cheftel, 1977). Dans les processus enzymatiques, les conditions de pH extrêmes peuvent induire une accélération des réactions catalysées par des bases ou par des acides. D'autre part, une moindre variation de pH pourrait causer de profonds changements de la qualité de certains aliments. À titre d'illustration, les aliments pauvres en protéines tels que les légumes verts, sont moins tamponnés que la viande et le poisson, et se laissent acidifier plus facilement. A côté de ces facteurs liés aux produits, l'environnement de celui-ci n'est pas à négliger.

II.4.2.2-Les facteurs liés à l'environnement

- **La température**

La température semble être le facteur extrinsèque le plus important pendant le stockage des aliments à cause de son large spectre d'influence sur tous les types de réactions chimiques et les altérations pouvant survenir à l'aliment (Cheftel et Cheftel, 1977). L'effet de la température sur une réaction de détérioration (représentée par sa constante de vitesse K) peut être estimé à partir de l'équation d'Arrhenius ($K=K_0 x e^{-E/RT}$) (3) (Mc Weeny, 1968). À une certaine température, l'enzyme peut perdre son activité, ou la voie de la réaction peut changer ou être influencée par d'autres réactions. De même, l'état physique du système peut changer ou encore, plusieurs réactifs peuvent devenir défectueux. Ce changement d'état varie en fonction des matériaux qui constituent l'aliment. D'où la nécessité de connaître le comportement ou la rhéologie des aliments.

II.5-Propriétés rhéologiques des aliments

La rhéologie est la science qui étudie et décrit l'écoulement, la déformation et la rupture d'un corps sous l'effet d'une contrainte. Un aliment est un matériau sur lequel on peut mesurer les propriétés rhéologiques (Sherman, 1979; Prentice, 1984).

II.5.1-Intérêts des mesures rhéologiques

La mesure des propriétés rhéologiques d'un aliment permet de prévoir le comportement mécanique de l'aliment au cours des différentes étapes de transformation. Les propriétés rhéologiques sont également à l'origine des

comportements perçus lors de l'évaluation sensorielle de la texture (Sherman, 1979; Prentice, 1984).

II.5.2-Texture des aliments

La texture est l'ensemble des propriétés rhéologiques et de structures perceptibles par les mécanorécepteurs, les récepteurs 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 ou sensorielle.

II.5.3- Méthodes mécaniques de mesure des propriétés rhéologiques des aliments

Pour caractériser le comportement rhéologique des aliments solides, on soumet généralement ceux-ci à une contrainte (force par unité de surface) et l'on enregistre la manière dont ils se déforment. Les profils obtenus permettent de caractériser le comportement rhéologique de l'aliment en fonction des conditions expérimentales. Les principales techniques mécaniques de mesure des propriétés rhéologiques des aliments sont : la pénétrométrie, la compression, la flexion, l'étirement, et le cisaillement. Les machines les plus utilisées pour les réaliser sont : General Food Texturometer (General Food); Machine Universelle d'Essais (INSTRON); Food Technology Corporation Texture Press (Food Technology Corporation) et Ottawa Texture Measuring System (Ottawa) (Sherman, 1979; Prentice, 1984).

II.5.3.1-Test de pénétration

La pénétration est la résistance à l'enfoncement d'une matière par un corps pénétrant. Le test de pénétration est certainement le plus ancien test de mesure de la texture. Il consiste à faire pénétrer dans l'aliment une sonde ou une aiguille et à mesurer la force nécessaire pour atteindre une certaine profondeur. Ce test est très utilisé pour évaluer les propriétés mécaniques des fruits et légumes (Sherman, 1979; Prentice, 1984). Le graphe enregistré présente la force (exprimé en N) nécessaire pour atteindre une certaine profondeur en fonction du temps.

II.5.3.2-Test de compression

Le test de compression consiste à mesurer la résistance que présente un aliment à la compression qui lui est appliquée. Il permet également de déterminer le module d'élasticité qui correspond au rapport de la contrainte appliquée à la déformation de l'échantillon. La compression peut s'effectuer entre deux plaques, par l'air comprimé ou par une bille (Sherman, 1979; Prentice, 1984).

II.5.3.3-Analyse instrumentale du profil de texture

L'analyse instrumentale du profil de texture d'un aliment permet d'obtenir plusieurs paramètres texturaux ayant une corrélation avec certains paramètres d'appréciations sensorielles. 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) ou de la morsure des molaires ou encore du sens du toucher (compression).

II.6. État des connaissances sur la production et l'utilisation de la farine de taro

Les travaux de recherche, menés entre 1999 et aujourd'hui, ont été développés dans une thématique liée à la mise au point d'une poudre alimentaire pour la préparation d'un aliment local. Au stade actuel, une denrée alimentaire (le taro, *Colocasia esculenta*) a été visée pour la préparation d'un aliment de grande consommation au Cameroun, le achu (tubercule de taro cuit et pilé). Ces travaux ont permis de développer un procédé de production de farine dont le produit est non seulement bien accepté par les consommateurs, mais aussi a des caractéristiques qui ne sont pas significativement différentes de celles des aliments faits par les ménagères. Sur un plan plus fondamental, ces travaux ont permis de comprendre les mécanismes de brunissement et d'irritation du tubercule de taro, la fonctionnalité des farines notamment en réhydratation, les comportements viscoélastiques et l'acceptabilité du achu, ainsi que leur relation avec les facteurs comme la taille particulaire, la température de séchage des tubercules et des graines, la quantité d'eau à la réhydratation, le mode de réhydratation, et le comportement des consommateurs.

En somme, ces travaux se sont orientés vers le développement et l'étude des propriétés physicochimiques de la poudre de taro et de niébé et du produit alimentaire (achu) élaboré à partir de cette poudre. L'objectif principal de ces travaux a été d'étudier l'influence des procédés sur les propriétés physicochimiques, biochimiques et nutritionnelles de la poudre, et de relier ces grandeurs aux propriétés d'usage recherchées. Plus spécifiquement, les sujets de recherche suivants ont été menés:

II.6.1. Étude des caractéristiques du achu et des contraintes liées à la production et l'utilisation de la farine de taro pour sa préparation

II.6.1.1. Etude du brunissement

Ce travail mené sur 6 écotypes de taro en provenance de 4 localités du Cameroun et du Tchad a permis de relever que le degré et le type de brunissement dans le taro dépend de l'écotype utilisé avec en général, une implication forte des proanthocyanidines. Ainsi, il a été montré que les écotypes Kwanfre, country Ngaoundéré et sosso Tchad présentent les brunissements les plus élevés alors que les écotypes Ibo Ngaoundéré, Ibo Ekona et country Ngaoundéré ont les brunissements les plus faibles. L'écotype Kwanfre qui a le taux de brunissement le plus élevé a présenté principalement un brunissement de type enzymatique qui s'est observé pendant le pelage et accentué pendant le séchage des tranches; l'écotype Sosso du Tchad a présenté un brunissement de type non enzymatique (probablement à médiation phénolique) qui s'est observé après la cuisson du tubercule dans sa peau, pelage et pilage. Les autres types de brunissement (réaction de type maillard) ont été observés pendant la cuisson des farines. L'analyse biochimique a montré que l'écotype Kwanfré présente le taux de phénols totaux le plus élevé (70,3 mg d'acide gallique/100g) alors que l'écotype Sosso du Tchad présente les taux d'amines libres et de sucres réducteurs les plus élevés. Une corrélation linéaire significative ($r=0.86$; $p<0,05$) a été observée entre la teneur en phénols totaux et le degré de brunissement de la farine pendant la reconstitution. Par ailleurs, une corrélation significative a été observée entre les groupements amines et le degré de brunissement. D'autre part, il a été observé une corrélation linéaire significative ($r=0,91$; $p<0,05$) entre le degré de brunissement et la teneur en proanthocyanidine. Quel que soit les cas, il est apparu de ces travaux que le

brunissement est très faible dans les écotypes Country Ekona, ibo coco Ngaoundéré et ibo Coco Ekona. Ainsi, il apparaît que le brunissement de la farine de taro résulte de multiples mécanismes qui sont d'ordre enzymatiques et non enzymatiques. Ces brunissements surviennent à plusieurs niveaux :

- pendant le pelage et tranchage, et observé dans l'écotype kwanfré, le brunissement est essentiellement d'ordre enzymatique; pendant le séchage des tranches non cuites, le brunissement enzymatique continue, mais est renforcé par la réaction de Maillard entre les groupes amines libres et les sucres réducteurs. Ce dernier type a été observé de façon plus ou moins intense dans les différents écotypes de taro. Pendant le séchage, l'oxydation à médiation non enzymatique des composés phénoliques suivie de leur polymérisation pourrait également être impliquée dans le brunissement. Bien évidemment, le brunissement enzymatique serait également incriminé dans le changement de couleur des tranches ;

- Pendant le pilage des tubercules cuits, on a observé un brunissement intense, particulièrement dans la variété Sosso Tchad. Ce type de brunissement souvent observé dans la pomme de terre résulterait de la réaction entre les composés phénoliques et les ions métalliques comme le Fe. D'autre part, l'oxydation et la polymérisation des phénols une fois en contact avec l'oxygène pourront également être envisagées.

Le brunissement constitue un problème à l'utilisation de la farine de taro dans ce sens que la pâte de taro doit avoir une couleur d'un blanc à beige. À cet effet, il a été montré une corrélation significative négative entre le degré de brunissement et l'acceptabilité de la pâte. C'est à ce titre que l'écotype de taro Ibo coco qui présente un brunissement faible a été sélectionné comme matière première pour la production de la farine de taro. Toutefois, des études sont actuellement envisagées afin de

comprendre les mécanismes de brunissement dans les variétés de taro. Cette étude est d'une importance capitale dans ce sens que l'écotype de taro Sosso cultivé au Tchad est sujet à des brunissements qu'il est important de maîtriser et de résoudre afin de mettre à la disposition des populations tchadiennes une farine acceptée. Une enquête menée en 2000 au Tchad a en effet montré que le Tchad est un grand producteur de taro, et que dans toute la partie sud du Tchad, le taro aurait supplanté la culture de coton. En outre, le taro est transformé par les populations locales en multiples produits que sont les cossettes, la farine qui sert à la préparation des bouillies et de la boule. Cependant, ces aliments de couleur sombre sont très peu acceptés. C'est à ce titre que la farine de taro développée sur l'écotype Ibo coco par notre laboratoire et soumise à la population tchadienne a été acceptée à 100%.

II.6.2. Étude de l'irritation

L'irritation est un des problèmes majeurs associés à l'utilisation de la farine de taro. Selon les données de la littérature (Nip, 1997), l'irritation qui résulte du toucher ou de la consommation du tubercule de taro frais serait due à la présence de cristaux d'oxalate de calcium. Les cristaux d'oxalate de calcium responsables de l'irritation sont sous la forme d'aiguilles appelées raphides. Ces cristaux sont empaquetés dans des cellules appelées idioblastes. Il a également été montré que les cristaux d'oxalate existent sous forme de rosettes. Les travaux de Njintang (2003) ont confirmé ces résultats de la littérature et ont montré d'avantage que les raphides peuvent être éjectés d'une ou des extrémités des idioblastes lorsqu'une simple pression est exercée sur cette cellule. Ces idioblastes dits défensifs sont différents des idioblastes dits non défensifs qui n'éjectent pas de raphides. D'autre part, la cuisson inhibe l'éjection des raphides, mais le pilage peut détruire l'idioblaste et

libérer les raphides. L'analyse infra rouge a confirmé la nature carbonatée des oxalates, avec la présence de structure aminée suggérant la présence d'amine. Ceci semble confirmer les analyses d'autres auteurs qui ont indiquées la présence de protéase dans les idioblastes défensives, et qui serait responsable de l'éjection. Le séchage et le broyage des tranches entraînent une libération des raphides dans la pâte, ce qui pourrait avoir des conséquences sur la texture. À l'opposé, une cuisson préalable des tubercules avant séchage et broyage limite l'éjection des raphides et garantie probablement la bonne texture de la pâte. À côté des cristaux d'oxalate de calcium qui sont insolubles, l'on rencontre également dans le taro l'oxalate sous forme soluble. Les taux élevés d'oxalate de calcium solubles sont susceptibles d'augmenter chez le consommateur l'apport exogène d'oxalate et par conséquent, la formation de calculs urinaires.

Une étude spectroscopique infra rouge des oxalates de calcium en rosette, des raphides isolées des idioblastes défensifs et non défensifs est envisageable. De même, une étude de la variation d'oxalate soluble et insoluble pendant les processus de préparation de la pâte est envisagée.

II.6.3. Contrainte texturale et élaboration de la stratégie de production de la poudre de taro

La texture du achu représente un des paramètres déterminants pour son acceptabilité. Une analyse microscopique du achu a montré que le tubercule de taro est un ensemble de cellules contenant des granules d'amidon entre lesquelles sont dispersées les protéines. Les idioblastes apparaissent dans l'espace intercellulaire. Lorsque le tubercule est cuit, les granules absorbent de l'eau et remplissent toute la

cellule. Cependant, le poids du tubercule est relativement stable pendant la cuisson et toute augmentation ne dépasse pas les 3%. Lorsque le tubercule cuit est pilé, les cellules contenant l'amidon gélatinisé sont séparées, on obtient alors une sorte de particules cellulaires mouillées. En effet, la cuisson dans l'eau fragilise le ciment intercellulaire et facilite la séparation des cellules. C'est cette propriété qui a été utilisée par le Institute of Food Research (IFR, Norwich, UK) pour développer la technique de Vortex Induced cell separation (VICS) qui détermine le degré de séparation cellulaire proportionnel au temps de cuisson. Lorsque le pilage est prolongé, certaines cellules libèrent leur contenu de granule d'amidon, les amidons sont par la suite détruits et leur contenu en amylose et amylopectine libéré. Le achu en fin de pilage est alors un gel d'amylose et d'amylopectine dans lequel sont dispersées les cellules contenant les cellules d'amidon gélatinisé. L'analyse rhéologique a montré que le achu décrit un comportement viscoélastique. Lorsque la farine est utilisée pour préparer la pâte par cuisson dans l'eau bouillante, le gel qui en résulte est constitué de cellules entières détruites. Dans ce cas, le achu est un gel d'amylose et d'amylopectine contenant des fragments de parois cellulaires. La conservation de l'intégrité de la cellule dans le cas de la cuisson du tubercule est liée à la contrainte physique qui s'impose dans le tubercule. En effet, dans le tubercule, les amidons ne peuvent gonfler et avoir une taille au-delà de celle de la cellule, contrairement aux granules exposées dans la farine qui gonflent et éclatent pendant la cuisson. Sur le plan physicochimique, les pâtes résultant des deux modes de cuisson montrent des différences significatives. C'est à ce titre que les farines obtenues par séchage et broyage de ces pâtes ont montré une capacité d'absorption d'eau, une densité massique, un indice de solubilité et une indice valeur bleue significativement plus élevée pour la pâte faite à partir de la farine comparée à la

pâte obtenue par la méthode traditionnelle. Ces observations ont permis de tirer quelques conclusions quant à la production de la farine de taro pour la préparation du achu :

- Le tubercule peut être tranché et séché et les tranches sèches peuvent alors être cuites et pilées (procédé de séchage avant cuisson). Dans ces conditions, la gélatinisation des amidons dans les tranches pourrait être similaire à celle observée dans le tubercule. D'autre part, les tranches peuvent être cuites avant d'être séchées (procédé de cuisson avant séchage).

- Le tubercule peut être cuit entièrement, tranché, séché et broyé. La farine précuite qui en résulte est simplement reconstituée dans l'eau bouillante pour obtenir le achu.

Ces études ont été menées dans le but de définir le procédé le mieux adapté à la production de la farine de taro, matière première pour la préparation du achu.

II.6.4. Étude de l'utilisation des tranches de taro pour la préparation du achu

II.6.4.1. Procédé de cuisson des tranches avant séchage

La cuisson des tranches a été suivie par la détermination du degré de gélatinisation par la méthode de l'indice valeur bleue. Selon les courbes de gélatinisation obtenues, il apparaît que le degré de gélatinisation de l'amidon des tranches de taro varie avec le temps suivant un modèle de cinétique d'ordre 1. La constante de vitesse de gélatinisation augmente avec la température de cuisson et baisse avec l'épaisseur de la tranche. De même, cette constante varie avec la température selon le modèle mathématique d'arrhénius. C'est à ce titre que l'énergie d'activation de la gélatinisation des tranches de taro a été déterminée et les résultats

obtenus ont montré qu'elle augmente avec l'épaisseur de la tranche. Ceci est évident, d'autant plus que les tranches de grande épaisseur ont besoin d'énergie plus élevée pour atteindre les granules d'amidon au cœur de la tranche. Il a par ailleurs été observé une corrélation linéaire parfaite entre l'épaisseur de la tranche et l'énergie d'activation. Si la gélatinisation de l'amidon représente la principale modification que l'on observe pendant la cuisson des produits amylicés, il n'en demeure pas moins que d'autres modifications notamment le transfert de matières des tranches vers l'eau de cuisson se déroule et sont très susceptibles d'affecter la qualité des farines. C'est à ce titre que la variation de la teneur en sucres réducteurs et composés phénoliques, deux composés impliqués dans le brunissement de la pâte de taro a été étudiée. Il en est ressorti que la diffusion des composés phénoliques et des sucres réducteurs suit une cinétique d'ordre 1. Bien évidemment, la constante de diffusion augmente avec la température de cuisson et baisse avec l'épaisseur des tranches. Dans le cas des composés phénoliques, on a observé que la teneur initiale en composés phénoliques générée par le model ne varie pas significativement, ni avec la température de cuisson, ni avec l'épaisseur des tranches. À l'opposé, la teneur initiale en sucres réducteurs générée par le model de diffusion utilisé a été élevée à la température 90°C pour les tranches d'épaisseur 0,5cm. Ceci suggère pour ces tranches, une production des sucres réducteurs pendant la cuisson et par conséquent, une constante de diffusion anormalement élevée.

Après la cuisson, les tranches doivent être séchées avant le broyage pour obtenir la farine. Du fait que la gélatinisation induite par la cuisson est susceptible d'influencer le séchage et les caractéristiques de la farine, une étude de l'influence du degré de gélatinisation a été menée. La cinétique de séchage des tranches ainsi

obtenue a été effectuée dans un séchoir à convection. La cinétique de séchage a été suivie par la mesure de la perte de masse et le calcul du coefficient de transfert d'eau. Il est apparu que le séchage des tranches de taro suit un modèle de cinétique présentant 2 phases de vitesse décroissante. La rupture entre les deux phases se situe à la teneur en eau 1-2 g/100g et le temps pour atteindre cette zone de rupture varie avec le degré de gélatinisation et la température de séchage. Il a été observé globalement une réduction de la constante de vitesse de séchage avec le degré de gélatinisation quelque soit la phase de séchage utilisée. Toutefois, avec l'augmentation du degré de gélatinisation, on a observé une diminution de la constante pour les gélatinisations < 45%, et une augmentation de la constante pour les gélatinisations >45%. Pour ce qui est de l'effet de la température de séchage, on a observé une augmentation de la constante avec la température, selon le modèle d'arrhénius. L'énergie d'activation, les valeurs Z et Q_{10} calculées n'ont pas montré de relation linéaire avec le degré de gélatinisation. Ceci suggère que la cuisson des tranches dans l'eau aurait facilité la dissolution dans l'eau de cuisson de l'amylose à la suite de la gélatinisation. D'autre part, l'indice valeur bleue des farines qui en ont résulté a permis de mettre en évidence la formation d'amidon résistant dans les farines gélatinisées comparativement aux farines crues. Enfin, cette étude a révélé un effet de la gélatinisation sur le brunissement alors qu'aucun effet significatif de la température n'a été observé sur la couleur des farines.

Il a été observé qu'une reconstitution de la farine gélatinisée donnait une pâte brune et dure. L'essai de réhydratation des tranches précuites suivi du pilage n'a pas permis d'obtenir une pâte homogène du fait de la forte dureté des tranches. L'objectif initial à travers ce procédé qui était celui de réduire le brunissement en facilitant la diffusion des initiateurs comme les sucres réducteurs et les composés phénoliques

n'a pas été atteint, d'autant plus qu'en plus de la perte de molécules comme l'amylose et les mucilages dans l'eau de cuisson, le brunissement a augmenté avec le degré de gélatinisation. Selon Nip (1997), les mucilages de taro, composés très solubles dans l'eau, joueraient un rôle important dans la texture de la pâte.

II.6.4.2. Procédé de séchage des tranches avant cuisson

Dans cette étude, les tranches ont été utilisées pour préparer la boule qui a été comparée à la boule faite par la méthode traditionnelle. Il est ressorti des résultats que le brunissement représente un problème majeur d'utilisation des tranches. La pâte résultant des tranches a montré une texture fibreuse caractérisée par une capacité d'absorption d'eau, un indice valeur bleu et une densité de farine plus faible. Ce résultat a montré que le séchage avant cuisson induit également une perte de l'aptitude à absorber de l'eau, et donc à gélatiniser. À ce titre, une acceptabilité faible de la pâte a été obtenue pour la pâte faite à partir des tranches.

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

MATERIEL ET METHODES

III.1-Propriétés physicochimiques, thermiques et microstructure des poudres alimentaires de six variétés de taro

III.1.1-Echantillonnage et production des poudres alimentaires (farines et amidons)

Les farines et les amidons de taro ont été produits suivant la figure 6. Six variétés de tubercules de taro codées (WCN=White Country Coco Ngaoundéré, WCE= White Country Coco Ekona, RIE=Red Ibo Coco Ekona, RIN=Red Ibo coco Ngaoundéré, KW1=Kwanfré 1, KW2=Kwanfré 2) ont été utilisées pour l'étude. Ils ont été récoltés entre 8 et 9 mois de maturité dans un champ paysan à proximité de l'Université de Ngaoundéré. Les tubercules ont été lavés à l'eau du robinet, épluchés et calibrés pour enlever les échantillons défectueux. Les tubercules ont été découpés en tranches de 0,3 cm en utilisant un couteau de cuisine inox (Stainless steel) et séchés dans un séchoir électrique à convection air forcé de type CK-2000 à 50°C ± 2°C. Les tranches sèches ont été d'abord broyées par un moulin à marteau (polymix de Culatti, France) doté d'un tamis de 500µm. Les farines ont ensuite été divisées en deux lots : un premier lot a été conditionné dans des sachets en polyéthylène et maintenue dans un réfrigérateur à 4°C avant l'utilisation tandis que le deuxième lot a été utilisé pour l'isolement de l'amidon.

III.1.2-Extraction de l'amidon de taro

L'extraction des amidons a été effectuée par la méthode de Singh *et al.* (1989). Pour ce faire, la farine de taro (100g) a été trempée dans de l'eau (3L) à 35°C pendant 12h. La pâte obtenue a été homogénéisée pendant 30 min à l'aide d'un mixeur

commercial (moulinex modèle, France). La suspension obtenue a été filtrée à travers un tamis de 150 µm de maille et le surnageant a été laissé au repos pendant 12h pour décantation. L'amidon brut a été alors collecté après deux rinçages. Le culot a été séché pendant 48h à 50°C et l'amidon obtenu a été soigneusement conditionné dans des sachets en polyéthylène secs et stockés à 4°C jusqu'à utilisation. Le rendement de l'extraction de l'amidon a été évalué par la méthode gravimétrique de Singh *et al.* (1989).

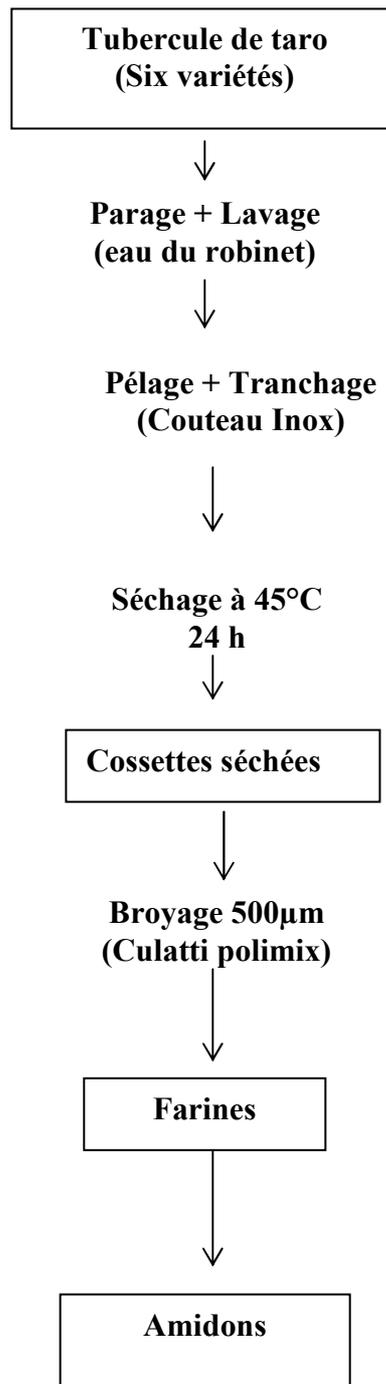


Figure 6: Schéma de production des farines et amidons de taro.

III.1.3-Analyse chimique et de quelques minéraux

III.1.3.1-Détermination de la teneur en eau

La détermination de la teneur en eau a été effectuée par la méthode AOAC (1990) basée sur la mesure de la perte en masse des échantillons après étuvage à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à élimination complète de l'eau libre et des matières volatiles. Le creuset séché à l'étuve a été refroidi dans un dessiccateur et taré (M_0). Une masse d'échantillon de 1g a été introduite dans le creuset (M_1) et séchée à l'étuve à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24h jusqu'à obtention d'une masse constante. L'échantillon a été refroidi dans le dessiccateur et pesé (M_2).

La teneur en eau a été calculée suivant la relation :

$$\text{Taux d'humidité (TH)} = ((M_1 - M_2) / (M_1 - M_0)) \times 100$$

M_0 : poids du creuset à vide

M_1 : poids du creuset contenant le matériel à sécher

M_2 : Poids de l'ensemble creuset et produit après étuvage

III.1.3.2-Détermination de la teneur en lipides totaux

La teneur en lipides totaux a été déterminée par la méthode utilisant l'extraction à chaud au soxhlet décrite par Bourely (1982).

- **Mode opératoire**

Les farines et les amidons séchés à l'étuve à 105°C ont été introduits dans les sachets de papier filtre numérotés, séchés et tarés. L'extraction de l'huile est faite au soxhlet avec l'hexane pendant une durée de 12h. La teneur en lipides totaux est calculée par rapport à la matière sèche par la différence de poids du sachet avant et après l'extraction complète. La teneur en lipides pour 100g d'échantillon sec est donnée par la formule suivante :

$$\text{Lipides (\%)} = [(P_1 - P)/(P_1 - P_2)] \times 100. \quad (4)$$

D'où P_1 est le poids du sachet plein renfermant la prise d'essai avant extraction;

P est le poids du sachet plein renfermant la prise d'essai après extraction d'huile;

P_1 est le poids du sachet de papier filtre vide ;

M_2 est la masse en gramme de la capsule contenant la prise d'essai après étuvage.

III.1.3.3-Détermination de la teneur en cendres

Pour déterminer la teneur en cendres des farines et des amidons de taro, la matière sèche des farines est incinérée dans un four à moufle à 550°C jusqu'à obtention des cendres blanches après 48h (Wolff, 1972). Le taux de cendres est exprimé par rapport à 100g de produit sec par la relation :

$$\text{Cendres (\%)} = [(M_3 - M_1) / (M_2 - M_1)] \times 100 \quad (5)$$

D'où M_1 est la masse en gramme de la capsule vide;

M_2 est la masse de la capsule + masse de la prise d'essai séchée à 105 °C à l'étuve;

M_3 est la masse de la capsule contenant le résidu après incinération.

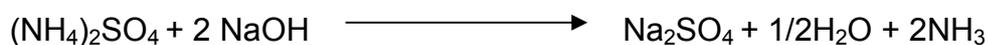
III.1.3.4-Dosage des protéines totales

Les échantillons secs de farines et d'amidons sont minéralisés dans des matras de Kjeldahl (AFNOR, 1984) et l'azote est dosé à l'aide d'un appareil semi-automatique GEHARDT (Paris, France). La teneur en protéines brutes est obtenue en multipliant la teneur en azote par le facteur conventionnel de 6,25 (FAO / WHO, 1978).

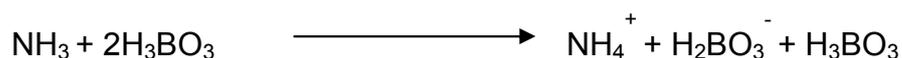
- **Mode opératoire**

Un gramme d'échantillon est introduit dans un matras de Kjeldahl, puis 2mL d'acide sulfurique concentré et une pincée de catalyseur de minéralisation ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaSO}_4 + \text{Se}$) y sont ajoutés. La minéralisation se fait sur une rampe électrique à 400°C . Le liquide de minéralisation devient incolore au bout de 2h.

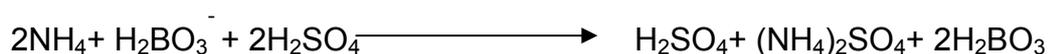
Dans l'appareil à distiller semi-automatique Gerhardt (Vapodest 4S, Paris France), le contenu du matras de Kjeldahl est additionné de lessive de soude (soude 10 N). Il se produit la réaction suivante :



L'ammoniac dégagé 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)), vert en milieu alcalin et rose en milieu acide. Il se forme le borate d'ammonium selon la réaction :



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



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 déduit de la formule :

$$\% N = [(V_1 - V_0) \times 0,14 \times 10^{-3} \times 100] \times 100 / m. \quad (6)$$

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

V_0 = volume de H_2SO_4 utilisé pour la titration de l'essai à blanc;

m = masse de l'échantillon.

La teneur en protéines brutes (totales) est calculée en utilisant le facteur de conversion de l'azote en protéines qui est de 6,25 (FAO / WHO, 1978).

Trois essais sont réalisés sur un même échantillon.

III.1.3.5-Dosage des sucres disponibles et solubles

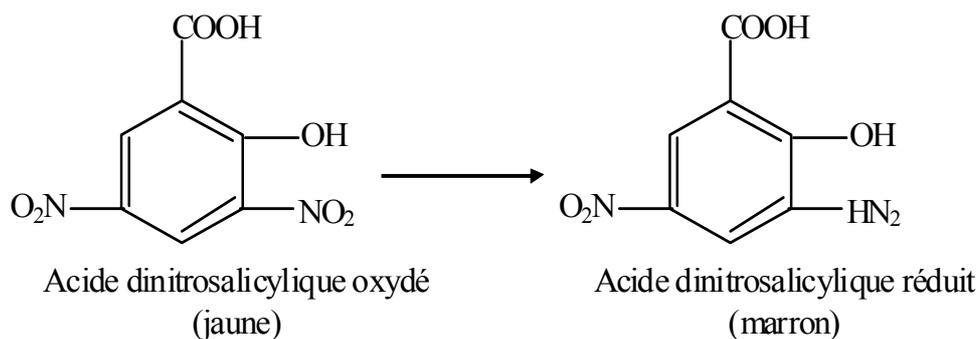
Les sucres disponibles et les sucres solubles des farines et amidons de taro ont été extraits après hydrolyse sulfurique de la matière sèche délipidée, et dosés par la méthode colorimétrique utilisant le DNS (Acide 3, 5 dinitrosalicylique) selon Miller, Blum, Glennon & Burton (1960) améliorée par Bailey *et al.* (1992) et par Njintang *et al.* (2003).

- **Principe du dosage des sucres par le DNS**

Les sucres solubles ont été extraits dans de l'eau distillée et dosés par la méthode de Fisher et Stein (1961), utilisant l'acide 3, 5 dinitrosalicylique (DNS).

Principe

L'acide 3, 5 dinitrosalicylique (DNS) forme par réduction en milieu alcalin un complexe marron lorsqu'il est chauffé en présence des sucres solubles. L'intensité de la coloration développée à 540nm est utilisée pour quantifier les sucres présents.



- **Extraction et dosage**

Une prise d'essai de 100mg de farine a été dispersée dans 20mL d'eau distillée et agitée vigoureusement pendant 30min à température ambiante. Après centrifugation (3000 trs/min), le surnageant a été récupéré dans une fiole jaugée de 50mL. Le volume a été ajusté à 50mL avec de l'eau distillée. L'étalonnage a été préparé à partir du glucose.

Les résultats ont été exprimés en gramme de glucose pour 100g de produits secs (g/100g M.S) à partir de l'équation de régression établie avec la gamme de glucose de 0 à 2 mg/mL.

III.1.3.6-Dosage des Minéraux

La teneur en minéraux (Ca, Na, Mg, K, Mn, Fe) a été déterminée par spectroscopie d'absorption atomique après solubilisation des cendres de 1g de farine en milieu acide. Les cendres sont traitées avec 10mL d'acide chlorhydrique puis complétées avec 100 mL d'eau. L'appareil utilisé est un spectromètre d'absorption atomique AAS 1100 (Perkin-Elmer, USA) alimenté par une flamme air-acétylène. Pour l'extraction du Ca et du Mg, on ajoute 10mL de chlorure de lanthane (18g d'oxyde de lanthane + 250 mL d'HCl concentré dans 100 mL d'eau distillée) avant de compléter la fiole jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

III.1.4- Analyse thermique Différentielle et détermination de la teneur en amylose

La teneur en amylose a été analysée selon la méthode utilisant l'analyse thermique différentielle décrite par Mestre *et al.* (1996). L'analyse thermique Différentielle (ATD ou DSC : « Differential Scanning Calorimetry ») permet de déterminer les variations d'énergie liées à un changement d'état. L'analyse est dite « différentielle » car le flux énergétique mesuré au niveau de l'échantillon est soustrait à celui d'un point de référence constitué par une capsule vide. Un balayage de température permet donc 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.

Les thermogrammes de DSC des amidons et les farines de taro ont été enregistrés sur un Perkin-Elmer Pyris1 modèle (Perkin-Elmer Corp Norwalk, USA) avec une vitesse de chauffage de 5°C/min et un balayage de température de 25-98°C. Les amidons, les farines ou de l'amylose ont été dispersés dans de l'eau distillée (1:3, w/v) dans une capsule d'aluminium hermétiquement scellé. L'appareil a été calibré pour la température et la mesure d'enthalpie avec de l'indium, et une capsule vide a été utilisée comme référence. Le logiciel *Pyris 1* a été employé pour calculer la capacité de chaleur et pour intégrer les pics. Les températures de début et de fin de gélatinisation ont été déterminées par l'intersection des tangentes adaptées aux flancs principaux et secondaires du pic avec la ligne de base.

Les analyses ont été réalisées avec un colorimètre *différentiel Perkin-Elmer, modèle Pyris 1 (Perkin-Elmer Corp., Norwalk, USA)*, commandé par le logiciel *Pyris 1*. Le calibrage a été effectué avec l'indium ($\Delta H = 28,43 \text{ J/g}$).

Une masse d'échantillon d'environ 3mg est placée dans une capsule en aluminium de 50 μ L, puis mélangée à 9mL d'eau distillée. L'ensemble est scellé et maintenue à la température ambiante à 25°C pendant 15min, pour permettre une bonne homogénéisation. La capsule ainsi scellée est placée et maintenue pendant 15 minutes, puis chauffée jusqu'à 95°C à une vitesse de 5°C/min.

Les enthalpies de fusion (ΔH) ont été calculées par intégration de l'aire totale du pic de fusion.

La teneur en amylose a été calculée en utilisant l'équation :

$$\text{Amylose(\%)} = 100 \times \frac{A \times \Delta H_1}{\Delta H_2 \times S} \quad (6)$$

où A et S sont respectivement les poids de l'amylose et de l'échantillon standard utilisés dans l'expérience, ΔH_1 et ΔH_2 leur changement respectif d'enthalpie.

III.1.5-Détermination des paramètres de couleur des poudres alimentaires

La blancheur d'une farine est une caractéristique essentielle de sa qualité. Pour cette raison, les mesures de la couleur de l'amidon ont été effectuées en utilisant un Chromamètre CR210 (Minolta, France). La couleur est un attribut perceptif, subjectif, élaboré dans notre système visuel à partir de la lumière renvoyée par les objets et par leur environnement. La colorimétrie consiste en un ensemble de données et de méthodes permettant de quantifier la couleur objective. L'espace

chromatique CIE L^* , a^* , b^* , défini par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) est un espace à trois dimensions approximativement uniforme du point de vue des écarts chromatiques (Robertson, 1977). Les trois coordonnées de CIELAB sont des correspondants approximatifs de la luminance (L^*), de la balance «rouge-vert» (a^*) et de la balance «jaune-bleu» (b^*) (Figure 7).

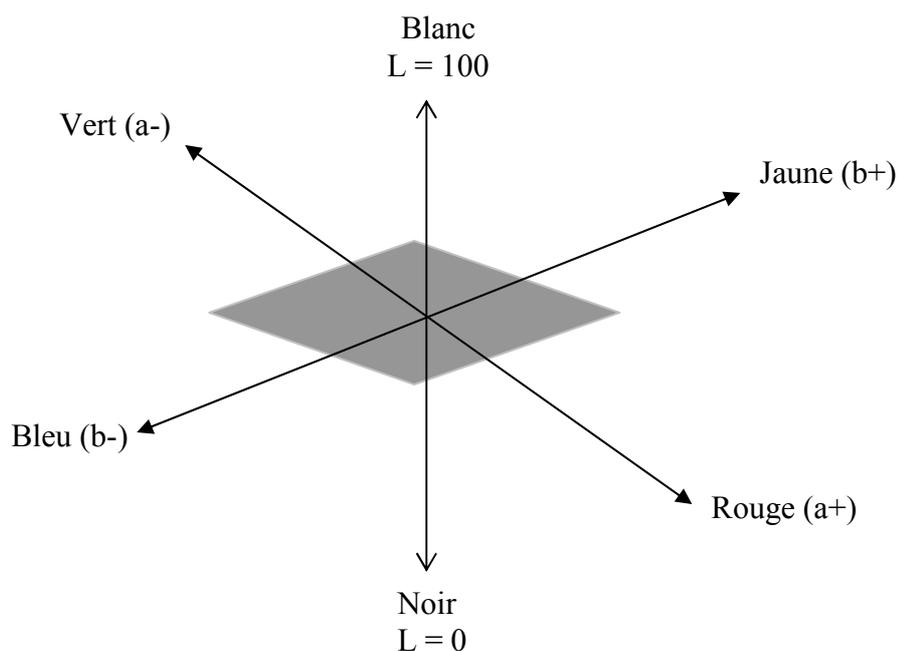


Figure 7: Espace chromatique CIE $L^*a^*b^*$

III.1.6-Analyse granulométrique des poudres alimentaires (farines et amidons) de taro et propriétés d'empattage

La taille des particules a une influence sur ses propriétés d'hydratations et thermiques. Il est donc important de bien connaître les caractéristiques granulométriques des farines et amidons pour comprendre et maîtriser tous leurs paramètres d'hydratation et de gélatinisation.

- **Principe**

La taille moyenne et la distribution granulométrique des particules ont été déterminées à l'aide d'un granulomètre laser. La granulométrie laser repose sur la diffusion statique de la lumière. D'après la théorie de Fraunhofer, une telle diffusion est observée lorsque le diamètre des particules est cinq fois supérieur à la longueur d'onde du faisceau incident. La quantité de lumière diffusée et l'importance de l'angle de déviation dépendent de la taille des particules. Ainsi, les grosses particules dévient des quantités importantes de lumière aux petits angles, alors que les petites particules dévient les quantités infimes de lumière aux grands angles. En assimilant les particules à des sphères lisses, l'angle de diffusion θ est relié aux diamètres des particules d par les équations proposées par la théorie de Mie. L'intensité des photons détectés aux différentes tranches d'angle de diffusion permet de déduire le nombre de particules correspondant à chaque classe de taille.

- **Mode opératoire**

La mesure de la distribution de taille des farines et des amidons a été réalisée avec un granulomètre de type Mastersizer modèle S (*instruments de Malvern, Orsay*). Cet appareil permet de mesurer le pourcentage de particules de farine et d'amidon distribuées dans les classes de grandeur choisies pour la mesure de poudre sèche/distribution de particules comme décrit par Njintang *et al.* (2006a). L'utilisation de la lentille 300RF permet de mesurer des tailles comprises entre 0,05 et 900µm. Le faisceau laser, issu d'un tube à gaz Hélium Néon, a une puissance de 5mW et une longueur d'onde de 632,8nm. Les données brutes provenant de l'unité optique sont traitées par le logiciel *Sizer Sv2.17*(*Malvern Instrument, Orsay*) afin de calculer la taille des particules. Cinq mesures par dispersion sont réalisées à une minute d'intervalle et deux dispersions sont utilisées par échantillon.

III.1.7-Détermination de l'isotherme de sorption et de désorption des poudres alimentaires de taro

Les isothermes de sorption-désorption 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 et de désorption de l'amidon de taro ont été déterminées à 20°C selon la méthode gravimétrique statique de Wolf *et al.* (1985). Les isothermes de désorption ont été déterminées sur des échantillons approximativement hydratés jusqu'à 30% à température ambiante. Des échantillons de $1 \pm 0,02$ g ont été pesés dans les bocal pesés au préalable. L'ensemble a été mis dans des hygrostats avec sept solutions de sel saturées (LiCl, MgCl₂, K₂CO₃, NaBr, NaCl, KCl) employées pour obtenir les environnements constants d'activités de l'eau entre 0,1 et 0,9 (Bell et Labuza, 2000).

Tous les sels utilisés étaient dans la gamme choisie. Aux activités de l'eau élevée ($a_w > 0,70$), l'azide de sodium ($0,2\text{g.L}^{-1}$) a été augmentée dans les hygrostats pour empêcher la détérioration microbienne des farines et des amidons. Les hygrostats ont été maintenus dans un milieu thermostaté à $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Les échantillons ont été pesés tous les trois jours. L'équilibre a été reconnu quand trois mesures consécutives de poids ont montré à une différence de moins de $0,001\text{g}$. La teneur en humidité de chaque échantillon a été déterminée par la méthode du four (AACC, 1990) (105°C pour 24h) et a été exprimée comme la moyenne de trois répétitions. La courbe résultante d'adsorption a été examinée selon le modèle d'Oswin de l'adsorption donc la forme générale est :

$$M (\text{g/g}) = A \cdot [a_w (1-a_w)]^C \quad (7)$$

Les constantes $A (\text{g.g}^{-1})$ et C ont été déterminées selon Chetana *et al.* (2005).

III.1.8- Analyse microstructurale des granules d'amidon par microscopie électronique à balayage (MEB)

Principe

Un faisceau très fin d'électrons accélérés à une tension de 10 à 30 kV balaie la surface d'un échantillon où se produisent des interactions détectées par un capteur. Les électrons secondaires et/ou rétrodiffusés sont recueillis, en synchronisant la détection (mesure d'une intensité) au balayage du faisceau incident. On obtient ainsi une image de la surface. Le contraste dépend du type d'électrons sélectionnés, de la tension d'accélération choisie et de la nature des atomes présents.

On distingue les contrastes suivants :

-**Le contraste topographique** est lié aux taux d'électrons secondaires et à leur accès au détecteur, en fonction de la topographie. On parle de «contraste d'angle», pour distinguer par exemple, les bords d'une sphère où les pointes apparaissent plus brillants et où les trous apparaissent sombres.

-**Le contraste chimique** est lié au facteur de diffusion de l'atome et donc au numéro atomique. Plus l'atome est lourd, plus le nombre d'électrons rétrodiffusés augmente et plus la zone correspondante sera brillante.

Protocole expérimental

La morphologie de granule a été examinée à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB). Pour se faire, une couche mince de granule d'amidon a été montée sur le support de spécimen d'aluminium. Le support de spécimen a été chargé dans un Emitech K550 pulvérisant le dispositif d'enduction (Emitech, Ashford, R-U). Il a été enduit du palladium d'or, avec une épaisseur environ de 30nm. La microscopie électronique à balayage a été effectuée en utilisant un *Hitachi S2500* actionné à une tension d'accélération de 10 kV.

III.1.9-Détermination de la capacité d'absorption d'eau et l'indice de solubilité dans l'eau des farines et des amidons de taro

Pour la détermination de la capacité d'absorption d'eau et l'indice de solubilité, 0,5g d'échantillon a été mélangé à 10 mL d'eau distillée et incubé pendant 15min dans un bain marie à agitateur (Kottermann, Allemagne) et maintenu à une température variant entre 20 et 90°C. L'ensemble a été centrifugé à 5000 trs/min pendant 30min. Le culot et le surnageant ont été séchés à 105°C pour 12h. La capacité d'absorption d'eau et l'indice de solubilité dans l'eau ont été respectivement évalués selon Phillips *et al.* (1988), et Anderson *et al.* (1969).

III.1.10-Analyse spectroscopique infrarouge des farines et des amidons de taro

La spectroscopie infrarouge est une technique d'analyse physico-chimique qui sonde les liaisons covalentes entre les atomes et leurs arrangements. Cette méthode permet d'accéder directement à l'information moléculaire, à la nature chimique et à l'organisation structurale du matériau (Pelletier, 1999). La spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier (FT-IR) a été employée pour évaluer des différences structurales dans des échantillons. Les spectres de FT-IR ont été enregistrés en mode d'absorbance de 4000 à 400 cm^{-1} . Le détecteur utilisé est de type DTGS (Sulfate de Triglycine Deutérée). Une accumulation de 32 spectres est réalisée par échantillon et la résolution est de 4 cm^{-1} . Les échantillons sont dilués dans des pastilles de KBr (transparentes aux infrarouges), dans les proportions des 5 mg d'échantillon pour 95 mg de KBr. Dix répliques ont été rassemblées pour chaque échantillon. Les spectres obtenus ont été transférés dans un paquet d'analyse de données. Le logiciel utilisé pour cette analyse est *OPUS NT 3.2* de *Brüker*.

III.1.11-Analyse rhéologique des farines et amidons de taro

Au cours du phénomène de gélatinisation, l'amidon absorbe de l'eau, gonfle et éclate. Son contenu en amylose se verse dans le milieu extracellulaire et forme un gel qui possède des propriétés d'écoulement. Ces propriétés d'écoulement varient en fonction de la température. Les propriétés d'écoulement ont été ainsi déterminées. A cet effet, 2,5 mg de farine ou d'amidon ont été mélangés à 100 mL d'eau distillée. L'ensemble a été mélangé et chauffé à 80°C pendant 10 min. Après incubation à température ambiante pendant 1h, la solution a été placée entre deux

plaques d'un rhéomètre rotatif à contrainte imposée (Rheologica Stresstech, UK). La plaque supérieure étant caractérisée par un cône de 40 mm de diamètre et 4° de dénivellation (c40/4). Un temps de 5 min a été observé pour permettre un équilibrage en température à 25°C. Après ce temps d'équilibre, l'écoulement de la solution a été analysé en fixant un gap de 1mm. Une contrainte de 0 à 200s⁻¹ a été imposée pendant 300s.

