



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE DE LORRAINE

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires

Ecole Doctorale Ressources Procédés Produits Environnement

Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules

UNIVERSITE DE NGAOUNDERE

Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles

Formation Doctorale Sciences Alimentaires/Nutrition

Laboratoire de Biophysique, Biochimie Alimentaire et Nutrition

THESE EN CO-TUTELLE

Présentée devant l'Université de Lorraine et l'Université de Ngaoundéré

Pour obtenir les grades de

Docteur de l'Université de Lorraine et Docteur/Ph.D. de l'Université de Ngaoundéré

Spécialité : Procédés Biotechnologiques et Alimentaires / Sciences Alimentaires et Nutrition

Par

HIMEDA MAKHLOUF

Propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la farine et de l'amidon de taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) variété Sosso du Tchad en fonction de la maturité et du mode de séchage

Soutenue publiquement devant la commission d'examen le 11 septembre 2012

Président :

NDJOUENKEU R. Professeur, Université de Ngaoundéré

Rapporteurs:

AMVAM ZOLLO P. H. Professeur, Université de Yaoundé I

MONTET D. Docteur. HDR, CIRAD Montpellier

Examineurs:

SCHER J. Professeur, Université de Lorraine (Directeur de thèse)

MBOFUNG C. M. Professeur, Université de Ngaoundéré (Directeur de thèse)

BERNARD C. Docteur, Ecole de Biologie Industrielle (EBI)-Cergy

TATSADJIEU L. Maître de Conférences, Université de Ngaoundéré

Invités:

FACHO B. Professeur, Université de N'djamena

NJINTANG N. Maître de Conférences, Université de Ngaoundéré

GAIANI C. Maître de Conférences, Université de Lorraine

DEDICACES

*A mes défunts parents
Makhlouf Brahim et Mardia Tawati*

*A mes frères et sœurs: Brahim Makhlouf, Tawati
Makhlouf, Moukhtar Makhlouf, Moukhtar
Tawati, Mabrouka Makhlouf, Mansoura
Makhlouf et Souad Makhlouf*

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée au Laboratoire de Biophysique, Biochimie Alimentaire et Nutrition (LABBAN) de l'ENSAI de l'Université de Ngaoundéré et au Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules (LIBio) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) de l'Université de Lorraine.

Je voudrais avec enthousiasme rendre mérite à tous ceux qui à leur manière m'ont aidé à mener à bien cette thèse.

Je tiens à remercier en premier lieu « Allah » le Tout Puissant de m'avoir donné courage et santé pour achever ce travail.

Je désire alors exprimer ma profonde gratitude :

Au projet CORUS-IRD 6052 (Coopération pour la Recherche Universitaire et Scientifique) qui a financé une partie de ce travail.

Au Professeur Carl MBOFUNG : C'est un grand honneur que vous m'accordez en acceptant de bien vouloir diriger ce travail malgré vos multiples occupations. Vous avez cultivé en moi le sens du travail bien fait et la rigueur dans la démarche scientifique. C'est ici l'occasion pour moi de vous rendre cet hommage mérité.

Au Professeur Joël SCHER Directeur de thèse : Vous avez été intéressé dès le premier jour de notre rencontre par la réalisation de ce travail. Je garde un meilleur souvenir de l'accueil qui m'a été réservé dans votre établissement. Je tiens à vous remercier pour votre disponibilité constante et pour vos conseils si précieux.

Au Professeur Njintang Nicolas, pour avoir accepté de faire partie de l'équipe principale qui m'a encadrée depuis la Maîtrise jusqu'aujourd'hui. En dehors de votre assistance scientifique et votre soutien matériel, vous avez été un bon aîné pour moi au cours de notre collaboration. Trouvez ici cher grand frère l'expression de mon profond respect.

Au Professeur Facho BALAAM, chef de l'équipe Sud 2 du projet CORUS-IRD 6052. J'ai eu le privilège de bénéficier comme tant d'autres de votre savoir-faire et votre savoir être. Vos qualités humaines et scientifiques seront pour moi une référence et je compte beaucoup sur vos conseils tout au long de ma vie. Veuillez accepter cher Professeur l'expression de ma sincère admiration et ma profonde reconnaissance.

A tous les enseignants et le personnel de l'ENSAI qui ont tout mis en œuvre pour parfaire notre formation.

Aux Professeurs Claire GAIANI et Muriel JACQUOT du LIBIO de l'ENSAIA, pour avoir répondu à mes préoccupations et l'aide apportée à la réalisation de ce travail.

Au Pr. Léopold TATSADJIEU, Dr Edith FOMBANG, Dr MOHAMMADOU et Dr Guy Bertrand NOUMI pour leurs multiples conseils et encouragements ;

Aux Dr Giscard KAPTSO, Dr ABOUBAKAR, Dr Augustin GODOUM, Dr Rober BEKA, Dr Ahmed MOHAGIR et Dr Patrice BOGNE pour leur assistance.

A Marie Noëlle MAUCOURT, Carole JEANDEL, Carole PEROUT, Anne LAPLACE et Cédric PARIS du LIBio pour m'avoir orienté, initié et formé dans l'utilisation des équipements pendant mon séjour à Nancy. Ma gratitude leur sera permanente.

A Adama GAMI et Fatimé HALIKI pour tout le soutien qu'elles ont su m'apporter durant cette formation.

A M. AUTOMNE technicien de laboratoire à la faculté des sciences exactes et appliquées de l'Université de N'djamena pour sa disponibilité et son aide précieuse.

A tout le personnel du Centre National de Nutrition et de Technologie Alimentaire du Ministère de la Santé Publique du Tchad : pour votre soutien, votre

sympathie et votre solidarité à mon égard.

A tous les étudiants de la formation doctorale et plus particulièrement Valentin GUIAMA, Colinlaw NDOUYANG, Djomdi, Bakari DAOUDOU, Barka ABAKOURA, Madeleine DANGWE, Viviane DJUIKWO, Nadège NGANOU, Emmanuel PANYO'O, Josiane NGATCHIC, Romelle FEUMBA, Armel ASSIENE, André MACHE et Pierre NOBOSSE. Merci pour tous les agréables moments passés ensemble au travail et en dehors.

A Richard NGUIMBOU (compagnon de tous les jours), Eric FANKEM et Abel WAFO pour l'excellent temps passé ensemble à Nancy comme à Ngaoundéré. Qu'ils trouvent ici mes vifs remerciements.

A mes amis Abdoulaye Brahim, Alhadj D. Annaïm, Alhadji Ibrahima, Alhadji Moussa, Abakar Adoum, Abdoulaye Abakar, Adoum Idriss, Boubakary Issa, Boukhari Abdou, Brahim Aboudiga, Dieudonné Tchopwe, Djibrine Mahamat, Doungouss Hessana, Hassana Oumarou, Ibrahim Hamadou, Ibrahim Oumar, Issa Moustapha, Isseini Anguini, Kemgang D. Tchouta, Mahadi Brahim, Mahamat Saleh Al-Goni, Mahamat Souleymane, Marie Goletti, Mohamadou Mal Oumar, Moïse D. Frina, Moustapha Mahamat Ali, Mvondo V. Y. Emmanuel, Ndam Njoya A., Ousmane Brahim, Outmane Djibrine, Sali Bakari, Yerima Moumoune, Youpoungam Abdou Azizi et Zakaria Yahya. Votre soutien a sans doute été important pour le bon déroulement de mes études. Soyez en remerciés.

A tous les voisins du quartier Kodogo (kousseri) pour leur soutien sans faille.

A tous ceux-là qui n'ont pas été cités nommément et dont le soutien moral et la présence à mes côtés ont été d'un grand apport dans la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

| | |
|--|------|
| DEDICACES | ii |
| REMERCIEMENTS..... | iii |
| SOMMAIRE | vi |
| LISTE DES TABLEAUX | x |
| LISTE DES FIGURES..... | xi |
| LISTE DES PHOTOGRAPHIES | xiii |
| LISTE DES ABREVIATIONS | xiv |
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| I - REVUE DE LA LITTERATURE..... | 5 |
| I. Le taro..... | 6 |
| I. 1. Origine et quelques données botaniques sur le taro | 6 |
| I. 2. Ecologie et culture de Colocasia esculenta..... | 8 |
| I. 3. Production de taro..... | 8 |
| I. 4. La maturité | 10 |
| I. 5. Valeur nutritive du taro | 12 |
| I. 6. Les cristaux d'oxalates de calcium et l'âcreté | 15 |
| I. 7. Transformation de tubercule en farine | 16 |
| I. 7. 1. Le séchage..... | 16 |
| I. 7. 1. 1. Le séchage solaire direct traditionnel | 16 |
| I. 7. 1. 2. Le séchage solaire direct amélioré | 17 |
| I. 7. 2. Le broyage | 19 |
| I. 8. Utilisations..... | 20 |
| I. 9. Contraintes liées à l'utilisation de la farine de taro | 21 |
| I. 9. 1. Le brunissement | 21 |
| I. 9. 1. 1. Le brunissement enzymatique..... | 21 |
| I. 9. 1. 2. Réaction de Maillard..... | 22 |
| I. 9. 2. La couleur | 25 |
| I. 9. 2. 1. Couleur et colorimétrie..... | 25 |
| I. 9. 2. 2. Espace colorimétrique..... | 26 |
| I. 9. 2. 3. Changement de la couleur | 26 |
| I. 10. Amidon..... | 27 |
| I. 10. 1. Extraction de l'amidon..... | 27 |
| I. 10. 2. Composition de l'amidon..... | 27 |
| I. 10. 2. 1. Amylose et amylopectine..... | 27 |
| I. 10. 2. 2. Le phosphore..... | 30 |
| I. 10. 3. Utilisations des amidons | 30 |
| I. 11. Quelques caractéristiques de la farine et de l'amidon..... | 31 |
| I. 11. 1. Influence du degré de maturité..... | 31 |
| I. 11. 2. Capacité d'absorption d'eau | 32 |