III.2- Modifications physico-chimiques et fonctionnelles pendant la cuisson des tubercules de taro (*Colocasia esculenta* L. Schott)

III.2-1-Matériel végétal

La variété de tubercule localement appelée « *Ibo coco* », utilisée dans cette étude a été récoltée dans un champ de paysan à proximité de l'Université de Ngaoundéré (Adamaoua-Cameroun). Les tubercules ont été lavés à l'eau du robinet avant utilisation. Les tubercules utilisés présentent les caractéristiques physiques suivantes telles que déterminées selon Baryeh (2001):

- La masse : 85,2±12,9 g ;
- La longueur : 7,6±1,2 cm ;
- La largeur et l'épaisseur : 4,7±0,7 cm ;
- Le diamètre géométrique : 5,4± 0,7 cm ;
- La sphéricité : 0,70±0,10.

Le schéma général du travail est donné à la figure 14.

III.2-2-Préparation des tubercules

La préparation des tubercules a été effectuée dans une marmite à pression d'une capacité de 12 L. Les tubercules ainsi nettoyés ont été divisés en 4 groupes. Les trois premiers groupes ont été cuits pendant 0, 5, 10, 15, 20 et 25 minutes dans trois types de solution. Le premier processus a été effectué dans 1500 mL d'eau, le second dans une solution de citron (*Citrus sp*) à la proportion de 1:3 (w/v) et le troisième dans une solution de tamarin (*Tamarindus indica*) à la proportion de 1:3 (w/v). Le dernier groupe a été découpé en tranches et cuit à la vapeur.

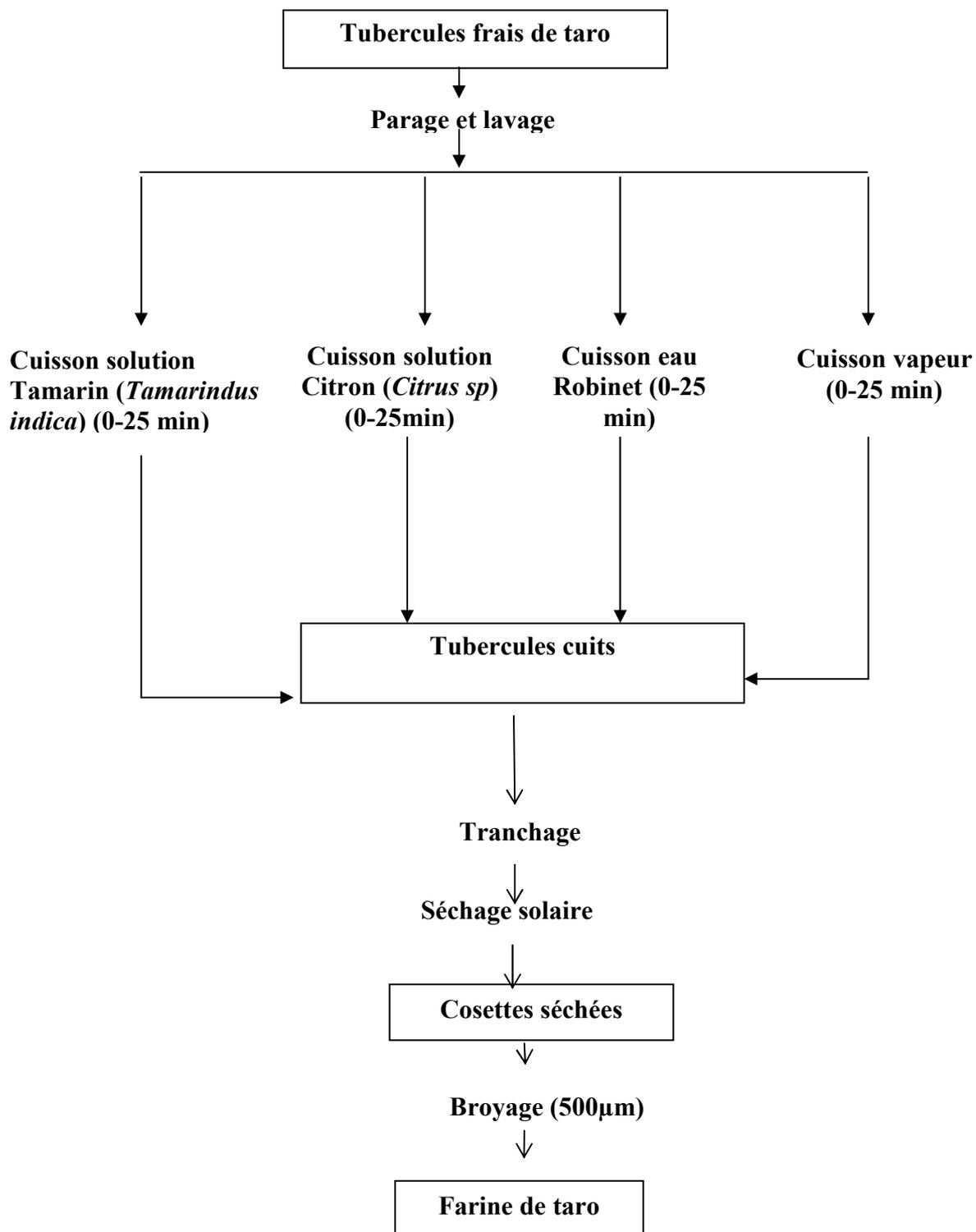


Figure 8: Production des farines précuites de taro à partir des tubercules cuits dans différentes solutions.

III.2-3- Production de la farine

Après prétraitement des tubercules tel que présenté à la figure 14, les différentes farines ont été produites. Dans la procédure de production des farines, tous les tubercules cuits aux différents temps suscités ont été épluchés et découpés en tranches. Les tranches issues de tous les prétraitements ont alors été séchées dans un séchoir solaire, broyées à l'aide d'un moulin à marteaux (Culatti polymix) équipé d'un tamis de 500 μm , et les farines obtenues ont été emballées et stockées pour des analyses ultérieures.

III.2-4- Evaluation physicochimique des tubercules de taro pendant la cuisson

III.2-4-1- Evaluation des sucres réducteurs

Les sucres réducteurs ont été extraits dans l'eau distillée et la teneur déterminée selon le protocole décrit au paragraphe III. 1.3.5

III.2-4-2-Détermination des protéines solubles

La solubilité des protéines a été déterminée suivant la méthode d'Oshodi et Ekperigin (1989). Selon cette méthode, à 0,5 g de farine, nous avons ajouté 9 mL d'eau distillée et l'ensemble a été maintenu sous agitation pendant 30 minutes. Après 45 minutes, le volume de la solution a été complété à 10 mL avec de l'eau distillée. La solution ainsi obtenue a été centrifugée à 5600 trs/min pendant 30 minutes à l'aide d'une centrifugeuse de type Bioblock Compsas. Le surnageant a été récupéré et les protéines dosées par la méthode colorimétrique modifiée de Lowry *et al.* (1951).

III.2-4-3-Détermination de la teneur en amidons résistants

La teneur en amidon résistant dans les farines a été déterminée par la méthode de Goni *et al.* (1996). Une masse d'échantillon de 100 mg a été dispersée dans une solution de pepsine (1 mg/mL) et incubée pendant 60 min à 40°C pour éliminer les protéines. L'amidon a été hydrolysé par addition de 40 mg d'alpha-amylase suivie d'une incubation à 37°C pendant 16 h. Les hydrolysats ont été centrifugés et les surnageants rejetés. L'amidon résistant a été déterminé dans le culot par dispersion de celui-ci dans 6 mL de KOH 2M et agitée vigoureusement pendant 30 min à température ambiante. L'amidon solubilisé a été ensuite hydrolysé par addition de 60 µL d'amyloglucosidase d'*Aspergillus niger* et une incubation à 60°C pendant 45 min dans un bain-marie agité. Après centrifugation (3000 g, 10 min), la concentration de glucose dans le surnageant a été déterminée par la méthode de Fischer et Stein (1961) utilisant l'acide 3, 5 dinitrosalicylique (DNS). L'absorbance a été lue à 540 nm et la concentration en glucose a été convertie en teneur en amidon grâce au facteur de multiplication 0,9.

III.2-4-4- Détermination de la teneur en oxalate

La teneur en oxalates totaux a été déterminée par titrations à chaud d'extrait d'échantillon à l'aide d'une solution de KMnO_4 (0,01 M) (Ukpabi *et al.*, 1989). Dans la procédure, environ 0,5g d'échantillon sec et broyé a été introduit dans une fiole de 100 mL contenant 76 mL d'eau distillée et 4 mL de HCl 6 N. Le mélange a été chauffé au bain-marie bouillant pendant 1 h, refroidi dans un bain de glace et le volume ajusté jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. Après une première

filtration, 2 aliquotes de 40 mL ont été introduits dans 2 béchers qui ont reçu chacun 20 mL de HCl 6 N. Le mélange a été évaporé jusqu'à la moitié du volume initial et filtré. Le précipité retenu sur le papier filtre a été lavé plusieurs fois à l'eau chaude jusqu'à obtention d'un volume d'environ 60 mL. Le filtrat obtenu a ensuite reçu 3 gouttes de rouge de méthyle et de l'ammoniaque 25% jusqu'à l'obtention d'une coloration faiblement jaune. La solution a par la suite été portée à ébullition dans un bain-marie, refroidie dans un bac à glace et filtrée pour enlever le précipité d'ions ferreux. Le filtrat obtenu a été bouilli, puis 5 mL de CaCl₂ 5% y ont été ajoutés sous agitation constante et laissé au repos pendant une nuit. Il a ensuite été filtré et le précipité d'oxalate de calcium retenu sur le papier a été transféré dans un bécher avec de l'eau distillée et de l'acide sulfurique 25% jusqu'à dissolution complète. Pour précipiter les métaux lourds, 5 mL du réactif tungstophosphate ont été ajoutés dans les extraits acidifiés et le mélange a été centrifugé à 5000 trs/min pendant 15 min. Le surnageant a par la suite été titré à chaud sous agitation constante avec une solution de permanganate de potassium 0,05 M. Un témoin a été réalisé parallèlement et l'étalonnage s'est fait au moyen d'une solution d'acide oxalique 0,2 M.

III.2-4-5- Détermination de l'Indice valeur bleue

L'indice valeur bleue a été déterminé selon la procédure décrite par Njintang *et al.* (1999). Dans cette méthode, 0,5 g de farine a été suspendu dans 10 mL d'eau distillée contenue dans des tubes à centrifuger et l'ensemble agité pendant 15 min avant d'être centrifugé à 5000 trs/min pendant 15 min. Un volume du surnageant (1 mL) a été mélangé à 2 mL d'une solution d'iode (préparée comme suit : 50 mg d'iode et 500 mg d'iodure de potassium dans 1 L d'eau distillée) et l'absorbance lue à 640

nm. L'indice valeur bleue a été calculé en équivalent de D.O pour 100g de matière sèche.

III.2-4-6- Détermination des produits intermédiaires et finaux des réactions de Maillard

La formation des produits intermédiaires de la réaction Maillard sur la farine faite à partir des tubercules cuits a été contrôlée par absorbance à 280 nm (A280) tandis que la formation des produits dérivés de la réaction de maillard a été analysée par des mesures de l'absorbance à 420 nm (A420). Les mesures ont été faites sur un extrait obtenu en mélangeant 0,5 g de farine de taro à 10 mL d'eau distillée pendant 10 min. La suspension a été agitée pendant 15 min à l'aide d'un agitateur mécanique de type KS 10 et centrifugée à 5000rpm pendant 15min à l'aide d'une centrifugeuse Bioblock MLWT scientifique. 62.1. Les surnageants ont été récupérés et les absorbances à 280 (A280) et 420 nm (A420) ont été lues sur un spectrophotomètre type Spectronic Genesys 2 PC.

III.2-4-7-Détermination du taux de séparation cellulaire (VICS)

Le taux de séparation cellulaire (VICS) qui permet d'évaluer le degré de cuisson ou de ramollissement à la cuisson des tubercules a été mesuré suivant la méthode de Parker *et al.* (1995) avec des modifications. Après chaque temps de cuisson, les tubercules ont été découpés en cubes de 1 cm de coté à l'aide d'un couteau inoxydable. 10 g d'échantillon ainsi traités (P1) ont été mélangés à 30 mL d'eau distillée et agités à 1100 tr/min pendant 25 min à l'aide d'un agitateur magnétique (Heidolph, AM 3000 D). Le mélange obtenu a par la suite été décanté et

sa teneur en matières solubles (P2) évaluée après séchage à l'étuve à 105°C. Le taux de séparation cellulaire (VICS) a été calculé par la formule suivante :

$$VICS = \frac{P2}{P1 * MS} * 100 \quad (7)$$

où MS est la teneur en matière sèche du taro cuit.

III.2-4-8-Analyse de la dureté

La dureté des tubercules au cours de la cuisson a été déterminée par simple compression en utilisant un texturomètre de type Llyod (Llyod instrument LRX-2500 N, Fareham, Hans, UK). Au cours des différents temps de cuisson, les tubercules ont été prélevés et soumis à la compression. Le principe de cette mesure a consisté en la détermination de la force du capteur nécessaire pour avoir des déformations du tubercule à 1mm de compression à une vitesse de 0,167mm.s⁻¹ suivie d'un relâchement à la position initiale à la même vitesse. Chaque tubercule a été soumis à 3 déformations et les données ont été enregistrées. La valeur moyenne a été prise pour représenter la texture moyenne de l'échantillon. Sur le profil obtenu (Figure 15), la dureté a été définie comme étant la force au pic de la courbe de compression.

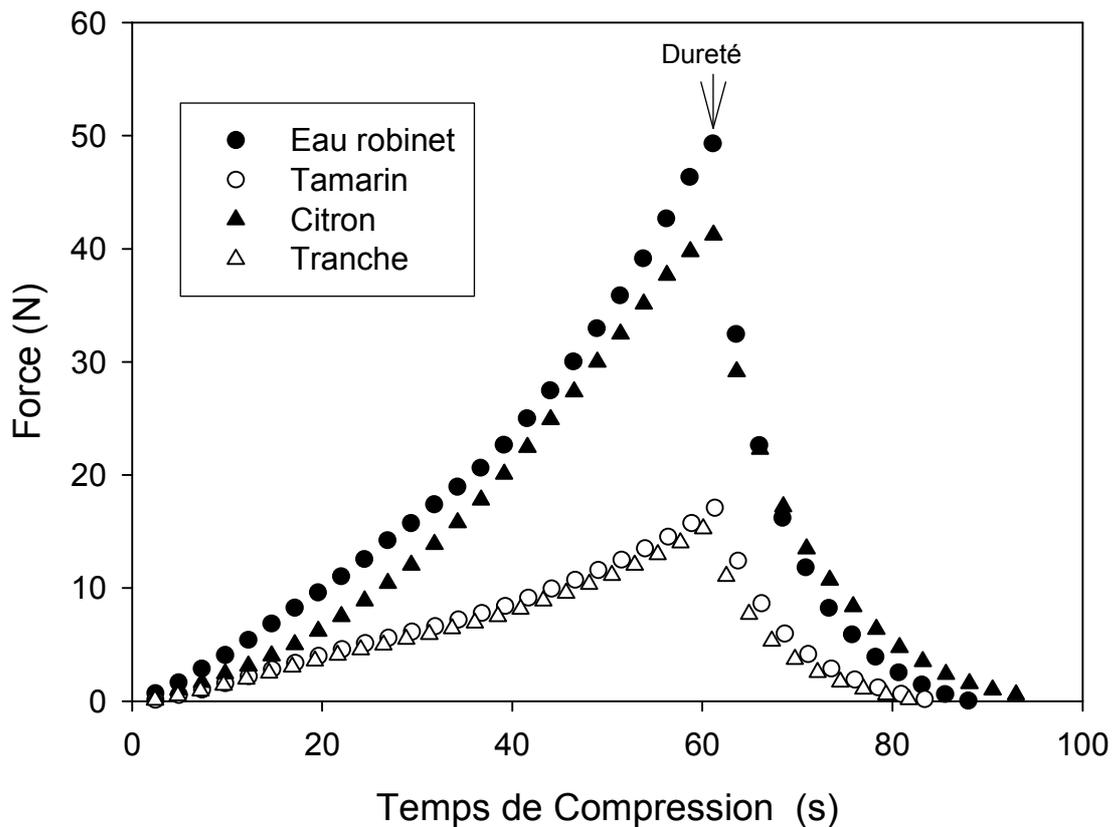


Figure 9: Courbe typique de compression des tubercules cuits en fonction du type cuisson (Après 15 min de cuisson).

III.2-5- Analyses sensorielles

Les analyses sensorielles de la farine précuite ont été étudiées par un panel de 6 femmes issues de la communauté d'étudiants de l'université basée sur leur expérience à faire cuire le taro. Dans un premier temps de formation des panélistes qui a duré 2 heures, le panel a choisi 3 attributs principaux qui ont été utilisés pour la caractérisation des tubercules cuits : l'aspect irritant, les goûts amer et acide. Elles ont été alors invitées à examiner manuellement la texture et à vérifier si les tubercules étaient cuits ou non. Quand les membres du jury ont obtenu un tubercule cuit, ils ont été alors invités à vérifier dans la bouche le degré d'irritation, d'amertume et d'acidité. Plus de trois sessions ont été effectuées.

III.3-Etude de l'influence du mode de cuisson des tubercules et du mode de reconstitution des pâtes sur le profil textural et l'acceptabilité de la pâte de taro

III.3.1-Matériel végétal

La variété de tubercule « *Ibo coco* » utilisée dans cette étude a été récoltée dans un champ expérimental dans les alentours de l'Université de Ngaoundéré (Adamaoua-Cameroun). Les tubercules ont été lavés dans l'eau du robinet puis conservés à 4°C jusqu'à leur utilisation.

III.3.2- Production de la farine et préparation du « achu »

Les tubercules de taro frais ont été cuits dans une marmite en aluminium sous pression (SEB, France) pendant 15 min selon 4 modes (cuisson dans l'eau du robinet, le tamarin, le citron et à la vapeur) selon la procédure décrite au chapitre précédent. Les tubercules cuits ont été pelés et découpés en tranches de 0,3 cm, en utilisant un couteau inox (Stainless Steel, Japan) avant d'être séchés dans un séchoir solaire à coquille pendant 36 h. Les cossettes ainsi obtenues ont été broyées en utilisant un moulin à marteaux (Culatti, polymix) équipé d'un tamis de 500 µm, et les farines obtenues ont été emballées dans des films en polyéthylène et stockées à 4°C pour les analyses ultérieures.

Le «achu» a été préparé selon deux méthodes : premièrement suivant la méthode traditionnelle, et deuxièmement par reconstitution de la farine et pilage en «achu». Pour la cuisson traditionnelle du «achu», les tubercules de taro, variété Ibo coco, ont été cuits dans une cocotte minute (SEB, France) pendant 15min, pelés

puis pilés dans un mortier jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. Pour ce qui concerne le «achu» reconstitué, les farines de taro précuit, obtenues de chacun des 4 modes de cuisson, ont été mélangées à l'eau bouillante pour atteindre une humidité finale de 68 ou 75%. L'ensemble a été soigneusement mélangé dans une marmite hors de la plaque (traitement O) ou sur la plaque chauffante (traitement H) à l'aide d'un pilon jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. Les pâtes obtenues ont été sujettes aux analyses sensorielles et de double compression.

III.3.3-Analyses chimiques

Les protéines totales, la teneur en eau, les cendres, les oxalates totaux et les amidons résistants des différentes farines ont été déterminés selon les procédures décrites au paragraphe III.2.

Les sucres disponibles ont été évalués en utilisant la méthode décrite par Njintang et Mbofung, (2003). Dans cette méthode, 1,5 g de farine a été mélangé à 10 mL d'acide sulfurique (1,5 N). L'ensemble a été chauffé pendant 20min, 10 mL de NaOH (10%) a été ajouté à la solution, transféré dans une fiole de 100 mL et le volume ajusté au trait de jauge avec de l'eau distillée. La solution ainsi obtenue a été utilisée pour la détermination spectrophotométrique des sucres réducteurs selon la méthode utilisant le DNS décrite précédemment.

Les protéines solubles ont été déterminées selon la méthode de Oshodi et Ekperigin (1989) décrite dans le chapitre précédent (Paragraphe III.1).

Les teneurs en amidons résistants et en oxalates totaux ont été déterminées par les méthodes Goni et *al.* (1996) et (Ukpabi et *al.*, 1989), décrites au paragraphe III.2.

Les minéraux (Ca, Mg, Na, Al, Fe, Mn, Zn, Cu) ont été déterminés en utilisant un spectrophotomètre à absorption atomique telle que décrite au paragraphe III.

III.3.4-Analyses physico-chimiques et microstructurales des farines

Les isothermes d'adsorption et de désorption des farines précuites ont été déterminés à 20°C selon la méthode gravimétrique statique de Bell et Labuza, (2000). La capacité d'absorption d'eau réelle (CAEr) et l'indice de solubilité dans l'eau (ISE) ont été déterminés respectivement par les méthodes de Phillips *et al* (1988) et Anderson *et al.* (1969) telles que décrites au paragraphe III.1.

Les composés phénoliques ont été extraits dans l'éthanol à 70 % et dosés par la méthode de Marigo (1973) utilisant le réactif de Folin – Ciocalteu

III.3.5-Analyse spectroscopique infrarouge et détermination de la couleur des farines précuites

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) employée pour évaluer des différences structurales dans les échantillons a été effectuée selon la procédure décrite au chapitre III. De même les mesures de la couleur des farines ont été effectuées en utilisant un Chromamètre CR210 (Minolta, France).

III.3.6-Etudes des caractéristiques rhéologiques des farines.

La manipulation et la vibration de matériaux pulvérulents permettent aux particules les plus petites de se glisser parmi les plus grosses. Ainsi, l'espace géométrique occupé diminue et la densité augmente. Ce principe est mis en exergue pour la caractérisation rhéologique des farines. À cet effet, L'angle de repos, l'angle de spatule, la compressibilité, la densité et la cohésion des farines précuites, ont été déterminés en utilisant l'appareil de contrôle de caractéristiques rhéologiques des poudres (PT-N modèle, *Hosokawa* Mi-cron Corporation, Japon). Ces cinq

paramètres ont été alors convertis en index de fluidité pour des évaluations numériques des propriétés d'écoulement des farines.

III.3.7-Détermination des caractéristiques texturales

Le suivi des caractéristiques de texture des pâtes a été faite en soumettant chaque échantillon à un test de double compression en utilisant la machine universelle Lloyd (Lloyd instrument LRX, Allemagne) commandé par le logiciel Nexygen. Le principe de mesure du test de double compression a consisté à déterminer la force du capteur nécessaire pour avoir des compressions de la pâte à 80% de son épaisseur ($2,5 \pm 0,02\text{cm}$) soit 20 mm. Pratiquement, chaque pâte est soumise à 2 déformations de 20 mm chacune, à une vitesse de 10 mm/min, à l'aide du capteur muni d'une tige cylindrique de section circulaire avec 10 mm de diamètre soit $78,54 \text{ mm}^2$ de surface. La force maximale du capteur est de 500 N, avec une pré charge de 0,5N. La pré charge ou le zéro de la force est la force minimale de contact entre la tige et la surface de la pâte marquant le début de l'expérience.

La détermination des paramètres du profil de texture fait référence aux travaux de Szczesniak (1963), Sherman (1979), Bourne (1983), Prentice (1984) et Ratnakaye *et al.* (1999). À partir courbes de double compression illustrées par la figure 26, les paramètres physiques suivants ont été définis:

- la dureté en Newton (N) : elle exprime la force maximale obtenue à la première déformation ou morsure;
- la cohésion est le rapport entre l'aire 2 et la deuxième déformation ou morsure et l'aire 1 à la 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 condition non déformée après que la force déformante (appliquée par la tige du capteur) ait été soulevée;
- le *gumminess* (N) ou consistance qui est le produit de la dureté et la cohésion;
- la masticabilité exprimée en mJoule (mJ) indique le produit du *gumminess* et de l'élasticité. Elle exprime l'aptitude du produit à former un bol alimentaire approprié à la dégustation.

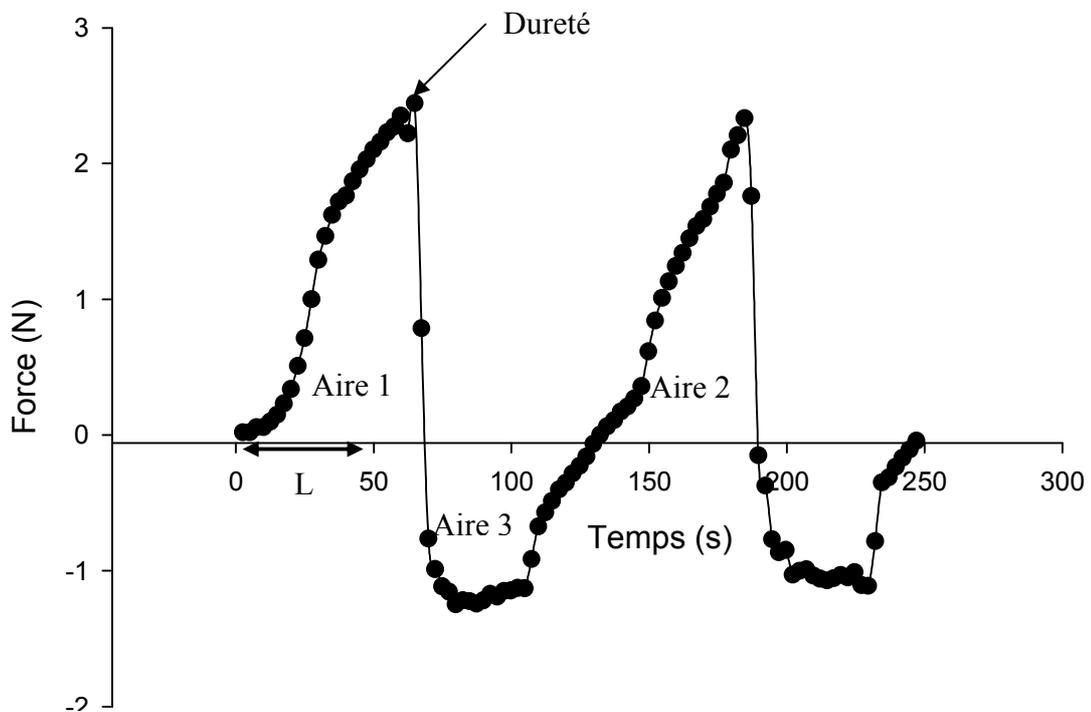


Figure 25: Courbe typique de profil de texture de la pâte de taro.

III.3.8-Evaluation du profil sensoriel

III.3.8.1-Analyse descriptive

L'analyse descriptive a été effectuée par un panel de 15 personnes composé d'étudiants et des employés de l'Ecole Nationale des Sciences Agro-Industrielles (ENSAI) de l'Université de Ngaoundéré (8 femmes et 7 hommes). Les panélistes ont été choisis en fonction leur motivation et de leur disponibilité et ont suivi une formation de 2 jours sur l'analyse. 17 échantillons de « achu » leur ont été présentés et chaque panéliste devait générer des descripteurs de texture, de l'aspect, de la couleur et de l'odeur. Les descripteurs ayant eu une fréquence supérieure ou égale à deux ont été sélectionnés et utilisés pour les analyses hédoniques.

III.3.8.2-Analyse hédonique

15 panélistes ont été invités à évaluer l'acceptabilité globale et les différents descripteurs en utilisant une échelle structurée de 0 à 10, où 0 signifie déteste extrêmement et 10 aime extrêmement. Les panélistes ont eu la possibilité d'ajouter des remarques ou observations à leur évaluation. La présentation des échantillons a été faite de manière randomisée.

III.4-Prédiction du degré favorable de séchage des tranches de taro par l'utilisation des marqueurs analytiques et de la courbe de sorption.

III.4.1-Matériel végétal

La variété de tubercule *Colocasia esculenta*, localement appelée « Ibo coco » utilisée dans cette étude a été récoltée dans un champ dans la localité de Bini

(Ngaoundere-Cameroun). Les tubercules ont été lavés dans l'eau du robinet puis conservés à 4°C jusqu'à utilisation.

Les tubercules ont été cuits pendant 15 min dans l'eau du robinet en utilisant une marmite à pression (SEB, France). Les tubercules cuits ont été pelés puis découpés sous formes cubiques (approximativement 1x1x1cm). Chaque cube a été introduit dans un ballon de 500 mL puis placé dans un bain marie ultracryostats compacts (Julabo) à -60°C pendant 30 min. Après congélation totale des cubes, les ballons ont ensuite été fixés sur les différents becs du lyophilisateur (Christ ALPHA 1-2 D, Allemagne) et les échantillons ont été lyophilisés pendant 18 h.

III.4.2-Vieillessement accéléré et détermination de la teneur en eau maximale

Pour cette étude, 2 g de farine de taro sont déposés sur une boîte de pétri qui est placée dans une enceinte hermétique contenant une solution de sel saturé. Des essais ont ainsi été effectués pour 5 solutions saturées différentes à savoir la silice (Si), le chlorure de lithium (CLi), l'acétate de potassium ($C_2H_3KO_2$) et le nitrate de magnésium ($Mg(NO_3)_2$). Ces solutions de sel saturées permettent de créer dans l'enceinte des humidités relatives de 0,07; 0,11; 0,23; 0,33 et 0,53 respectivement (Stapelfeidt *et al.*, 1997). Les enceintes sont en effet des boîtes fermées hermétiquement qui ont été déposées dans une étuve maintenue à $45\pm 1^\circ C$ pendant 20 jours. Les mesures de poids et le dosage des marqueurs moléculaires (carbonyls et malonaldéhyde) ont été effectués après 10 jours et 20 jours de stockage.

III.4.3- Détermination de la teneur en eau monomoléculaire par le modèle théorique de Brunauer-Emmet-Teller (BET)

La méthode théorique BET est représentée par l'équation :

$$aw/ E(1 - aw) = 1 / MC + aw(C - 1) / MC \quad (8)$$

où

M est la teneur en eau monomoléculaire, C est une constante qui varie avec la température selon l'équation $C=K.e^{QS/RT}$ (9)

Avec QS qui est la chaleur d'absorption.

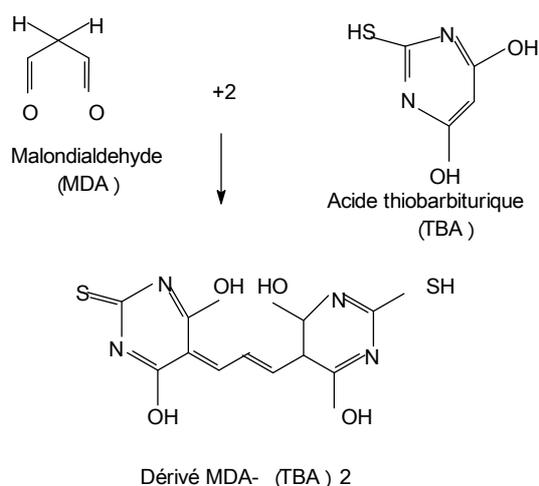
Ce modèle a été choisi pour sa fiabilité pour des activités en eau inférieure à 0,5 (O'Connor & O'Brien, 1994).

III.4.4-Détermination de la teneur en carbonyles

La masse d'échantillon (1g) de farine a été mélangée à 100 mL d'eau distillée. Le mélange a été homogénéisé à l'aide d'un barreau aimanté pendant 10 min. 1 mL de la solution a été placé dans un tube à essai de 20 mL et mélangé à 1 mL de 2.4 dinitrophenylhydrazine (2.4 DNPH). La solution du tube à essai a été vigoureusement agité à l'aide d'un vortex pendant 30 s et laissée au repos pendant 5 min. Cette phase a été répétée deux fois. 1,1 mL d'acide trichloroacétique 10%(TCA) a été ajouté à la solution afin de permettre la précipitation du complexe jaune formé par les carbonyles et le 2.4 dinitrophenylhydrazine. Après centrifugation à 1000 rpm à température ambiante, le surnageant a été éliminé et le résidu a été repris dans 10 mL d'urée (8 mol.L⁻¹). L'absorbance du mélange a été lue à 370 nm en utilisant des tubes en quartz avec comme référence une solution d'urée (8 mol.L⁻¹).

III.4.5-Détermination de la teneur en malonaldehyde total (MDA)

L'analyse des substances réactives avec l'acide thiobarbiturique a été effectuée par la méthode de Genot (1996). L'acide thiobarbiturique réagit avec les malonaldehydes (MDA) pour donner un complexe de couleur rose violacée détectée à un maximum d'absorbance de 532 nm. Le complexe est formé suivant l'équation ci-après:



Pour le dosage du malonaldehyde, 2 g de farine de taro ont été placés dans un tube à essai de 25 mL et 100 μ L d'une solution éthanolique de TBH (1mg/mL) puis 16 mL de TCA (5% p/v) ont été ajoutés. Le mélange a été homogénéisé trois fois en utilisant un homogénéisateur (Janke & Kunkel, Germany) à la vitesse de 2000 trs/min, pendant 15 min. Après l'homogénéisation, le surnageant a été collecté. 2 mL du surnageant ont été additionnés à 2 mL d'acide thiobarbiturique. La référence a été effectuée en mélangeant l'acide thiobarbiturique et le TCA. Les différents tubes ont été incubés dans le bain marie à 70°C pendant 30 min avant d'être refroidis dans de l'eau froide. L'absorbance a été lue à la longueur d'onde de 532 nm et la teneur en malonaldehyde total a été calculée suivant la formule:

$$\text{équivalent MDA} = (A_{532} \times V_{\text{TCA}} \times 2 \times M \cdot 10^{-2}) / (1,56 \times m) \quad (10)$$

dans cette relation, V_{TCA} est le volume de TCA (16 mL), m est la masse de l'échantillon (g) et M est la masse moléculaire de malonaldehyde (72 g.mol^{-1})

III.4.6 Influence de la teneur en eau de fin de séchage sur l'acceptabilité du achu et test de consommation de la pâte de taro

Sur la base des conditions optimales de séchage déterminées par les mesures de sorption, les tranches précuites de taro ont été séchées à 3 humidités différentes (10-12%, 7-8% et 5-6%), broyées dans un moulin à marteaux doté d'un tamis de $500\mu\text{m}$. la pâte de taro a été préparée en reconstituant 100 g de farine dans l'eau bouillante pour atteindre une teneur en eau de 80% (base humide) suivie d'un pétrissage pendant 10 min. Une étude d'acceptabilité de l'aspect, texture, odeur, goût, et acceptabilité générale, a été effectuée par un panel de 13 étudiants sur les pâtes servies avec ou sans la sauce dans un ordre aléatoire.

La farine produite à 7-8 % d'humidité a été produite, emballée en sachet de 500 g et servie à 20 familles pour un test de consommation.

III.5-Etude des variations physicochimiques et rhéologiques de la farine de taro au cours du stockage.

III.5.1-Matériel

La variété de tubercule de taro (*Colocasia esculenta*), localement appelée « Ibo coco » utilisé dans cette étude, a été fraîchement récoltée dans un champ expérimental à proximité de l'Université de Ngaoundéré. Ces tubercules ont été complètement lavés à l'eau du robinet et maintenus à 4°C jusqu'à utilisation dans les 4 jours qui suivent.

III.5.2-Méthodes

III.5.2.1-Préparation des échantillons

III.5.2.1.1-Cuisson des tubercules

La cuisson a été effectuée pendant 15 minutes dans une cocotte minute (SEB, France) ayant une capacité de 12L. Les tubercules ont été plongés dans l'eau du robinet (1/3 w/v) et cuit à la pression. Les études aux chapitres précédents ont montré que le temps de 15 min était suffisant pour la cuisson du taro sous pression. Les tubercules cuits obtenus ont été alors épluchés puis découpés en tranches. Les tranches ont été séchées dans un séchoir solaire à coquille.

III.5.2.1.2-Production de la farine

Après séchage, les tranches ont été broyées dans un moulin à marteaux (Culatti, France) équipé d'un tamis ayant une maille de 500 μ m. Les farines obtenues ont été tamisées en utilisant trois tamis de maille respective 75, 150, 250 μ m. Après chaque tamisage, les particules qui traversent les mailles sont collectées et étiquetées selon la taille de maille du tamis. À cet effet, trois groupes des particules ont été obtenus 75, 150 et 250 μ m. Les farines de chaque dimension particulière ont été conditionnées dans des sachets de polyéthylène et stockées selon trois modes: 1-non scellé et stocké à la température ambiante (SOBAT); 2- sachet en polyéthylène scellé et stocké à la température ambiante (SSBAT); 3-sachet en polyéthylène scellé et stocké dans un réfrigérateur à 4°C (SSBRT). 5 lots de farines de chaque dimension particulière et de chaque régime de stockage ont été préparés, l'ensemble selon un dispositif factoriel 4X3X6; soient 4 modes de stockage, 3 granulométries et 5 temps (0, 1, 2, 3, 4 et 5 mois) de stockage. Après chaque mois le sachet est utilisé pour les analyses et la préparation du achu.

III.5.2.2-caractéristiques chimique des farines

Les analyses chimiques à savoir, la teneur en eau, les cendres, les protéines, les glucides totaux, les amidons résistants des différentes farines ont été effectuées sur les farines de différentes granulométries selon les méthodes décrites dans le paragraphe III.1.

III.5.2.2.1-Préparation du *Achu*

Le *Achu* a été préparé à partir des farines pour la détermination du profil textural. Pour se faire, les farines ont été mélangées à l'eau distillée bouillante (25 g pour 75 mL). L'ensemble a été malaxé pendant 15min dans un mortier afin d'obtenir une pâte homogène et viscoélastique.

III.5.2.2.2-Détermination des caractéristiques texturales de la pâte

Les caractéristiques de texture des pâtes ont été évaluées en soumettant chaque échantillon à un test de double compression en utilisant la machine universelle LLYOD Instruments (LRX, Allemagne) commandé par le logiciel Nexygen, tel que décrit dans le paragraphe III.2.

III.5.2.3-Détermination des propriétés fonctionnelles des farines de taro

La capacité d'absorption d'eau et l'indice de solubilité dans l'eau ont été déterminés par les méthodes de Phillips *et al.* (1988) et Anderson *et al.*(1969) respectivement; l'indice valeur bleue a été déterminé selon la méthode décrite par Birch & Prietly (1973). Toutes les procédures sont décrites aux paragraphes précédents.

III.5.2.4. Caractéristiques rhéologiques des farines de taro

Les caractéristiques de rhéologiques ont été effectuées en utilisant un appareil de type Hosokawa (model PT-N, Hosokawa Mi-cron Corporation, Osaka, Japan).

III.6-Analyses statistiques

Toutes les analyses physicochimiques ont été effectuées en triple. La moyenne et l'écartype ont été calculées. L'analyse de variance a été effectuée pour calculer les différences significatives entre les moyennes de traitement, et le test de classement multiple de Duncan a été employé pour classer les moyennes en utilisant le logiciel Statgraphics (1997).

Le modèle d'adsorption d'Oswin a été appliqué en utilisant l'analyse non linéaire à l'aide du logiciel de Microcal.

Une corrélation simple de Pearson et une corrélation linéaire multiple des propriétés mesurées de tubercules ont été effectuées.

L'analyse en composante principale (ACP) a été effectuée sur les moyennes grâce au logiciel statbox (France).

Les tracés des courbes ont été effectués en utilisant le logiciel Sigma plot. 8.02 (Systat software, C.A. USA)

Le tracer des courbes de cinétique de dégradation des produits selon l'allure générale de cinétique d'ordre 1 décrite par Labuza & Riboh, (1982) Van Boekel, (1996).

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1- Propriétés physicochimiques, thermiques et microstructure des poudres alimentaires de six variétés de taro (*Colocasia esculenta*)

L'objectif de cette partie est de caractériser les poudres alimentaires six variétés de taro d'un point de vue physicochimique, thermique, microstructurale et rhéologique, dans le but de pouvoir de pouvoir relier ces caractéristiques à l'aptitude des tubercules à cuire vite.

IV.1.1-Composition chimiques des farines de taro

La composition chimique des différentes variétés de farine de taro est donnée dans le tableau 2. La teneur en humidité des farines se situe entre 8 et 10%, valeurs couramment observées pour couvrir une durée de conservation de plus de six mois (Swinkels, 1985). Comme indiqué dans le tableau 2, on note une variation significative ($p < 0,05$) des teneurs en eau entre les différentes farines. La valeur la plus élevée est observée pour la variété CE ($9,6 \pm 0,1$ g/100g), tandis que la plus faible est observée pour la variété RIE ($8,2 \pm 0,2$ g/100g). Ces valeurs de teneur en eau des farines de taro se situent dans la gamme de ceux obtenus par Njintang (2002) sur six variétés de taro du Cameroun et du Tchad. Comme pour la teneur en eau, on a observé une variation significative ($p < 0,05$) de la teneur en cendres des farines. La teneur en cendres varie entre 1,6 et 5,5%, valeurs qui se rapprochent de celles de la plupart des tubercules tropicaux (Swinkels, 1985). Toutefois, nous devons remarquer que ces valeurs sont nettement plus élevées que celles des céréales. Les gammes de variation de potassium, le magnésium, le calcium et le sodium dans les farines de taro sont respectivement de 3,5-59,7; 32-392 ; 25,4-192 et $< 0,5$ -5,6 mg/100g. Ces résultats montrent qu'indépendamment de la variété, le

magnésium et le calcium sont les minéraux les plus abondants dans les farines de taro. Comme on pourrait s'y attendre, les teneurs en calcium sont relativement élevées dans le taro, probablement du fait de son appartenance à la famille des Araceae. En effet, cette famille est très riche en cristaux d'oxalate de calcium responsable de l'irritation. À cet effet, Sira (2000) a associé les teneurs élevées en calcium à la présence d'oxalate. Ainsi, une corrélation positive ($R=0,69$, $p<0,05$) a été trouvée entre le Ca et le Mg. S'il est accepté que la présence du Ca soit liée à la présence d'oxalate, il est très probable que le Mg aurait un rôle dans la formation des cristaux d'oxalate, mais ceci reste à vérifier. De façon comparative, les variétés KW1 et KW2 ont les teneurs les plus élevées en Ca et Mg (91-192 mg/100g et 106,7-382 mg/100g respectivement) tandis que la variété RIN contient les teneurs les plus basses (25,4 et 61,9 mg/100g). Ces observations sont en accord avec les observations microscopiques rapportées par Njintang (2003) qui a montré l'absence des cristaux d'oxalate dans les variétés RIE et RIN. Parmi les minéraux ci-dessus cités, quelques éléments en trace sont présents dans les farines de taro. On peut distinguer le Fer, Mn, Cu et le Zn. La teneur en Fe dans les farines varie de 2,4 ppm (RIE) à 41,7 ppm (RIN). Ces valeurs supérieures à la normale (2,3-19,9ppm) (FAO, 1988b) s'expliqueraient par le fait que les tubercules faisant partie de la racine de la plante sont le site où l'absorption du fer a lieu.

Tableau 2: Composition chimiques des farines et des amidons de six variétés de taro (*Colocasia esculenta*).

Paramètres	Variétés					
	RIE	RIN	CE	CN	KW1	KW2
Teneur en eau (g/100g)	8,2±0,2 ^a	9,0±0,4bc ^c	9,6±0,1 ^c	8,5±0,4 ^{ab}	8,5±0,1 ^{ab}	8,8±0,2 ^b
Protéines (g/100g)	8,57±0,13 ^c	11,62±0,90 ^e	7,29±0,30 ^a	11,39±0,20 ^d	11,83±1,80 ^e	7,58±0,80 ^b
Glucides totaux (g/100g)	94,8±0,12 ^{cd}	93,9±0,14 ^c	90,5±0,1 ^a	91,0±0,09 ^b	95,5±0,6 ^d	90,8±0,4 ^b
Amidon (g/100g)	86,6±0,3 ^f	84,36±0,1 ^e	82,12±0,1 ^d	79,85±0,2 ^c	68,8±0,24 ^b	66,5±0,12 ^a
Lipides (g/100g)	0,50±0,10 ^b	1,17±0,32 ^d	0,53±0,15 ^c	0,30±0,07 ^a	0,33±0,06 ^a	0,37±0,06 ^a
Sucres réducteurs (g/100g)	13,8±0,1 ^b	13,5±0,1 ^a	19,5±0,4 ^d	26,7±0,1 ^e	14,6±0,1 ^b	15,5±0,2 ^c
Cendres (g/100g)	1,6±0,35 ^a	1,5±0,4 ^a	4,4±0,3 ^b	3,8±0,9 ^b	1,3±0,6 ^a	5,5±1,1 ^c
Ca (mg/100g)	25,4	55,9	111	30,7	91	192
Na (mg/100g)	<0,5	4,8	4,6	4,8	<0,5	5,6
Mg (mg/100g)	61,9	32,9	88,9	90,4	106,7	382
K (mg/100g)	5,2	27,5	59,7	23,7	3,5	11,4
Mn (ppm)	6,4	13,1	62,4	130,3	127,3	85,6
Fe (ppm)	41,7	2,4	17,6	15,0	13,1	21,8
Zn (ppm)	42,8	0,4	1,1	1,0	1,3	1,8
Cu (ppm)	1,2	0,4	1,1	1,0	1,3	1,8

Moyenne ± écartype; les données en lignes suivies par une lettre sont significativement différentes (p<0,05).

En effet, l'activité des racines permet la solubilisation et l'absorption du fer. Les racines acidifient les parois de leurs cellules et un petit volume de sol autour de celles-ci (rhizosphère). Le fer est plus soluble et assimilable en milieu acide. De plus, en milieu acide, le fer se combine avec des molécules organiques pour créer un complexe chélaté. Le fer ainsi protégé de l'oxydation se maintient en solution. Ces teneurs élevées en fer contribueraient d'avantage aux apports alimentaires de fer, notamment pour les enfants et les femmes dont les besoins sont élevés (FAO, 1988b).

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 limités. Les teneurs en glucides totaux varient de 90,5% à 95,5% tandis que le rendement d'extraction d'amidon varie de 66,5 à 86,6%. Les teneurs en amidon obtenues dans cette étude ne sont pas en accord avec celles (70-80%) et (52-58%) rapportées par Jane *et al.* (1992) respectivement pour les teneurs en amidon et le rendement. Les teneurs en sucres réducteurs quant à eux varient significativement ($p < 0,05$); La variété CN a la valeur la plus élevée (26,7g/100g) alors que les variétés RIN, RIE (13,5-13,8g/100g) ont les valeurs les plus faibles. La différence dans la teneur en sucres réducteurs doit refléter la fragilité de l'amidon des différentes variétés.