| | |
|---|-----------|
| I. 11. 3. Isothermes d'adsorption..... | 32 |
| I. 11. 4. La répartition granulométrique et la morphologie des amidons | 33 |
| I. 11. 5. La cristallinité des amidons | 34 |
| I. 11. 6. Les propriétés thermiques | 36 |
| I. 11. 7. La gélatinisation..... | 36 |
| I. 11. 8. La rétrogradation..... | 37 |
| I. 11. 9. La viscosité | 37 |
| I. 11. 10. Le profil textural des pâtes..... | 38 |
| I. 11. 11. Analyse sensorielle des pâtes..... | 39 |
| | |
| II - MATERIEL ET METHODES | 41 |
| | |
| II. 1. Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la composition biochimique des farines de taro Sosso | 42 |
| II. 1. 1. Culture et zone d'étude | 42 |
| II. 1. 2. Echantillonnage..... | 43 |
| II. 1. 3. Production des farines | 44 |
| II. 1. 4. Caractérisation biochimique des farines de taro Sosso | 44 |
| II. 1. 4. 1. Teneur en eau..... | 44 |
| II. 1. 4. 2. Teneur en cendres totales | 45 |
| II. 1. 4. 3. Teneur en protéines totales | 45 |
| II. 1. 4. 4. Teneur en sucres disponibles | 47 |
| II. 1. 4. 5. Teneur en lipides totaux | 48 |
| II. 1. 4. 6. Dosage des minéraux | 49 |
| II. 1. 4. 7. Profil des acides aminés | 49 |
| II. 1. 4. 8. Indice chimique | 50 |
| II. 1. 4. 9. Protéines solubles | 51 |
| II. 1. 4. 10. Teneur en oxalates totaux | 51 |
| II. 1. 4. 11. Teneur en fibres brutes..... | 52 |
| II. 1. 4. 12. Amidons totaux..... | 54 |
| II. 2. Caractérisation physico-chimique de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité | 56 |
| II. 2. 1. Echantillonnage..... | 56 |
| II. 2. 2. Extraction de l'amidon..... | 56 |
| II. 2. 3. Caractérisation de l'amidon..... | 57 |
| II. 2. 3. 1. Composition chimique..... | 57 |
| II. 2. 3. 2. Teneur en amylose..... | 57 |
| II. 2. 3. 3. Teneur en phosphore | 58 |
| II. 2. 3. 4. Capacité d'absorption d'eau et Indice de solubilité..... | 59 |
| II. 2. 3. 5. Gonflement : | 60 |
| II. 2. 3. 6. Propriétés thermiques des amidons | 60 |
| II. 2. 3. 7. Détermination de l'isotherme d'adsorption..... | 61 |
| II. 2. 3. 8. Détermination des paramètres de couleur..... | 63 |
| II. 2. 3. 9. Répartition granulométrique de particules d'amidon..... | 64 |
| II. 2. 3. 10. Morphologie des granules d'amidon | 65 |
| II. 2. 3. 11. Forme de particules | 66 |
| II. 2. 3. 12. Cristallinité des amidons | 66 |
| II. 3. Propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines de taro Sosso : influence du degré de maturité et du mode de séchage | 68 |