L'habilité de l'amidon de taro natif à l'hydrolyse par l'amyloglucosidase est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3: Teneur en amylose, phosphore et amidon hydrolysable dans les farines et amidons de six variétés de taro (*Colocasia esculenta*).

Variété	Echantillon	Amylose (%)	Amidon (%)	Hydrolysable	Phosphore (M.S)	(mg/100g)
RIE	Amidon	30,85±0,63 ^b	43,14±2,54 ^a		0,83±0,08 ^{ns}	
	Farine	26,05±0,27 ^c	45,07±1,30 ^a		1,97±0,02 ^c	
RIN	Amidon	16,65±0,15 ^a	51,23±1,27 ^b		0,88±0,08 ^{ns}	
	Farine	14,70±1,64 ^b	58,87±2,60 ^c		1,96±0,03 ^c	
CE	Amidon	26,77±2,47 ^b	54,83±1,27 ^{bc}		0,76±0,18 ^{ns}	
	Farine	18,53±1,92 ^b	56,11±3,90 ^{bc}		1,76±0,09 ^{bc}	
CN	Amidon	28,38±2,86 ^b	37,75±2,54 ^a		0,82±0,16 ^{ns}	
	Farine	16,07±1,96 ^b	46,91±1,30 ^a		1,66±0,33 ^{abc}	
KW1	Amidon	25,43±0,42 ^b	56,63±1,27 ^{bc}		0,77±0,22 ^{ns}	
	Farine	19,40±0,04 ^{ab}	50,59±1,30 ^{ab}		1,44±0,09 ^{ab}	
KW2	Amidon	29,21±1,50 ^b	58,43±1,27 ^c		1,43±0,27 ^{ns}	
	Farine	24,10±1,56 ^{bc}	61,63±1,30 ^c		1,36±0,03 ^a	

Moyenne ± écartype; les données en colonnes, pour un même type d'échantillon (amidon ou farine), suivies par des lettres ideniques ne sont pas significativement différentes au seuil $p < 0.05$.

La teneur de l'amidon hydrolysable varie de 37,75 (CN) à 58,43% (KW2) pour les amidons et de 45,07 (RIE) à 58,87% (RIN) pour les farines. On observe une corrélation significative ($R = -0,32$; $p < 0,05$) entre la teneur en sucres réducteurs et le degré d'hydrolyse. Parallèlement, une corrélation linéaire négative ($R = -0,45$, $p < 0,05$) a été établie entre le niveau d'hydrolyse et la teneur en amylose de l'amidon. Ce résultat suggère que l'amidon ayant la teneur en amylose la plus élevée est hydrolysé plus lentement que celui ayant la teneur la plus basse. Ceci serait lié au fait que l'amylose est la partie d'amidon qui existe sous forme de double chaîne et qui est difficilement accessible par des enzymes. D'autre part, il a été également observé une corrélation linéaire négative ($R = -0,43$; $p < 0,05$) entre l'amidon hydrolysable et la teneur en phosphore de l'amidon. Le phosphore est l'un des

composés non glucidique présent dans les granules d'amidon. Le phosphore est présent dans l'amidon sous forme de phosphate mono-esters et de phospholipides. Les phosphates mono-esters sont liés de manière covalente aux chaînes d'amylopectines. Ils permettent d'améliorer la clarté et la viscosité de la pâte (Craig *et al.*, 1989). Suivant les indications du tableau 3, la teneur en phosphore de l'amidon varie de 0,76 (CE) à 1,36 mg/100g (KW2). Les valeurs de phosphore obtenues dans cette étude sont élevées comparativement à celles obtenues par Pérez *et al.* (2005) sur *Colocasia esculenta* (0,01mg/100g), *Xanthosoma sagittifolium* (0,07mg/100g) et *Manihot esculenta* (0,05 mg/100g). Une corrélation linéaire négative ($r=-0,43$; $p<0,05$) a été observée entre la fraction hydrolysable de l'amidon et la teneur en phosphore. Ceci indique que, l'amidon natif ayant une teneur élevée en phosphore sera moins digestible. Une explication possible de cette observation serait qu'une faible teneur en phosphore entraînerait la formation d'une teneur élevée en amidons résistants (Liu *et al.*, 2007). La teneur en phosphore des amidons de tubercule est typiquement inférieure à 500mg/100 g et est habituellement rapportée à la cendre (Thomas et Atwell, 1999). À cet égard, une corrélation linéaire positive ($R=0,69$; $p<0,05$) a été observée entre la teneur en phosphore et la teneur en cendres des farines.

IV.1.2-Paramètres de couleur et isotherme de sorption des farines et amidons de taro

Les paramètres de couleur (L^* , a^* , b^*) sont représentés dans le tableau 4. Toutes les caractéristiques de couleur sont dans le même ordre des valeurs : L^* (83,2-94,9), a^* (1,5-5,7) et b^* (3,0-13,8). Ces résultats ont montré que les farines ont une blancheur appréciable (valeur élevée de L^*), moins rouge (valeurs faible de a^*)

et moins jaune (valeur faible de b^*). Certaines études ont présumé que la variation de la valeur de b^* parmi les espèces serait liée à leur teneur en sucres et en protéines à cause de leur rôle dans le brunissement non enzymatique (Jamin et Flores, 1998). Dans le présent travail, on a observé une relation linéaire non significative entre les protéines ou les sucres avec les paramètres a^* ($R=0,44$) ou b^* ($R=0,24$). Cette relation non linéaire révèle que la composition de la farine aurait une certaine contribution sur la couleur de la farine.

La capacité de l'amidon et de la farine de taro à absorber de l'eau à 20°C est présentée sur la figure 8. Cette figure correspond à l'isotherme de sorption de l'eau et décrit la variation de la teneur en eau d'un produit en fonction de l'activité de l'eau (a_w). Les courbes montrent que la variation de la teneur en eau des farines et des amidons dépend de l'humidité relative (HR) de l'atmosphère dans laquelle ils ont été stockés. Si l'HR diminue, les amidons et les farines rejettent l'eau ; par contre, si l'HR augmente, ils absorbent l'humidité (Swinkels, 1985). Les courbes obtenues dans le présent travail sont de forme sigmoïdale car montrant un point d'inflexion qui caractérise les composés riches en sucres (Maskan et Gögüs, 1997). Cette caractéristique est semblable à celle observée par nombreux d'autres auteurs sur les amidons (Chungcharoen et Lund, 1987). Ces auteurs ont montré que chaque isotherme de sorption présente en général trois zones. Chacune de ces zones correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit : la région A correspondant à $a_w < 0,2$, caractérise la monocouche moléculaire à la surface du produit ; la région B pour la gamme d' a_w de 0,22-0,7 correspondant à l'adsorption des couches additionnelles d'eau au-dessus de la monocouche, et la région C pour la gamme de 0,7-0,99 d' a_w correspondant à la condensation de l'eau dans les pores du produit suivi de la dissolution du matériau soluble (Benado et Rizvi (1985). En

général, la teneur en eau augmente rapidement aux activités en eau faibles (0-0,13), ensuite elle monte alors lentement entre les aw de 0,15 et 0,7 ; suivie d'une forte élévation au-dessus d'aw 0,7. Les résultats obtenus ont montré que la variation de la teneur en eau en fonction de l'activité (aw) en eau suit le modèle d'Oswin ($R^2 > 0,95$; $p < 0,01$). Les constantes A et B du modèle présentées dans le tableau 4 ont montré une variation significative.

Tableau 4: Paramètres de Couleur et constante d'Oswin (A) des farines et amidons de taro

Variété	Echantillons	constante d'Oswin (B)(10^{-1})	constante d'Oswin (A°)($10^{-2} \cdot g \cdot g^{-1}$)	Paramètres de couleur		
				L*	a*	b*
RIE	Amidon	6,38±0,68 ^{ab}	3,99±0,51 ^a	94,9±0,3 ^d	1,5±0,1 ^a	3,0±0,25 ^a
	farine	8,49±1,38 ^{ns}	3,16±0,86 ^{ns}	87,7±6 ^a	1,45±0,14 ^a	6,98±0,31 ^a
RIN	Amidon	7,44±1,0 ^{abc}	3,18±0,61 ^{ab}	93,9±0,5 ^d	2,1±0,1 ^b	4,7±0,34 ^b
	farine	6,20±0,8 ^{ns}	5,19±0,76 ^{ns}	93,63±0,41 ^c	2,20±0,07 ^a	8,86±0,11 ^b
CE	Amidon	11,05±0,78 ^d	1,93±0,71 ^a	88,7±0,3 ^b	5,1±0,1 ^e	9,1±0,1 ^d
	farine	6,55±1,63 ^{ns}	5,44±1,6 ^{ns}	92,24±0,59 ^{abc}	1,92±0,02 ^a	9,36±0,13 ^b
CN	Amidon	10,63±1,63 ^{cd}	2,20±0,52 ^{ab}	90,8±0,7 ^c	3,5±0,2 ^c	7,2±0,5 ^c
	farine	9,19±0,89 ^{ns}	3,10±0,55 ^{ns}	93,36±0,47 ^{bc}	1,92±0,04 ^b	9,31±0,16 ^a
KW1	Amidon	9,76±0,9 ^{bcd}	2,69±0,49 ^{ab}	93,5±0,5 ^b	2,5±0,2 ^a	5,2±0,3 ^b
	farine	10,21±0,85 ^{ns}	2,41±0,41 ^{ns}	88,30±0,42 ^{ab}	4,20±0,1 ^b	11,85±0,16 ^c
KW2	Amidon	5,75±0,62 ^a	3,18±0,36 ^{ab}	83,2±0,5 ^a	5,7±0,2 ^f	13,8±0,2 ^e
	farine	6,30±0,8 ^{ns}	5,09±0,75 ^{ns}	84,40±4 ^a	5,67±0,23 ^b	13,91±0,3 ^c

Moyenne±écartype ; $p < 0,05$. Les données en colonnes, pour un même type d'échantillon (amidon ou farine), suivies par des lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil $p < 0,05$

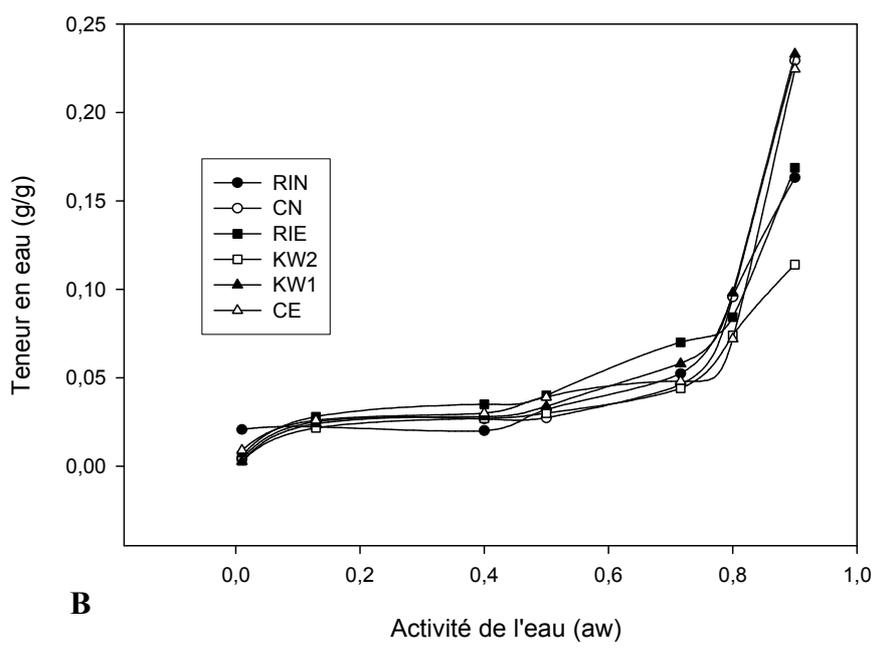
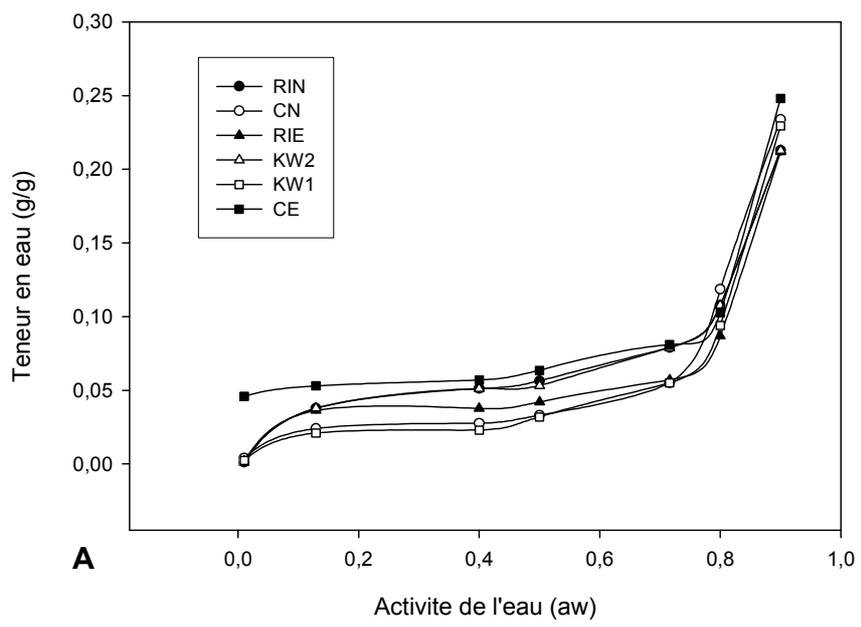


Figure 10: Isothermes de sorption des farines (A) et amidons (B) de taro.

Dans l'ensemble, les farines ont des valeurs de A élevées comparativement à celles des amidons. Cette observation explique le rôle des autres constituants non glucidiques dans l'absorption de l'eau des farines. A l'inverse la constante B est faible pour les farines et élevée pour les amidons. À cet effet, une corrélation négative a été établie entre les constantes A et B. Les valeurs de A sont comprises entre 0,019 (variété CE) et 0,039 (variété RIE) pour les amidons et de 0,024 (variété KW1) à 0,054 (variété CE) pour les farines. Dans le cas des valeurs de B, les valeurs sont comprises entre 0,57 et 1,10 pour les amidons et 0,62 à 1,02 dans le cas des farines. Les valeurs de A et B sont systématiquement supérieure (A) et inférieure (B) à celles rapportées pour le maïs (A=0,079, B=0,32) (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004) et pour l'amidon de pomme de terre (A=0,069 ; B=0,39) (Peng *et al.*, 2007).

IV.1.3-L'Analyse thermique Différentielle (ATD) des farines et amidons

Les transitions thermiques des six farines et amidons de taro déterminées par analyse thermique différentielle sont rassemblées dans le Tableau 5. Tous les échantillons d'amidon montrent un thermogramme avec une transition endothermique simple typique du procédé de gélatinisation (Biliaderis, 1990 ; Iturriaga *et al.*, 2004). Aussi bien pour les farines que pour les amidons, Il n'existe aucune différence significative entre les températures de début de gélatinisation (T_0 comprise entre 48,08 et 65,49°C) d'une part, et les températures de pic de gélatinisation (T_p comprise entre 54,40 et 74,54°C) d'autre part. Par contre, une variation significative ($p < 0,001$) a été observée sur l'enthalpie (ΔHG), avec des valeurs qui varient de 8,43J/g (RIN) à 14,95J/g (RIE) pour les farines et de 11,04J/g (RIN) à 16,93 J/g (RIE) pour les amidons. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Ahmed, Ramaswamy *et al.* (2008) qui ont rapporté des valeurs d'enthalpies élevées pour l'amidon du riz et des valeurs faibles pour les farines de

riz. Cette observation montre clairement que l'enthalpie de gélatinisation n'est pas uniquement influencée par la composition de l'amidon (le ratio amylose et amylopectine) mais aussi par, l'architecture des granules (le ratio cristallin et amorphe) et la structure de l'amylopectine (la longueur de la chaîne, le nombre de résidus de la chaîne) (Gunaratne & Hoover, 2002). En outre, une teneur élevée en amylose ayant des longues chaînes donne des valeurs élevées d'enthalpie (Jane et al., 1992).

Tableau 5: Profil de gélatinisation des farines et amidons de taro.

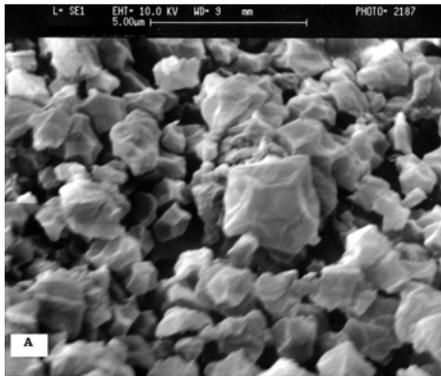
Variétés	Echantillons	Paramètres de DSC			
		T ₀	T _p	T _c	ΔH (J/g)
RIN	Amidon	60,93±2,36 ^b	64,77±2,77 ^c	66,42±1,27 ^b	8,43±0,21 ^a
	farine	63,41±2,38 ^c	67,24±3,21 ^b	70,27±3,61 ^{ab}	11,04±0,86 ^a
RIE	Amidon	55,20±1,2 ^a	61,27±0,71 ^{abc}	64,96±0,7a ^b	14,95 ^d
	farine	54,93±2,64 ^b	56,48±1,76 ^a	60,78±2,51 ^{ab}	16,93±1,34 ^c
CE	Amidon	57,47±0,97 ^a	62,78±2,89 ^{bc}	67,05±2,67 ^b	11,41±0,89 ^b
	farine	57,85±3,14 ^b	74,54±2,20 ^c	68,81±3,5 ^b	15,37±0,82 ^{bc}
CN	Amidon	56,80±1,57 ^a	59,42±0,61 ^{ab}	61,78±0,87 ^a	9,22±0,87 ^a
	farine	62,91±2,82 ^c	64,29±3,41 ^b	66,4±2,25 ^{ab}	15,19±2,21 ^{bc}
KW1	Amidon	65,49±1,53 ^c	69,75±2,34 ^d	73,33±3,13 ^c	11,13±0,01 ^b
	farine	64,37±2,35 ^c	67,64±1,67 ^b	69,53±2,6 ^b	14,59±0,24 ^b
KW2	Amidon	56,14±1,23 ^a	58,99±1,11 ^a	61,24±3,12 ^a	13,36±0,66 ^c
	farine	48,08±2,46 ^a	54,40±3,16 ^a	57,91±2,50 ^a	16,75±0,84 ^c

Moyenne±écartype ; T₀ = Température de début de gélatinisation ; T_p = Température de pic de gélatinisation ; T_c = Température de fin de gélatinisation. Les données en colonnes suivies par des lettres identiques ne sont pas significativement différentes au seuil p<0.05

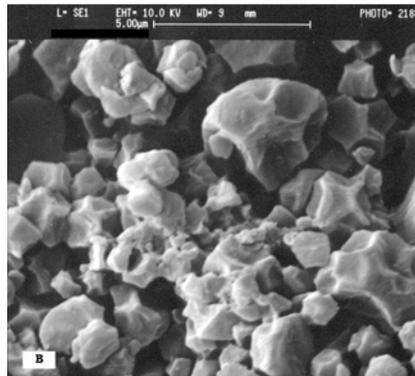
Les profils de gélatinisation des amidons présentés dans le tableau 5 sont tout à fait semblables à ceux rapportés par Jane *et al.*, (1992) sur la farine et l'amidon de taro. Cependant, les températures initiales de mi et de fin de gélatinisation sont inférieures à celles rapportées par Sira (2000) pour la farine et l'amidon de taro. De plus, Sira (2000) a établi une corrélation significative entre la température de gélatinisation (T_p) et la teneur en amylose des amidons de taro. Une observation similaire a été faite dans le présent travail, bien que la corrélation observée ne soit pas significative ($R=0,37$).

IV.1.4-Microstructure et répartition granulométrique des farines et amidons de taro

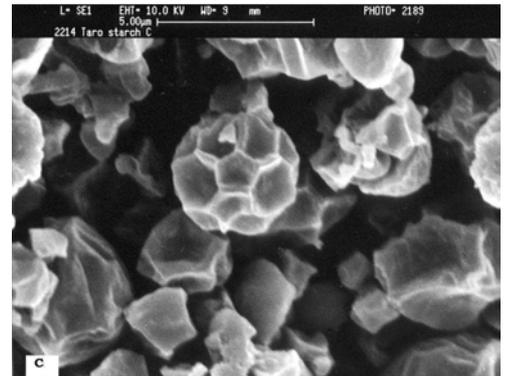
Les microscopies électroniques à balayage (MEB) ont montré que les granules d'amidons de taro ont des formes polygonales irrégulières de taille inférieure à 5 μm (figure 9). La répartition granulométrique (Figure 10) a montré une distribution des particules de manière monomodale, avec une moyenne de taille comprise entre 3 et 20 μm . Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues par d'autres auteurs (1-5 μm) sur l'amidon de taro (Jane *et al.*, 1992; Sugimoto *et al.*, 1986). Les résultats de nos études sur la répartition granulométrique ont montré que les granules d'amidon de taro sont soit sous forme d'amas ou sous forme de complexes. Ceci s'expliquerait par le fait qu'au cours de l'extraction des amidons, la phase du passage alcalin a été brève. Ceci n'a pas permis la dissociation des granules de manière individuelle. Les observations microscopiques des échantillons d'amidons confirment cette association. Les observations minutieuses de la taille des particules donnent des diamètres de chacun des échantillons d'amidon variant de 1 à 5 μm , ceci est en accord avec la taille de granule d'amidon de taro rapportée dans la littérature.



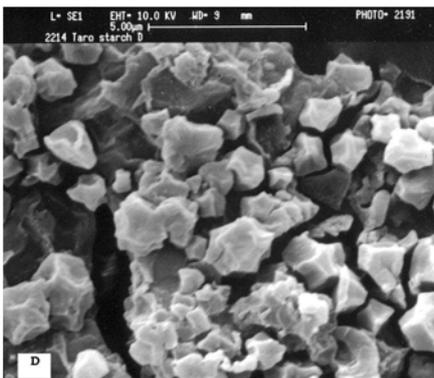
A



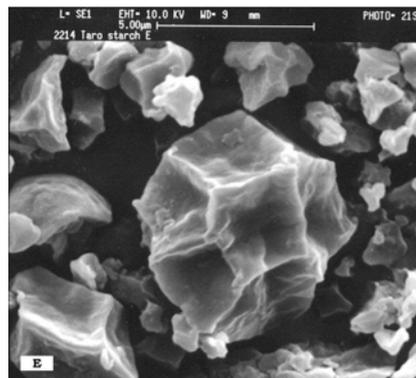
B



C



D



E

Figure 11: Microscopie électronique à balayage (MEB) des amidons isolés de la farine de taro des variétés KW1 (A), RIE (B), RIN (C), CN (D) et CE (E).

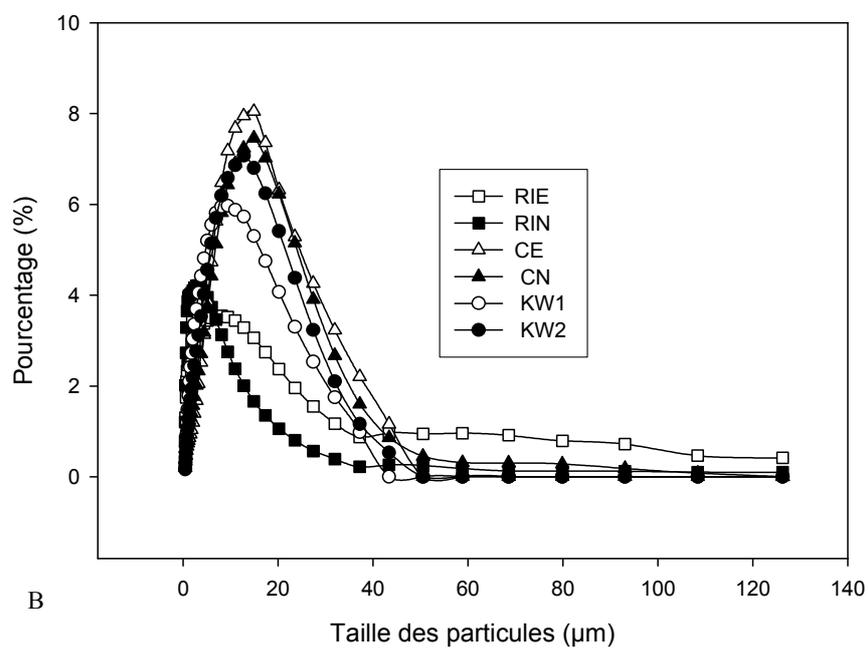
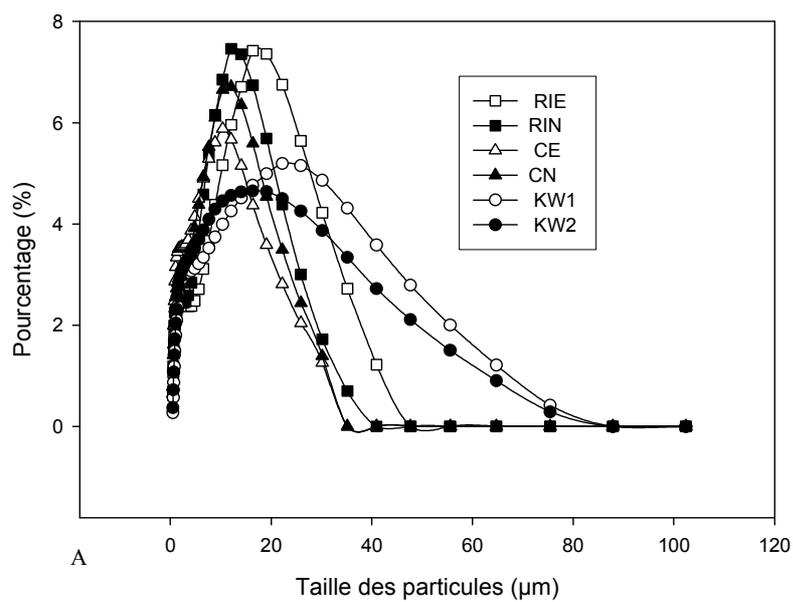


Figure 12: Distribution granulométrique des farines (A) et amidon (B) de taro.

III.3.5-Spectrophotométrie Infra rouge à transformé de Fourier

Pour obtenir les informations sur la différence possible des structures entre les granules d'amidon des échantillons de taro et l'aptitude de leur différents constituants à absorber de l'eau, la spectrophotométrie infra rouge à transformé de Fourier a été effectuée. Les spectres obtenus pour les six échantillons étaient semblables en ce qui concerne leurs formes, mais étaient différents dans l'intensité des crêtes principales (figure 11). Les spectres montrent l'absorption élevée aux numéros de vague 574, 1020-1026, 1056, 1151, 1365, 1631, 2922 et 3400 cm^{-1} confirmant la nature glucidique des échantillons. Selon Van soest *et al.* (1995), les bandes à 1047 et 1022 cm^{-1} décrivent les propriétés cristallines et amorphes de l'amidon, respectivement, et leurs rapports respectifs indiquent le degré d'organisation de l'amidon (Sevenou *et al.*, 2002 ; van Soest *et al.*, 1995). Dans cette étude, de telles bandes apparaissent, mais celle à 1047 cm^{-1} n'était pas précise, et nous avons utilisé celle à 1056 cm^{-1} . Le tableau 7 présente les valeurs des indices résultant des spectres. En général, les indices cristallin et amorphe varient respectivement de 1,7 (KW2) à 2,7 (RIE) et de 1,7 à 2,3 pour les farines, tandis que pour les amidons elles varient respectivement de 1,3 (KW2) à 3,5 (RIE) et 1,2 à 2,6. Les valeurs du rapport d'indices, I_{1022}/I_{1056} , qui varient de 0,74 (RIE) à 0,93 (KW1), suggèrent en général que, l'amidon de taro serait plus amorphe que cristallin. Les valeurs du rapport obtenues dans le présent travail se rapprochent de la valeur 0,8 rapporté par Olkku et Rha (1978) et Van Soest *et al.* (1995) pour le dolique de Chine et les fécules de pommes de terre. De façon comparative, les valeurs du rapport obtenues pour les amidons ne sont pas significativement différentes de leurs farines respectives, justifiant ainsi que l'amidon est le composant le plus important de la farine de taro.

Tableau 6: Indices de Cristalline (I_{1020}), d'Amorphe (I_{1056}), d'organisation structurale (I_{1056}/I_{1020}) des farines et amidons de taro.

Caractéristiques FTIR	Échantillons	Variétés					
		RIE	CE	CN	RIN	KW1	KW2
Indice cristalline	Farine	2,7	1,9	1,8	2,1	1,7	2,0
	Amidon	3,5	1,4	1,7	2,0	1,5	1,3
Indice amorphe	Farine	2,3	1,6	1,5	1,8	1,5	1,7
	Amidon	2,6	1,3	1,3	1,7	1,4	1,2
Indice d'organisation structurale	Farine	0,85	0,84	0,83	0,86	0,88	0,85
	Amidon	0,74	0,93	0,76	0,85	0,93	0,92

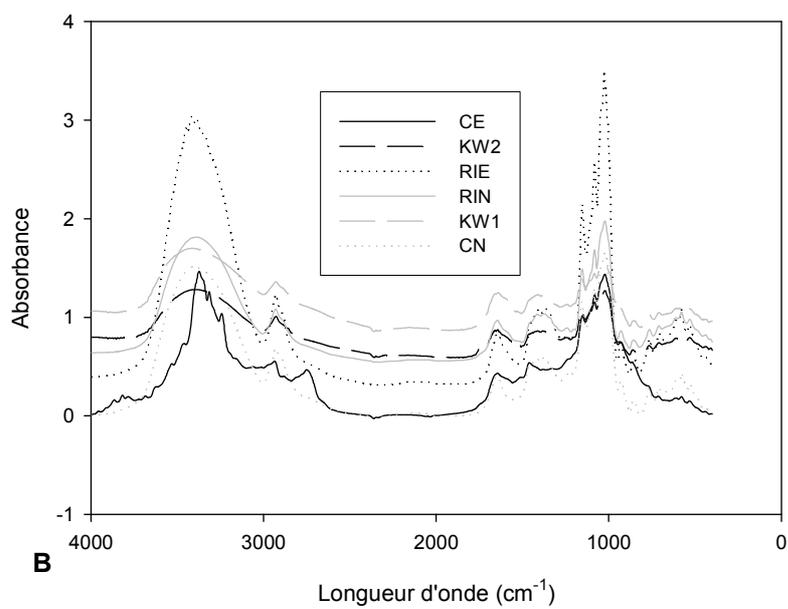
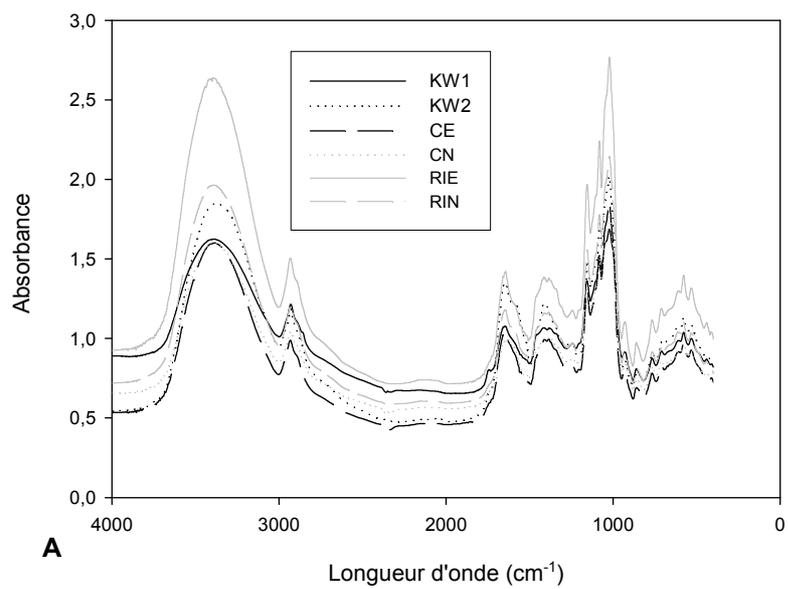


Figure 13: Courbes de la spectrophotométrie infra rouge des farines (A) et amidons (B).

IV.1.6-Capacité d'absorption d'eau (CAE) et indice de solubilité

(ISE)

La capacité d'absorption d'eau (CAE) des échantillons de farine et d'amidon est représentée par la figure 12. En général, on observe une augmentation de la CAE en fonction de l'augmentation de la température jusqu'à une température seuil (50-60°C) au-delà de laquelle on n'observe plus de variation significative, sinon une baisse relative. L'hydratation faible de la farine ou des amidons à basse température a été rapportée par de nombreux auteurs (Agunbiade & Longe, 1999). L'hydratation des amidons est largement affectée par les arrangements structuraux de leur amylose et amylopectine constitutives (Schoch et Mayfield, 1956). Les valeurs plus élevées de CAE pour les variétés RIE, KW2 et CN, montrent que ces variétés ont une plus grande capacité à fixer l'eau comparativement aux autres. Ainsi, il est probable que les arrangements granulaires de RIE, de KW2 et de CN soient moins compacts et en conséquence, leurs granules peuvent, avoir des espaces intermoléculaires plus élevés que les trois autres variétés. Lorsque la température de gélatinisation est atteinte, il y a pertes des liaisons hydrogènes et l'espace intermoléculaire est rapidement modifié par l'hydratation, aboutissant à l'augmentation de l'hydratation de la granule (Biliaderis, 1992). Des observations faites sur la figure 12 ont montré que les farines et amidons des variétés RIE, KW2 et CN ont absorbé légèrement plus d'eau que les variétés RIN, KW1 et CE (10,06g H₂O g⁻¹). De plus, il s'avère que la capacité d'absorption d'eau des farines de taro est systématiquement plus haute que celle de leurs amidons (Figure 12). Ces résultats suggèrent que d'autres composés différents de l'amidon des farines tels que le mucilage contribueraient fortement à l'absorption d'eau de la farine. En effet il a été suggéré que les mucilages dans les aliments joueraient un rôle dans la balance

hydrique et contre la déshydratation des plantes (Charles, Huang, & Chang 2008). La variation de CAE des amidons pourrait être due à la différence du degré d'organisation des groupes d'hydroxyle pour former des liaisons hydrogènes et covalentes entre les chaînes d'amylose et d'amylopectine (Hoover et Sosulski, 1986).

Des observations similaires, de l'effet de la température sur la capacité d'absorption d'eau, ont été observées sur l'indice de solubilité (Is) dans l'eau. En effet, on observe un faible indice de solubilité à des températures basses (20°C), particulièrement pour les farines et amidons des variétés CE, CN, KW1 et KW2. Au fur et à mesure que la température augmente, on observe une augmentation de l'Is. Lorsque la température a dépassé une valeur seuil, probablement la température de pic de gélatinisation, on observe une baisse de la solubilité. La basse solubilité des amidons à température faible a longtemps été attribuée à la structure semi cristalline de la granule d'amidon et des liens d'hydrogène formés entre les groupes d'hydroxyle dans les molécules d'amidon (Eliasson, 1992). À température élevée égale à la température de gélatinisation, la solubilité augmente à cause de la rupture des granules d'amidon, de l'exposition des groupements hydrophiles et la solubilisation des molécules d'amylose. L'augmentation de température au-delà de la température de gélatinisation se traduirait probablement par une agitation élevée du gel, une réassociation des molécules d'amylose et par conséquent une baisse de l'indice de solubilité.

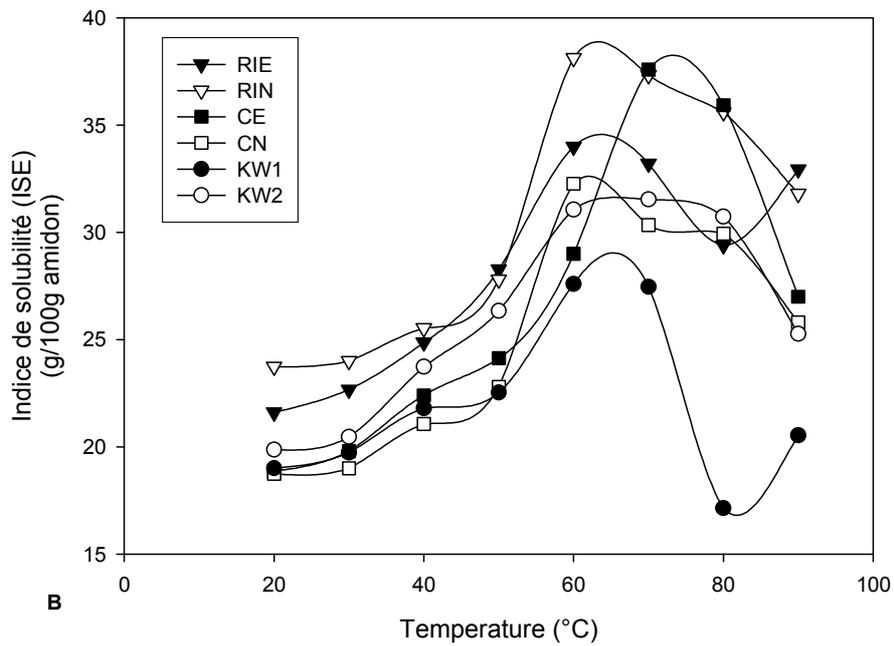
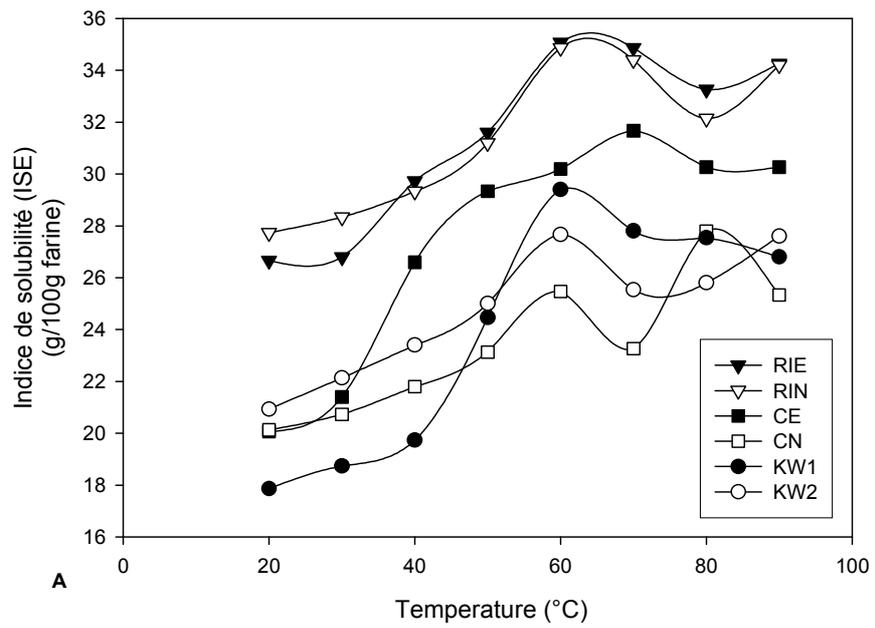


Figure 14: Indice de solubilité dans l'eau des farines (A) et amidons (B)

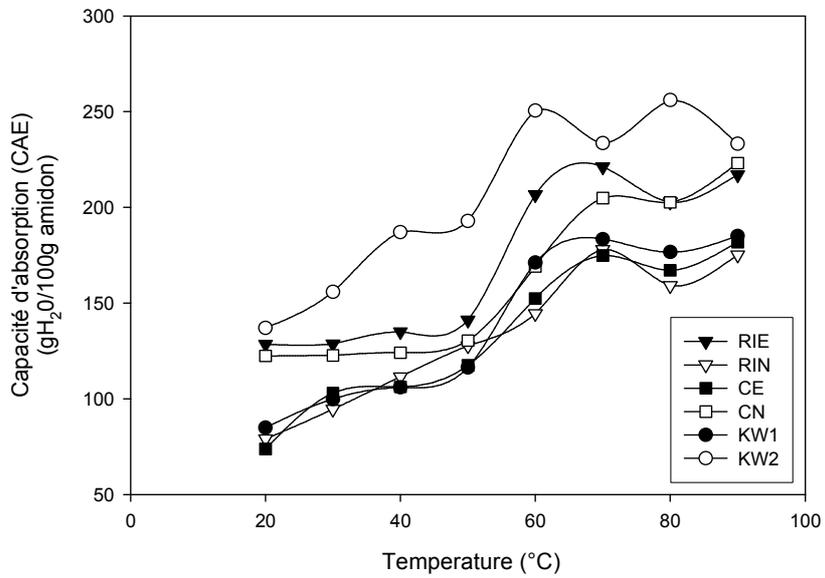
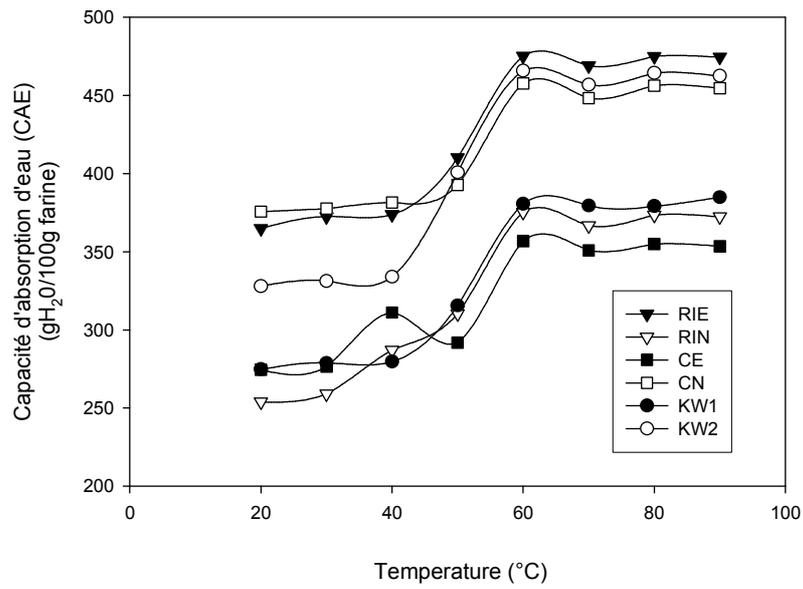


Figure 15: Capacité d'absorption d'eau des farines et des amidons de taro.

IV.1.7-Viscosité des farines et amidons de taro

La viscosité des farines et amidons a été étudiée dans la gamme de cisaillement comprise entre 100 et 500 Pa. Les résultats de cette analyse sont reportés dans le tableau 7. Tous les échantillons analysés se sont approximativement ($R^2=0,96-1,00$) bien comportés comme des liquides dont les variations suivent une loi de puissance. L'analyse des pâtes de farines et d'amidons a montré que la farine RIN et l'amidon KW1 ont un comportement pseudoplastique. Ces échantillons présentent un indice d'écoulement (n) faible, soient 0,16 pour la farine RIN et 0,13 pour l'amidon KW1. Par contre, les variétés RIE et CE présentent des valeurs élevées (0,38 et 0,86 respectivement). Toutefois, l'indice de consistance (K) a montré des valeurs faibles pour la farine et l'amidon de CE (1,0 et 0,06 Pa.s ^{n} respectivement). Tandis que la farine et l'amidon de RIE ont montré des valeurs élevées (19,6 Pa.s ^{n}). La viscosité de la pâte a été liée à la capacité des ingrédients à fixer de l'eau (Dogan, Sahin et Sumnu, 2005). Selon ces auteurs, l'échantillon qui fixera le plus d'eau aura une viscosité élevée. À cet effet, une corrélation significative a été observée entre la constante de consistance et la capacité d'absorption d'eau ($R=0,9$; $p=0,01$). De plus, il a été établi que les valeurs élevées de consistance ont été associées à des teneurs élevées en indice de solubilité ($R=0,78$; $p<0,05$). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Dogan *et al.* (2005) sur les farines de soja et du riz. Selon ces auteurs, dans une solution contenant une farine à faible capacité d'absorption d'eau, et donc une faible viscosité, il existe en quantité élevée d'eau libre pour faciliter le transfert de chaleur. En plus, Singh *et al.* (2003) montre que lorsque la viscosité augmente avec la baisse de la température, ceci suggère une tendance des différents constituants présent dans la pâte chaude à se réassocier ou à rétrograder.

Tableau 7: Constante de consistance (K) et indice d'écoulement (n), des différentes farines et amidons de taro

Paramètres	Echantil lons	Variétés					
		RIE	RIN	CE	CN	KW1	KW2
K (Pa.s ⁿ)	Farine	19,6±0,7	14,8±0,4	1,0±0,00	1,6±0,05	9,9±0,3	9,9±0,3
	Amidon	10,6±0,3	4,20±0,1	0,06±0,0	8,78±0,2	10,44±3,9	52,3±0,5
			3	1		7	
N	Farine	0,23±0,0	0,16±0,0	0,86±0,0	0,61±0,0	0,39±0,01	0,39±0,0
		1	0	5	1		1
	Amidon	0,38±0,0	0,42±0,0	0,35±0,0	0,17±0,0	0,13±0,05	0,30±0,0
		1	1	1	1		1

Moyenne±écartype, n=3.

IV.1.8-Conclusion partielle

Les résultats obtenus ont révélé des différences sur la structure et les propriétés physicochimiques des farines et des amidons de taro. L'étude a montré que les échantillons *Ibo coco* ont des valeurs faibles en teneur en eau, et calcium comparativement à d'autres échantillons. Les températures de début et de pic de gélatinisation sont respectivement de 55 et 65°C. Les enthalpies de gélatinisation sont élevées pour la farine et l'amidon de RIE (14,9 farine et 16,9 pour les amidons) et faibles pour RIN (8,43 pour la farine et 11,04 pour l'amidon). L'indice amorphe, la capacité d'absorption d'eau, l'indice de solubilité dans l'eau varient de manière significative entre les variétés. La variété *Ibo coco* a une bonne aptitude à l'absorption en eau. Cette aptitude à l'absorption d'eau expliquerait le fait qu'elle cuit vite, eu égard au fait que l'eau est un bon caloporteur. Bien plus cette variété ayant un indice de solubilité élevé forme un gel avec un indice de consistance élevé. *Ibo coco* est la variété qui nous permettra facilement d'atteindre l'objectif qui est de réduire le temps de cuisson du tubercule et une pâte ayant les propriétés proches de la pâte traditionnelle. A cet effet, il est impératif de connaître le comportement de cette variété pendant la cuisson des tubercules. Ce comportement varie-t-il avec le type de solution de cuisson ?