| | |
|---|-----------|
| II. 3. 1. Echantillonnage..... | 68 |
| II. 3. 2. Propriétés physicochimiques..... | 69 |
| II. 3. 3. Plus petite concentration gélifiante (PPCG) | 69 |
| II. 3. 4. Propriétés d’empattage | 69 |
| II. 3. 5. Propriétés d’écoulement des farines | 70 |
| II. 4. Effet du degré de maturité et du mode de séchage sur la texture et la couleur de la | |
| pâte de taro Sosso | 71 |
| II. 4. 1. Echantillonnage..... | 71 |
| II. 4. 1. 1. Préparation de la pâte de taro Sosso | 71 |
| II. 4. 2. Les précurseurs de brunissement | 72 |
| II. 4. 2. 1. Sucres réducteurs | 72 |
| II. 4. 2. 2. Amines libres | 72 |
| II. 4. 2. 3. Produits intermédiaires et finaux des réactions de Maillard..... | 73 |
| II. 4. 2. 4. Les composés phénoliques totaux | 73 |
| II. 4. 3. Analyse trichromatique des couleurs des pâtes | 74 |
| II. 4. 4. Analyse sensorielle des pâtes..... | 74 |
| II. 4. 5. Profil de texture des pâtes | 75 |
| II. 4. 6. Analyses statistiques..... | 76 |
| | |
| III - RESULTATS ET DISCUSSION | 78 |
| III. 1. Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la composition biochimique | |
| des farines de taro Sosso | 79 |
| III. 1. 1. Composition chimique | 79 |
| III. 1. 2. Teneur en minéraux | 84 |
| III. 1. 3. Profil des acides aminés | 87 |
| III. 1. 4. Indice chimique | 90 |
| III. 1. 5. Solubilité des protéines dans l’eau..... | 92 |
| III. 1. 6. Teneur en oxalates totaux..... | 94 |
| III. 1. 7. Teneur en amidons totaux | 96 |
| Conclusion partielle..... | 98 |
| III. 2. Caractérisation physico-chimique de l’amidon de taro Sosso en fonction du degré de | |
| maturité..... | 99 |
| III. 2. 1. Composition chimique des amidons de taro Sosso..... | 99 |
| III. 2. 2. Teneur en amylose et en phosphore des amidons | 100 |
| III. 2. 3. Propriétés fonctionnelles des amidons..... | 103 |
| III. 2. 3. 1. Capacité d’absorption d’eau et indice de solubilité des amidons..... | 103 |
| III. 2. 3. 2. Le gonflement | 106 |
| III. 2. 4. Propriétés thermiques des amidons..... | 107 |
| III. 2. 5. Isotherme d’adsorption des amidons de taro Sosso | 109 |
| III. 2. 6. Paramètres de couleurs des amidons..... | 112 |
| III. 2. 7. Microstructure et répartition granulométrique de l’amidon de taro | 113 |
| III. 2. 8. La forme des particules..... | 118 |
| III. 2. 9. La cristallinité des amidons | 120 |
| Conclusion partielle..... | 123 |
| III. 3. Propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines de taro Sosso : influence du | |
| degré de maturité et du mode de séchage..... | 124 |

| | |
|---|------------|
| III. 3. 1. Capacité d'absorption d'eau et indice de solubilité dans l'eau | 124 |
| III. 3. 2. La plus petite concentration gélifiante (PPCG)..... | 128 |
| III. 3. 3. Le gonflement | 129 |
| III. 3. 4. Isotherme d'adsorption..... | 131 |
| III. 3. 5. Répartition granulométrique | 134 |
| III. 3. 6. La formes des particules | 138 |
| III. 3. 7. Propriétés thermiques | 141 |
| III. 3. 8. Propriétés d'empattage | 142 |
| III. 3. 9. Couleur des farines | 147 |
| III. 3. 10. Les propriétés d'écoulement des farines..... | 149 |
| III. 3. 11. Analyses en composantes principales | 153 |
| Conclusion partielle..... | 160 |
| III. 4. Effet du degré de maturité et du mode de séchage sur la texture et la couleur de la pâte de taro Sosso..... | 161 |
| III. 4. 1. Sucres réducteurs | 161 |
| III. 4. 2. Amines libres..... | 163 |
| III. 4. 3. Produits intermédiaires et finaux des réactions de Maillard | 164 |
| III. 4. 4. Les composés phénoliques totaux | 166 |
| III. 4. 5. Couleur des pâtes | 168 |
| III. 4. 6. Analyse sensorielle des pâtes de taro Sosso..... | 172 |
| III. 4. 7. Profil de texture des pâtes de taro Sosso | 182 |
| Conclusion partielle..... | 189 |
| DISCUSSION GENERALE | 190 |
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES..... | 199 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:..... | 202 |
| PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET CONFERENCES AVEC COMITE DE LECTURE..... | 229 |
| RESUME..... | 232 |
| ABSTRACT | 232 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 : Profil en acides aminés des tubercules de taro (Njintang, 2003) | 14 |
| Tableau 2: Caractéristiques morphologiques des granules d'amidon des différentes sources (Swinkles, 1985) | 34 |
| Tableau 3: Gradient d'élution des acides aminés par chromatographie liquide haute performance en phase inverse | 50 |
| Tableau 4 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la composition des farines de taro Sosso | 82 |
| Tableau 5 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en minéraux des farines de taro Sosso | 85 |
| Tableau 6 : Le profil des acides aminés des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage..... | 89 |
| Tableau 7 : Indice chimique des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage..... | 91 |
| Tableau 8 : Composition chimique des amidons de taro Sosso en fonction du degré de maturité | 99 |
| Tableau 9: Propriétés thermiques des amidons de taro Sosso en fonction du degré de maturité | 109 |
| Tableau 10: Paramètres du modèle de GAB des amidons de taro Sosso en fonction du degré de maturité | 112 |
| Tableau 11 : Influence du degré de maturité sur les paramètres de la couleur de l'amidon de taro Sosso | 113 |
| Tableau 12: Degré de cristallinité et cristallinité relative des amidons de taro Sosso en fonction du degré de maturité | 122 |
| Tableau 13 : Paramètres du modèle de GAB des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage | 134 |
| Tableau 15 : Influence du degré de maturité et du mode séchage sur les paramètres de la couleur des farines de taro Sosso..... | 149 |
| Tableau 16 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les propriétés d'écoulement des farines de taro Sosso..... | 152 |
| Tableau 17 : Matrice de corrélation entre toutes les variables..... | 156 |
| Tableau 18 : Corrélation entre les variables et les quatre axes principaux | 157 |
| Tableau 19 : Classes des pâtes de taro Sosso sur la base de l'analyse K-means .. | 177 |
| Tableau 20 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur le profil de texture de la farine de taro Sosso | 183 |
| Tableau 21 : Corrélation entre les paramètres de la couleur et du profil de texture des pâtes de taro Sosso | 197 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|-----|
| Figure 1: Principaux pays producteurs de taro en Afrique..... | 9 |
| Figure 2: Réaction du brunissement enzymatique (Kroll et al., 2000). | 22 |
| Figure 4 : Structure de l'amylose (Horton et al., 1994) | 28 |
| Figure 5: Structure de l'amylopectine (Horton et al., 1994) | 29 |
| Figure 6 : Localisation de la zone d'étude | 43 |
| Figure 7: Espace chromatique CIE L*a*b* | 63 |
| Figure 8: Courbe typique de profil de texture de la pâte de taro Sosso | 76 |
| Figure 9 : Effet du degré de maturité et du mode de séchage sur la solubilité des protéines des farines de taro Sosso dans l'eau | 93 |
| Figure 10 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les oxalates totaux des farines de taro Sosso..... | 95 |
| Figure 11 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les amidons totaux des farines de taro Sosso..... | 97 |
| Figure 12 : Influence du degré de maturité sur la teneur en phosphore et en amylose de l'amidon de taro Sosso | 102 |
| Figure 13: Capacité d'absorption d'eau réelle de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité et de la température | 105 |
| Figure 14 : Influence du degré de maturité et de la température sur l'indice de solubilité de l'amidon de taro Sosso | 105 |
| Figure 15 : Influence du degré de maturité sur le gonflement de l'amidon de taro Sosso..... | 107 |
| Figure 16: Isotherme d'adsorption de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité | 110 |
| Figure 17 : Répartition granulométrique de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité. (A) : voie sèche ; (B) voie liquide..... | 115 |
| Figure 18 : variation de la sphéricité de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité..... | 119 |
| Figure 19 : variation de la convexité de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité..... | 119 |
| Figure 20 : Diffractogramme de l'amidon de taro Sosso des différents degrés de maturité.. | 121 |
| Figure 21 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la capacité d'absorption d'eau réelle des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique..... | 125 |
| Figure 22 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur l'indice de solubilité des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique..... | 127 |
| Figure 23 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la plus petite concentration gélifiante des farines de taro Sosso. | 130 |
| Figure 24: Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur le taux de gonflement des farines de taro Sosso. | 130 |
| Figure 25 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur l'isotherme d'adsorption des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique | 133 |
| Figure 26 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la répartition granulométrique des farines de taro Sosso par voie sèche. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique. | 136 |
| Figure 27 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la répartition granulométrique des farines de taro Sosso par voie liquide. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique | 137 |
| Figure 28 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la sphéricité des farines | |