IV.2-Modifications physico-chimiques et fonctionnelles pendant la cuisson des tubercules de taro (*Colocasia esculenta* L.Schott)

Il a été montré que la cuisson dans la solution de tamarin (solution acide) réduirait l'irritation et le temps de cuisson (Soudy, 2002).

L'objectif de cette partie est d'étudier les modifications des caractéristiques de texture, de l'irritation et les propriétés physicochimiques des tubercules de taro pendant la cuisson dans différentes solutions en fonction du temps, le but est de rechercher la meilleure technique de préparation qui réduirait le temps de cuisson.

IV.2-1-Variation des caractéristiques physicochimiques

La figure 16 montre la variation des sucres réducteurs en fonction du temps et du type de cuisson. En général, indépendamment du mode de cuisson on observe une augmentation de la teneur en sucres réducteurs. Les valeurs les plus élevées en sucres réducteurs ont été observées dans les cuissons en solutions acides. La valeur élevée en sucres réducteurs des tranches cuites à la vapeur comparativement à la cuisson du tubercule dans l'eau du robinet pourrait s'expliquer par la taille réduite des tranches qui favorise un fort échange de chaleur et par ricochet une vitesse élevée des réactions qui s'y produisent. Ce résultat témoigne de l'hydrolyse de l'amidon pendant la cuisson. Ces résultats confirment les observations de Njintang *et al.* (2003) qui ont montré l'hydrolyse de l'amidon de taro pendant la cuisson des tranches dans l'eau de robinet.

La gélatinisation et l'hydrolyse influencent généralement la digestibilité de l'amidon des aliments. De même, les traitements thermiques contribuent à la perte de la structure cristalline de l'amidon qui peut se réorganiser au cours du séchage pour

former les amidons résistants. Vu l'importance de ces derniers dans le management de certaines maladies, la teneur en amidon résistant a été déterminée pendant la cuisson. Elle est définie comme étant la capacité de l'amidon à résister à l'hydrolyse par l'amyloglucosidase. Les résultats ont montré qu'indépendamment de la méthode de cuisson, l'amidon résistant diminue en fonction du temps de cuisson. Les échantillons obtenus par cuisson des tranches ou dans l'eau du robinet ont montré des valeurs les plus élevés et les échantillons provenant des solutions acides présentent les teneurs les plus faibles (Figure 17). Ces résultats certifient que l'amidon est hydrolysé par la solution acide pendant l'ébullition.

Une autre modification non négligeable pendant la cuisson du taro est celle des protéines solubles (Figure 18). En général les protéines solubles diminuent pendant la cuisson et cette réduction est faible pour la cuisson des tranches à la vapeur et importante pour les autres traitements.

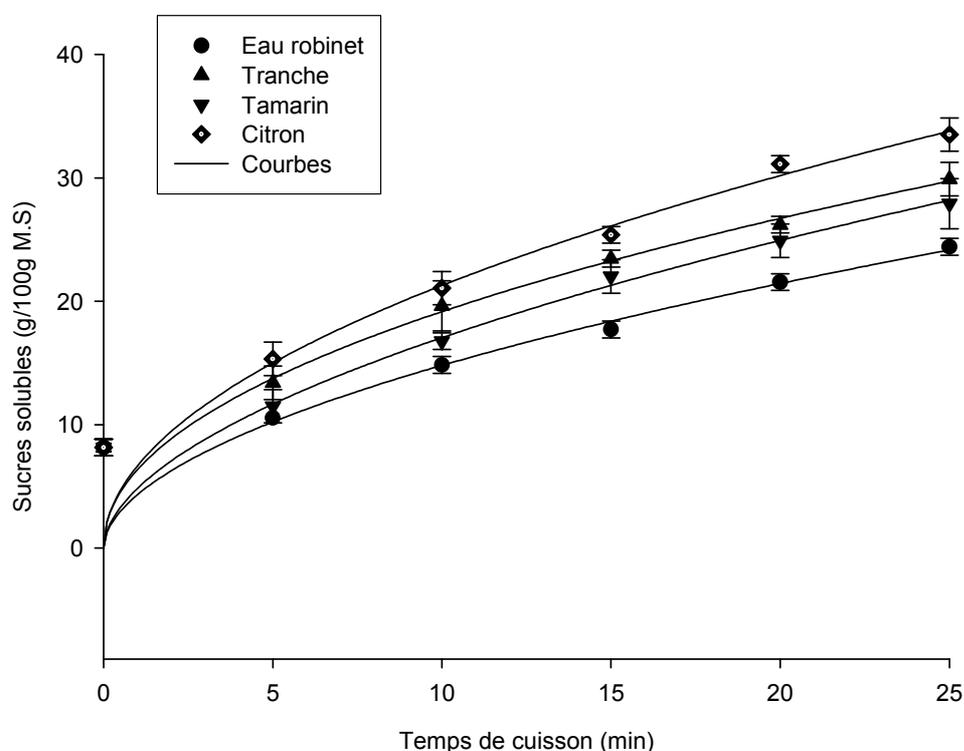


Figure 16: Variation des sucres réducteurs en fonction du temps et du mode de cuisson.

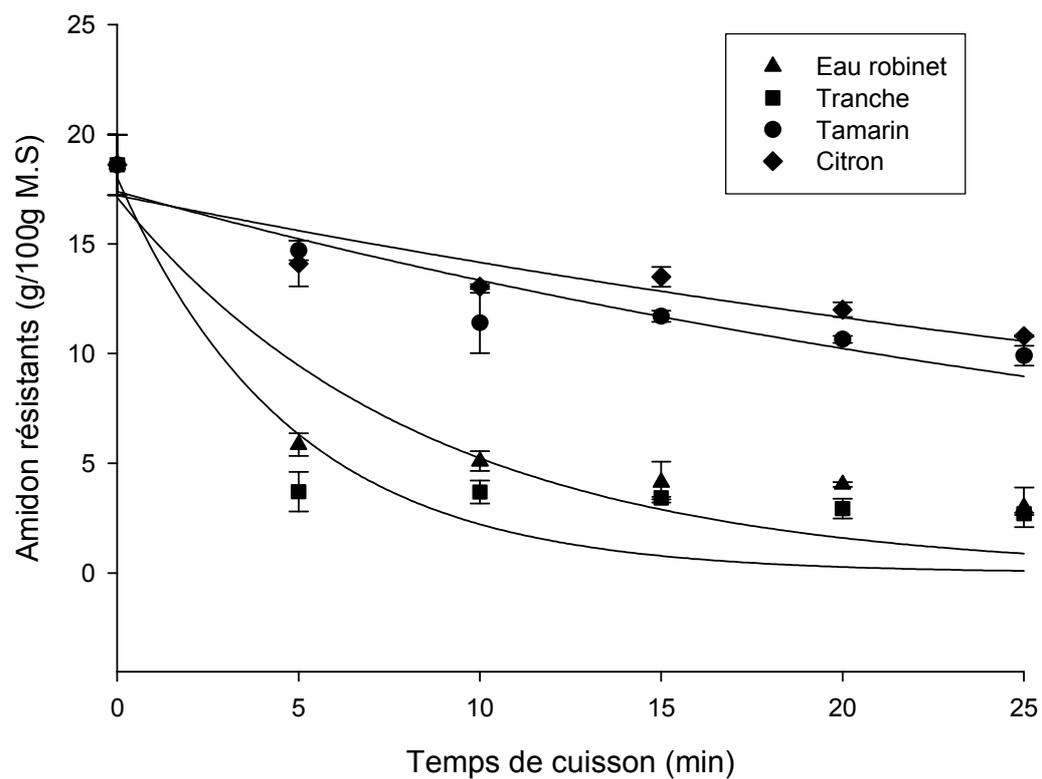


Figure 17: Variation des amidons résistants en fonction du temps et du mode de cuisson.

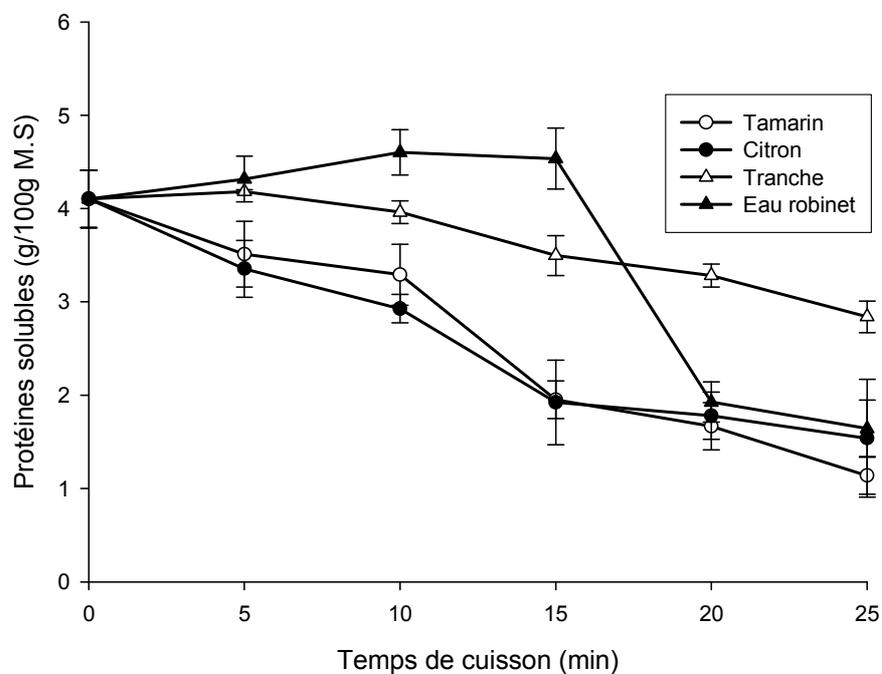


Figure 18: Variation des protéines solubles en fonction du temps et du type de cuisson.

Dans l'ensemble on observe une baisse de la teneur en protéines solubles pendant les différentes cuissons. Ce résultat s'explique par une augmentation du lessivage des protéines au cours de la cuisson. Ce lessivage est plus important dans les solutions acides ou dans les solutions à pH alcalins. Une baisse similaire des protéines a été observée par Ohishi, Kasai, Shimada & Hatae (2003), qui ont montré, dans une étude sur l'effet de l'ajout de l'acide acétique dans la solution de cuisson sur la dissolution des protéines, que les protéines sont plus extraites dans le riz à 0,2M d'acide acétique (pH=2,6) que dans l'eau (pH=6,8). De plus, ces auteurs ont montré que l'effet de l'acide acétique sur la dissolution des protéines augmente avec l'augmentation de la température.

Tandis que la gélatinisation et l'hydrolyse sont des réactions importantes qui se produisent dans la plupart des produits féculents pendant la cuisson, l'irritation est une autre caractéristique importante en ce qui concerne le taro. En effet la consommation ou le contact du taro non bouilli avec le peau induit l'irritation des tissus et il a été démontré que l'irritation est inactivée essentiellement par la cuisson humide (Nip, 1997; Njintang 2003). La présente étude a indiqué que l'irritation due à la consommation du taro est totalement réduite après 10 minutes de cuisson (Figure 19). Le court temps nécessaire pour éliminer totalement l'irritation pourrait être dû au fait que la variété Ibo coco contient les teneurs très faibles des cristaux d'oxalate de calcium comparés à d'autres variétés de taro (Njintang *et al.*, 2003).

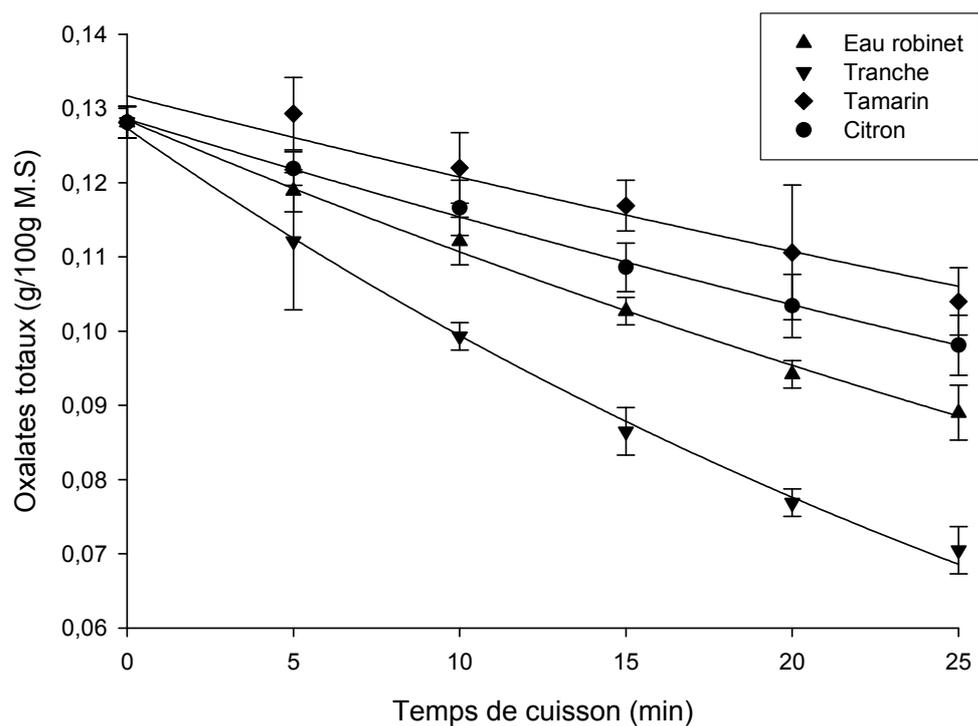


Figure 19: Variation de la teneur en oxalates totaux des tubercules de taro en fonction de temps et du mode de cuisson.

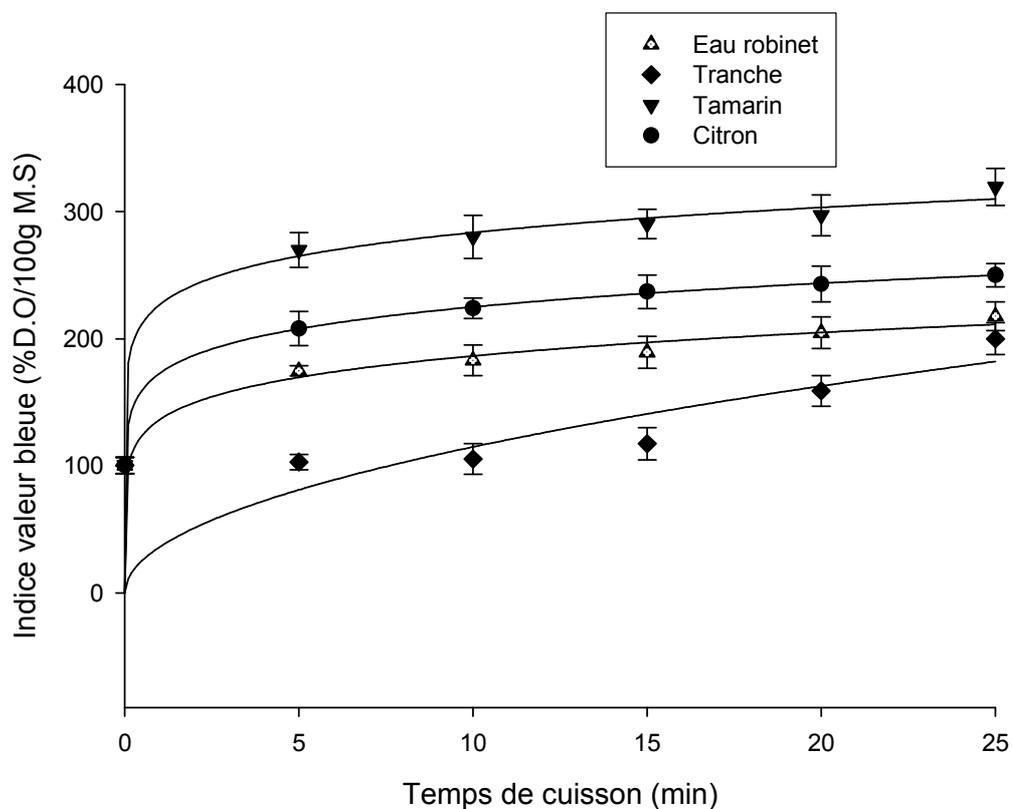


Figure 20: Variation de l'Indice Valeur Bleue en fonction du temps et du type de cuisson.

Etant donné que de nombreuses études ont attesté que les raphides d'oxalate de calcium sont responsables de l'irritation en taro (Bradbury & Holloway, 1988; Bradbury & Nixon 1998). Une évaluation de la teneur en oxalate de calcium pendant la cuisson a montré une réduction significative pour tous les modes de cuisson excepté la cuisson des tranches à la vapeur qui a montré une valeur constante. Des réductions semblables du taux d'oxalate de calcium pendant la cuisson ont été rapportées pour d'autres produits alimentaires (Savage *et al.*, 2000). Les résultats ainsi obtenus indiquent bien que la réduction de la teneur en oxalate ne justifie pas nécessairement l'inactivation de l'irritation.

La variation de l'indice valeur bleue (BVI) du taro pendant la cuisson est donnée sur la figure 20. Indépendamment des conditions de cuisson, le BVI de taro augmente de manière significative ($p < 0,05$) pendant les 25 minutes de cuisson. L'augmentation de l'affinité pour l'iode de l'amidon pendant la cuisson a été rapportée dans plusieurs travaux (Njintang *et al.*, 2003a; Iwuoha, 2004). Pendant les 5 premières minutes de cuisson, le BVI augmente rapidement dans le cas des tranches, suivi d'une stabilisation. Pour les autres modes de cuisson la valeur initiale de BVI est faible probablement à cause de l'épaisseur qui est élevée pour les tubercules comparée aux tranches et par conséquent un transfert de chaleur plus faible. À 25 minutes de cuisson, le BVI des tranches cuites et des tubercules cuits dans l'eau ont tendance à se rapprocher, comparativement aux tubercules cuits dans la solution acide qui présentent des valeurs de BVI plus faibles. Le BVI est un indicateur du degré de gélatinisation de l'amidon (Njintang *et al.*, 2003a) et comme tel les valeurs de BVI plus faibles observées dans le présent travail pour des tubercules cuits dans la solution acide suggèrent un degré de gélatinisation des

amidons faibles. On pourrait également penser que l'acide dans les solutions de tamarin et de citron aurait induit une hydrolyse de l'amidon menant à la diminution de l'indice BVI.

Les variations des indices des produits intermédiaires de la réaction de maillard (A280) et des indices des produits de réaction avancée de maillard (A420) sont présentées sur les figures 21 et 22 respectivement. Indépendamment de la méthode de cuisson, A280 et A420 augmentent linéairement et de manière significative ($r > 0,76$, $p < 0,001$) avec le temps de cuisson. On a observé une corrélation linéaire significative ($r = 0,60$, $p < 0,01$) entre A280 et A420 suggérant qu'à un niveau élevé des produits intermédiaires est associé une teneur élevée des produits de réaction avancés de maillard. Une observation importante à relever est la corrélation linéaire significative obtenue entre la teneur en protéines solubles et A280 ($r = -0,62$, $p < 0,01$) ou A420 ($r = -0,81$, $p < 0,001$). Ceci indique clairement l'implication des acides aminés ou des protéines dans le brunissement de maillards des tubercules de taro pendant la cuisson. L'implication des protéines dans le développement de la couleur pendant la cuisson a également été démontrée dans un système modèle fait de sucres et quelques acides aminés en solution chauffée à température élevée (Carabasa-Giribet et Ibarz-Ribas, 2000). Pendant les 15 premières minutes de cuisson, A280 augmente rapidement tandis que A420 présente une période de latence. Ceci semble évident puisque A280 est un indice de la réaction intermédiaire de maillard tandis que A420 est celui des produits avancés de la réaction de maillard. Carabasa-Giribet *et al.*, (2000) et Davies, Wedzicha, & Gillard (1997) dans leurs systèmes modèles ont trouvés un temps d'induction pour les deux absorbances A280 et A420 et selon ces auteurs, le temps d'induction dépend de la concentration et du type des sucres et d'acides aminés impliqués.

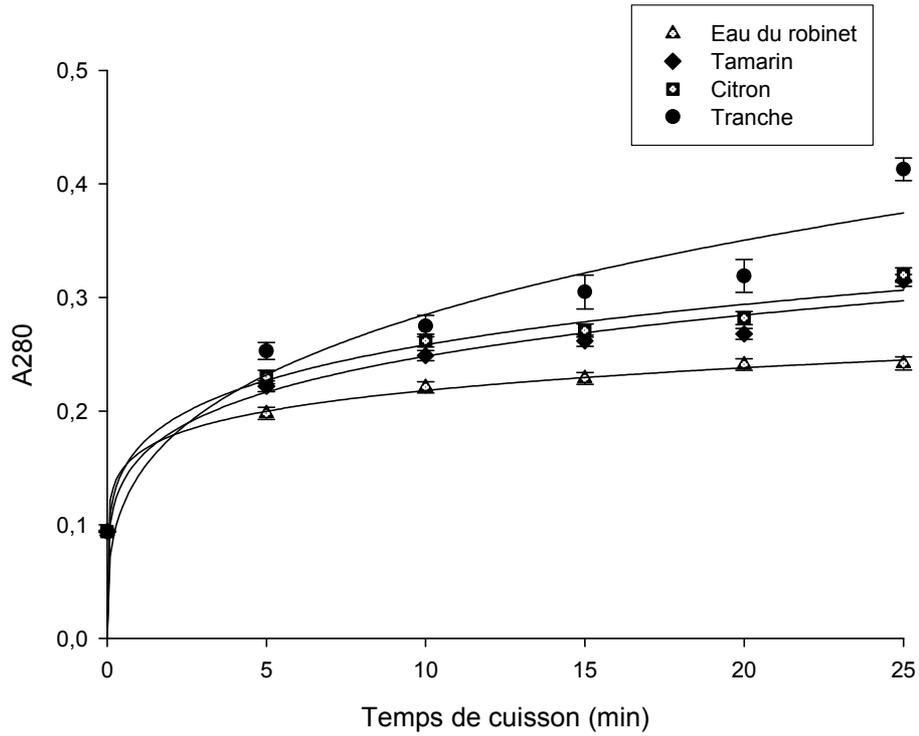


Figure 21: Variation de l'absorbance à 280 nm (A280) en fonction du temps et du type de cuisson.

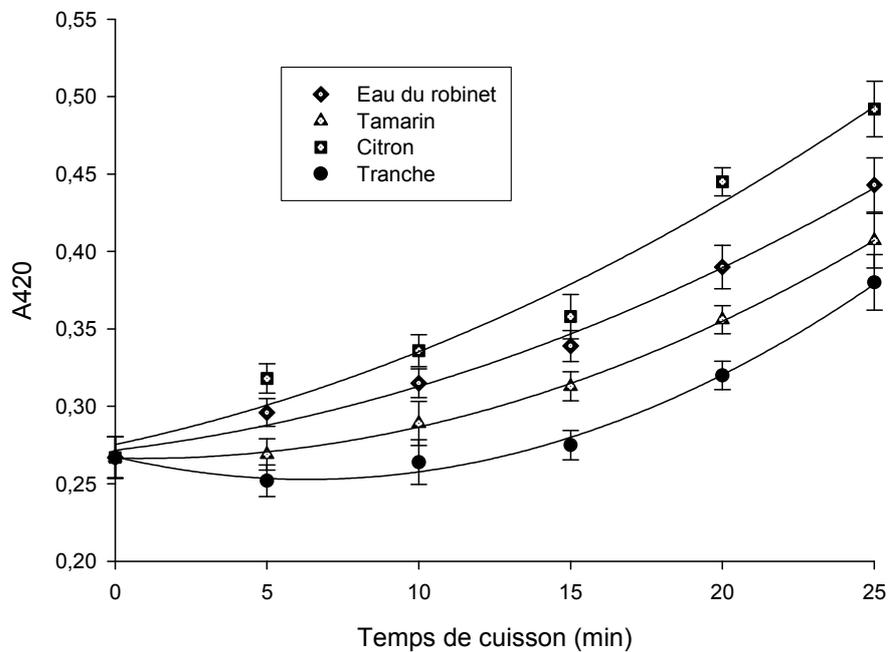


Figure 22: Variation de l'absorbance à 420 nm (A420) en fonction du temps et du mode de cuisson.

IV.2-2- Changements des paramètres de texture et des caractéristiques sensorielles

Les changements des caractéristiques physico-chimiques des tubercules ou des tranches de taro pendant la cuisson ont nécessairement pour conséquences des changements de dureté. La dureté étant le paramètre ultime qui est évalué pour décider du degré de cuisson du tubercule. L'effet du temps de cuisson sur la dureté est présenté sur la figure 23 pour les quatre modes de cuisson. Dans tous les cas, une diminution de la dureté avec le temps de cuisson a été observée, avec des variations significatives ($p < 0,05$) entre les modes de cuisson. En général, une diminution rapide de la dureté des tubercules apparaît entre 0 et 5 min de cuisson. Au delà de cette période, une variation faible de la dureté avec une tendance à la constance a été observée. Le taux de diminution de la dureté est relativement élevé pour la cuisson des tranches et faible pour la cuisson dans l'eau. La diminution générale de la dureté avec le temps de cuisson a été attribuée par quelques auteurs à la gélatinisation de l'amidon pendant la cuisson (Taiwo *et al.*, 1997). Ceci semble se vérifier dans le présent travail, du fait qu'une corrélation linéaire significative ($r = -0,62$, $p < 0,001$) a été observée entre l'indice de gélatinisation (BVI) et la dureté. En plus Sefa-Dedeh *et al.*, (1978, 1979) ont démontré que pendant la cuisson, la gélatinisation conduit généralement à une hydrolyse de l'amidon d'une part, et d'autre part que l'hydrolyse de l'amidon est associée au ramollissement des graines de haricot. Ceci semble être le cas dans le présent travail d'autant plus qu'une corrélation significative ($r = -0,75$; $p < 0,001$) a été observée entre la teneur en sucres réducteurs dans tubercules et la dureté. Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en protéines solubles a été corrélée à la dureté ($r = 0,51$, $p < 0,01$). Cette observation est en conformité avec les travaux de Nisha *et al.* (2006) qui ont suggéré que,

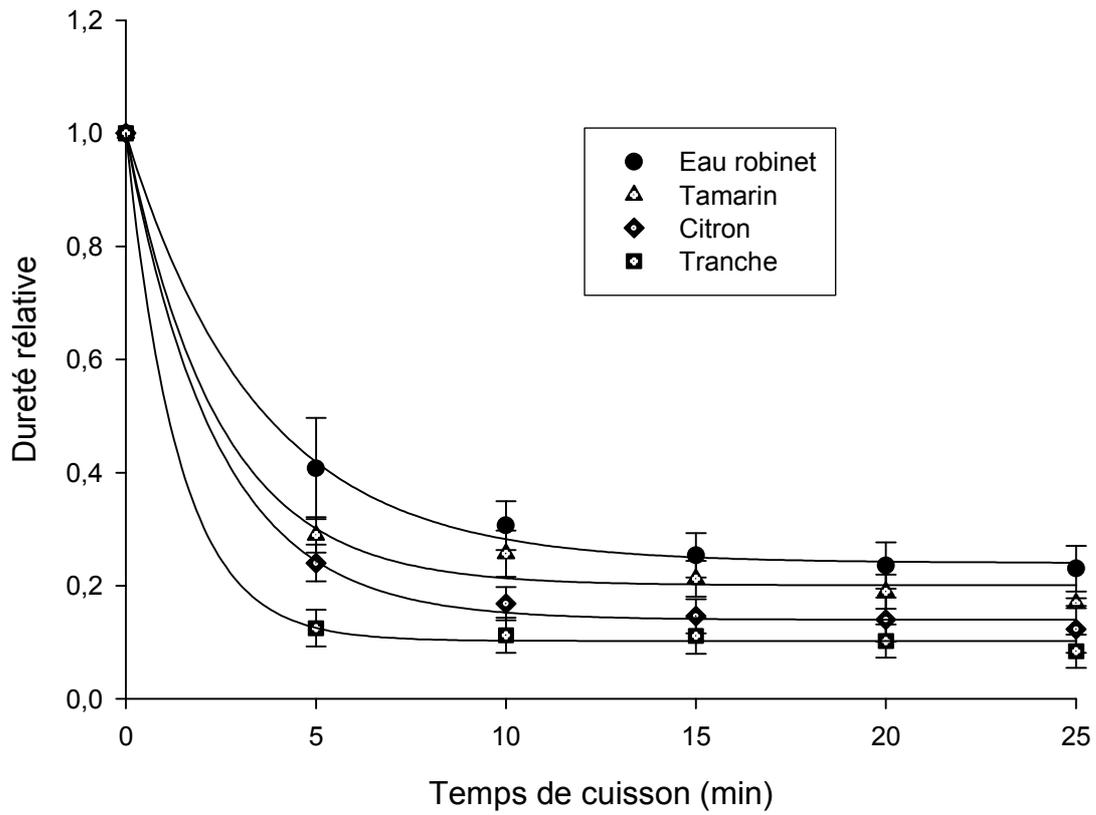


Figure 23: Variation de la dureté de différents modes de cuisson des tubercules de taro en fonction du temps de cuisson.

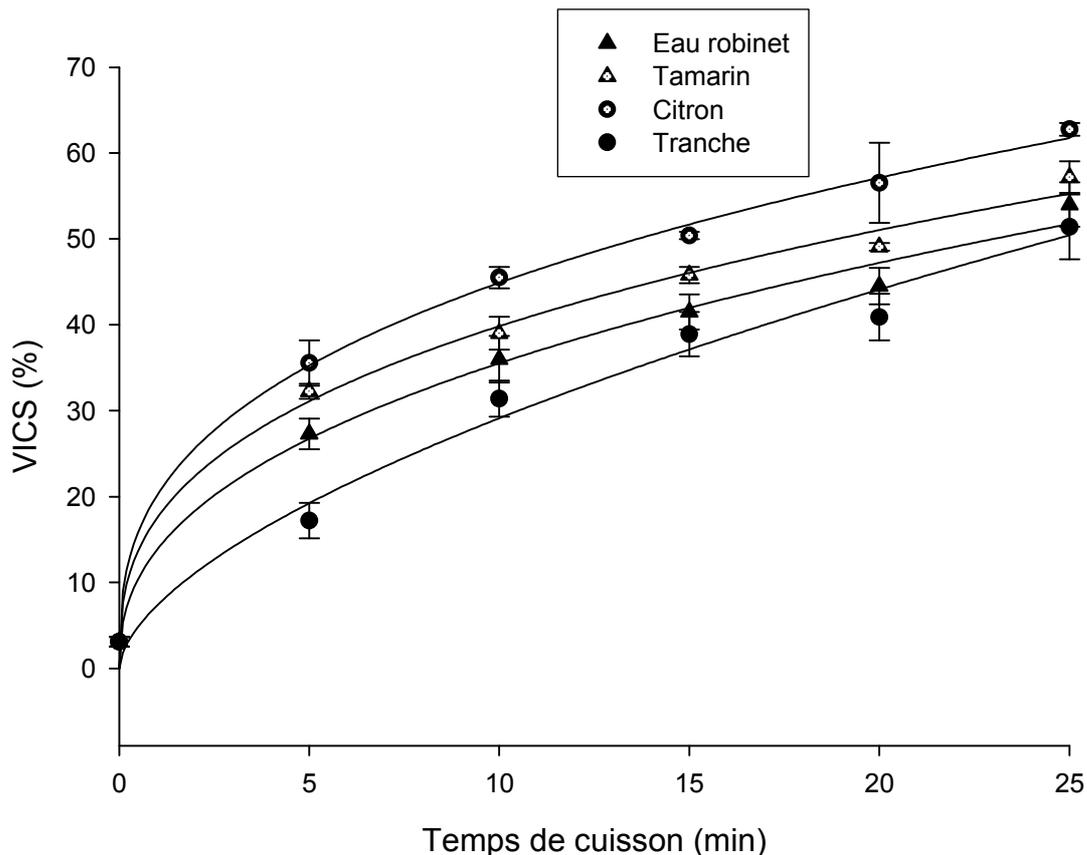


Figure 24: Variation des cellules séparées en fonction du temps et du type de cuisson.

la dénaturation des protéines pourrait être à l'origine de la tendreté des tubercules pendant la cuisson.

Un autre paramètre impliqué dans la modification de la texture pendant la cuisson est la séparation cellulaire (figure 24). En général le taux de séparation cellulaire (VICS) augmente significativement avec le temps de cuisson ($r=0,89$, $p<0,001$). La cuisson dans l'eau a montré une faible valeur de VICS, tandis que la cuisson à la vapeur a la valeur la plus élevée. La différence entre le VICS des tubercules cuits et celui des tranches cuites à la vapeur serait due probablement à la différence des épaisseurs, qui est plus élevée dans le cas des tubercules. Cependant, la différence entre les solutions de cuisson a montré que la cuisson dans l'eau permettait de conserver l'intégrité des tubercules comparativement aux

solutions acides. Ceci semble être en contradiction avec les rapports de BeMiller et Kumari (1972) qui pensent que la cuisson est généralement améliorée dans les conditions basiques dans la quelle la β -élimination des pectines (impliqué dans le ramollissement des tissus cuits) conduit à une rupture des liaisons glycosidiques. Selon ces auteurs une telle dépolymérisation est fortement favorisée par les pH alcalins, ce qui n'est pas le cas dans la présente étude qui a indiqué un ramollissement en solution acide. À l'opposé, l'augmentation du taux de séparation cellulaire élevé est en concordance avec les travaux de Parker, Waldron et Smith (2003) qui ont rapporté que les cuissons en solution acides favorisent la rupture des liaisons glycosidiques entre les polysaccharides dans l'espace intercellulaire. Globalement les modifications structurales majeures pendant la cuisson, rapportées Sefa-dede et al., (1979) et Waldron et al., (2003), sont généralement dues à la rupture des liaisons intercellulaires conduisant à la séparation des cellules, et le ramollissement. À cet égard, la corrélation linéaire significative observée dans ce travail entre le VICS et la dureté des tubercules ($r = -0,92$; $p < 0,001$) est complètement en accord avec ces derniers travaux.

En général, les présents résultats ont montré que plusieurs phénomènes sont impliqués dans le ramollissement du tubercule pendant la cuisson : la gélatinisation, l'hydrolyse de l'amidon et la dénaturation des protéines, la séparation cellulaire. Une analyse de corrélation linéaire multiple a été effectuée entre la dureté relative et les autres caractéristiques, telles que les sucres réducteurs, le BVI, les protéines solubles, les amidons résistants et le VICS tels que démontré par la corrélation linéaire multiple significative avec un coefficient de détermination $r^2 = 92,7\%$ ($p < 0,001$).

Dureté = 0,84 + 0,00587*Sucres – 0,00140*BVI – 0,0789*Protéines + 0,0275*Amidon résistants– 0.010109*VICS.

Dans cette relation, le coefficient associé aux sucres réducteurs n'est pas significatif suggérant que les sucres solubles joueraient un rôle moindre dans ce processus de cuisson.

Les analyses sensorielles ont montré qu'après 15 min de cuisson, la totalité des tubercules sont cuits. Les tranches par contre, sont cuites après 12 min. A ce temps spécifique de cuisson, les tubercules cuits dans les solutions de citron et de tamarin ont présenté un goût acide. De plus, les tubercules obtenus de ces deux modes de cuisson ont montré un arrière goût amer à 25 min de cuisson. En définitive, les tubercules obtenus par cuisson dans les solutions acides ont été moins acceptés par le panel suggérant que ces modes de cuisson seraient à proscrire dans le développement des farines.

IV.2.3-Conclusion partielle

La présente étude a montré que pendant la préparation des tubercules de taro, les propriétés physicochimiques et texturales varient en fonction du type de cuisson. La tendreté du tubercule résultant de la cuisson est une conséquence de mécanismes multiples impliquant la gélatinisation de l'amidon, la séparation cellulaire et la solubilisation des protéines. 12 min sont suffisantes pour atteindre la cuisson des tranches alors que ce temps est de 15 min pour la cuisson des tubercules. Les cuissons dans les solutions acides induisent des goûts acides et amers aux tubercules, montrant les limites de leur utilisation pour la production des farines de taro, matière première pour la préparation du «achu». La question que l'on se pose à l'issue de ce travail est de savoir quelle est l'influence de ces différents modes de cuisson sur les propriétés des pâtes. Est-ce que les différentes pâtes peuvent se rapprocher les unes des autres par leurs modes de reconstitutions ?

IV.3- Etude de l'influence du mode de cuisson des tubercules et du mode de reconstitution des pâtes sur le profil textural et l'acceptabilité de la pâte de taro

Le présent travail a été effectué avec pour objectif de caractériser les changements texturaux et sensoriels qui ont lieu dans le taro pendant la reconstitution de la pâte en achu sous l'influence des conditions de production de la farine (mode de cuisson) et les conditions de reconstitution de la pâte (cuisson sur la plaque chauffante, hors de la plaque chauffante, le but est de rechercher le meilleur mode de reconstitution de la pâte qui donne une pâte ayant des caractéristiques proches de la pâte traditionnelle.

IV.3.1-Composition chimique et propriétés physicochimiques des différentes farines précuites de taro.

La composition chimique des farines obtenues à partir des 4 méthodes de cuisson est présentée dans le tableau 8. En général l'analyse de variance montre une variation significative ($p < 0,05$) des différents paramètres analysés, à l'exception de la teneur en protéines qui ne varie pas de manière significative. La teneur en protéines se situe entre 3,35 et 4,45%. Les valeurs des protéines obtenues dans cette analyse sont inférieures à celles obtenues par Agbor-Egbe & Rickard (1990a) et Njintang (2003) sur les variétés similaires de taro. Cette valeur faible de la teneur en protéines pourrait s'expliquer par les provenances variées, et aussi la différence entre les méthodes d'analyses utilisées.

Tableau 8: Composition chimique et propriétés physicochimiques des différentes farines précuites de taro.

Echantillons	Eau robinet	Tranches	Citron	Tamarin
Protéines (g/100g M.S)	3,52±0,37	4,45±0,45	3,62±0,5	3,35±0,5
Cendres (g/100g M.S)	4,57±0,09 ^c	1,2±0,05 ^a	1,55±0,3 ^b	6,2±0,1 ^d
Sucres disponibles (g/100g M.S)	17,71±0,48 ^a	23,45±0,45 ^{bc}	22,02±0,95 ^b	25,37±0,48 ^c
Lipides (g/100g M.S)	1,58±0,2 ^c	0,413±0,05 ^b	0,26±0,04 ^{ab}	0,263±0,012 ^{ab}
Teneur en eau (g/100g M.S)	7,86±0,09 ^{ab}	6,59±0,85 ^a	7,09±0,02 ^{ab}	7,88±0,12 ^b
Amidons résistants (g/100g M.S)	7,40±0,63 ^c	7,93±0,08 ^c	4,51±0,4 ^b	1,72±0,5 ^a
Protéines solubles (g/100g M.S)	2,53±0,03 ^c	1,95±0,02 ^a	1,92±0,02 ^a	2,49±0,001 ^b
Sucres réducteurs (g/100g M.S)	5,05±0,39 ^a	4,89±0,13 ^a	8,09±0,39 ^b	9,03±0,48 ^b
Oxalates totaux (mg/100g M.S)	1,1±0,1 ^{ab}	0,86±0,1 ^a	1,4±0,2 ^b	1,0±0,1 ^a

Les valeurs ayant les mêmes lettres en exposant sur la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %

La teneur en eau quant à elle varie significativement d'un traitement à un autre avec la cuisson des tranches présentant la teneur en eau la plus faible. Les teneurs en eau obtenues sont très faibles, ce qui est favorable à la conservation. La teneur en eau faible obtenue dans le cas de la cuisson des tranches serait liée à la faible hygroscopicité des farines qui en résultent, conduisant ainsi à un équilibre d'humidité relativement plus bas. L'explication la plus probable est la gélatinisation qui serait plus faible dans ce traitement comparé à d'autres qui ont une quantité nécessaire pour assurer une gélatinisation plus importante de l'amidon dans le tubercule pendant la cuisson.

Les teneurs en cendres varient de manière significativement entre les différentes farines. La valeur la plus élevée est observée pour la cuisson du tubercule dans la solution de tamarin (6,2 g/100g M.S) tandis que la valeur la plus faible est observée dans la farine obtenue à partir des tranches. La valeur faible de la teneur en cendre observée dans la farine obtenue à partir des tranches pourrait s'expliquer par un transfert de minéraux de la pelure vers le tubercule. Cet effet serait d'autant plus important que l'eau contient des minéraux comme dans le cas des cuisson en solution tamarin et citron. De façon comparative les teneurs observées dans le présent travail sont supérieures à celles rapportées par Njintang (2003) sur le taro.

La teneur en sucres disponibles présentée dans le tableau 8 montre une variation significative ($p < 0,05$) d'un mode cuisson à un autre. La valeur la plus élevée (25,37 g/100g M.S) est observée dans la farine obtenue de la cuisson dans le tamarin tandis que la valeur la plus faible (17,71 g/100g M.S) est observée dans la farine obtenue par cuisson des tranches. Les valeurs élevées en sucres disponibles dans la farine obtenue à partir de la cuisson dans le tamarin pourraient s'expliquer par le fait que l'hydrolyse de l'amidon pendant la cuisson acide serait plus élevée tel qu'il a

été démontré au chapitre précédent à travers l'augmentation des sucres réducteurs. Il est également possible que l'augmentation des sucres disponibles se fasse à travers la diffusion des sucres de la solution de tamarin au tubercule, d'autant plus que cette solution présente un goût sucré. Cette observation est confortée par les travaux antérieurs (Souidy, 2002) qui ont montré une augmentation de la teneur en sucres disponibles des tranches de taro suite au trempage dans une solution de tamarin.

La teneur en lipides reste dans l'ensemble relativement basse, même si de variations notables sont observées entre les traitements avec la cuisson dans l'eau donnant une farine à la teneur en lipides la plus élevée et la cuisson en solutions acides les plus faibles. Ceci s'expliquerait encore par l'acide qui attaquerait les structures du tubercule et libérerait les lipides, dont le rôle essentiellement structural dans le tubercule de taro a été montré. Il est possible que ces lipides puissent jouer un rôle dans la structure de l'amidon par la formation de complexes lipides-amidon. En effet il a été observé une corrélation négative ($r=-0,52$; $p<0,05$) entre la teneur en lipides et la teneur en amidon résistant, montrant que la formation des amidons résistants est limitée par la présence de lipides. La teneur élevée en amidons résistants dans la farine produite à partir des tranches serait due à l'hydratation faible des molécules d'amidon conduisant à une gélatinisation faible. Il a en effet été démontré que la gélatinisation de l'amidon a lieu lorsqu'un seuil d'humidité est atteint (Njintang et Mbofung, 2003).

L'effet hydrolytique de l'acide sur l'amidon est sans aucun doute l'augmentation de la teneur en sucres réducteurs dans le tubercule. Malgré l'augmentation probable de lessivage qui pourrait survenir pendant la cuisson dans les solutions acides, on a observé que les farines qui en résultent présentent le taux de sucres réducteurs le

plus élevé. Il va de soi que l'augmentation de la teneur en sucres réducteurs entraîne une baisse de l'amidon résistant. A ce titre une corrélation négative ($r=-0,96$; $p<0,01$) a été observée entre la teneur en amidon résistant et la teneur en sucres réducteurs. Ce résultat déjà élucidé au chapitre précédent témoigne de l'effet hydrolytique de l'acide sur l'amidon dans les traitements au tamarin et au citron.

Quelque soit le type de farine, on a observé une influence du mode de cuisson sur la teneur en sucres réducteurs ($p<0,05$). La valeur la plus élevée (9,03 g/100g) a été observée dans la farine produite à partir de la cuisson dans le tamarin. Tandis que la valeur la plus faible (4,89 g/100g) a été observée dans la farine produite à partir des tranches. Ces observations corroborent avec les analyses faites précédemment sur les sucres disponibles. Toute fois ces valeurs restent supérieures dans l'ensemble à celles obtenues par Njintang (2003). La présence des sucres réducteurs pourrait être due aux phénomènes simultanés d'hydrolyse et de gélatinisation qui se produisent dans le tubercule pendant la cuisson (BeMiller & Whistler, 1997).

La teneur en oxalates totaux quand à elle ne varie pas significativement d'un traitement à un autre. Ces valeurs restent cependant dans la gamme de valeurs rapportées pour le taro (0,33-0,48 mg/100g matière fraîche) par Sefa-dede et Agyir-Sackey (2004).

Tableau 9: Composition en quelques minéraux des différentes farines de taro.

Echantillon	Ca (mg/100g M.S)	Mg (mg/100g M.S)	Na (mg/100g M.S)	Al (mg/100g M.S)	Fe (mg/100g M.S)	Mn (mg/100g M.S)	Zn (mg/100g M.S)	Cu (mg/100g M.S)
Tamarin	6,76±0,4 ^{ns*}	59,69±0,1 ^c	27,03±0,09 ^d	1,2±0,02 ^d	2,76±0,04 ^{cd}	4,16±0,03 ^d	24,87±1,1 ^c	1,2±0,02 ^c
Citron	5,5±0,3 ^{ns}	60,36±0,2 ^d	23,08±0,1 ^b	0,9±0,04 ^b	2,3±0,06 ^b	0,95±0,01 ^b	20,95±2,1 ^b	1,17±0,04 ^b
Tranche	5,75±0,2 ^{ns}	55,4±0,1 ^b	16,15±0,2 ^a	0,7±0,02 ^a	1,9±0,08 ^a	0,76±0,01 ^a	16,15±1,2 ^a	1,13±0,05 ^a
Eau robinet	6,6±0,5 ^{ns}	51,7±0,1 ^a	25,33±0,1 ^c	1,05±0,03 ^c	2,7±0,01 ^c	4,09±0,02 ^c	22,9±0,1 ^b	1,19±0,03 ^b

Les moyennes ayant les mêmes lettres en exposant sur la même ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %

*ns= non significative

Le tableau 9 présente la teneur en quelques minéraux des différentes farines de taro. On observe de manière générale un effet significatif ($p < 0,05$) du mode de cuisson sur la teneur en éléments minéraux. Dans cette étude le Magnésium est le minéral le plus abondant dans les farines, avec une teneur qui se situe entre 51,7 et 60,36mg/ 100g M.S tandis que l'aluminium est le minéral le moins représenté (0,7–1,2mg/ 100g M.S). Il faut cependant relever que l'élément le plus abondant dans le taro est le potassium qui n'a pas fait l'objet d'analyse dans le présent travail et dont la concentration est près de 20 fois supérieure à celle du magnésium (Sefa-Dedeh & Agyir-Sackey, 2004). Les analyses de variances ont montré en général une influence significative du mode de cuisson sur la teneur en minéraux, sauf le Ca qui ne varie pas significativement entre les différentes farines. Pour la quasi-totalité des minéraux analysés, la cuisson dans le tamarin donne des farines possédant les teneurs les plus élevées. Par exemple pour ce qui concerne Mg les valeurs les plus élevées ont été observées dans les farines obtenues par cuisson dans le citron et le tamarin alors que la valeur la plus faible a été observée dans la farine obtenue par cuisson dans l'eau du robinet. Il avait déjà été observé que le traitement dans le tamarin conduit à une augmentation significative de la teneur en cendres brutes. Il est donc très probable que ces minéraux représentent une fraction importante de cendres dans le tamarin, ce qui aurait conduit par diffusion à une augmentation de leurs teneurs dans les farines. De façon comparative, les teneurs en Ca, Mg, Na, Fe et Zn observées dans le présent travail sont dans la gamme de valeurs rapportées par Sefa-Dedeh & Agyir-Sackey (2004). Elles sont cependant faibles comparativement à celles obtenues par Agbor-Egbe & Rickard (1990a) sur *Colocasia* spp.