| | |
|--|-----|
| de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique..... | 139 |
| Figure 29 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la convexité des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique..... | 140 |
| Figure 30: Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur le module élastique (G') des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique | 145 |
| Figure 31: Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur le module visqueux (G'') des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique | 146 |
| Figure 32 : Cercle de corrélation CP1xCP2 des propriétés physiques, thermiques et fonctionnelles de la farine de taro Sosso de différents degrés de maturité et modes de séchage. | 154 |
| Figure 33 : Distribution des farines de taro Sosso et des variables dans le système d'axe CP1XCP2 | 159 |
| Figure 34 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en sucres réducteurs des farines de taro Sosso..... | 162 |
| Figure 35 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en amines libres des farines de taro Sosso..... | 164 |
| Figure 36 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les produits intermédiaires de la réaction de Maillard des farines de taro Sosso. | 167 |
| Figure 37 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les produits de la réaction avancée de Maillard des farines de taro Sosso. | 167 |
| Figure 38 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en composés phénoliques totaux des farines de taro Sosso. | 168 |
| Figure 39 : L^* des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage | 169 |
| Figure 40 : a^* des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage | 170 |
| Figure 41 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les scores sensoriels des pâtes de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique | 174 |
| Figure 42 : Cercle de corrélation des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage..... | 176 |
| Figure 43 : Répartition des pâtes de taro Sosso de l'analyse sensorielle dans le système d'axe CP1 CP2 en fonction du degré de maturité et du mode de séchage..... | 176 |
| Figure 44 : Classes des pâtes de taro Sosso en fonction du K-means..... | 178 |
| Figure 45 : Caractéristiques des pâtes de taro Sosso au centre des classes..... | 179 |
| Figure 46 : Acceptabilité générale des pâtes de taro Sosso en fonction des classes..... | 181 |
| Figure 47 : Cercle de corrélation du profil de texture des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage..... | 185 |
| Figure 48 : Distribution des pâtes de taro Sosso du profil de texture dans le système d'axe CP1 CP2 en fonction du degré de maturité et du mode de séchage..... | 185 |
| Figure 49: Répartition des variables sur la couleur et la texture des pâtes de taro Sosso | 191 |

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

| | |
|--|-----|
| Photographie 1 : Plant de taro (<i>Colocasia esculenta</i>) variété Sosso en culture | 7 |
| Photographie 2: Tubercules de taro (variété Sosso) | 7 |
| Photographie 3 : Effet du degré de maturité sur la morphologie des granules d'amidon de taro Sosso observée par microscopie électronique à balayage | 117 |
| Photographie 4 : Pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage | 171 |

LISTE DES ABREVIATIONS

A280: Absorbance à 280 nm

A420: Absorbance à 420 nm

ACP : Analyse en Composantes Principales

AFNOR : Association Française de Normalisation

CAEr : Capacité d'absorption d'eau réelle

CIE: Commission Internationale de l'Eclairage

DNS : Acide 3, 5 dinitrosalicylique

DO : Densité Optique

ATD: Analyse Thermique Différentielle

DSC : Differentiel Scanning calorimetry

FAO : Food Agriculture Organisation

IS : Indice de solubilité

MEB : Microscope électronique à balayage

PPO: Polyphénol-oxydases

To: Température de début de gélatinisation

Tc : Température de fin de gélatinisation

Tp: Température de pic de gélatinisation

ΔH : Enthalpie de gélatinisation

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

MS : Matière sèche

MF : Matière fraîche

Mo : Masse initiale

T : Température

Meq : Masse à l'équilibre

PPCG : Plus petite concentration gélifiante

CP : Composante principale

SS : Séchage solaire

SE : Séchage électrique

IR : Indice de rétrogradation

Th : Teneur en huile

Tg : Taux de gonflement

DC : Degré de Cristallinité

CR : Cristallinité Relative

IB : Indice de blancheur

IC : Indice chimique

F6SS: Farine 6 mois séchage solaire

F7SS: Farine 7 mois séchage solaire

F8SS: Farine 8 mois séchage solaire

F9SS: Farine 9 mois séchage solaire

F10SS: Farine 10 mois séchage solaire

F6SE: Farine 6 mois séchage électrique

F7SE: Farine 7 mois séchage électrique

F8SE: Farine 8 mois séchage électrique

F9SE: Farine 9 mois séchage électrique

F10SE: Farine 10 mois séchage électrique

INTRODUCTION GENERALE

Les tubercules représentent une importante source alimentaire pour de nombreuses populations du monde (FAO, 2007). Dans les pays en développement (PED), ils constituent une marge importante d'emplois et de revenus pour les populations des zones rurales. Au Tchad, le taro est l'un des principaux tubercules cultivés et consommés. Ces dernières décennies, le taro de la variété Sosso est très cultivé en lieu et place du coton dans la région de Mayo Kebbi-Est. Après la récolte, l'excès de production de taro est transformé en cossettes et en farines qui servent à la préparation de la boule (Njintang, 2003). Cependant, le brunissement de cette farine pendant la cuisson limite son utilisation. Une enquête préliminaire menée auprès des populations tchadiennes a montré que celles-ci acceptent la farine de taro inversement à son niveau de brunissement. Dans l'optique de minimiser le brunissement de la farine de taro à partir de la variété Sosso, l'identification de facteurs autres qu'intrinsèques à cette variété a été menée. A ce titre, les facteurs qui pourraient être à l'origine du brunissement de ce taro sont la période de récolte qui, dans la pratique au Tchad, s'étale sur plusieurs mois ; et le séchage solaire qui est source de contaminations notamment d'ions métalliques. Une question sous-tend l'étude du brunissement lié aux facteurs externes à savoir : quels sont les effets de la période de récolte et de la méthode de séchage sur les propriétés physicochimiques de la farine et de l'amidon de taro Sosso, texturales et sensorielles de sa pâte ? L'enjeu est d'établir les conditions optimales de récolte et de séchage, afin de contribuer à l'amélioration de la production de la farine de taro Sosso.