La Figure 19 représente l'isotherme de sorption des différentes farines. On peut observer sur cette figure que les isothermes de sorption des farines de taro ont montré des allures sigmoïdes typiques des formes des constituants alimentaires (isotherme de type II) (Iglesias and Chirife, 1982; Samaniego-Esguerra *et al*, 1991). La plupart des échantillons analysés ont montré une hystérésis entre la courbe d'adsorption et de désorption (Figure 26). À une humidité relative donnée, la teneur en eau à l'équilibre pendant la désorption est supérieure à celle pendant l'adsorption. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer cette hystérésis. Al Hodali (1997) a expliqué ce phénomène en considérant un matériau solide entouré de multiples orifices capillaires. Pendant l'adsorption, les capillaires commencent par se remplir à cause de l'augmentation de l'humidité relative, pendant que les pores sont encore vides. Lorsque la pression de vapeur de l'air devient supérieure à la pression de vapeur du liquide dans les capillaires, l'humidité entre dans les pores. Pour la désorption, les pores sont au départ, saturés en liquide. Ce liquide ne peut s'échapper que lorsque la pression d'air environnant devient plus basse que la pression de vapeur du liquide à l'intérieur du capillaire. Les résultats de l'analyse de régression non-linéaire pour adapter l'équation du modèle d'Oswin (Figure 27) à l'adsorption et la désorption, sont regroupés dans le tableau 10. Ces résultats montrent que, les paramètres A et B varient de manière significative ($p < 0,05$) avec le mode de cuisson. En général les paramètres A et B en désorption ne sont pas significativement différents de ceux en adsorption. En revanche on a observé un effet significatif du mode cuisson sur les paramètres avec la farine obtenue de la cuisson des tranches présentant la valeur A la plus élevée, et le traitement cuisson dans l'eau montrant le paramètre B (particulièrement en désorption) le plus élevé. Ce résultat suggère que la farine obtenue à partir de la cuisson des tranches est plus

hygroscopique comparativement aux autres farines. Ceci s'explique par le fait que du fait de leur épaisseur réduite les tranches ont pu bien gélatinisées.

IV.3.2- Propriétés rhéologiques des farines précuites et des pâtes reconstituées

Le tableau 10 montre aussi les variations des propriétés d'écoulement des farines. On peut y relever que la cuisson dans l'eau et à la vapeur donne des farines de cohésivité, compressibilité, angle de chute et densité aérée élevés comparativement aux cuissons dans le tamarin et le citron. La cohésion élevée pour les farines issues du traitement à l'eau de robinet se rattacherait aussi à la taille fine de leurs particules. Car pour certains auteurs (Lam et Newton, 1992), en dessous d'une certaine taille critique les particules ont tendance à se coller entre elles ou à adhérer à la surface qui les supporte, probablement à cause des forces d'attraction qui deviennent plus importantes par rapport à la pesanteur (Cheng *et al.*, 1968). Les différences observées dans l'écoulement des différentes farines traduisent ainsi les effets quasi-similaires du tamarin et du citron sur le tubercule au cours de la cuisson. Notamment nous avons montré au chapitre précédent que la cuisson dans les solutions acides entraînait un indice de gélatinisation faible. Or les travaux récents de Njintang *et al.*, (2006) ont relevé la relation positive entre le taux de gélatinisation et la densité des farines. Cela semble être le cas dans ce travail où les farines de degré de gélatinisation élevé (cuisson eau) présentent la densité la plus élevée. La cohésion plus faible dans les traitements acides traduirait également la rupture des liaisons entre les molécules (hydrolyse) dans la farine.

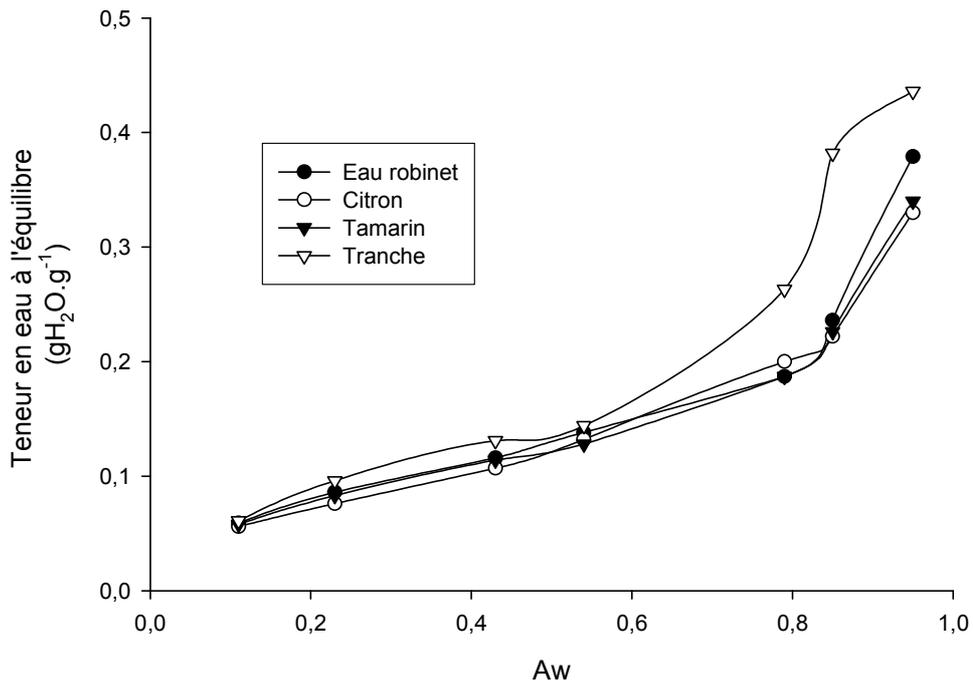


Figure 26: Isotherme de sorption des différentes farines de taro.

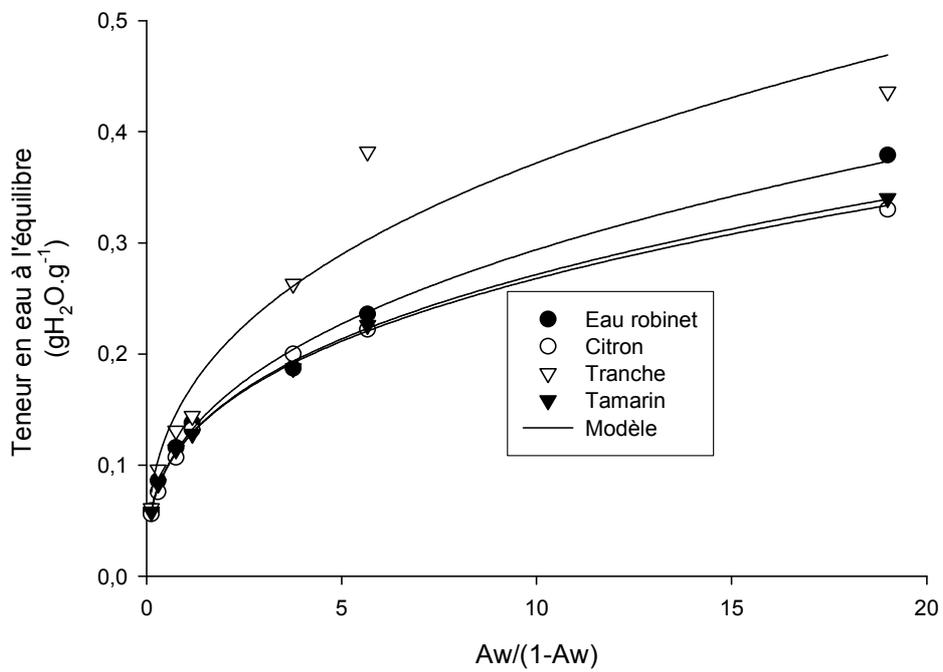


Figure 27: Modèle d'oswin $X_e = a(Aw/(1-Aw))^b$ des différentes farines de taro.

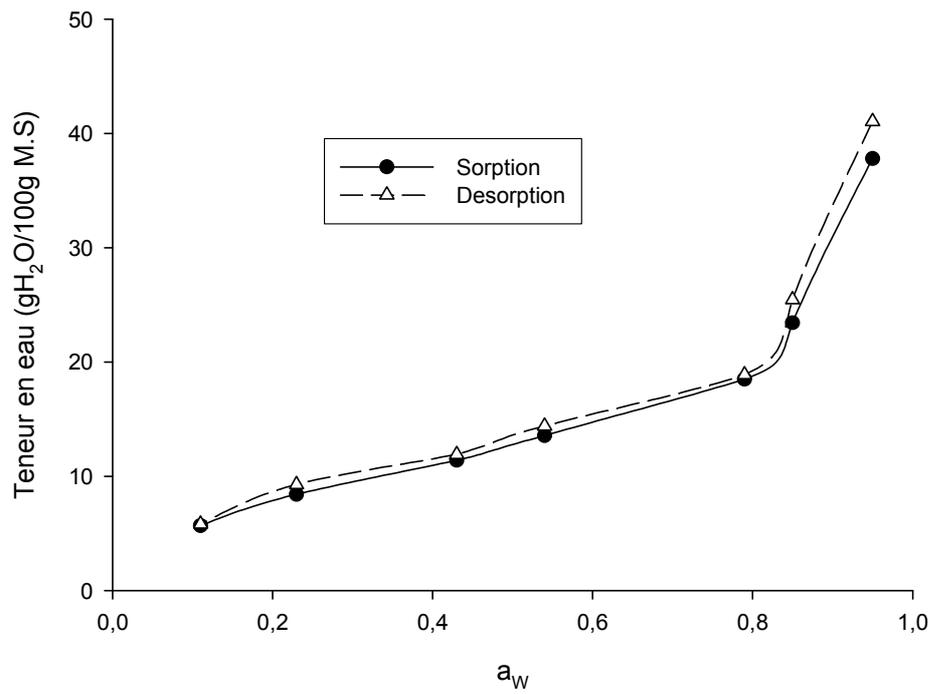


Figure 28: Isotherme de sorption et désorption de la farine obtenue par cuisson dans l'eau du robinet.

Tableau 10: Quelques paramètres rhéologiques et de sorption des farines de taro obtenues de différents modes de cuisson.

Paramètres	Type de cuisson				
	Eau robinet	Tranche	Citron	Tamarin	
Sorption cinétiques	Adsorption A	0,12±0,01 ^b	0,16±0,01 ^a	0,12±0,01 ^b	0,12±0,01 ^b
	B	0,37±0,01 ^a	0,36±0,01 ^a	0,35±0,01 ^a	0,35±0,01 ^a
Désorption	n A	0,13±0,01 ^c	0,17±0,01 ^a	0,13±0,01 ^c	0,13±0,01 ^c
	B	0,39±0,01 ^a	0,35±0,01 ^c	0,34±0,01 ^c	0,33±0,01 ^c
Angle de repos	17,8±0,2 ^c	19,6±0,2 ^a	18,4±0,1 ^b	16,3±0,3 ^d	
Angle de chute	66,3±0,2 ^a	57,3±0,2 ^b	52,0±0,0 ^c	50,6±0,2 ^d	
Densité aérée	0,69±0,00 ^a	0,66±0,01	0,52±0,00	0,63±0,00 ^c	
		0,89±0,01		0,89±0,01	
Densité comprimée	0,93±0,01 ^a	0,89±0,01	0,72±0,01 ^c	0,89±0,01	
Compressibilité (%)	25,6±0,4 ^a	25,1±0,2 ^a	24,8±0,2 ^a	25,0±0,2 ^a	
Cohésivité	89,6±0,3 ^a	83,7±0,1 ^b	80,7±0,4 ^c	81,4±0,1 ^c	

Les moyennes sur la même ligne ayant les mêmes lettres en exposant ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité 5 %

Les spectres infrarouges des différentes farines précuites de taro sont représentés sur la figure 29. Des pics remarquables sont observés dans les environs de 1649, 1550, 1456, 1417, 1240, 1157, 1080, 1022, 929, 852, 763, 707, 667, 576 et 526 cm^{-1} . Une bande extrêmement faible est apparue à 1722 cm^{-1} . Selon Silverstein *et al.* (1998), cette bande correspond aux groupements carboxyliques acides non ionisés COOH. Il a été montré que les ions carboxyliques présentent une forte bande entre 1635 et 1600 cm^{-1} , ce qui permet de distinguer les anions carboxylates des esters qui eux, présentent une bande moyenne entre 1420 et 1300 cm^{-1} . Les groupements de l'acide carboxylique exhibent aussi des petites bandes aux alentours de 1440-1210 cm^{-1} . La présence de ces bandes peut être associée à la présence l'acide uronique qui a été identifiée dans la structure des mucilages. Ces observations confirment la nature glucidique des farines qui a déjà été rapportée par de nombreux auteurs (Lin & Huang, 1993; Jiang & Ramsden, 1999; Njintang, 2003). En outre, il a été montré que les bandes situées entre 1649 cm^{-1} et 1550 cm^{-1} correspondent aux groupements amines primaires de déformation N-H, qui en association avec les fortes vibrations situées aux alentours de 1157 et 1080 cm^{-1} , correspondraient à celles des protéines. Les bandes à 1047 et 1022 cm^{-1} sont connues comme étant des bandes indicatrices des propriétés cristallines et amorphes de l'amidon respectivement. De plus, leur ratio a été indiqué pour la détermination du degré d'organisation de la structure de l'amidon dans la farine (Sevenou *et al.*, 2002; van Soest *et al.*, 1995). Nos résultats suggèrent que le degré d'organisation de la structure de granule d'amidon (cristallinité) a été affecté par le mode de cuisson, d'autant plus que le rapport des valeurs d'absorbance à 1047 et 1022 cm^{-1} varie de manière significative ($p < 0,05$) avec le mode de cuisson (Tableau 11). La farine obtenue par cuisson des tranches ont des faibles ratios (0,955) tandis que la farine

obtenue à partir de la cuisson dans l'eau du robinet a des valeurs les plus élevées (0,973). Entre ces deux extrêmes se trouvent les traitements acides qu'on peut encore visualiser sur les spectres infrarouges. Il est probable que le degré de cristallinité de ces poudres soit lié à leur degré d'hydratation (leur teneur en eau), et donc à leur hygroscopicité.

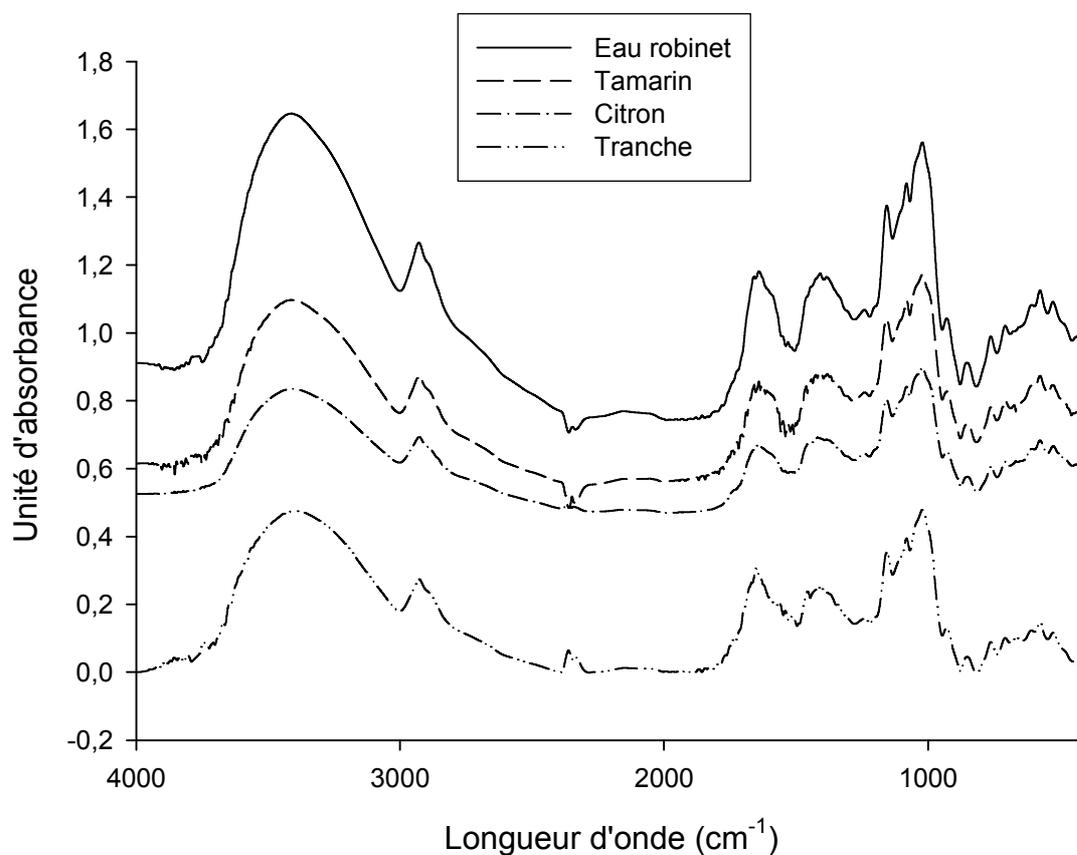


Figure 29: Spectres infra rouge des farines de taro.

Tableau 11: Effet de la cuisson sur des bandes sélectionnées et le rapport des bandes déterminé par la spectroscopie infrarouge de transformée de Fourier (FTIR) des farines de taro.

Echantillons	bandes infra rouges		Ratio des bandes
	1047 cm ⁻¹	1022 cm ⁻¹	1047/1022
Tranche	1,143±0,001 ^d	1,186±0,001 ^c	0,955±0,001 ^a
Citron	1,142±0,001 ^c	1,171±0,001 ^c	0,968±0,002 ^b
Eau robinet	1,097±0,001 ^a	1,127±0,001 ^b	0,973±0,001 ^c
Tamarin	1,084±0,001 ^b	1,133±0,001 ^a	0,957±0,001 ^a

Les moyennes ayant les mêmes lettres en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %

La capacité d'absorption d'eau (CAEa) définit souvent le caractère hydrophile de la farine. Comme on s'y attendait notamment à travers l'étude du spectre IR et des rapports I_{1047}/I_{1022} , les résultats ont montré que la farine obtenue à partir de la cuisson dans l'eau du robinet a une valeur de CAEa élevée (614g H₂O/100 g M.S), tandis que la farine obtenue par cuisson des tranches possède la valeur la plus faible (487,22gH₂O/100 g M.S). La valeur de CAEa élevée dénote de la plus grande aptitude de la farine issue de la cuisson dans l'eau à fixer de l'eau. Comme nous l'avons bien relevé plus haut, ceci serait la conséquence d'une plus grande gélatinisation des amidons dans ce traitement. L'indice de solubilité (ISE) quant à lui est plus élevée dans la farine obtenue par la cuisson des tranches comparativement aux autres cuissons, avec une valeur de 22,14 g /100 g M.S. On se serait attendu, au regard du développement mené plus haut indiquant que le traitement à la vapeur conduit à une gélatinisation plus réduite, que le traitement à la vapeur donne un

indice de solubilité plus faible. En effet les travaux récents de Njintang *et al.*, (2006) ont montré que l'indice de gélatinisation du taro augmente avec la gélatinisation. Cette différence peut se justifier par la diffusion des molécules solubles (amylose) qui se serait effectuée dans l'eau de cuisson.

La teneur en phénols totaux montre une variation significativement avec le mode de cuisson avec le traitement au tamarin donnant la teneur la plus élevée et le traitement à la vapeur la valeur la plus faible. Trois cas de figures peuvent être responsables de la variation observée sur la teneur en phénols. Le premier est celui où le tubercule a une teneur qui ne varie pas, ceci suppose qu'aucun échange n'a lieu entre le tubercule et le milieu extérieur. Ceci peut être le cas pour les tranches même si dans certaines conditions il a été montré que le chauffage induit des modifications sur la teneur en phénols (Walters *et al* 1996). Le second cas est la diffusion des phénols de l'intérieur du tubercule vers la solution de cuisson, si cette dernière a une teneur en phénols plus élevée que le tubercule de taro. Ce cas est probable dans le traitement au citron qui a induit une réduction significative de la teneur en phénols. Le dernier cas est celui où les phénols migrent de l'extérieur vers l'intérieur du tubercule. A cet effet la teneur en phénols a été élevée dans la cuisson à l'eau et au tamarin. La farine obtenue de la cuisson dans la solution de tamarin a une teneur de phénols particulièrement élevée du fait de la teneur de phénols élevée dans la solution. L'augmentation observée dans le traitement à l'eau de robinet serait liée à la pelure qui non seulement constitue une barrière à la sortie de composés, mais aussi en est une source. Dans ce contexte cette pelure serait fragilisée par les acides, notamment ceux du citron, conduisant ainsi à une baisse dans le traitement au citron. La diffusion des phénols vers la partie comestible du tubercule a l'inconvénient de colorer cette dernière. C'est probablement à ce titre qu'on a

observé une luminance (L) plus faible pour la farine issue du traitement au tamarin, même si globalement les farines ont des couleurs proches. Une corrélation positive ($R=0,82$; $p<0,05$) a été établie entre le paramètre b et la teneur en composés phénoliques, ce qui témoigne du rôle des composés phénoliques dans la couleur des farines. Des résultats négatifs du trempage dans la solution de tamarin sur la couleur des tranches de taro ont également été observés par Soudy (2000).

Tableau 12: Effet du mode de cuisson sur quelques propriétés physicochimiques de la farine de taro

Paramètres	Eau robinet	Vapeur	Citron	Tamarin
CEAr (%M.S)	614,04±5 ^c	487,22±18 ^a	535,53±10 ^b	534,77±10 ^b
ISE (% M.S)	12,18±0,2 ^b	22,14±0,1 ^d	9,69±0,4 ^a	14,66±0,1 ^c
Phénols totaux (% M.S)	176,9± 2,5 ^b	140,8±2,5 ^a	135,9±2,3 ^a	264,8±3,7 ^c
L*	87,57±0,24 ^b	88,32±1,04 ^b	86,3±0,34 ^{ab}	85,69±0,4 ^a
a*	-0,86±0,18 ^b	-0,7±0,1 ^b	-1,05±0,05 ^a	-0,83±0,02 ^b
b*	8,64±0,18 ^a	8,69±0,34 ^a	9,55±0,2 ^b	11,1±0,1 ^c

$P<0,05$; Les moyennes ayant les mêmes lettres en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %

Les propriétés d'écoulement des poudres conditionnent généralement les propriétés d'hydratation comme l'aptitude à absorber de l'eau ou à se solubiliser. C'est à ce titre que des corrélations significatives ont été observées entre d'une part l'ISE et d'autres parts la densité ($r=0,78$), la compressibilité ($r=0,73$), l'angle de chute ($r=0,80$), et la cohésivité ($r=0,90$). Toute fois, aucune corrélation entre la CAEa et ces paramètres n'a été observée. Toutes ces propriétés sont aussi déterminantes pour

les caractéristiques des produits qui en dérivent. Ainsi des effets significatifs aussi bien du mode de cuisson que du mode de reconstitution ont été observés sur les caractéristiques texturales des pâtes de taro faites à partir des farines qui sont la dureté, la cohésion, le gumminess, le modulus, la force de fracture, la consistance, la force d'adhésion et l'adhésivité. Ces variations rattachées à une analyse en composante principales ont permis de présenter une vue d'ensemble des similitudes et des différences entre les pâtes, et de ressortir des corrélations entre les propriétés de texture mesurées. La première composante principale (PC1) contribue pour 80% d'inertie tandis que la seconde composante principale (PC2) contribue pour 12%. PC1 est corrélée négativement à la plupart des variables mesurées sauf la cohésivité qui est elle corrélée à PC2. Le cercle de corrélation présenté à la figure 30 montre le rapprochement (indiquant une similitude) entre les paramètres cohésivité, modulus, force de fracture, consistance et force d'adhésion. Ceci montre qu'en réalité sur les 7 paramètres utilisés pour caractériser les pâtes, 3 seulement sont nécessaires à savoir la dureté, le gumminess et la cohésivité. Les deux premières permettent à elles seules d'expliquer près de 80% des variations observées dans les pâtes alors que l'adhésivité permet d'expliquer environ 12% de variation des pâtes. Lorsque les achus sont représentés dans ce système d'axe PC1xPC2, ils se regroupent en 3 lots distincts (figure 31). Le premier constitué du achu traditionnel, S68H, S68O, T68O, W68O et L68O présente la caractéristique de dureté élevée; le deuxième groupe constitué de la pâte W75H présente une cohésivité et une dureté très faible, enfin les autres pâtes présente une cohésivité faible. Au regard de cette structuration des pâtes, on peut relever que les pâtes reconstituées à partir de n'importe quelle farine (indiqué dans le code par L=citron, T=tamarin, W=eau et S=vapeur) hors de la plaque (indiqué O dans le code), à la teneur en eau 68 % (indiqué 68 dans le code)

se rapprochent de la pâte traditionnelle. Cette figure montre aussi que les pâtes de teneur en eau 68% se déplacent vers la gauche de l'axe CP1 témoignant de leur forte dureté. Ceci est évident et d'ailleurs démontré par de nombreux travaux (Njintang *et al.*, 2007, 2008), que plus une pâte est riche en eau moins elle est dure. Cette dureté ne semble pas être une caractéristique primordiale pour le taro d'autant plus que la teneur en eau du tubercule varie avec la saison, le temps de récolte et même la variété. Toute fois cette étude montre que la dureté est le paramètre qui varie le plus dans les conditions définies par ce travail. Parlant des conditions, la cuisson sur la plaque donne des pâtes qui se déplacent vers la droite de l'axe CP1, c'est-à-dire des pâtes de dureté faible. Ceci est aussi évident d'autant plus que la cuisson sur la plaque chauffante entraîne d'autres chauffages de la pâte, et donc une gélatinisation plus poussées tel qu'il a été démontré par Njintang (2003) dans sa thèse. Selon cet auteur, les amidons dans les farines sont plus exposées à la chaleur, gonflent plus sans contraintes texturales qui existent pour les amidons dans les tubercules, et donc éclatent en cas d'absorption d'eau importante. Ceci n'est pas le cas pour la reconstitution hors de la plaque ou le degré de gélatinisation de l'amidon est plus ou moins invariable. Il faut toutefois noter la particularité du traitement à l'eau, reconstitué à 75% d'eau sur la plaque qui présente une cohésivité particulièrement faible comparée à presque tous les autres qui ont une cohésivité moyenne. En particulier le achu traditionnel a une texture moyennement dure et gommeuse, très peu cohésive. De cette étude il ressort en définitive que les traitements sur la plaque doivent être évités et la teneur en eau à la reconstitution doit être de 68% voire 70% pour la cuisson dans l'eau.

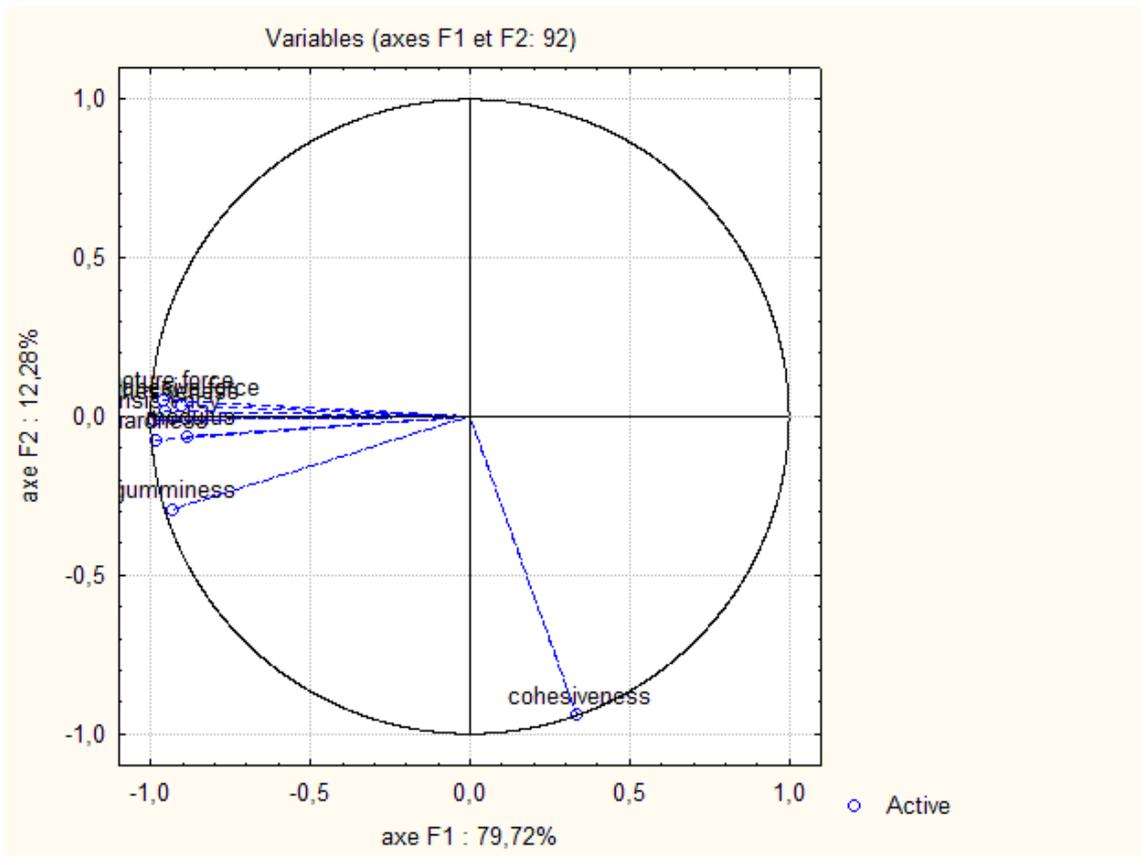


Figure 30: Coordonnée des descripteurs sur les axes F1-F2

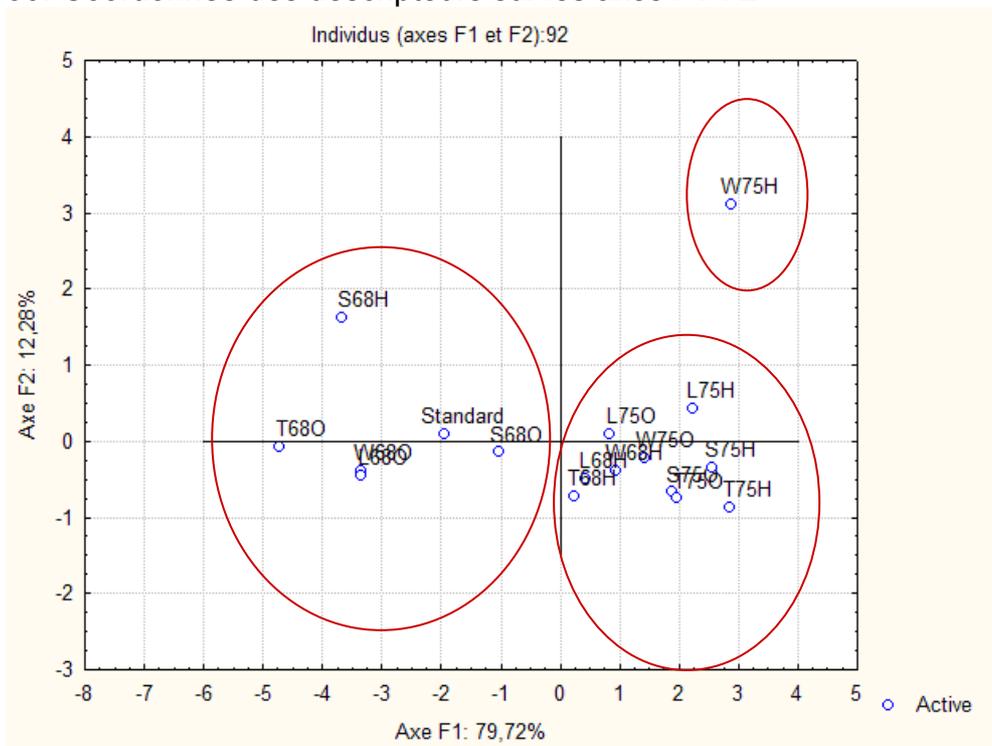


Figure 20: Différents échantillons de achu sur les axes PC1 PC2 W, S, L et T représentent les codes de cuisson dans l'eau, à la vapeur, dans le citron et dans le tamarin respectivement; sur (H) ou hors (O) de la plaque chauffante. 68 et 75, sont des teneurs en eau de reconstitution

Les paramètres de texture semblent être définis par les propriétés des farines, et c'est à ce titre qu'une forte corrélation a été observée entre l'ISE et les paramètres texturaux des pâtes. Plus précisément, l'ISE a montré une corrélation positive avec la dureté ($r=0,85$; $p<0,01$) et une corrélation négative avec la cohesivité ($r=-0,76$; $p<0,01$). Cette corrélation témoigne du lien qui existe entre le traitement utilisé et les paramètres texturaux du achu.

Le rapprochement entre le achu standard et certaines pâtes reconstitués, sur la base des paramètres de texture mesurés instrumentalement ne sauraient à eux seuls suffire pour dire que les objectifs ont été atteints. La perception du consommateur et son acceptabilité restent les derniers paramètres qui comptent et à ce titre une étude sensorielle descriptive et d'acceptabilité des pâtes a été effectuée. L'étude préalable qui visait à générer les paramètres descriptifs du achu a permis de produire 90 attributs différents avec 42 attributs liés à l'aspect, 10 à l'odeur, 14 à la flaveur et 23 liés à la texture (Tableau 13). Les descripteurs ont été sélectionnés après discussion avec les panélistes et en considérant seulement ceux cités par au moins deux des 14 panélistes. Une liste de 12 descripteurs a donc été choisie pour l'analyse descriptive du achu. L'ACP appliquée à ces données a permis de générer le cercle de corrélation présenté à la figure 32. Cette figure montre comme dans l'analyse de texture instrumentale deux composantes principales qui permettent de distinguer les achus. La première qui représente 71% de variation est constituée de la plupart des variables sauf fermeté et translucide qui sont quant à eux corrélés à la deuxième composante principale (10,17% d'inertie). Comme on peut bien le noter, le descripteur dureté, comme cela avait été le cas dans les analyses instrumentales, tient une part importante dans ces composantes et est significativement corrélée aux

autres paramètres de forces que sont, cohésion ($r=0,73$), élasticité ($0,87$), adhésivité ($r=1,00$). La dureté est aussi corrélée aux autres paramètres notamment granuleux ($r=0,57$), amertume ($r=0,94$), acidité ($r=0,91$), flaveur de taro ($r=0,83$), etc... Ces corrélations significatives justifient leurs rapprochements dans le cercle de corrélation.

Tableau 13: différents attributs générés à l'issu du profil sensoriel

Aspects	Odeurs	Flaveurs	Textures
Amorphe	Odeur du maïs	Peu salée	Pâteuse
Blanc brillant	Odeur fermentée	Manioc	Un peu sucrée
Blanc pâteux	Pâte cuite	Sucrée	Gommeuse
Blanc sale	Farine taro	Filant	Grumeuse
Blanc translucide	salée	Arrière goût sucré	Pas lisse
gris	Peu salée	Un peu bon	Bonne
Gris clair	inodore	Apre	Moins sucrée
Gris fin	Odeur du taro	Peu sucrée	Peu compact
Grisâtre dur	Farine cuite	Légèrement amer	Lisse
Grisâtre mou	Farineuse	Taro	Consistante
Grumeux		Arrière goût acide	Trop molle
Légèrement brun		Taro cuit	Moyennement salée
Légèrement compact		Légèrement sucrée	Acre
Légèrement granuleux		Fade	Visqueuse
Légèrement lisse			Gluante
Moyennement sombre			Compacte
Peu sombre			Ferme
Rigueux			Granuleuse
Très sombre			Tendre
Vitreux			Elastique
Brun			Collante
compact			Molle
Cristallin			Dure
Ferme			
Jaunâtre			
Blanc laiteux			
Blanc vitreux			
Blanchâtre			
Clair			
Granuleux			
Translucide			
Blanc			
Sombre			
Blanc sombre			
Brillant			
Brillant gris			
Gris foncé			
Légèrement sombre			
Grisâtre			
Noir			
Noirâtre			

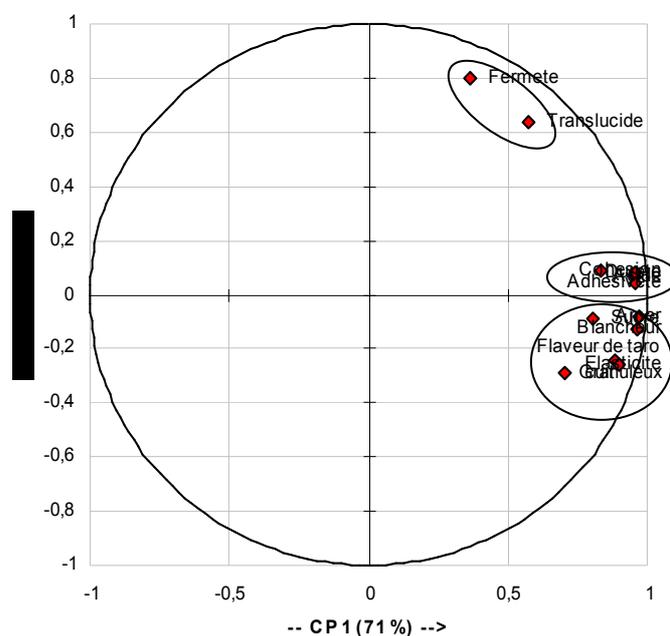


Figure 32: Cercle de corrélation des descripteurs des différents achu.

Lorsqu'on représente les différents échantillons de achu dans le système d'axes CP1xCP2, on obtient une organisation avec un démarcage net du achu traditionnel vers la droite de l'axe CP1, indiquant ainsi son caractère de dureté (et toutes les variables qui lui sont corrélées) élevée. On peut aussi remarquer que la plupart des pâtes s'alignent le long de l'axe CP2 montrant ainsi que les facteurs pris en compte dans la présente étude influencent particulièrement la fermeté et le translucide des pâtes. L'analyse de classification des achus par K-means a permis de définir 4 classes (tableau 14) dont les achus au centre des classes ont les caractéristiques présentées sur la figure 33. On peut y relever que le achu traditionnel est seul dans sa classe (classe2) et présente la particularité d'avoir les notes les plus élevées pour tous les descripteurs. En revanche les autres achus montrent des caractéristiques

assez proches avec des différences nettes pour les descripteurs fermeté et translucide, ces derniers étant élevés pour le achu classe 1 (très proche du traditionnel).

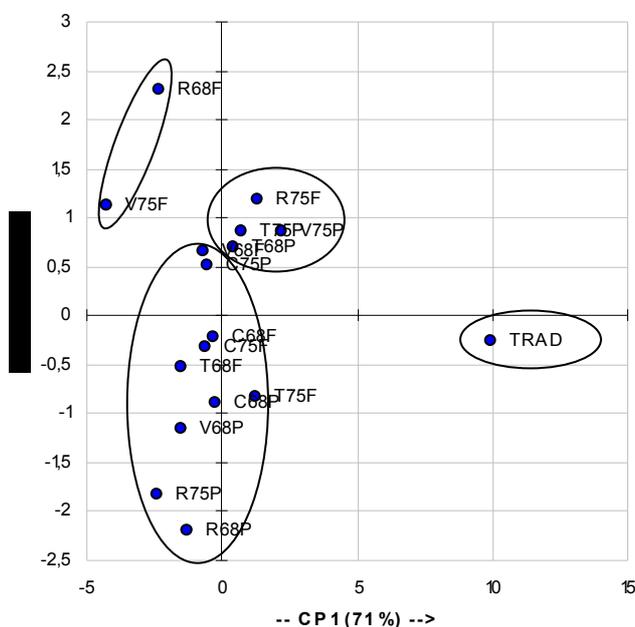


Figure 33: Différents échantillons de achu sur les axes CP1 et CP2, C, R, T, V, représentent les codes de cuisson dans le citron, l'eau du robinet, tamarin, à la vapeur respectivement; sur feu (F) ou sur paillasse (P). 68 et 75 sont des teneurs en eau de reconstitution.

Tableau 14: Différentes classes de achu sur la base de l'analyse K-means.

Classe	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
	R68F	TRAD	T68F	V68F
	V75F		R68P	T75P
			R75P	V75P
			V68P	T75F
				T68P
				R75F
				C75F
				C68P
				C75P
				C68F

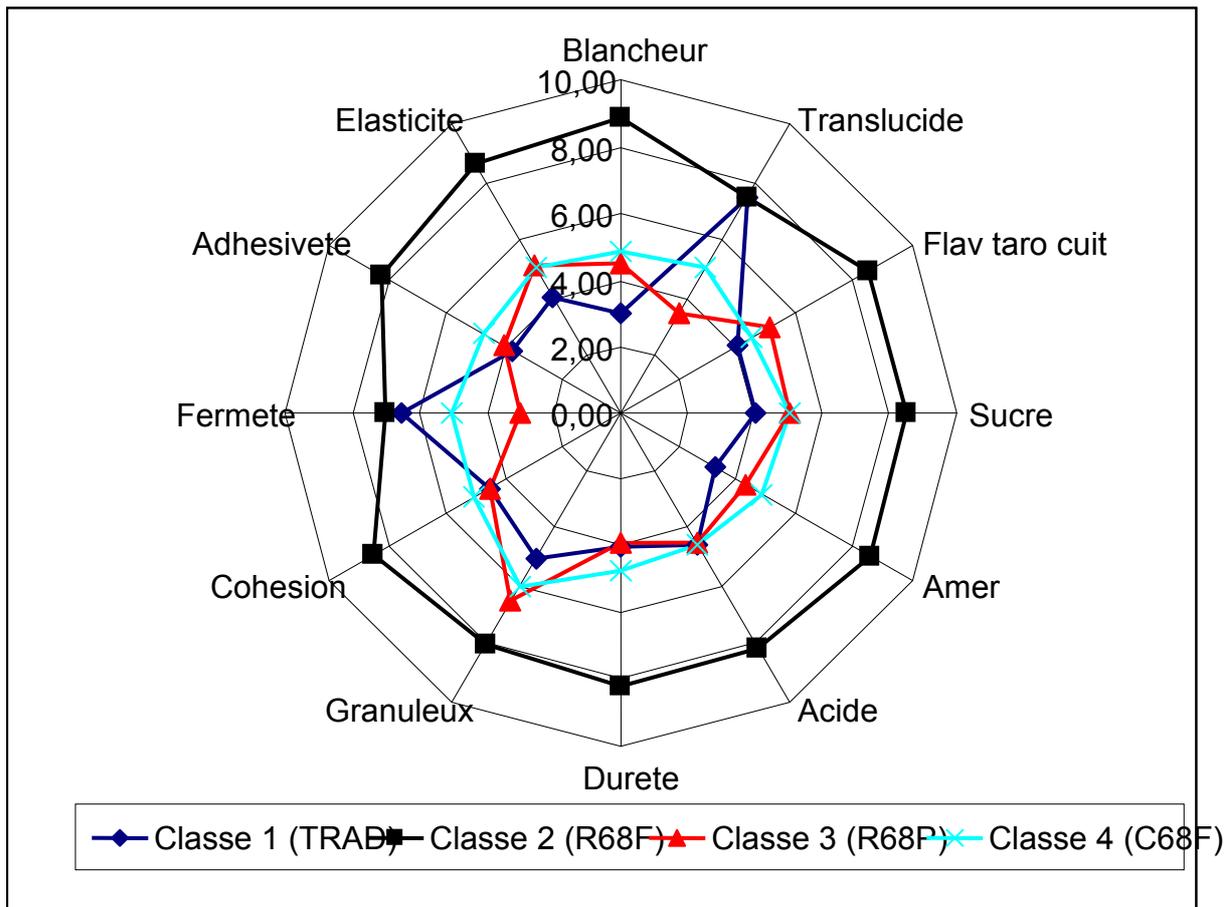


Figure 34: Caractéristiques des achus au centre des classes.

Il apparaît donc clairement de ces études que le achu fait à partir des farines n'a pas les caractéristiques sensorielles similaires à celles du achu traditionnel. Ceci ne veut certainement pas dire que le achu reconstitué n'est pas intéressant d'autant plus que les travaux antérieurs de Njintang *et al.* (2001) ont montré que les caractéristiques du achu traditionnel varient avec la variété, la saison, le temps de récolte et de stockage, alors que tous ces achus sont bien acceptés par les consommateurs.

L'analyse sensorielle a révélé que l'acceptabilité des achu varie d'un traitement à un autre avec le achu traditionnel montrant l'acceptabilité la plus élevée. Nous avons trouvé que l'acceptabilité générale dépend de l'acceptabilité de l'odeur, de la couleur et de la texture ; à cet effet, une corrélation significative a été observée entre l'acceptabilité générale et la couleur ($r=0,91$), l'odeur ($r=0,91$) et la texture ($r=0,93$). Les scores des différents achus présentés sur la figure 35 permettent de voir la spécificité du achu traditionnel qui est extrêmement aimé par le panel alors que les autres achus en général sont moyennement acceptés. Selon le panel, on peut améliorer la qualité des autres achus en éliminant les particules dures qui y sont présentes, l'amertume et l'acidité.

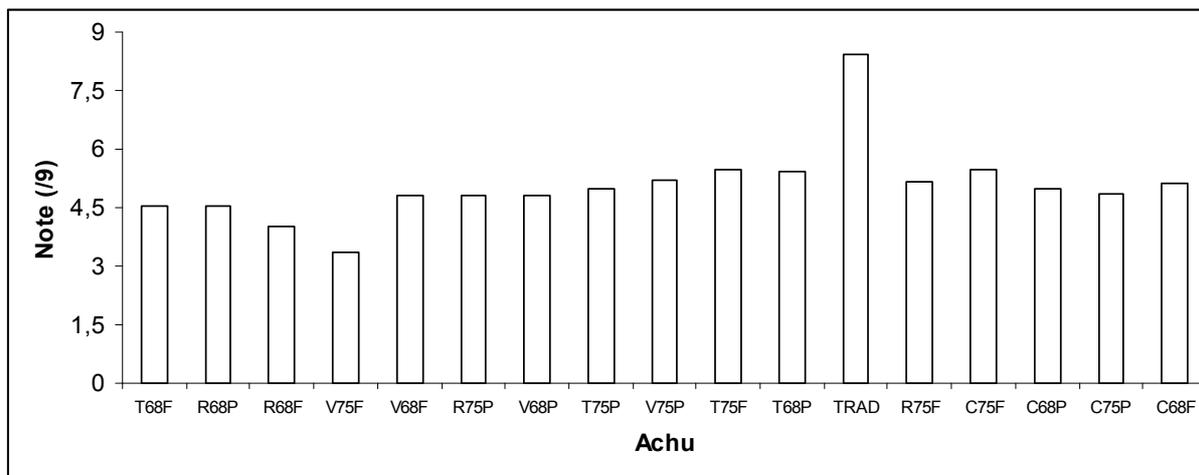


Figure 35: Acceptabilité des différents achu.

La présence de ces particules dures suggère que certains fragments n'ont pas cédé au broyage, probablement par ce que le broyage n'était pas fin ou encore que le séchage a favorisé le durcissement des cosettes en surface. L'amertume et l'acidité seraient plus liées à la solution utilisée (tamarin et citron). Il est judicieux d'éviter la

cuisson dans les solutions acides, et de définir les meilleures conditions de séchage. Il est très probable que les farines fines reconstituées à 75% d'eau donnent un achu bien accepté, ou mieux un achu aux propriétés proches du achu traditionnel.

IV.3.3-Conclusion partielle

Le présent travail montre que les différents modes de préparation ont une influence sur la composition des farines précuites. La farine obtenue à partir de la cuisson des tranches présente des valeurs les plus faibles en cendres, sucres disponibles et réducteurs, en minéraux. De même cette farine absorbe le plus d'eau (valeurs des constantes d'oswin élevées). Par contre la farine obtenue par cuisson dans l'eau du robinet est la plus dense et la plus cohésive. Le achu obtenu par reconstitution de la pâte à 75% d'eau, donne des caractéristiques texturales proches de la pâte traditionnelle. Mais l'analyse sensorielle a montré que toutes les pâtes reconstituées étaient granuleuses tandis que celles issues de farines cuites dans les solutions acides avaient des goûts acides ou amers. La présence des granules dans les pâtes reconstituées suggère que ces particules ont durcis pendant le séchage du à une mauvaise maîtrise des conditions de séchage. Il serait judicieux de déterminer les conditions favorables de séchage des tranches de taro pour obtenir une bonne pâte de « achu ».

IV.4- Prédiction du degré favorable de séchage des tranches de taro par l'utilisation des marqueurs analytiques et de la courbe de sorption.

Pendant les traitements de séchage et stockage, la réaction de maillard et l'oxydation des lipides ont été révélées comme des réactions majeures qui influencent aussi bien les qualités texturales qu'organoleptiques (couleur, la flaveur, et les modifications texturales) et nutritionnelles (Garned, 1979).

Dans l'optique d'optimiser les conditions de séchage pour avoir une bonne qualité et stabilité de la farine de taro, il est judicieux de déterminer la teneur en eau à laquelle le produit présente le moins de réaction de maillard.

Le présent travail consiste premièrement en la détermination de la teneur en eau monomoléculaire par l'utilisation des marqueurs moléculaires, ensuite de la comparer à celle obtenue par le modèle de sorption de BET, et enfin d'évaluer l'acceptabilité de la poudre obtenue dans ces conditions de séchage. Le but ici est de déterminer les conditions optimales de séchage et conservation de la farine de taro.

IV.4.1-Teneur en eau monomoléculaire théorique et expérimentale

La figure 36 présente l'isotherme de sorption des farines lyophilisées après 10 jours et 20 jours de vieillissement. Cette figure montre que les valeurs de teneur en eau après 10 jours et après 20 jours ne sont pas significativement différents. Ceci suggère que le temps d'incubation de 10 jours permet d'atteindre la saturation à l'humidité donnée. On peut également noter de ces courbes que entre les activités de l'eau 0,07 et 0,33, les teneurs en eau des farines augmentent de manière quasi linéaire pour atteindre la valeur de 7,2g H₂O/100g M.S. Après cette période on

observe une phase de stabilité pendant laquelle l'augmentation de l' a_w n'entraîne pas une augmentation de la teneur en eau. Cette valeur critique de 7,2 g H_2O /100g M.S est supérieure à la valeur (4g H_2O /100 g M.S) déterminée antérieurement sur la farine obtenue après séchage à l'étuve (Aboubakar, 2007). Cette observation pourrait se justifier par le fait que pendant le séchage par lyophilisation, le produit est très peu altéré comparé à l'étuvage.

La figure 37 présente la courbe de sorption suivant le modèle de BET. Dans la même optique, la teneur en eau monomoléculaire a été analysée par le modèle théorique BET. L'équation du modèle est représentée sur la figure 38. L'exploitation de cette équation a permis de déterminer la valeur de la teneur en eau monomoléculaire M_{1th} égale à 6,9 g H_2O /100g M.S.

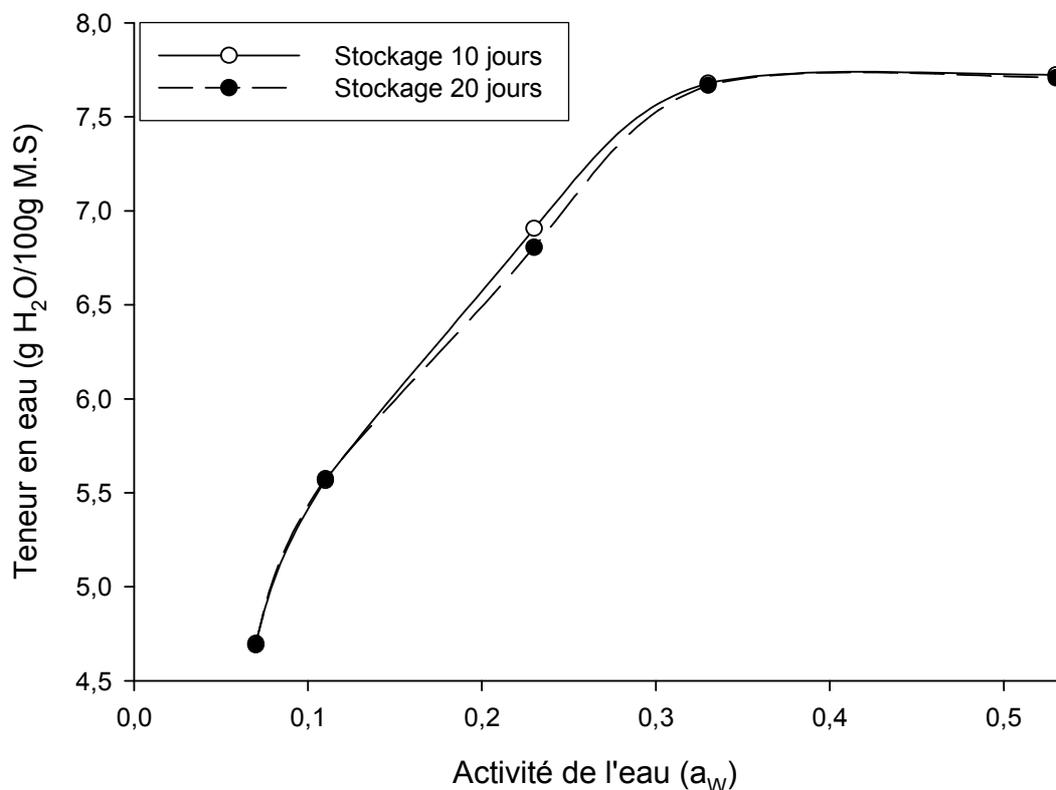


Figure 36: Isotherme de sorption de la farine de taro lyophilisée stockée après 10 et 20 jours de stockage.

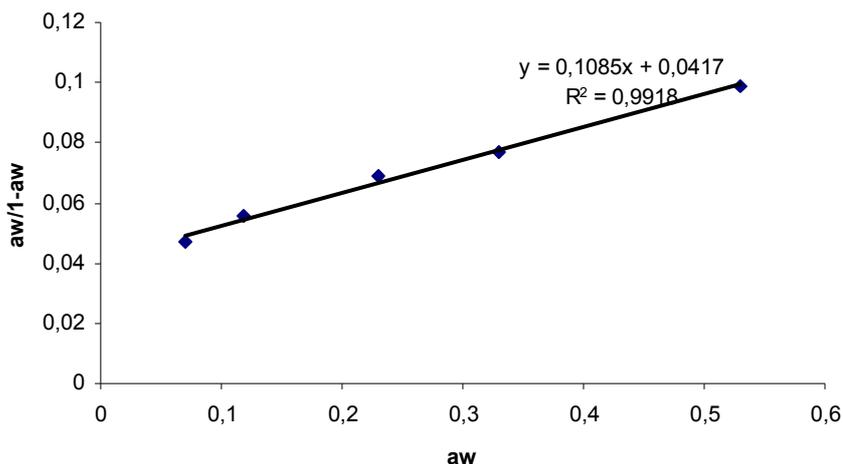


Figure 37: Forme linéaire de la variation de la teneur en eau avec a_w pour la détermination des constantes de sorption.

Lorsque l'on trace la variation de la teneur en carbonyls avec l'activité de l'eau (figure 38), on se rend compte que la teneur en carbonyls est minimale pour $a_w=0,26$, ce qui correspond à une teneur en eau de 7,2 g/100g. La variation de la teneur en malonaldéhyde présente quand à elle un minimum à l' $a_w = 0,36$, ce qui correspond à la teneur en eau de 7,6 g/100g. La figure 39 a permis de ressortir une comparaison entre le marqueur analytique (carbonyls) choisi avec l'un de ceux habituellement utilisé (malondialdéhyde) après 20 jours de stockage à 45°C. Les minima de variation observés permettent de penser que lorsque l'activité de l'eau est faible, la détérioration liée à l'action des glucides est plus importante. Par contre à des activités de l'eau élevées, l'action des lipides est plus importante. Ainsi, eu égard au fait que la farine de taro est faible en lipide et très riche en glucide, sa conservation se fera de manière plus aisée dans les activités de l'eau réduite. L'oxydation liée à l'action des malonaldéhydes n'aura pas un grand impact sur la qualité biochimique de la farine.

Les variations en carbonyles et malonaldéhydes montrent que les conditions de séchage meilleures se situent entre 7,2 et 7,6 g d'eau/100g de farines. Au-delà de ces valeurs, les teneurs en ces produits de dégradation des protéines, glucides et lipides augmentent de façon significative. Lorsque l'on compare la valeur expérimentale de variation de carbonyles à la valeur théorique déterminée par la méthode de sorption, on observe un rapprochement, ce qui indique que les carbonyles représentent assez bien un marqueur moléculaire de dégradation du taro pendant le séchage et le stockage.

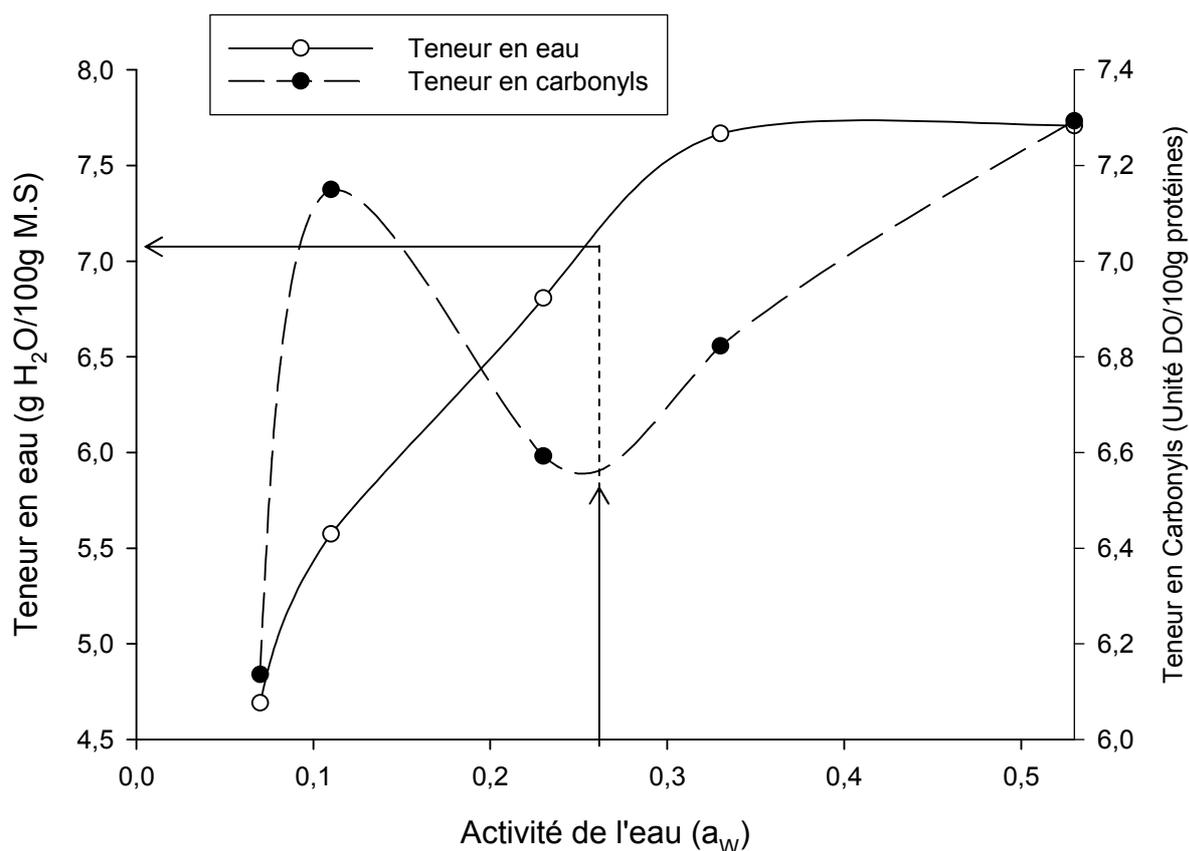


Figure 38: Détermination expérimentale de la teneur en eau monomoléculaire de la farine lyophilisée de taro : (→) a_w optimale, (.....←) teneur en eau optimale

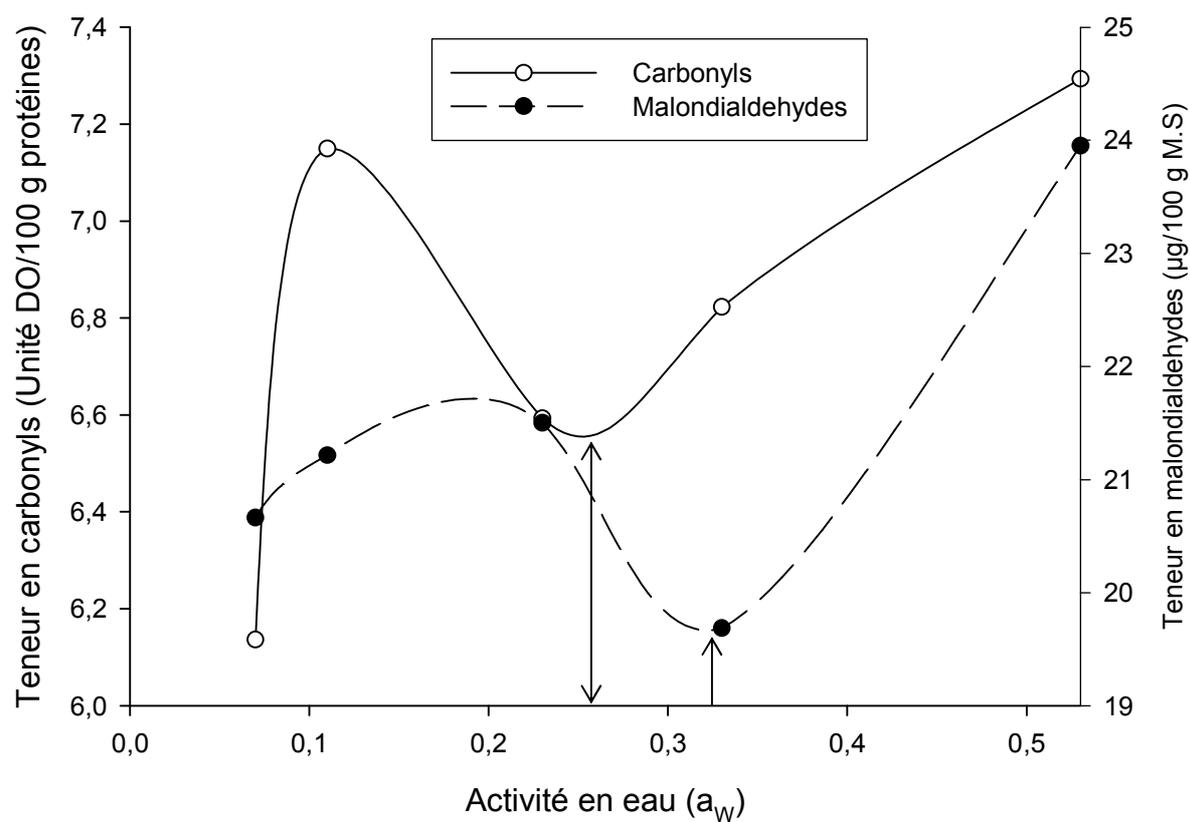


Figure 39: Comparaison du marqueur analytique (carbonyls) choisi avec l'un de ceux habituellement utilisé (malondialdehyde).

IV.4.2-Test d'acceptabilité de la farine de taro.

Les résultats de l'analyse sensorielle présenté dans le tableau 15, montrent que la teneur en eau influence de façon significative l'acceptabilité de l'aspect, ($p=0,010$), la saveur ($p=0,04$) et la texture ($p=0,003$) alors que l'acceptabilité de la couleur, l'acceptabilité générale avec ou sans la sauce ne varient pas significativement. En général le achu préparé à partir de la farine à 7-8% d'humidité est plus accepté pour son aspect, sa saveur et assez bien pour sa texture. Lorsque l'on compare l'acceptabilité du achu reconstitué au achu fait par la méthode traditionnelle, on se rend compte que le achu fait à partir de la farine à 7-8% d'humidité se rapproche le mieux. Le panel a conseillé d'effectuer un tamisage de la farine afin d'éliminer certaines particules et fibres.

Le test de consommation a touché la plupart des couches sociales. Les caractéristiques socio économiques des consommateurs sont présentées dans le tableau. On peut y relever tous les niveaux académiques et catégories socioprofessionnelles sont équilibrées.

De tous les consommateurs qui ont participé au test, tous connaissent le tubercule de taro et l'aiment bien. 52,6% consomment le taro moins de 7 fois par mois, 15,8% en consomment 7-10 fois par mois alors que 31,6% en consomment plus de 10 fois par mois. Ces observations permettent de dire que le panel choisit est habitué à ce tubercule. Pour ce qui est du achu, tous les panélistes connaissent et le préparent. Ce panel est d'autant plus intéressant que l'acceptation de la farine se fera comparativement à ce qu'ils aient l'habitude de préparer et consommer.

Tableau 15 : influence de la teneur en eau de fin de séchage sur l'acceptabilité du achu.

Achu	Aspect	Couleur	Texture	Flaveur	Acceptabilité générale sans sauce	Acceptabilité générale avec sauce
5-6%	5,00±1,78 ^{ab}	4,92±1,04 ^{ab}	5,62±1,71 ^c	3,54±1,66 ^c	3,62±2,26 ^b	4,77±2,74 ^b
7-8%	6,00±1,58 ^a	5,69±1,70 ^a	5,69±1,38 ^{bc}	5,31±1,65 ^b	4,85±2,15 ^b	5,75±2,27 ^b
Achu traditionnel	5,85±2,00 ^a	4,00±1,35 ^b	6,92±1,93 ^{ab}	6,92±1,32 ^a	6,73±1,36 ^a	7,69±1,38 ^a
10-11%	3,46±2,54 ^b	5,46±1,71 ^a	7,54±1,33 ^a	4,92±2,06 ^b	5,00±2,24 ^b	5,50±1,80 ^b

Les moyennes sur une même colonne, suivies d'une même lettre en puissance ne sont pas significativement différentes au seuil 0,05.

Tableau 16: Caractéristiques socio économiques des consommateurs

Age	Niveau académique	Statut matrimonial	Revenu mensuel	Catégorie socioprofessionnelle
age<35 52,6%	Primaire 10,5%	Marié 84,2%	<100 000 78,9%	Ménagère 47,4%
age<55 47,8%	Secondaire 57,9%	Non marié 15,8%	<200 000 5,3%	Employer 31,6%
	Universitaire 31,6%		>200 000 15,8%	Cadre 21,1%

Quand aux problèmes de préparation du achu, 84,2% pensent que le problème majeur est lié à la pénibilité de la préparation, 10,5% pensent que c'est le temps alors que 5,3% pensent à d'autres problèmes. Ces observations confortent encore d'avantage la problématique initiale qui a conduit aux recherches sur la farine actuellement en cours. En effet tous les consommateurs sont unanimes qu'une alternative de préparation de taro moins pénible et de courte durée favoriserait sa consommation.

Lorsque les farines ont été proposées aux consommateurs pour la préparation du achu à partir de la farine et de la notice d'utilisation, plus des 3/4 ont reconnu n'avoir aucun problème pour son utilisation (Figure 40A). Ce résultat permet de penser que l'utilisation de la farine de taro par certains ménages sera facilitée par des séances d'apprentissage. Des résultats sur l'acceptabilité du achu (Figure 40 B), il est apparu que plus de la moitié aiment très bien le achu reconstitué alors que 47% l'aiment bien. Ce résultat obtenu d'un panel qui connaît et consomme fréquemment le achu témoigne de sa bonne qualité et de bonnes propriétés de la poudre qu'il faut standardiser. Bien évidemment la plupart (95%) des consommateurs seraient prêts à acheter la farine si elle est commercialisée (Figure 40 C). La réticence des 5% de consommateurs est lié à la dénaturation de leur met qui représente un symbole. Mais il est probable qu'avec le développement social, ces produits s'intégreront bien également parmi les plus réticents. Mais un problème majeur qui pourrait être associée à la commercialisation de la farine est le prix psychologique (Figure 40 D) proposé par les consommateurs, à savoir 300-500 fcfa le sachet de 250 g. en effet au regard du compte d'exploitation d'une unité de production de 10,5 Kg de farine, il a été évalué un prix de revient de 2180 fcfa/kg soit environ 550 fcfa pour le sachet de 250 g (Azangue, 2007). Ce résultat montre que le pouvoir d'achat faible des

consommateurs est un point qui pourrait entraver le développement du marché de la farine de taro.

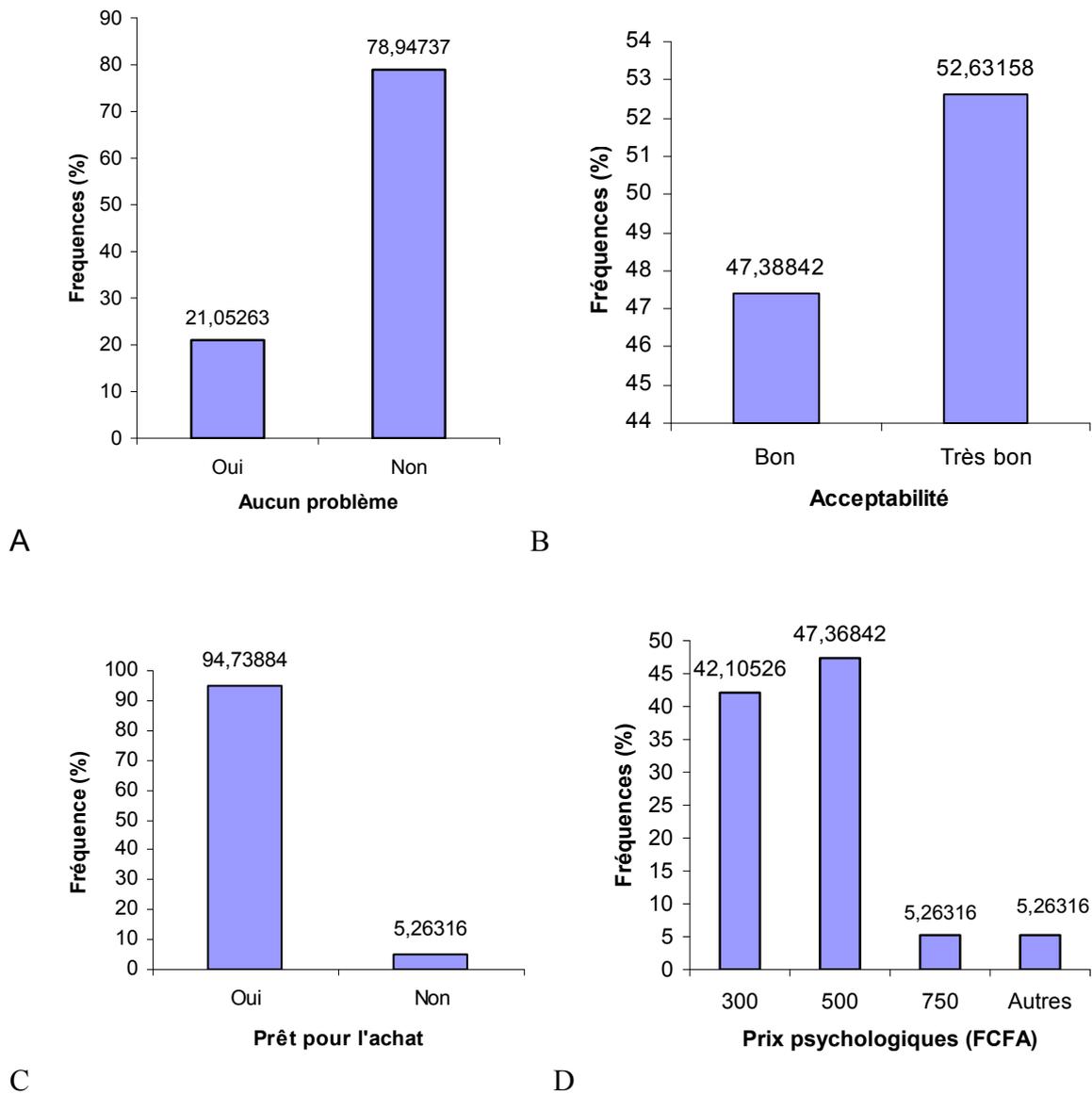


Figure 40: Tests de consommation au près des ménages.

IV.4.3-Conclusion partielle

La détérioration de la farine peut être analysée par la détermination des indicateurs biochimiques globaux. La méthode utilisant les carbonyles comme indicateur de détérioration de la farine de taro permet de déterminer la valeur de la teneur en eau où le produit présente un degré de dégradation faible. Cette teneur en eau est proche de la teneur en eau monomoléculaire déterminée par la méthode de BET. A cette teneur en eau, la farine montre une bonne acceptabilité auprès des consommateurs. Les consommateurs sont prêts à acheter la farine si elle est commercialisée. Mais toute fois, les facteurs limitant à cette commercialisation pourraient être le prix psychologique et faible pouvoir d'achat des consommateurs. La teneur en eau monomoléculaire ainsi déterminée permettrait-elle une conservation de la farine pendant une longue durée ?

IV.5-Etude des variations physicochimiques et rhéologiques de la farine de taro au cours du stockage.

Le présent travail a été effectué dans le but d'optimiser les paramètres de conservation de la farine de taro. Plus spécifiquement, il est question d'évaluer des variations physico-chimiques et rhéologiques des farines de granulométrie variable et des pâtes au cours du stockage.

IV.5.1-Variation de la composition chimique au cours du stockage

La composition des farines est donnée dans le tableau 17 . Aucune différence significative n'a été observée entre les différentes fractions de farines en ce qui concerne la teneur en eau, les cendres et les glucides totaux. La teneur en eau est proche de la teneur en eau mono moléculaire, favorable à la conservation. En revanche, on a observé une baisse significative ($p < 0,05$) de la teneur en protéines contre une augmentation significative de la teneur en lipides et amidons résistants avec l'augmentation de la fraction granulaire. A cet effet la fraction granulaire de farine $< 75\mu\text{m}$ a montré une teneur élevée en protéines ($1,47 \pm 0,01\%$) tandis que la fraction granulaire $< 250\mu\text{m}$ a montré une valeur faible ($1,28 \pm 0,02\%$). Ces résultats dénotent de la compartimentation intracellulaire importante des protéines de taro, contrairement aux protéines de structure qui se retrouvent généralement dans les grosses particules. Des teneurs élevées en protéines ont également été observées par Wang et Flores (1999) dans les fractions fines de farine de tortilla. D'autres auteurs (Lamberts, De Bie *et al.*, 2005) travaillant sur le riz ont reporté des variations similaires des taux de protéines. Ces derniers auteurs ont conclu par ces observations que les protéines ne sont pas distribuées de manière homogène dans l'endosperme du riz. Toute fois, il n'existe pas une relation linéaire entre la teneur en

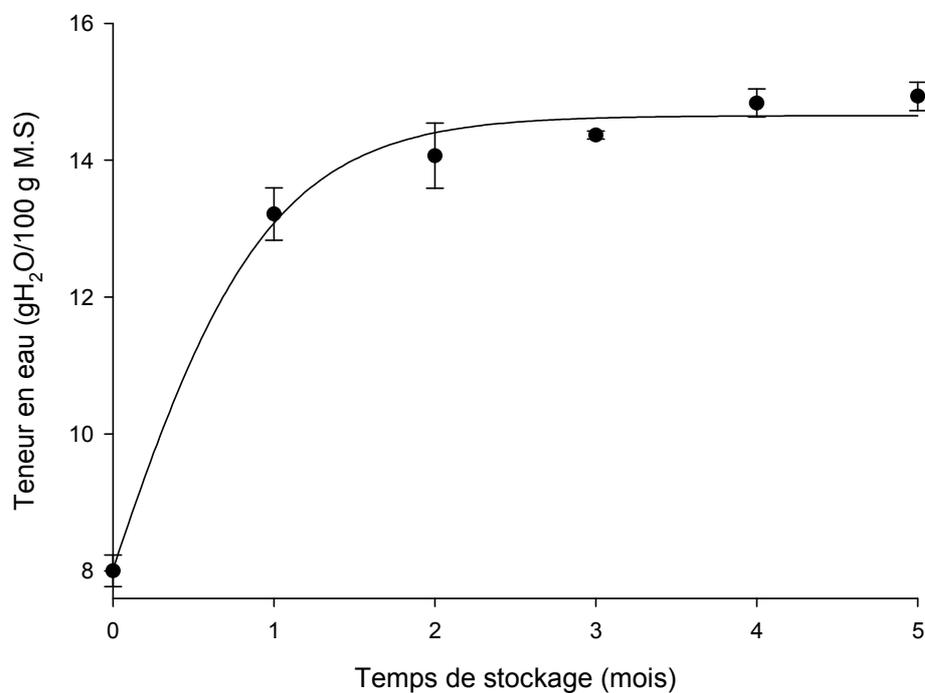
lipides et la fraction particulaire des farines. En effet les fractions $<150\mu\text{m}$ possèdent la teneur la plus élevée en lipides ($0,22\pm 0,001\%$), tandis que celles à $75\mu\text{m}$ possèdent la valeur la plus basse ($0,146\pm 0,002\%$). La teneur en amidons résistants quant à elle décroît en fonction de la taille de la farine de $2,26\pm 0,09$ pour la fraction $<250\mu\text{m}$ à $1,99\pm 0,09$ pour la fraction $<75\mu\text{m}$. Cette variation de la teneur en amidons résistants se justifierait par la formation de croûte sur la surface des tranches pendant le séchage, résultant de la déshydratation des sucres, et leur interaction avec les protéines. Pendant cette déshydratation on assiste généralement à une complexation et rétrogradation de l'amylose. En outre les interactions connues sous le nom de réaction de maillard entraîneraient la formation de complexes de haut poids moléculaires. Ces complexes se trouvent généralement dans les fractions particulières élevées et résistent généralement au broyage et à l'absorption d'eau. Il faut toutefois noter que la présence des lipides, à travers la formation des complexes lipide-amylose, est connue pour limiter les réactions de complexation et rétrogradation des amyloses. À cet effet, on a observé une corrélation linéaire négative et significative ($r=-0,52$; $p<0,05$) entre la teneur en amidon résistants et la teneur en lipides. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Wang & Flores (1999), qui ont montré que la teneur en amidons résistants de la farine de tortilla décroissait avec l'augmentation de la taille des particules. Toute fois la présence de l'amidon résistant à travers l'accélération du transit intestinal joue un rôle important dans le contrôle et la prévention de certains désordres métaboliques comme l'obésité, le diabète et le cancer du côlon (Qiang, Guelph, 2006).

Pendant le stockage, on a observé pour chaque fraction particulaire une variation significative des différentes caractéristiques de la farine. Pour ce qui est de la teneur en eau des farines, la courbe typique de variation est présentée à la figure 41.

Tableau 7 : Composition chimique des différentes farines de taro

	Taille (μm)		
	75	150	250
Eau (%)	7,56 \pm 0,18	7,42 \pm 0,33	7,99 \pm 0,07
Cendres (%)	5,37 \pm 0,03	5,46 \pm 0,03	5,52 \pm 0,01
Protéines (%)	1,47 \pm 0,01 ^b	1,31 \pm 0,02 ^a	1,28 \pm 0,02 ^a
Glucides (%)	92,31 \pm 0,56	89,67 \pm 0,92	89,71 \pm 0,7
Lipides (%)	0,146 \pm 0,01 ^a	0,224 \pm 0,01 ^b	0,221 \pm 0,003 ^b
Amidon résistant (%)	1,99 \pm 0,09 ^a	2,11 \pm 0,3 ^a	2,26 \pm 0,09 ^b

Moyenne \pm écartype; n=3 ; les valeurs sur une même ligne suivies d'une lettre en puissance ne sont pas significativement différents au seuil p<0.05.

**Figure 41:** Variation de la teneur en eau des farines au cours du stockage.

On peut y noter que la variation de la teneur en eau avec le temps de stockage a une allure hyperbolique avec une augmentation rapide durant les 2 premiers mois, suivie d'une saturation (humidité 15%). L'augmentation rapide de la teneur eau en début de stockage serait due au fait que ces farines ont été prégélatinisées avant le stockage, ce qui la rend plus hydrophile. Il est évident que cette variation dérive de l'équilibre qui cherche à s'établir entre la farine (activité de l'eau faible) et l'environnement (humidité et température variant avec les conditions). La variation de la teneur en eau s'applique bien à la cinétique d'ordre 1, à en croire les coefficients de corrélation obtenus (tableau 18). La constante cinétique d'absorption d'eau (k) et le temps de demi saturation ($t_{1/2}$) varient significativement avec le mode de stockage et la fraction granulaire. La constante cinétique, k , augmente lorsque la fraction particulaire baisse, alors que le temps de demi-saturation, $t_{1/2}$, baisse lorsque la fraction particulaire baisse. L'augmentation de la vitesse d'absorption d'eau avec la réduction de la taille particulaire pourrait s'expliquer par l'augmentation de la surface d'échange (Hogan *et al.*, 1968). Tous ces deux paramètres, k et $t_{1/2}$, varient de façon opposée avec le mode de stockage. En effet la constante, k , est systématiquement plus élevée pour les produits emballés et stockés en température de réfrigération et plus faible pour les farines non ensachées et laissées en température ambiante alors qu'un effet inverse est observé avec $t_{1/2}$. Cette variation opposée des deux paramètres s'explique simplement par le fait que plus la vitesse d'absorption d'eau est élevée, plus le temps pour atteindre la saturation est faible. Sur la base de ceci on constate aisément que l'emballage sous film de polyéthylène et stockage à la température ambiante et l'emballage sous film de polyéthylène et stockage à 4°C limitent la réhydratation des farines.

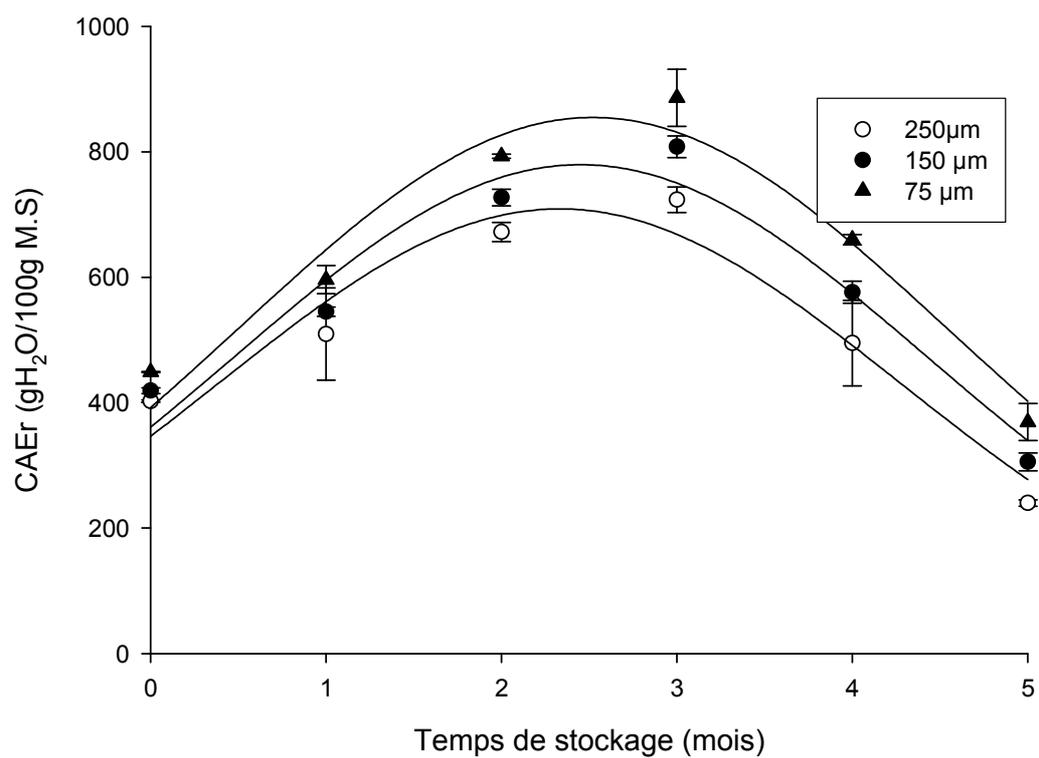
Tableau18: Constantes cinétiques d'absorption de l'eau des différentes farines de taro en fonction du stockage

Stockage	Taille (μm)	Constantes		
		$k(\text{mois}^{-1})$	$t_{1/2}$ (mois)	R^2
SOBAT	75	$0,809 \pm 0,083$	0,81	0,84
	150	$0,667 \pm 0,029$	1,04	0,96
	250	$0,634 \pm 0,038$	1,09	0,98
SSBAT	75	$0,462 \pm 0,1$	1,5	0,86
	150	$0,332 \pm 0,1$	2,08	0,84
	250	$0,296 \pm 0,073$	2,34	0,77
SSBRT	75	$0,287 \pm 0,07$	2,41	0,99
	150	$0,21 \pm 0,027$	3,3	0,97
	250	$0,179 \pm 0,013$	3,87	0,97

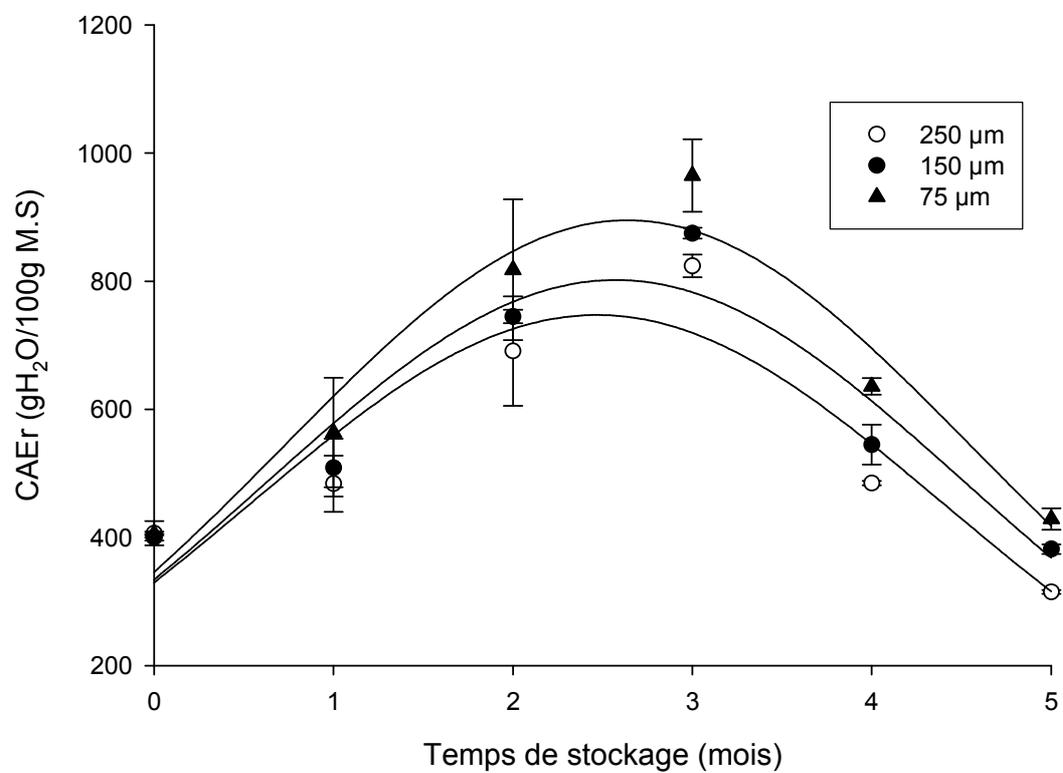
SOBAT=stockage en température ambiante; SSBAT = emballage sous film de polyéthylène et stockage à la température ambiante; SSBRT= emballage sous film de polyéthylène et stockage à 4°C.

La variation de la capacité d'absorption d'eau réelle (CAEr) des farines, pendant le stockage, est représentée sur la figure 42. La courbe est d'allure gaussienne avec un maximum d'absorption entre le 2^{ème} et le 3^{ème} mois (figure 42). Après cette période, on note une baisse totale de CAEr. Comme dans le cas de la teneur en eau des farines, les farines ayant de petites particules (75 µm) absorbent beaucoup d'eau comparativement aux farines de grande taille (150µm et 250µm). Des courbes similaires ont été observées pour ce qui concerne l'indice de solubilité dans l'eau (ISE). Des variations similaires de la CAEa et de l'ISE avec la taille particulaire ont été obtenus par Hogan *et al.*, (1968), qui ont expliqué ce phénomène par l'augmentation de la surface spécifique de fixation d'eau des petites particules.

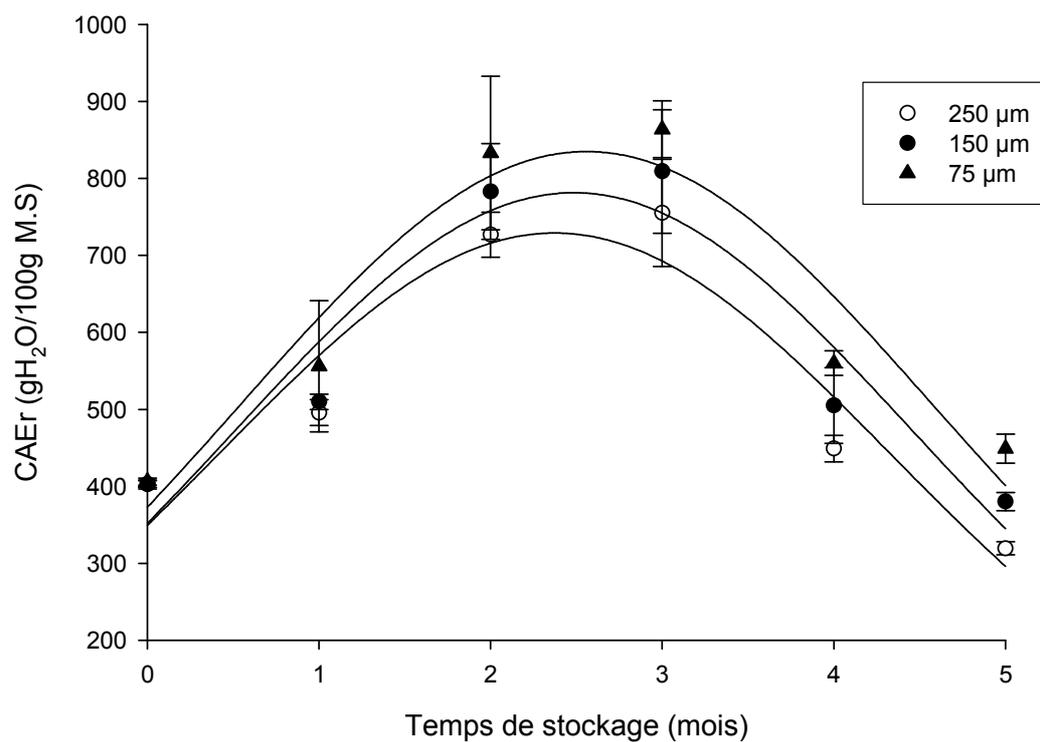
La figure 43 montre la variation type de la teneur en amidons résistants au cours du stockage. Elle indique que la formation des amidons résistants augmente en fonction du temps de stockage avec des valeurs systématiquement élevées pour les grandes fractions particulières. Cette élévation est accentuée dans le cas des farines SOBAT ($2,05 \pm 0,134 \text{ mois}^{-1}$) que dans le cas des farines SSBRT et SSBAT ($0,223 \pm 0,04$ et $0,389 \pm 0,2 \text{ mois}^{-1}$). Mais toute fois, la valeur élevée en amidons résistants a été observée dans la farine SOBAT ($5,78 \pm 0,15 \text{ g/100 g M.S}$). Cette valeur élevée serait liée à la technique de cuisson et aux conditions de stockage de la farine par le biais de la rétrogradation. Ce résultat est comparable à ceux obtenus par plusieurs auteurs Asp, (1995); Englyst & Hudson, (1996); Englyst, Kingman, & Cummings, (1992); Goni *et al.*, (1996); Siljeström *et al.*, (1989); Muir & O'Dea, (1992) sur la farine du blé, les céréales du petit déjeuner, le riz précuit, la farine composé de blé et du *parota*, l'avoines et la banane respectivement.