La relation entre la maturité et les caractéristiques chimiques et technofonctionnelles du végétal a été largement abordée par différents auteurs. En effet, les

études réalisées par Lee *et al.*, 1990 ; Varoquaux *et al.*, 1991 sur *Chichorium endivia* ont montré que le brunissement diminue avec le degré de maturité. Inversement, Amiot *et al.* (1992; 1993) ont montré qu'il existe une corrélation entre la composition en phénols et la susceptibilité de brunissement de diverses variétés des pommes et poires à maturité. Sugimoto *et al.* (1995) ont montré que la teneur en amylose de la pomme de terre augmente avec la maturité contrairement aux conclusions auxquelles sont parvenus récemment Liu *et al.*, 2003. Des études ont rapporté la variation des propriétés physicochimiques de la farine et de l'amidon de *Pachyrhizus ahipa* en fonction du degré de maturité (Leonel *et al.*, 2005). D'autre part, le lien entre le brunissement et le mode de séchage a été illustré par les travaux de Hsu *et al.* (2003) qui ont montré l'influence de la méthode de séchage sur les caractéristiques de la farine de l'igname. Ces études démontrent qu'il est possible de contribuer à la résolution du problème de brunissement par la maîtrise de la période de récolte du tubercule, et la gestion de la technique de séchage. Toutefois, la maturité et le séchage peuvent affecter non seulement le brunissement, mais aussi la texture du produit. En effet, des travaux menés par Trèche et Agbor-Egbe (1996) ont montré que la matière sèche du tubercule d'igname augmente avec la maturité pour atteindre une maturité au bout de 9 mois. Alors que les sucres réducteurs augmentent, le taux d'amidon augmente à partir de 4 mois pour atteindre son optimum à 6 mois. Noda *et al.* (1997) ont montré que la période de récolte a un effet significatif sur les propriétés gélifiantes et la gélatinisation des tubercules de patate douce. Ces effets semblent se justifier par l'influence sur les propriétés physicochimiques de l'amidon. Récemment, Noda *et al.* (2004) ont étudié l'effet de la période de récolte sur les propriétés de l'amidon de pommes de terre. Ces travaux ont été relayés par ceux de Huang *et al.* (2006) qui ont démontré des modifications

hautement significatives des propriétés morphologiques, thermiques et gélifiantes de l'amidon pendant la croissance du tubercule d'igname. En relation avec le degré de maturité et le mode de séchage, les travaux disponibles dans la littérature ne se sont pas intéressés au taro, encore moins à la variété Sosso. Pourtant, le taro (variété Sosso) de par son brunissement atypique, mérite d'être étudié afin de contribuer au renforcement de la compréhension du brunissement des tubercules. La présente étude suit donc l'évolution des principales caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques de la farine de taro Sosso et leurs relations avec les variables environnementales dont les plus intéressantes en liaison avec la pratique paysanne est l'état physiologique du tubercule et le mode de séchage.

C'est ainsi que ce travail a pour objectif général d'étudier l'effet du degré de maturité et du mode de séchage sur les propriétés physicochimiques et rhéologiques de la farine et de l'amidon de taro (variété Sosso du Tchad).

Plus spécifiquement il s'agit :

1- d'étudier l'influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la composition biochimique des farines de taro Sosso ;

2- de mener une analyse physico-chimique de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité ;

3- d'étudier les propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage ;

4- de déterminer les précurseurs de brunissement des pâtes de taro Sosso, le degré de maturité et le mode de séchage pour lesquels le brunissement est minimal dans la pâte.

Les hypothèses à vérifier dans cette étude sont :

Hypothèse 1: Le degré de maturité et le mode de séchage affectent la composition biochimique des farines de taro Sosso.

Hypothèse 2: Les propriétés physico-chimiques des amidons de taro Sosso varient à différents degrés de maturité.

Hypothèse 3: Le degré de maturité et le mode de séchage influencent les propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines de taro Sosso.

Hypothèse 4: Les précurseurs de brunissement, le degré de maturité et le mode de séchage influencent le brunissement et le profil de texture de la pâte de taro Sosso.