A



B



C

Figure 42: Variation de la CAEr en fonction du temps de stockage et en fonction du mode de stockage (A-non scellé et stocké à la température ambiante (SOBAT) ; B-sachet en polyéthylène scellé et stocké à la température ambiante (SSBAT) ; C-sachet en polyéthylène scellé et stocké dans un réfrigérateur à 4°C (SSBRT).

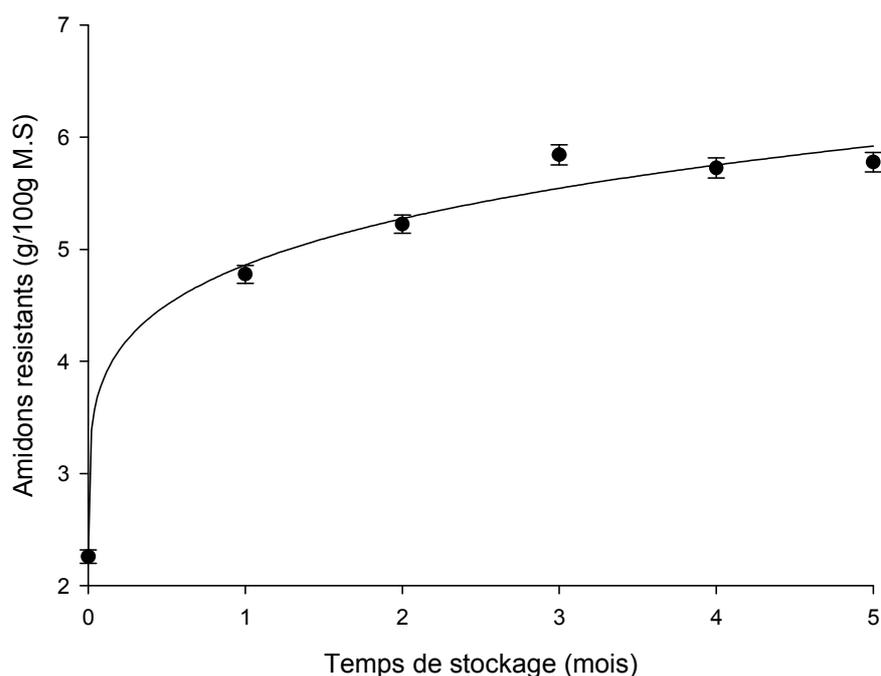
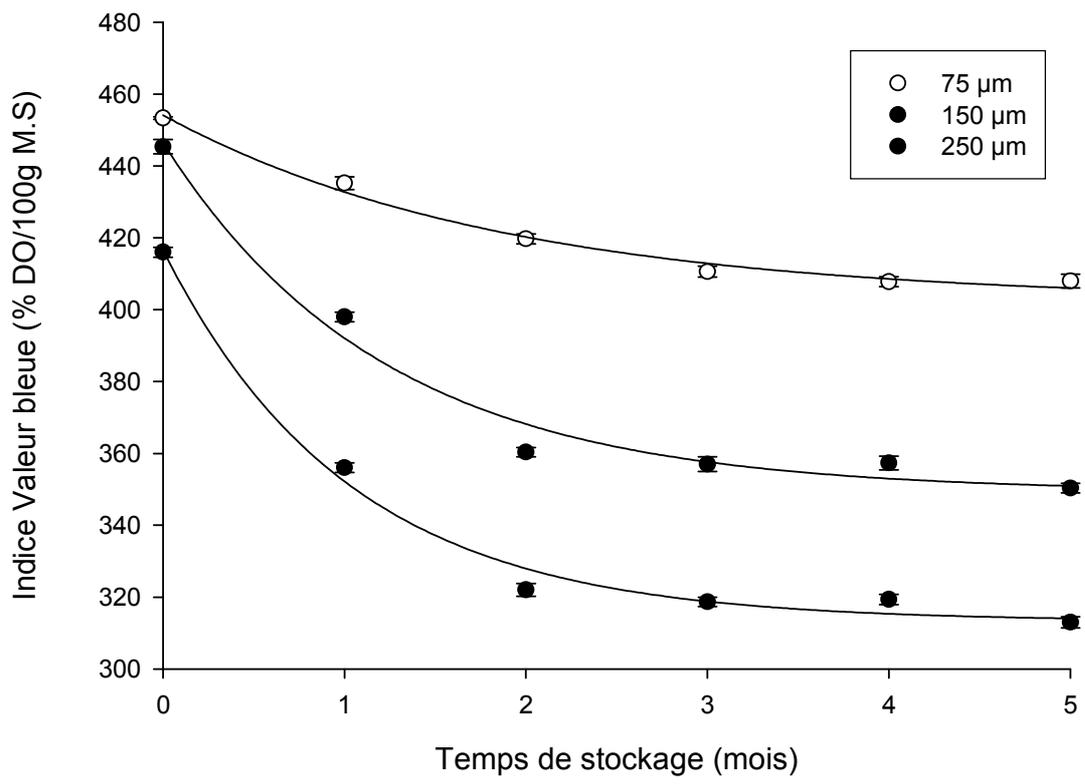


Figure 43: Variation des amidons résistants en fonction du temps de stockage.

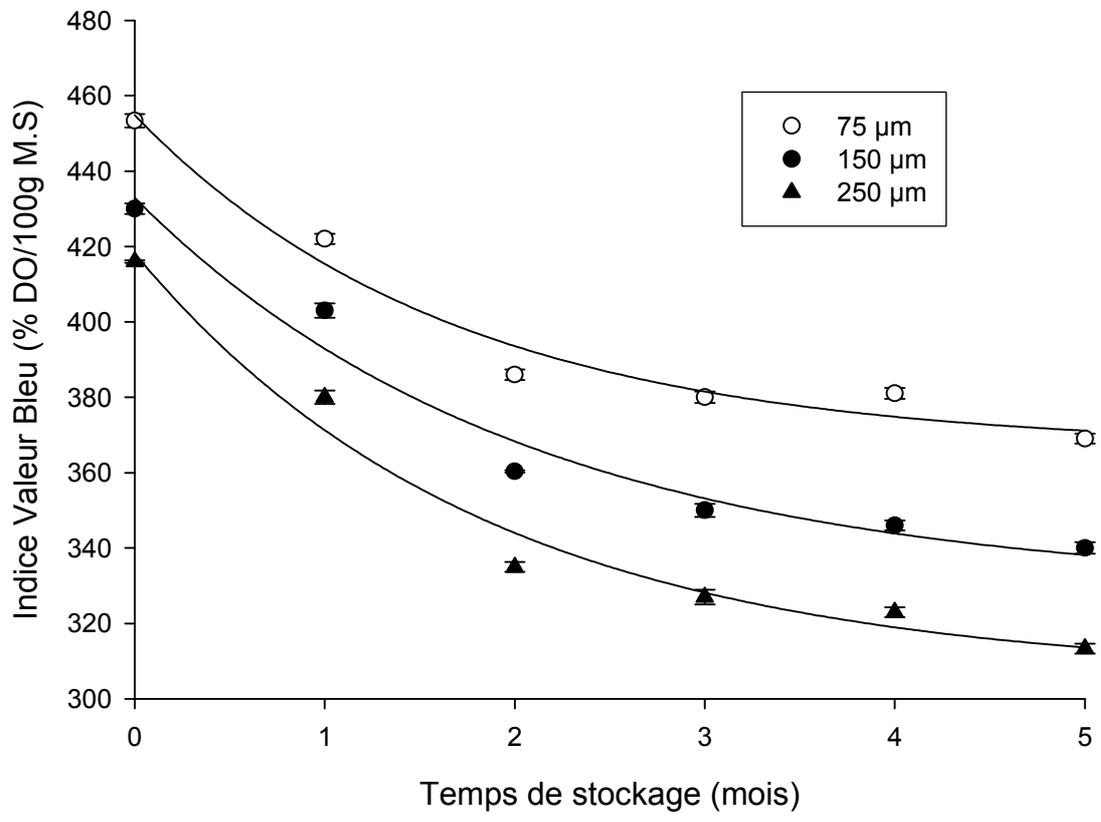
Tableau 19: Constantes cinétiques de formation des amidons résistants des différentes farines de taro en fonction du stockage.

Conditions de stockage	Caractéristiques cinétiques			
	Taille (μm)	$k(\text{mois}^{-1})$	$t_{1/2}$ (mois)	R^2
SOBAT	75	$0,818 \pm 0,19$	0,847	0,98
	150	$0,913 \pm 0,07$	0,759	0,86
	250	$2,05 \pm 0,13$	0,338	0,98
SSBAT	75	$0,389 \pm 0,2$	1,78	0,87
	150	$0,454 \pm 0,1$	1,526	0,88
	250	$0,523 \pm 0,1$	1,325	0,92
SSBRT	75	$0,223 \pm 0,09$	3,107	0,81
	150	$0,396 \pm 0,12$	1,75	0,85
	250	$0,572 \pm 0,1$	1,21	0,89

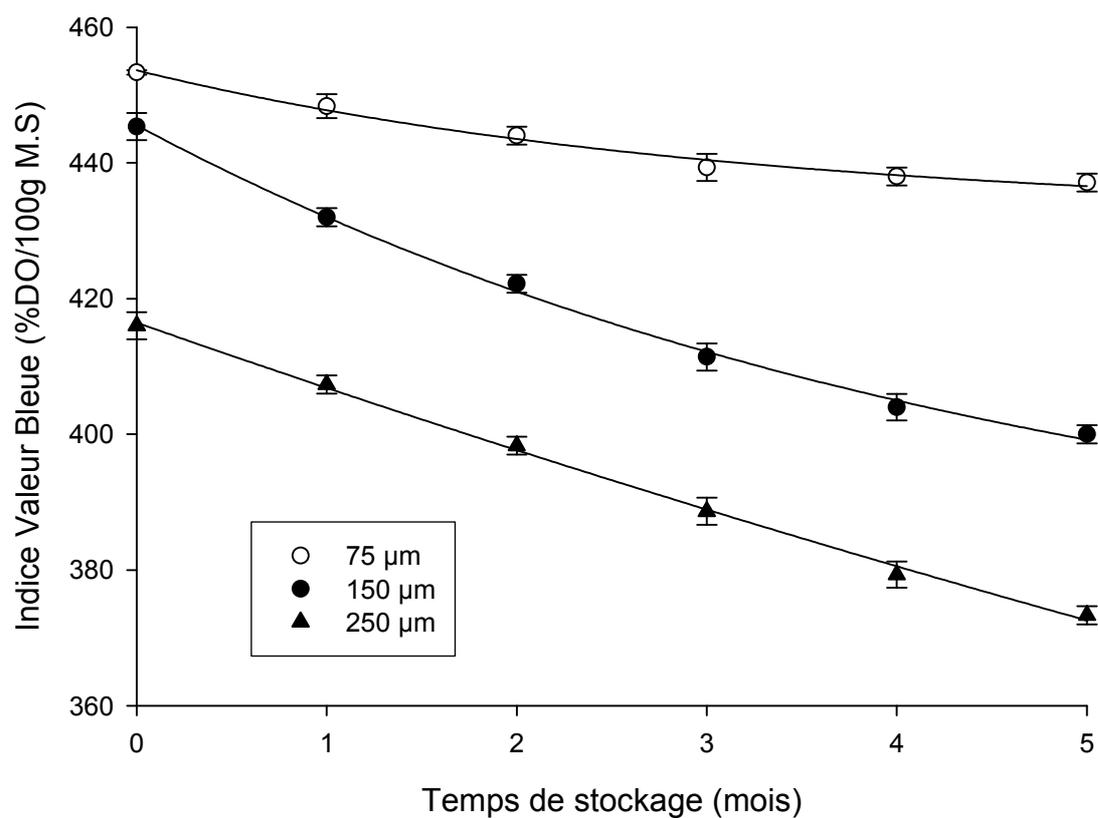
Plusieurs facteurs influencent la transformation des amidons digestibles en amidons résistants. Les facteurs les plus importants sont : la source de l'amidon, la structure granulaire de l'amidon, le degré de cuisson et la présence d'autres nutriments tels que les protéines, les lipides et les fibres alimentaires (Annison & Topping, 1994; Muir & O'Dea, 1992; Siljestrom *et al.*, 1989). Les teneurs en amidons résistants renvoient à la présence des structures cristallines de type A et B résistantes à la digestion enzymatique (Annison & Topping, 1994). Ainsi donc, il serait possible que la technique de cuisson (pré cuisson) utilisée dans le présent travail favorise la formation des amidons rétrogradés. Ceci aurait une implication directe sur l'indice valeur bleue (IVB). La variation de l'indice valeur bleue est représentée sur la figure 44 L'allure des courbes montre une baisse de l'IVB pendant les deux premiers mois de stockage pour toutes les farines. Cette baisse est intense (320% DO/100 g) pour les farines ayant des grandes tailles (150 et 250 μ m) et modérée pour les petites tailles (75 μ m). Des corrélations ($R=0,82$; $p<0,005$) ont été établit d'une part entre l'IVB et la taille des particules de farine et d'autre part entre l'IVB et le temps de stockage ($R=0,85$, $p<0,05$). En effet, les particules de grande taille se cristallisent rapidement sous l'effet de la rétrogradation pour donner des complexes glycolipidiques ou des amidons résistants. À cet effet, une corrélation positive ($R=0,59$, $p<0,05$) a été établit entre l'IVB et les amidons résistants. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Njintang & Mbofung (2003) sur la farine de taro.



A



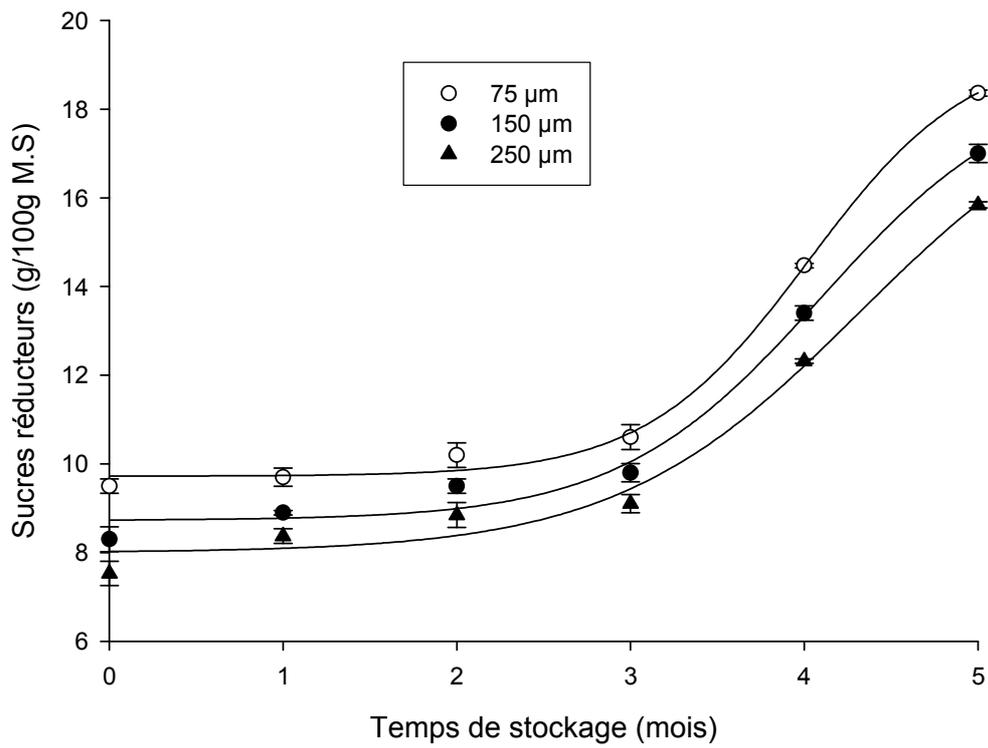
B



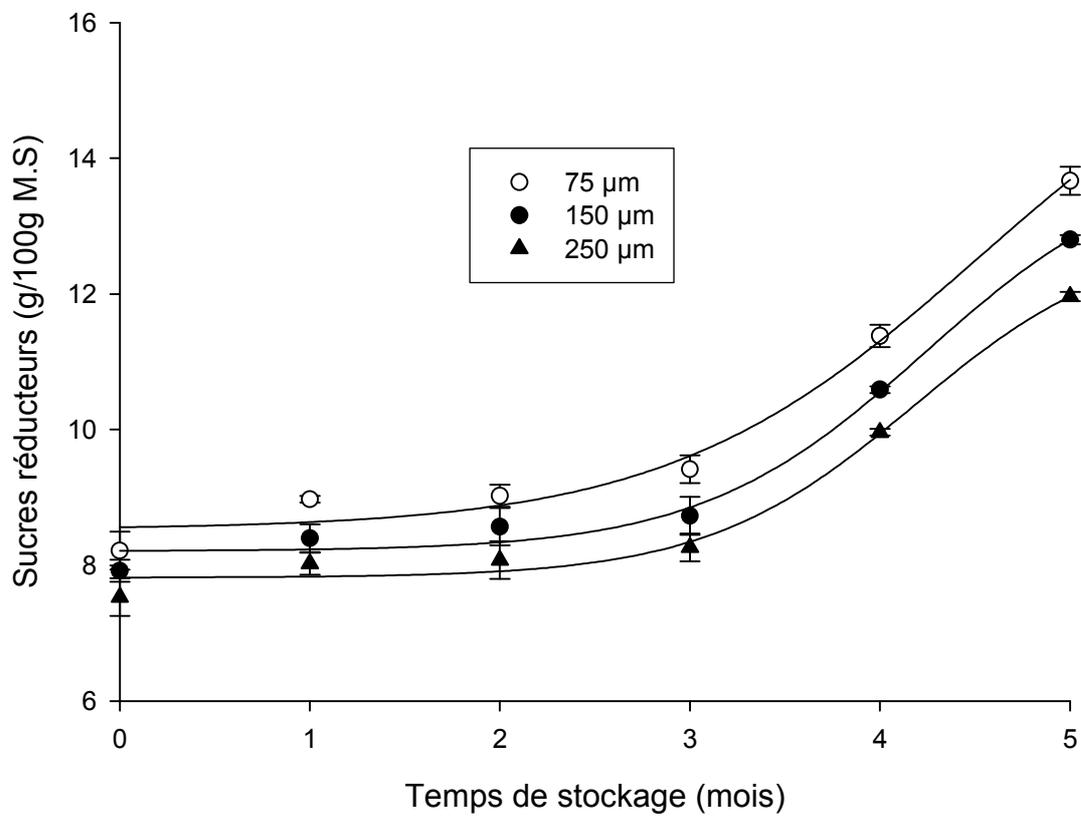
C

Figure 44: Variation de l'indice valeur bleue en fonction du temps de stockage (A- non scellé et stocké à la température ambiante (SOBAT) ; B- sachet en polyéthylène scellé et stocké à la température ambiante (SSBAT); C-sachet en polyéthylène scellé et stocké dans un réfrigérateur à 4°C (SSBRT).

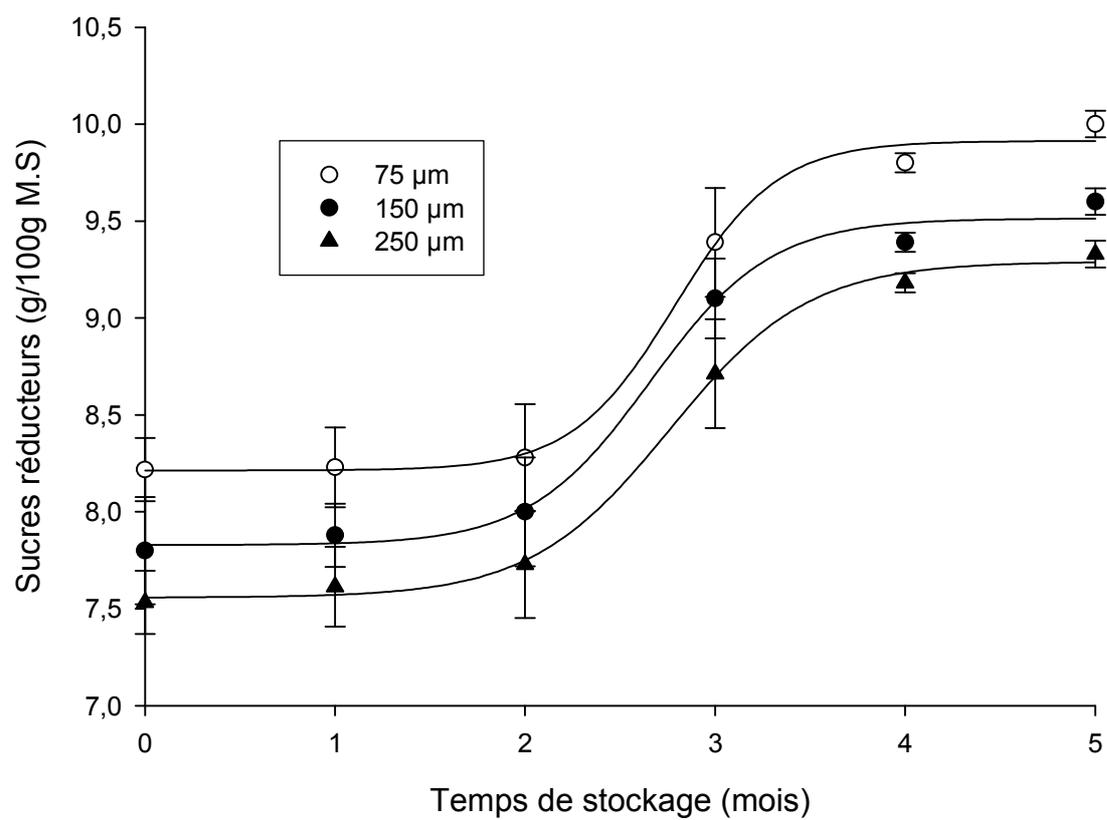
La teneur en sucres réducteurs est en général élevée à la fin de la période de stockage (5mois) pour toutes les farines. La figure 45 montre l'allure de la variation des sucres réducteurs en fonction du temps de stockage. Ces résultats montrent une influence de la taille des particules sur la teneur en sucres réducteurs ($p < 0,05$). Les farines de petite taille (75 μm) ont une teneur élevée comparativement à celles de grandes tailles (250 μm). Cette observation suggère que les farines ayant les petites particules absorbent beaucoup d'eau pendant le stockage. Cette absorption a entraînée l'hydrolyse des longues chaînes de sucre. Shaller (1978) a observé des augmentations de la teneur en sucre réducteur en fonction de la fraction particulaire au cours du stockage des denrées alimentaires américaines. Dans le même ordre d'idée, le type de stockage influence aussi la teneur en sucres réducteurs. La farine SOBAT a montré une augmentation de l'ordre de 20%. Ceci signifie que les farines stockées dans ces conditions s'hydrolysent rapidement. Ce taux d'augmentation des sucres réducteurs est inférieur à celui obtenu par Rasiklal *et al.*, (1970). Ces auteurs ont montré une augmentation de l'ordre de 18% après 4 mois de stockage des farines de blé à 23, 30 et 37°C. Par ailleurs le rôle des sucres réducteurs étant primordial dans le brunissement de la farine (Njintang, 2003), il serait impératif de déterminer la couleur des farines pendant le stockage. Ainsi, les paramètres de couleur des farines mesurée en utilisant l'espace L^*a^*b ont été représenté sur les figures 46 et 47.



A



B



C

Figure 45: Variation de la teneur en sucres réducteurs en fonction du temps de stockage.

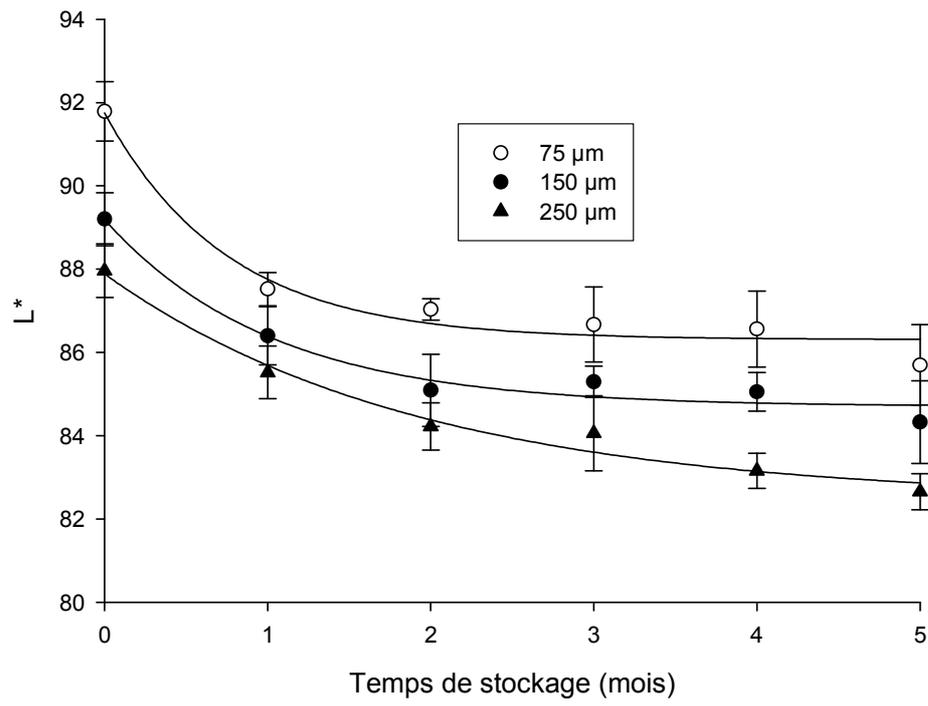
La différence entre les couleurs des farines est significative ($p < 0,05$). Les valeurs des paramètres L^* décroissent avec le temps de stockage. Cette baisse est importante dans les farines à grosses particules (2,65%) comparativement à celles de petite particule (2,35%). La baisse du paramètre L^* serait liée au noircissement de la farine. Ceci contribue à l'augmentation des paramètres a^* (rouge) et b^* (jaune). En plus, les analyses statistiques ont montré l'influence combinée du stockage et de la taille des particules sur les paramètres a^* et b^* ($p < 0,05$). Les paramètres a^* et b^* augmentent avec le temps de stockage. Une corrélation positive ($R=0,87$, $p < 0,05$) a été observée entre le paramètre a^* et les sucres réducteurs. Les sucres réducteurs et les amines libres sont des éléments importants lors des phénomènes de brunissement. En fait, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Jamin & Flores (1998), qui ont montré l'augmentation du paramètre a^* avec celui des sucres réducteurs et des protéines dans la farine de maïs. Ce constat justifie clairement l'implication de ces paramètres dans le brunissement non enzymatique lors de la décoloration de la farine. Kerr *et al.*, (2000), ont eu des résultats similaires sur la farine de *Vigna unguiculata*.

IV.5.2-Variation des caractéristiques physiques des farines au cours du stockage

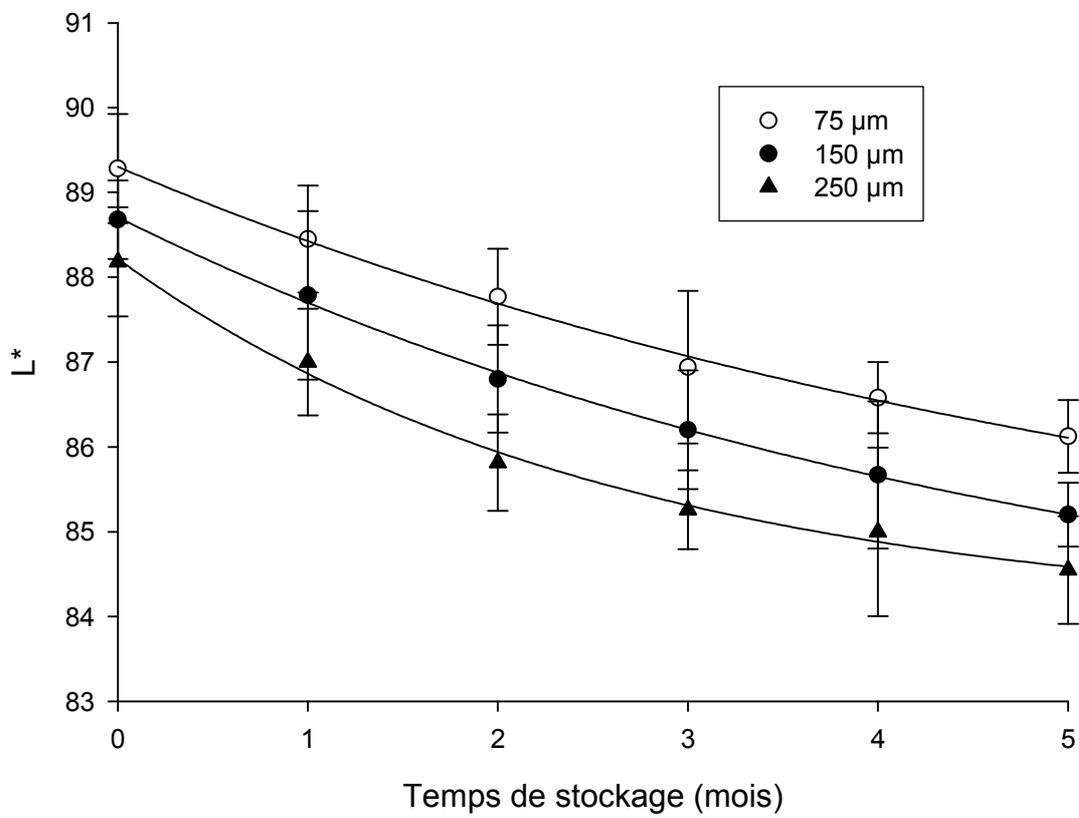
Les caractéristiques physiques des farines ont été évaluées par l'appareil Hosokawa (Figure 48 a, b, c). L'analyse de variance cumulée a montré que les valeurs de l'angle de repose varient de manière significative ($p < 0,05$) en fonction du temps, du mode de stockage et de la granulométrie. En ce qui concerne le temps de stockage, la valeur la plus élevée est observée pour les échantillons stockés pendant le premier mois, tandis que les valeurs les plus faibles sont observées dans

l'échantillon stocké pendant 5 mois. Pour la taille des particules on observe une variation significative la valeur la plus élevée (18°) a été obtenue dans les farines à $250\mu\text{m}$, tandis que la valeur la plus faible ($17,69^\circ$) a été observée dans les farines qui possèdent des petites tailles ($75\mu\text{m}$). Dans le cas du mode de stockage, il existe une variation significative de l'angle de repos entre les différentes farines à partir du troisième mois de stockage. Ce qui nous a fait penser que les farines de taro ont des comportements physiques différents et pourraient donner des pâtes aux caractéristiques différentes pendant la reconstitution.

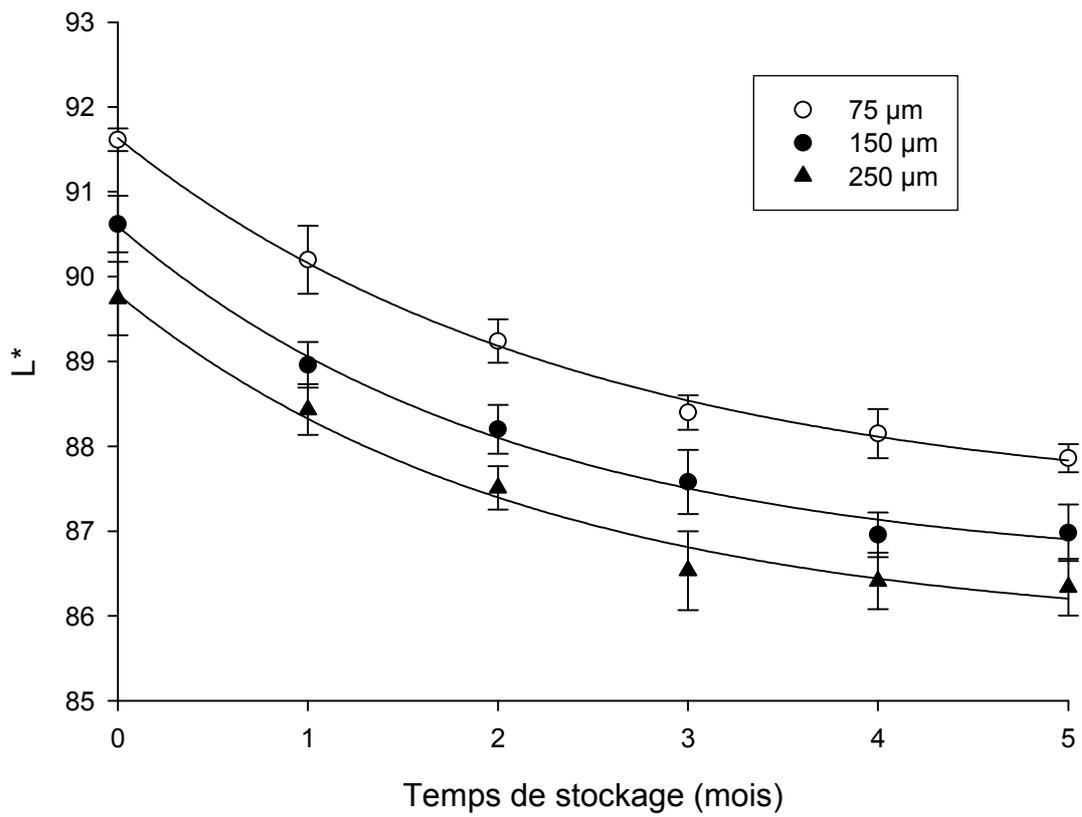
Les résultats de compressibilité des farines montrent que celles-ci varient de manière significative en fonction de la granulométrie de mouture des farines, de la du mode de stockage et du temps de stockage. Les valeurs les plus élevées (26,07) sont observées pour des farines ayant $75\mu\text{m}$ stockées et non scellées, tandis que les valeurs les plus faibles sont observées dans les particules de grosse taille ($250\mu\text{m}$). Ces observations sont similaires aussi bien pour les farines scellées et stockées à l'air ambiante que dans le réfrigérateur. Ces observations nous laissent penser que la compressibilité diminue en fonction de l'augmentation de la taille des particules. Cette augmentation ne saurait expliquer l'augmentation de la cohésion des farines. En effet, une élévation de la cohésion avec le temps de stockage a été déterminée (Fig. 49 a, b, c). Cette observation pourrait s'expliquer par le fait qu'au cours du stockage, les farines absorbent de l'eau et leurs particules gagnent en volume. À cet effet, une corrélation ($R=0,65$, $p<0,05$) a été établit entre la teneur en eau et la cohésion des farines. Ce phénomène est similaire à celui observé par Richefeu (2005) qui, en travaillant sur les matériaux granulaires a montré une augmentation de la cohésion avec la teneur en eau des granules. L'augmentation de la cohésion aboutit à la baisse de l'écoulement de la farine.



A

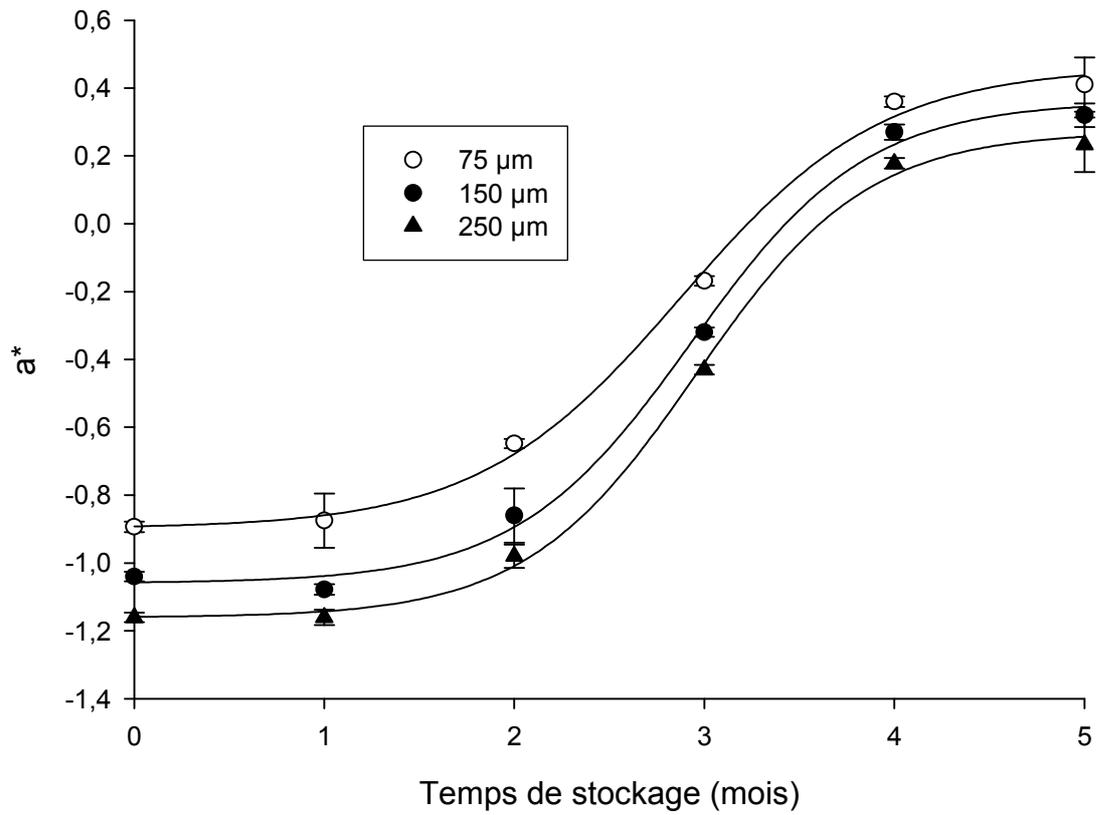


B

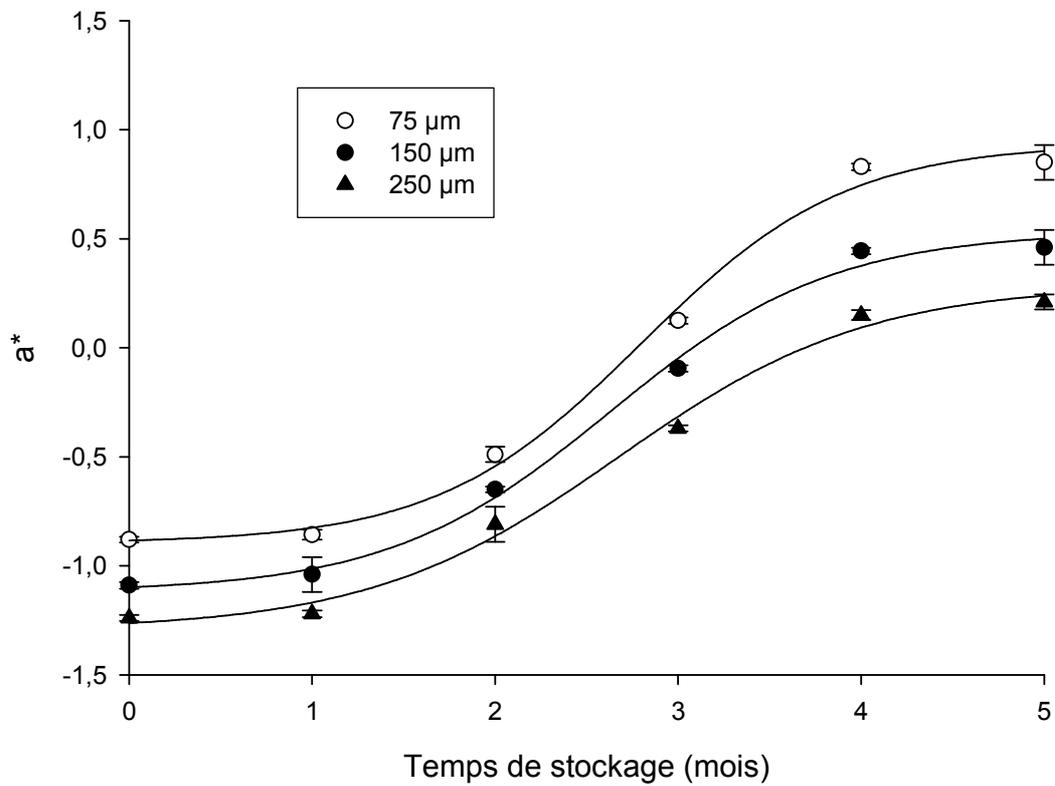


C

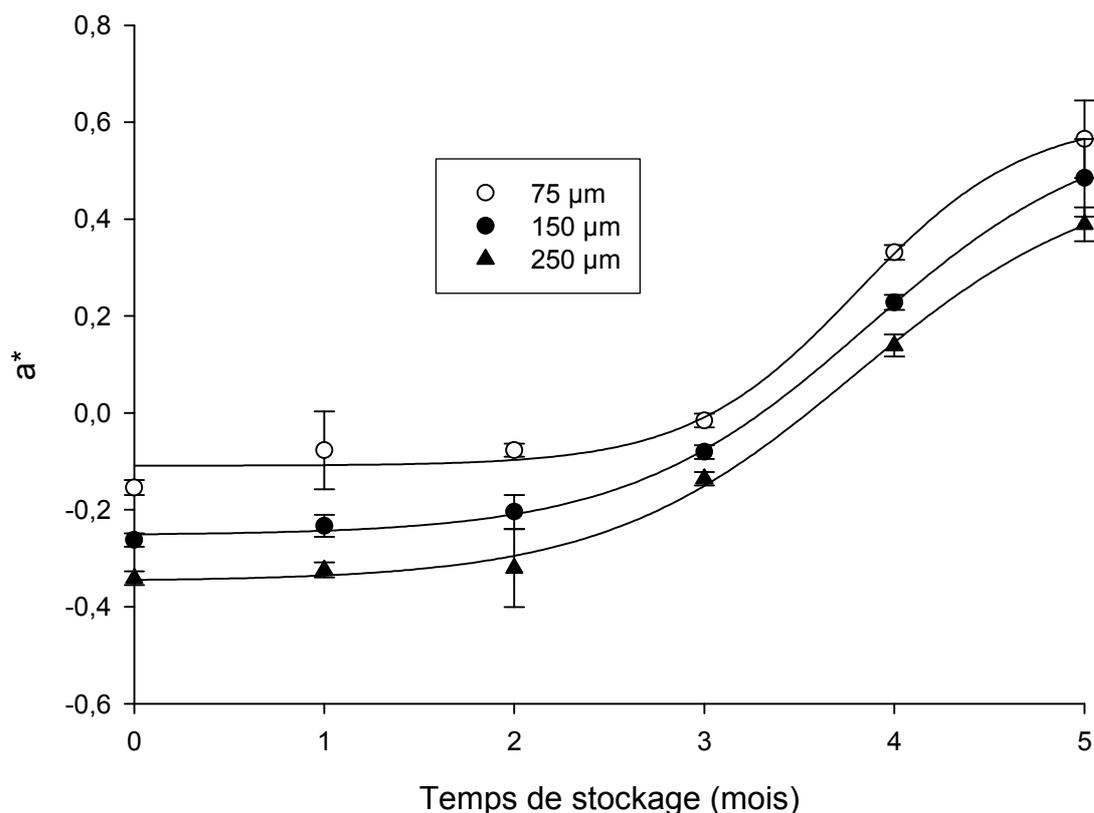
Figure 46: Variation du paramètre L* en fonction du temps de stockage : A - (SOBAT) ; B-(SSBAT) ; C-(SSBRT).



A



B



C

Figure 47: Variation du paramètre a^* en fonction du temps de stockage : A - (SOBAT) ; B-(SSBAT) ; C-(SSBRT).

IV.5.3-Variation du profil textural au cours du stockage

Le profil textural des pâtes est caractérisé par une courbe ayant deux aires positives et deux aires négatives. Le pic de la première aire caractérise la dureté de la pâte. Ainsi donc, Les figures 50 (a, b, c) montrent que la valeur de dureté la plus élevée (3,03N) a été observé dans les farines de 250µm. En général la dureté de toutes les pâtes diminuent considérablement avec le temps de stockage. Cette baisse commence faiblement les trois premiers mois et s'accroît au-delà de cette période. La structure plastique change graduellement en une structure rigide de faible dureté. Cette transformation est intense dans les pâtes produites à partir de la

farine SOBAT comparativement à celles issues de la farine SSBAT. Rahman & Al-Farsi (2005) qui ont travaillé sur les farines des dates, ont eu à obtenir des résultats similaires. Bien que la pâte du taro n'ait pas une structure rigide, il serait plus important de mesurer l'énergie nécessaire pour la transformer en une structure prête à être avalée. Cette structure est le gumminess (Figure 51a, b, c). Ainsi donc, la valeur la plus élevée en gumminess (2,788N) a été observé dans les pâtes produites à l'aide des farines à 250 μ m. Tandis que la valeur la plus faible (1,377N) a été observée pour la pâte traditionnelle. L'adhésivité est aussi un paramètre important des produits gommeux. Il mesure le travail nécessaire pour surpasser la force gravitationnelle entre la surface de la pâte et celle du récipient au quel la pâte est mise en contact. À l'issue de son évaluation, il ressort que la pâte traditionnelle possède la valeur la plus élevée (-76,895 N.s) comparativement aux pâtes reconstituées où la valeur la plus élevée est de -155,3 N.s (250 μ m). Il a été aussi observé que la taille des particules n'avait aucune influence sur l'adhésivité. Les figures 52 (a, b, c) montrent une augmentation de l'adhésivité avec le temps de stockage. Cette augmentation est beaucoup accentuée après trois de stockage. Cette augmentation serait due à un phénomène d'hydrolyse des granules d'amidon pendant le stockage. En effet il a été montré qu'au cours du stockage les grosses molécules de sucre s'hydrolysaient en des petites chaînes.

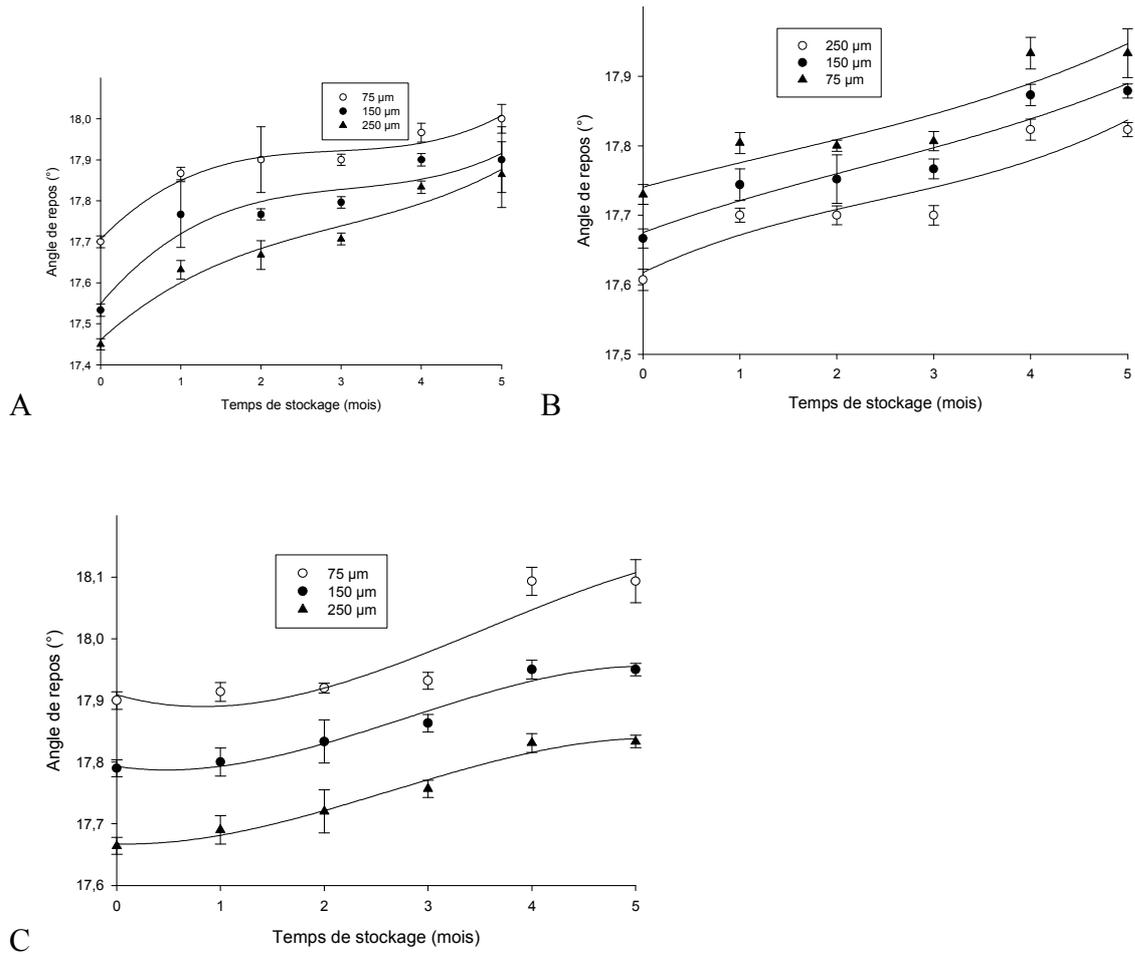
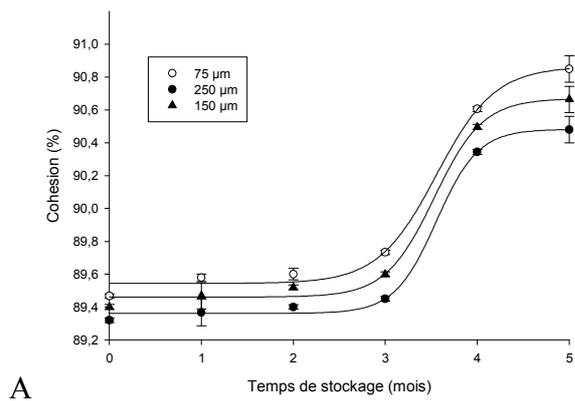


Figure 48 : Variation de l'angle de repos des farines SOBAT (A), SSBAT(B) et SSBRT (C) pendant le stockage.



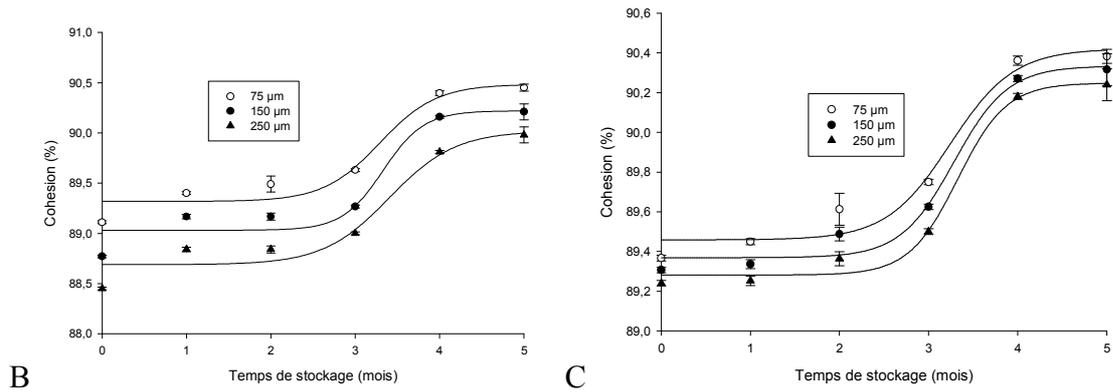


Figure 49 (A, B, C): Variation de la cohésion des farines SOBAT, SSBAT et SSBRT pendant le stockage respectivement.

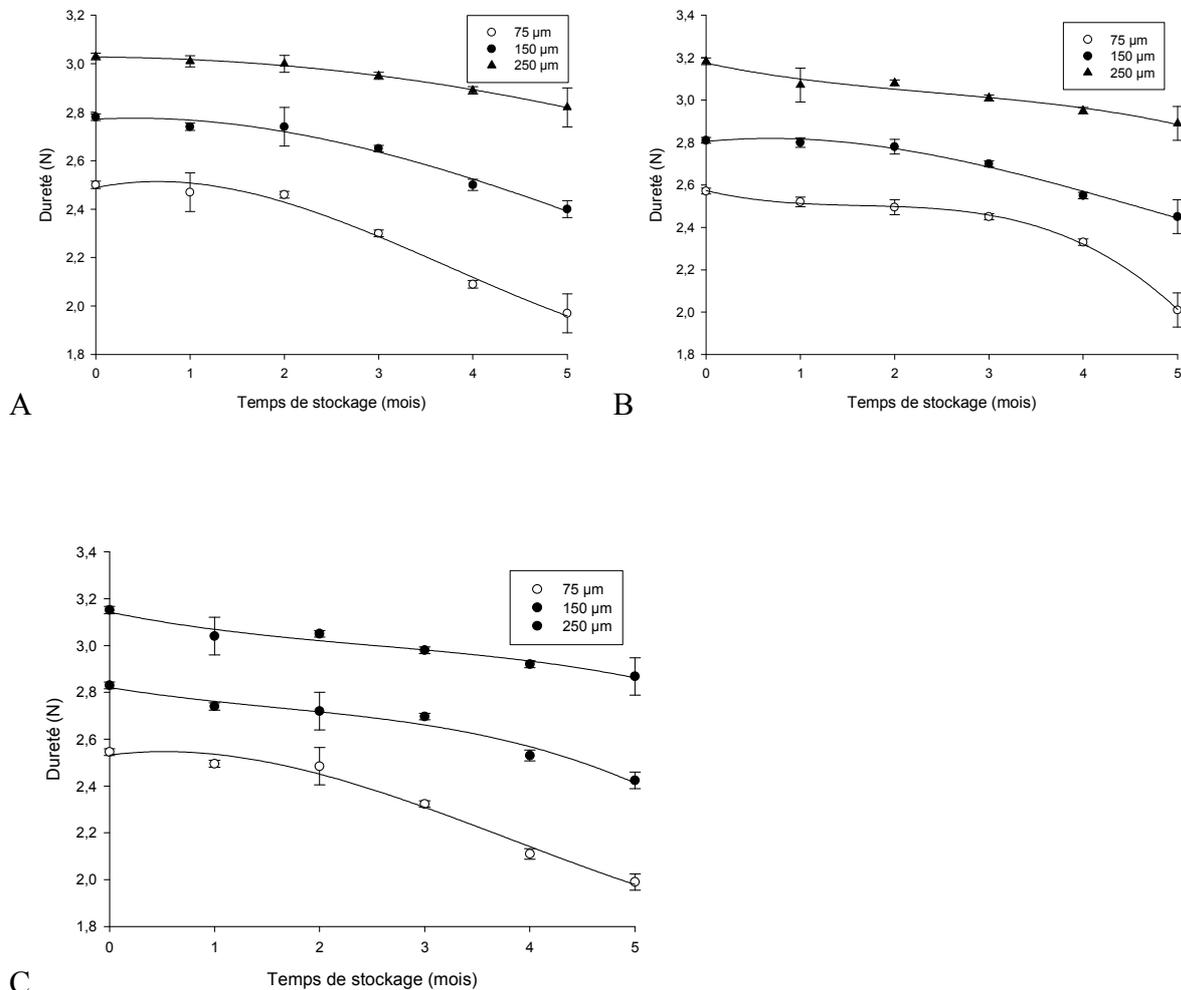


Figure 50 (A, B, C): Variation de la dureté des pâtes issues des farines SOBAT, SSBAT et SSBRT pendant le stockage respectivement.

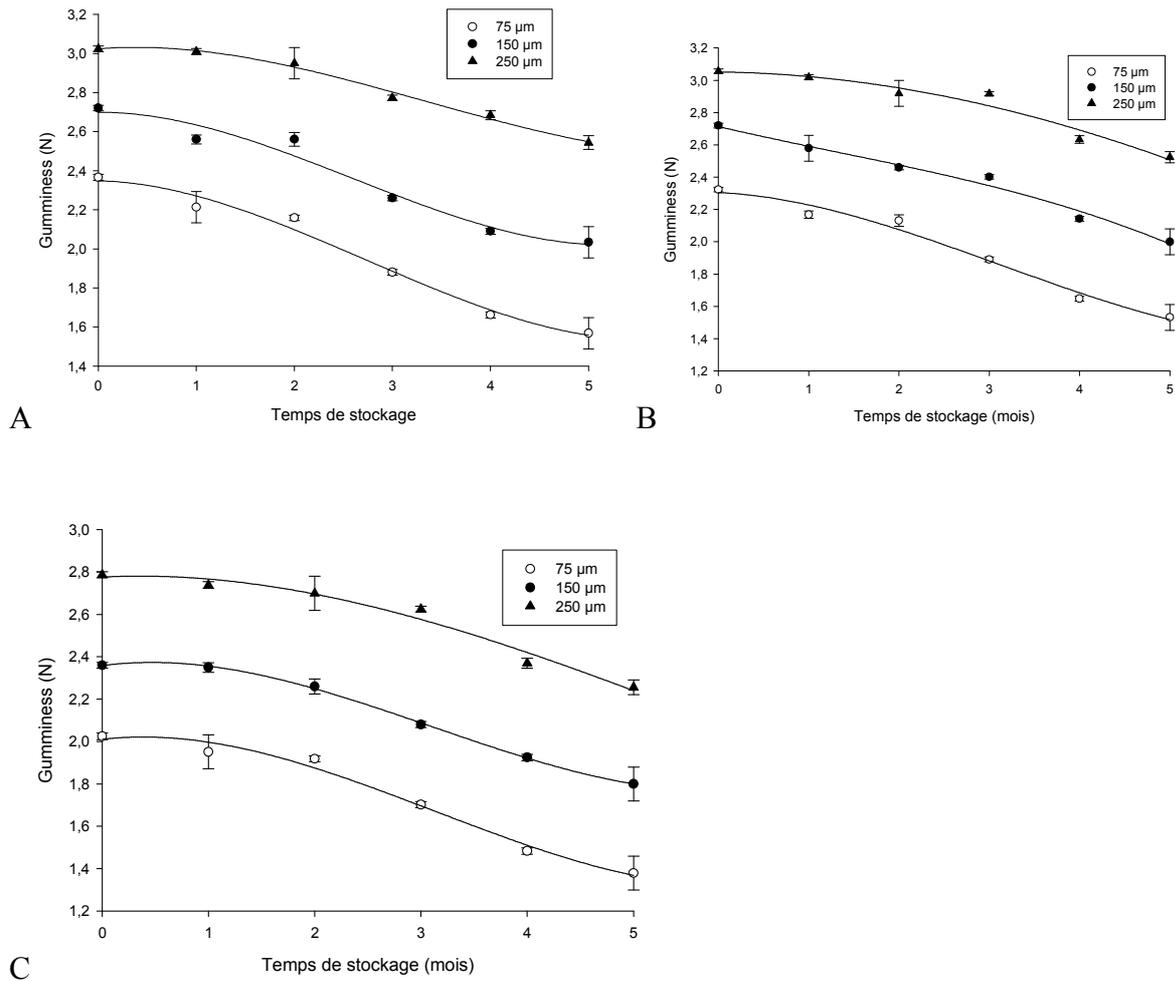
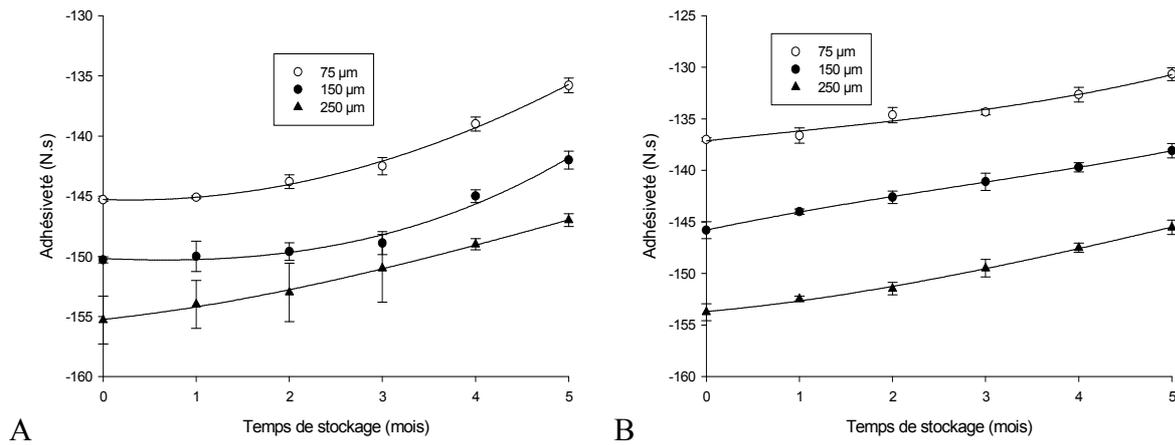
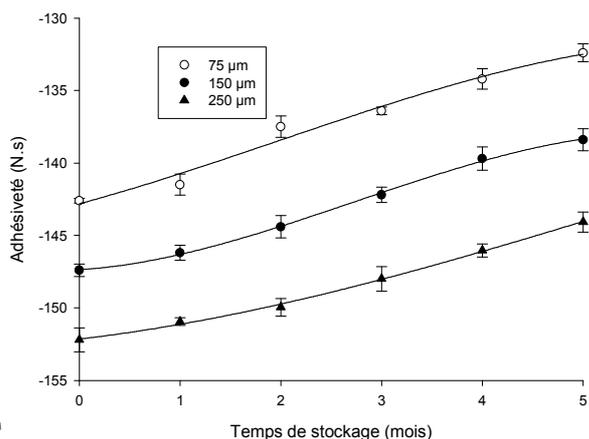


Figure 51 (A, B, C): Variation du gumminess des pâtes issues des farines SOBAT, SSBAT et SSBRT pendant le stockage respectivement.





C

Figure 52 (A, B, C): Variation de l'adhésivité des pâtes issues des farines SOBAT, SSBAT et SSBRT pendant le stockage respectivement.

Toute fois, contrairement à ces résultats, Njintang, Mbofung & Kesteloot (2007) ont eu à observer une baisse de l'adhésivité lorsque la taille des particules de farine baissait.

IV.5.4-Conclusion partielle

Les résultats ont montré quelques modifications physicochimiques et rhéologiques des farines et des pâtes. L'étude a montré que pendant les 5 mois de stockage, les variations de la teneur en eau des farines ont été observées. En plus, il y a une augmentation de la teneur en amidons résistants. La capacité d'absorption d'eau et l'indice de solubilité dans l'eau augmentent les trois premiers mois puis décroissent par la suite. La couleur des farines aussi varie. La luminance (L^*) décroît tandis que les paramètres a^* et b^* croissent. L'angle de repos augmente alors que la cohésivité diminue. La dureté de toutes les pâtes diminue considérablement avec le temps de stockage. La valeur la plus élevée du gumminess a été observée dans les pâtes à grosses particules. L'adhésivité la plus élevée a été notée pour la pâte traditionnelle comparativement aux pâtes reconstituées.

V- CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats obtenus dans le présent travail ont montré que les farines et amidons de taro présentent des différences structurales et sur les propriétés thermiques et rhéologiques. L'étude a montré que les farines et amidons de taro ont une teneur faible en protéine et lipide. La taille des granules d'amidon (<5 μm) varie de manière significative entre les variétés. Les températures moyennes initiales et de gélatinisation sont de 55 et 65°C respectivement. L'indice amorphe, la capacité d'absorption d'eau, l'indice de solubilité dans l'eau varient de manière significative entre les variétés. Ces analyses ont permis de sélectionner la variété Ibo coco comme la variété ayant des bonnes caractéristiques thermiques. Pendant la cuisson des tubercules de taro, les propriétés physicochimiques et texturales varient en fonction du type de cuisson. La tendreté du tubercule résulte de l'action des protéines solubles, du degré de gélatinisation, du degré de séparation cellulaire et des amidons digestibles. Le degré de gélatinisation, les amidons digestibles, les protéines solubles ont une influence négative sur la dureté des tubercules. La cuisson dans les solutions acides induit des goûts amères et acides. Les farines issues des cuissons dans les solutions de citron et de tamarin ne sont pas appréciées à cause de leur arrière goût. Ceci permet de choisir la cuisson dans l'eau de robinet comme meilleur mode de cuisson et les différents temps de cuisson sont de 15 min dans les cuissons dans les solutions et 12 min pour la cuisson par la vapeur. Dans les différentes farines, l'analyse des minéraux a montré que le magnésium est l'élément le plus abondant. Tous les échantillons analysés montrent une légère hystérésis entre la courbe de sorption et celle de la désorption. La farine SS a la valeur la plus élevée de la constante d'oswin (A). De plus, le degré d'organisation

structurale de granules d'amidon est significativement influencé par le mode de cuisson. En général, il existe une inter-corrélation entre les différentes propriétés physicochimiques des farines. Le achu obtenu par reconstitution de la farine à 78% d'eau, donne des caractéristiques texturales proches de la pâte traditionnelle. Mais toute fois, l'analyse sensorielle a montré que toutes les farines reconstituées étaient granuleuses. La détérioration de la farine peut être analysée par la détermination des indicateurs biochimiques globaux. La méthode utilisant les carbonyles comme indicateur de détérioration permet de déterminer la valeur de la teneur en eau monomoléculaire M_1 théorique et expérimentale. L'activité de l'eau de formation des carbonyles (0,26) est inférieure à celle de la formation des malondialdéhydes (0,32). Pendant 5 mois de stockage, il y a une augmentation de la teneur en amidons résistants. La capacité d'absorption d'eau et l'indice de solubilité dans l'eau augmentent les trois premiers mois puis décroissent par la suite. La couleur des farines aussi varie. La luminance (L^*) décroît tandis que les paramètres a^* et b^* croissent. L'angle de repos augmente alors que la cohésivité diminue. La dureté de toutes les pâtes diminue considérablement avec le temps de stockage. La valeur la plus élevée du gumminess a été observée dans les pâtes à grosses particules. L'adhésivité la plus élevée a été notée pour la pâte traditionnelle comparativement aux pâtes reconstituées. En bref, l'optimisation des paramètres de production et de conservation de la farine passe par le choix de la variété Ibo coco. Cette variété doit être cuite pendant 15 min dans l'eau du robinet, pelé puis séchée jusqu'à obtention d'une teneur en eau de fin de séchage comprise entre 7 et 8%. Les farines doivent être fine (75 et 150 μm) et conservées à 4°C dans les sachets scellés pendant 4 à 5 mois.

PERSPECTIVES

Il serait nécessaire pour compléter l'étude sur la texture de la pâte reconstituée en analysant l'influence des autres sources amylacées sur les caractéristiques rhéologiques et organoleptiques de la pâte.

Il serait aussi nécessaire d'optimiser le processus de broyage des cossettes afin d'obtenir une farine ayant des fines particules.

Enfin il serait nécessaire de faire une production des farines aux activités en eau proche de celle correspondante à la teneur en eau monomoléculaire et d'étudier les modifications physicochimiques et rhéologiques des pâtes qui en résulteront.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AACC (American Association of Cereal Chemists). (1990). Approved methods of the AACC (7th ed.). St. Paul. MN: The Association.
- Aboubakar (2002). Etude de l'effet de la granulométrie de la farine instantanée (précuite) du taro (*Colocasia esculenta*) sur quelques propriétés physico-chimiques, fonctionnelles et sensorielles. Mémoire de DEA. ENSAI, Université de Ngaoundéré. 57p.
- Aboubakar, Njintang, Y. N., Scher, J., Mbofung, C. M. F. (2008). Physicochemical, thermal properties and microstructure of six varieties of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flours and starches. *Journal of Food Engineering*, in press.
- Acker, L. (1969). Water activity and enzyme activity. *Food Technology*, 22(10), 1257-1270.
- AFNOR (Association Française de Normalisation) (1995). Recueil de normes françaises : contrôle de la qualité des produits alimentaires – analyse sensorielle. Edité par Afnor, 5^{ième} édition; Paris (France), 400 p.
- Agbor-Egbe, T. (1991). Study on the factors affecting storage of edible aroids. *Annals of Applied Biology*, 119(1): 121-130.
- Agunbiade O.S. and Longe O.G. 1999. The physico-functional characteristics of starches from cowpea (*Vigna unguiculata*), pigeon pea (*Cajanus cajan*) and yambean (*Sphenostylis stenocarpa*). *Food Chemistry*, 65:469-474.
- Al Hodali R. (1997). Numerical simulation of an agricultural foodstuffs drying unit using solar energy and adsorption process. Ph.D. Thesis, Université Libre de Bruxelles, Belgium. 309 p.

- Alvarez, M.D., Canet, W. (1998). Rheological characterization of fresh and cooked potato tissues (cv. *Monalisa*). *European Food Research and Technology* 207:55-65.
- Anderson, R. A. Conway, H. F., Pfeifer V.F. and Griffin E. L. (1969). Roll and extrusion-cooking of grain sorghum grits. *Cereal Sciences Today*, 14:372-378.
- Annison G, Topping, D.L. (1994). Nutritional role of resistant starch: chemical structure vs physiological function. *Annual Reviews of Nutrition*, 14:297–320.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (1990) Official methods of analysis (13th ed.) Washington, D.C: Association of Official Analytical Chemists.
- Baryeh, E. A. (2001). Physical properties of bambara groundnuts. *Journal of Food Engineering*, 47(4):321-326.
- BeMiller, J. N. and Kumari, G. V. (1972). beta-elimination in uronic acids: evidence for an ElcB mechanism. *Carbohydrate Research*, 25(2): 419-428.
- BeMiller, J. N. and Whistler, R. L. (1997). Carbohydrate, in Food chemistry, Ed. By Owen R. Fennema. Ohio state, Columbus. pp157-223.
- Benado, A. L. and Rizvi. S. S.H. (1985). Thermodynamic properties of water on rice as calculated from the reversible and irreversible isotherms. *Journal of Food Science*. 50:101–105.
- Berton, B. M. (2002). Hydratation par adsorption de vapeur d'eau ou par immersion des farines de blé et de leurs constituents. Thèse INPL, Nancy, 215 p.

- Biliaderis, C. G. and Seneviratne. H. D. (1990). On the supermolecular structure and metastability of glycerol monostearate-amylose complex. *Carbohydrate Polymers*. 13. pp185.
- Birch, G. G, and Prietly, R. J. (1973). Degree of gelatinisation of cooked rice. *Starch/Stärke*, 3: 98-102
- Borges, S. V, Cal-Vidal, J. (1994). Kinetics of water vapour sorption by drum-dried banana. *International Journal of Food Science and Technology*, 29: 83-90.
- Bradbury, J. H. and Holloway, W. D. (1988). Chemistry of tropical root crops: significance for nutrition and agriculture in the Pacific. *Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR). Monograph No 6*, 201p.
- Bradbury, J. H., and Nixon, R. W. (1998). The acidity of raphides from the edible aroids. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76(4): 608-616.
- Bricas, N., Vernier, P., Ategbro, E., Hounhouigan, J., N'kpenu, K. E., Orkwor, G. C. (1997). The development of yam chip sector in West Africa. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 44: 110-114
- Bushuk, W. and Winkler, C. A. (1957). Sorption water vapour on wheat flour starch and gluten. *Cereal chemistry*, 34(2): 73-86
- Carabasa-Giribet, M., and Ibarz-Ribas, A. (2000). Kinetics of colour development in aqueous glucose systems at high Temperatures. *Journal of Food Engineering*, 44, 181-189.
- Charles, A. L., Huang, T. C., & Chang, Y.H. 2008. Structural analysis and characterization of a mucopolysaccharide isolated from roots of cassava (*Manihot esculenta* Crantz L.) *Food Hydrocolloids* 22 (2008) 184–191
- Cheftel, J. C et Cheftel, H. (1977). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, tome1. *Tec et Doc. Lavoisier*. 271-280

- Cheng, D. C.H, Farley R., Valentin, F. H. H., (1968). The effect of particle size et interparticle force on the flow properties of powders. *Institution of chemical Engineers Symposium*. 29:14-24.
- Chetana, R. Srinivasa P. C. Yella Reddy, S. R. (2005). Moisture sorption characteristics of milk burfi, a traditional Indian sweet, using sugar substitutes. *European Journal of Food Research and Technology*, 220:136–141
- Chungcharoen, A. and Lund, D. B. (1987). Influence of solutes and water on rice starch gelatinization. *Cereal Chemistry*. 64(4). 240.
- Davies, C. G. A., Wedzicha, B. L. and Gillard, C. (1997). Kinetic model of the glucose-glycine reaction. *Food Chemistry*, 60 (3):323-329.
- Eichner, K., & Karel, M. (1972). The influence of water content and water activity on the sugar-amino browning reaction in model sys-tems under various conditions. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 20(2), 218
- Eliasson, A. C. (1992). A calorimetric investigation of the influence of sucrose on the gelatinization of starch. *Carbohydrate Polymers*. 18: pp131.
- Eyzaguirre, Z.. R., Nienaltowska, K., E. Q., De Jong L., B. E., Hasenack, B. and Nout, M. J. R. (2006). Effect of food processing of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) IKMP-5 on the level of phenolics, phytate, iron and zinc. *Journal of Science and Food Agriculture*, 86:1391–1398.
- FAO. (1988b). Traditional food plants. Etude FAO: Alimentation et nutrition n°42.Rome.
- FAO. (1991). Racines. tubercules. plantains et bananas dans la nutrition humaine. Collection FAO : *Alimentation et nutrition*. N° 24.

- Faraj, A., Vasanthan, T., Hoover, R. (2004). The effect of extrusion cooking on resistant starch formation in waxy and regular barley flours. *Food Research International*, 37(5):517–525.
- Fisher, E. H. and Stein, E. A. (1961). Biochemical preparation. 8. 30p.
- Genot, C. (1996). Some factors influencing TBA test. Report of diet-ox project (AIRIII-CT-92-1577).
- Goni, L. Garcia-Diz, Manas, E. and Saura C. F. (1996). Analysis of resistant starch; a method for foods and food products. *Food Chemistry*. 56(4): 455–459.
- Halliwell B. and Gutteridge J. M. C., (1990). Role of free radicals and catalytic metal ions in human disease: An overview, in: Packer, L., Glazer, A. N. (Eds.), Oxygen radicals in biological systems, *Methods in Enzymology*, , *Academic Press*, San Diego, USA, Vol. 186, pp. 1–85.
- Hogan, J. T, Normand, F. L, Deobald, H. J., Mottern, H. H., Lynn, L. and Hunnell, J. W. (1968). Production of high-protein rice flour. *Rice Journal*. 71: 5–11.
- Hong, P. G. and Nip, K. W., (1990). Functional properties of precooked taro flour in sorbets. *Food chemistry*, 36, 261-270.
- Hoover, R. and Sosulski, F. (1986). Effect of cross linking on functional properties of legume starches. *Starch*, 38:149–155.
- Iglesias, H. M., Chirife, J. (1982). Handbook of food isotherm. *Academic Press*, New York, pp. 170-175.
- Irvine, F.R. (1969). Cocoyam. In *West African Crops*.. Oxford: University Press. pp. 174-179.
- Iwuoha, I. C. (2004). Comparative evaluation of physicochemical qualities of flours from steam-processed yam tubers. *Food Chemistry*, 85:541–551.

- Jamin, F. F. and Flores, R. A. (1998). Effect of additional separation and grinding on the chemical and physical properties of selected corn dry-milled streams. *Cereal Chemistry*. 75(1), 166–170.
- Jarvis, M.C., MacKenzie, E., and Duncan, H.J. (1992). The textural analysis of cooked potato. 2. Swelling pressure of starch during gelatinization. *Potato Research*, 35: 93–100.
- Jiang G. and Ramsden. (1999). Characterisation and yield of the arabinogalactan-protein mucilage of taro corms. *Journal of Science and Food Agriculture*, 79: 671-674.
- Kerr, W. L, Ward W. D. C, Mc waters K. H. and Resurreccion, A. V. A. (2000). Effect of milling and particle size on functionality and physicochemical properties of cowpea flour. *Cereal Chemistry*, 77 (2): 213-219.
- Kimura, M. and Itokawa, Y. (1990). Cooking loss of minerals in food and its nutritional significance. *Journal of Japanese Society of Nutrition and Food Science*, 43 (1):31-42.
- Kinsella, J. E. and Fox, P. F., (1986). Water sorption by proteins, CRC Crit. *Review of Food Science and Nutrition*. 24:43-50.
- Labuza, T. P. and Riboh, D. (1982). Theory and application of Arrhenius kinetics to the prediction of nutrient losses in foods. *Journal of Food Science*. 36: 66-74.
- Lam, K. K., Newton, J. M., (1992). Effect of temperature on particulate solid adhesion to a substrate surface. *Powder technology* 73, 267-274.
- Lamberts, L., De Bie, E., Vandeputte G. E., Veraverbeke W. S., Derycke, V., De Man W, Delcour J. A, (2005). Effect of milling on colour and nutritional properties of rice. *Food Chemistry*. Article in press.

- Lim, S., Jane, J., Rajagopalan, S. and Seib, P. A. (1992). Effect of starch granule size on physical properties of starch-filled polyethylene film. *Biotchnology. Programm.* 8:51p.
- Lin A. and Johnson R. (1987). Klebsiella pneumonia 1,3-propanediol: NAD+ oxidoreductase. *J. Bacteriol*, 165(5):2050-2054.
- Linsinska and Leszczynski. (1989). Potato Science and Technology, Academic Publishers. 408p.
- Martens, H. J., and Thybo, A. K. (2000). An Integrated Microstructural, Sensory and Instrumental Approach to Describe Potato Texture. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 33(7):471-482.
- Maskan, M. and Gögüs, F. (1997). The fitting of various models to water sorption isotherms of pistachio nut paste. *Journal of Food Engineering*. 33:227–237.
- Mc Weeny. (1968). Reactions in food systems: negative temperature coefficients and other abnormal temperature effects. *J. Food and Technol*, 3(1): 15-30.
- Mossel D. A. A. (1996). Microbial safety of drinking water: the relevance and reliability of laboratory examinations. *J Applied Bacteriol*. 81:459-466
- Muir, J. G, O'Dea. (1992). Measurement of resistant starch; factors affecting the amount of starch escaping digestion in vitro. *American Journal of Clinic and Nutrition*, 56: 123–127.
- Mullins, W. R., Harrington, W. O., Olson, R. L., Wood, E. R., and Nutting, M.-D. (1955). Estimation of free starch in potato granules and its relation to consistency of reconstituted product. *Food Technology*, 9:393–395.
- Nguimbou, M. R. (2006). Modifications physico-chimiques et microbiologiques de la farine de taro (*Colocasia esculenta*) precuit au cours du stockage. Thèse

présentée pour l'obtention du DEA en Sciences Alimentaires et Nutrition, ENSAI, Université de Ngaoundere, pp 83.

- Nip, W. K. (1997). Taro: Processing Vegetable and Technology. Eds D.S. Smith. J.N. Cash. W.K. Nip and Y.H. Hui. Technomic Publishing CO. I. Taro: in nc. Pennsylvania. USA, pp 355-387.
- Nisha, P., Singhal, R. S. and Pandit, A. B. (2006). Kinetic modelling of texture development in potato cubes (*Solanum tuberosum* L.), green gram whole (*Vigna radiate* L.) and red gram splits (*Cajanus cajan* L.). *Journal of Food Engineering*, 76:524–530.
- Njintang, Y. N. (2003). Studies on the production of taro (*Colocasia esculenta*) flour for use in the preparation of achu -a taro base food. Doctorat/Ph.D thesis, University of Ngaoundere, Cameroon, p 298.
- Njintang, Y. N., & Mbofung, C. M. F. (2003a). Kinetics of starch gelatinisation and mass transfer during cooking of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) slices. *Starch/Stärke*, 55:170-176.
- Njintang, Y. N., & Mbofung, C. M. F. (2003b). Development of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flour as an ingredient in food processing: Effect of gelatinisation and drying temperature on the dehydration kinetics and colour of flour. *Journal of Food Engineering*, 58:259-265.
- Njintang, Y. N., & Mbofung, C. M. F. (2006). Effect of precooking time and drying temperature on the physico-chemical characteristics and in-vitro carbohydrate digestibility of taro flour. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 39: 684-691
- Njintang, Y. N., Abdou, B. A., Mbofung, C. M. F., Aboubakar, Bennett, R. N., Parker, M, Faulds, C. M., Smith, A. & Waldron, W. K. (2007a). Biochemical

- characteristics of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flour as determinant factor of the extend of browning during achu preparation. *American Journal of Food Technology*, 2(2): 60-70.
- Njintang, Y. N., Parker, M. L., Moates, G. K, Mbofung, C. M. F, Smith, A. C & Waldron, K. W. (2006a). Rheology and microstructure of achu, a food based on taro (*Colocasia esculenta* L. Schott), as affected by method of preparation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86: 902-907.
- 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.
- Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K. and Weitnauer, A. C. (1992). Food dehydration. *Handbook of food engineering*, Marcel Dekker, New York .
- Osisiogun, I. U. W., Uzo, J. O. and Ugochukwu, E. N. (1974). The irritant effect of cocoyams. *Planta-Media*, 26(2), 166-169.
- Owen R. (1996). *Introduction to food chemistry*. 3th Edition, 1045p.
- Parker, M. L., Newsom, D.W., and Miller, K. W. (1995). Texture of Chinese water chestnut: involvement of cell wall phenolics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 6, 37–346.
- Passam, H. (1982). Experiments on the storage of eddoes and tannias (*Colocassia and Xanthosoma spp*) under tropical ambient conditions. *Tropical Science*, 24(1): 39-46.
- Payne, J.H. Ley, G.J. and Akau, G. (1941). Processing and Chemical investigation of taro, Hawaiian Agricultural Experimental station, University of Hawaii, Bulletin 86.
- Peleg, M., (1977). Flowability of food powders and methods for its evaluation. *Journal of Food Process Engineering* 1:302-328.

- Pelletier, M., (1999). Application de la spectroscopie infrarouge à l'étude de l'organisation de l'eau aux interfaces: Le cas des phyllosilicates. Thèse INPL, Nancy, 375p.
- Perez, E. E. S. (2000). Determination of the correlation between amylose and phosphorus content and gelatinization profile of starches and flours obtained from edible tropical tubers using differential scanning calorimetry and atomic absorption spectroscopy, master in science, food and nutritional sciences, University of wisconsin-stout, menomonie, wi 54751.
- Phillips, R. D, Chinnan, M. S, Branch, A. L, Miller, J, Mcwatters, K. H. (1988). Effects of pre-treatment on functional and nutritional properties of cowpea meal. *J Food Sci.* 53(3): 805-809.
- Pilosof A. M. R, Boquet, R and Bartholomai, G. B. (1985). Kinetics of water uptake by food powders. *Journal of Food Science.* 50: 278-282.
- Prentice J. H. (1984). *Measurements in rheology of foodstuffs*. Elsevier applied science publisher, London.
- Qiang Liu, Guelph A. A. F. C, (2006). Caractérisation *in vivo* et *in vitro* des amidons résistants de maïs et de produits de maïs ontariens comme ingrédients alimentaires fonctionnels à valeur ajoutée.
http://www.omafra.gov.on.ca/french/research/new_directions/projects/2001/sr9078.htm
- Quast, D. G., Karel, M., & Rand, W. M. (1972). Development of a mathematical model for oxidation of potato chips as a function of oxygen pressure, extent of oxidation, and equilibrium relative humidity. *Journal of Food Science*, 37, 673.

- Rahman MS, Al-Farsi SA. (2005). Instrumental texture profile analysis (TPA) of date flesh as a function of moisture content. *Journal of Food Engineering*, 66: 505–511.
- Rasiklal, D. Daftary, Yeshajahu, P, David, B. and Sauer. (1970). Changes in Wheat Flour Damaged by Mold during Storage. *Journal of agriculture and Food chemistry*. 18 (4): 613-618.
- Reeve, R. M. (1963). Estimation of extra-cellular starch of dehydrated potatoes. *Journal of Food Science*, 28(2):198–206.
- Richefeu V. (2005). Approche par éléments discrets 3D du comportement de matériaux granulaires cohésifs faiblement contraints. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2.
- Samaniego-Esguerra, C. M., Boag, I. F., Roberston, G. L. (1991), Comparison of regression methods for fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables, *Journal of Food Engineering*, 13: 113-115.
- Savage, G. P., Vanhanen, L., Mason, S. M., and Ross, A. B. (2000). Effect of Cooking on the Soluble and Insoluble Oxalate Content of Some New Zealand Foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 13(3): 201-206.
- Scanlin, D. (1999). Improving solar food dryers; extracted from Home power magazine, 69: 24-34.
- Sefa-Dedeh, S. & Agyir-Sackey, K. E. 2004. Chemical composition and the effect of processing on oxalate content of cocoyam *Xanthosoma sagittifolium* and *Colocasia esculenta* cormels. *Food Chemistry*, 85, 479–487
- Sefa-Dedeh, S., Staneley, P. W. and Voisey, P. W. (1979). Texture implications of the microstructure of legumes. *Food Technology*, 33: 77-83.

- Sefa-Dedeh, S., Staneley, P.W. and Voisey, P.W. (1978). Effects of soaking times and cooking conditions on the texture and microstructure of cowpea. *Journal of Food Science*, 43(5), 1833- 1839.
- 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 spectroscopy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 31: 79–85.
- Shaller, D. (1978). Fiber content and structure in foods. *American Journal of Clinic and Nutrition*. 31: 99-103.
- Sherman P. (1979). *Food texture and Rheology*. Academic press, London.
- Siljestrom, M., Eliason A. C, Bjorck, I. (1989). Characterization of RS from autoclaved wheat starch. *Starch/Stärke*, 41(4):147-151.
- Silverstein, R. M., Bassler G. C. and Morill T. C. (1998). Identification spectrométriques de composes organiques. Traduction française de la 5^{ème} Edition par Larue E., De Boeck, Université, Paris. pp 99.
- Singh. U., Voraputhaporn. W. Rao. P. V. and Jambunathan. R. (1989). Physicochemical characteristics of pigeonpea and mungbean starches and their noodle quality. *J. Food Sci.* 54. 1293-1297.
- Soudy, I. D. (2002). Contribution à l'étude de quelques propriétés fonctionnelles, nutritionnelles et sensorielles des farines de taro (*Colocasia esculenta*). . *Thèse présentée pour l'obtention du DEA en Sciences Alimentaires et Nutrition, ENSAI, Université de Ngaoundere*, 99p.
- Stapelfeidt H., Nielsen B. R., Skibsted L. H., (1997). Effet of heat treatment, water activity and storage temperature on the oxidative stability of whole milk powder, *Int. Dairy J.* 7. 331–339.

- Sugimoto, Y., Nishihara, K., and Fuwa, H. (1986). Some properties of taro (Ishikawase and Takenokoimo) and yam (Iseimo and Nagaimo) starch. *Journal of Japanese Society of Starch Science*. 34:1.
- Swinkels, J. M. (1985). Sources of starch its Chemistry and physics In: GMA Van Beymun (ed.), *Starch Conversion Technology*, (pp. 15-46) J.A. Rods. Pub. Marcel Dekkers, Inc. New York; nad Basel.
- Tagodoe, A. & Nip, W. K. (1994). Functional propersties of raw and precooked taro (*Colocasia esculenta*) flours. *International journal of food science and technology*, 29(4), 457-462.
- Taiwo, K. A., Akanbi, C., and Ajibola, O. O. (1997). The effects of soaking and cooking time on the cooking properties of two cowpea varieties. *Journal of Food Engineering*, 33(3-4), 337-346.
- Thomas D. S., Atwell, W. A. (1999). Starch Structure. In: *Starches. Critical guides for the food industry*. (Series Ed.), Eagan Press Handbook series. St. Paul, Minnesota, USA. pp. 1,2; 25-30
- Thybo, A. K., and Martens, M. (1999). Instrumental and sensory characterization of cooked potato texture. *Journal of Texture Studies*, 30: 259–278.
- Trèche, S. (1989). Potentialités nutritionnelles des ignames (*Dioscorea spp.*) cultivées au Cameroun. Vol. I : texte. Vol. II : annexes. Thèse, Editions de l'ORSTOM, Collection Etudes et Thèses, Paris, 595 p.
- Ukpabi, U.J., and Ejidoh, J. I. (1989). Effect of deep oil frying on the oxalate content and the degree of itching of cocoyams (*Xanthosoma* and *Colocasia spp.*). . *Technical paper presented at the 5th Annual Conference of the Agricultural Society of Nigeria, Federal University of Technology, Owerri, Nigeria, 3-6 sept.*
- Van Boekel, M. (1996). Statistical aspects of kinetic modeling for food science

- 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.
- Waldron, W. K., Parker, M. L. and Smith, A. C. (2003). Plant cell wall and food quality. *Comprehensive review in Food Science and Food Quality*, 2:101-110.
- Wang L, Flores A.R. (1999). Effects of flour particle size on the textural properties of flour Tortillas. *Journal of Cereal Science*. 31: 263–269.
- Wolf, M., Walker J. E. and Kapsalis, G. (1972). Water vapour sorption hysteresis in dehydrated food. *Journal of Agriculture of food chemistry*. 20 (5): 1073-1080.
- Wolf, W., Spiess W. E. L., Jung G., Weisser, H., Bizot. H. and Duckworth, R. B (1985). The water-vapor sorption isotherms of microcrystalline cellulose and purified potato starch. Results of a collaborative study. *Journal of Food Engineering*. 3: 51–73.
- Wurster, D. E, Peck, G. E and Kildsig, D. O, (1984). A thermodynamic study of the starch-water surface interaction. *Starch/Stärke*, 36 (9): 297-299.

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Didier MONTET, Ingénieur de Recherche, CIRAD, Montpellier

Monsieur Balaam FACHO, Professeur, Université de Ndjamena, Tchad

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur ABOUBAKAR

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Optimisation des paramètres de production et de conservation de la farine de Taro
(Colocasia esculenta)**

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Procédés biotechnologiques et alimentaires** »

Fait à Vandoeuvre, le 07 janvier 2009

Le Président de l'I.N.P.L.,

F. LAURENT



NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANDŒUVRE CEDEX

OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DE PRODUCTION ET DE CONSERVATION DE LA FARINE DE TARO (*Colocasia esculenta*)

RESUME

L'étude de l'optimisation des paramètres de production et de conservation de la farine de taro (*Colocasia esculenta*) a permis de mieux comprendre le processus cuisson des tubercules et de conservation des farines. Les études de cuisson des tubercules de six variétés ont montré que la variété *Ibo coco* est celle qui cuit vite eu égard à ses bonnes propriétés thermiques. La cuisson des tubercules dans l'eau du robinet est la meilleure technique de cuisson comparativement aux cuissons, à la vapeur, dans les solutions acides de citron et de tamarin. Les études de détermination des conditions optimales de séchage et conservation de la farine de taro, en utilisant un vieillissement accéléré à 10 et 20 jours de stockage à 45°C à des activités en eau de 0,07 ; 0,11 ; 0,23 ; 0,33 ; 0,53 ont permis de montrer que le vieillissement après 10 jour de stockage était suffisant pour les analyses. De plus l'application du modèle BET lors des mesures des isothermes de sorption, a permis de déterminer les teneurs en eau monomoléculaires théorique et expérimentale. Les farines produites à la teneur en eau monomoléculaire, donnent une pâte ayant des caractéristiques texturales proches de celles de la pâte traditionnelle. Toutefois, la conservation de ces farines à différent fractions particulières (75, 150 et 250 µm) montre que les petites fractions particulières (75 µm) absorbent plus vite de l'eau que les autres fractions particulières et sont de ce fait plus susceptibles à la détérioration.

Mots clés : tubercules de taro, farines, activité en eau, fractions particulières, conservations

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF PRODUCTION AND STORAGE OF TARO FLOUR (*Colocasia esculenta*)

ABSTRACT

Study on optimization of production and storage parameters of the taro (*Colocasia esculenta*) flour permitted to better understanding the cooking process of taro tubers and storage of taro flours. Studies of cooking of six varieties of tubers showed that the variety *Ibo coco* had high rate of cooking, due to his good thermal properties. The cooking of tubers in the faucet water is the best technique of cooking compared to, steam cooking, lemon and tamarin cooking. Studies of determination of the optimal conditions of drying and storage of the taro flour, using an accelerated ageing to 10 and 20 days of storage at 45°C to the activity in water of 0,07; 0,11; 0,23; 0,33; 0,53, showed that the ageing after 10 day of storage was sufficient for analyses. Besides the use of the BET model on sorption isotherms, permitted to obtain values of theoretical and experimental monolayer water. Flours produced at this monolayer water, give dough with the textural characteristics near of those of traditional dough. However, the storage of these flours with different particle sizes (75, 150 and 250 µms) shown that the small particle size (75 µms) absorb water quickly than other flours, and they are more susceptible to the deterioration.

Keys words: taro flour, water activity, particle sizes, storage