I - REVUE DE LA LITTERATURE

I. Le taro

I. 1. Origine et quelques données botaniques sur le taro

Le genre *Colocasia* serait d'origine asiatique. Il est très cultivé en Malaisie et en Polynésie d'où lui vient son nom de Taro (Matthews, 2004). Sa diffusion a été quasi générale en Asie intertropicale et même au Japon, avant d'atteindre l'Arabie et le bassin méditerranéen au début de notre ère, pour gagner l'Égypte et l'Afrique Tropicale (Spriggs, 1997). De là, cette plante aurait été introduite aux Antilles avec les esclaves africains.

Le taro (*Colocasia esculenta*) est une plante herbacée qui atteint une hauteur d'un à deux mètres et possède des feuilles larges, avec de longs pétioles sortant d'un verticille. Les feuilles sont longues de 20 à 50 cm, oblong-ovées avec des lobes basaux arrondis. Le tubercule a une forme cylindrique d'une longueur d'environ 30 cm et un diamètre d'environ 15 cm (Manner & Taylor, 2010). Les tubercules latéraux sont petits et peu nombreux. Il est reconnu dans le monde environ 1000 cultivars de taro qui diffèrent surtout par la coloration des feuilles, des pétioles, des tubercules ou de leur forme. On les classe généralement en deux groupes en fonction de leur forme : l'un diploïde appelé « dasheen » que l'on trouve majoritairement en Océanie et l'autre triploïde appelé « edoe » que l'on rencontre plutôt en Inde et Asie du Sud-Est (Nip, 1997).



Photographie 1 : Plant de taro (*Colocasia esculenta*) variété Sosso en culture



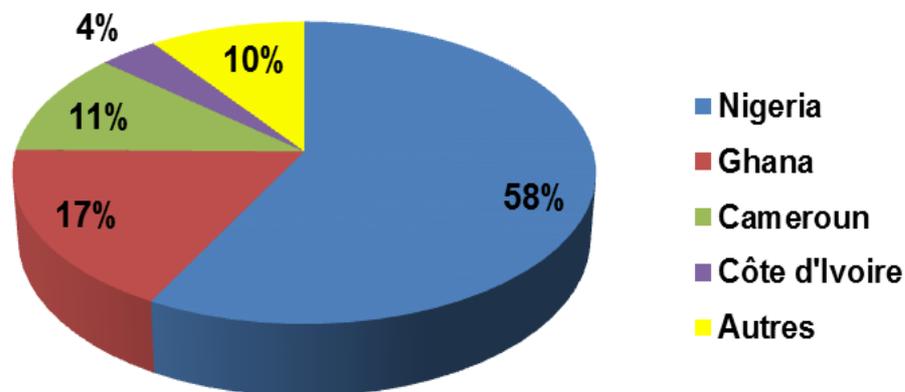
Photographie 2: Tubercules de taro (variété Sosso)

I. 2. Ecologie et culture de *Colocasia esculenta*

Le taro, qui pousse aussi bien dans les régions de haute altitude bien arrosées par les pluies que dans les bas-fonds mal drainés, requiert plus de 2000 mm de pluie par an (Nip, 1997). Certains cultivars sont adaptés aux sols à haute salinité. C'est une plante d'ombre très souvent cultivée en association avec des cultures pérennes telles que le plantain, le palmier à huile, le cacaoyer, etc.... Au Cameroun, le taro est cultivé dans le sud, zone séparée du nord par la chaîne de l'Adamaoua. Il préfère les régions de pluviométrie dépassant 1000 mm et les terres profondes, mais drainées. Les régions de l'Ouest, du Littoral, du Centre et du Sud constituent les zones de production par excellence du taro dans ce pays (Njintang, 2003). Tout comme au Cameroun, le taro Sosso est cultivé au Tchad dans le sud et surtout dans la région de Mayo Kebbi (Est et Ouest), la Tandjilé et une partie du Logone.

I. 3. Production de taro

Selon les données de la FAO (2008) concernant la production des racines et tubercules en Afrique, le taro occupe la cinquième place après le manioc, l'igname, la pomme de terre et la patate douce. Sur le continent africain et notamment en Afrique subsaharienne, les racines et tubercules constituent les plus importantes cultures alimentaires. L'Afrique subsaharienne produit 92,25% de la production mondiale de taro. La production africaine de taro est estimée à 9,506 millions de tonnes (FAO, 2008). La Figure 1 montre les principaux pays producteurs de taro en Afrique. Le taro étant cultivé dans toutes les régions du pays, la production annuelle du Cameroun se lève à 1,133 millions de tonnes. Au Tchad la production du taro (Sosso) est limitée dans quelques régions et sa production annuelle est estimée à 40000 tonnes (Manner & Taylor, 2010).



(Source : FAO 2008).

Figure 1: Principaux pays producteurs de taro en Afrique

Dans les zones humides et subhumides du Ghana et du Nigeria, le taro à l'instar des autres racines et tubercules constituent les principales cultures vivrières dans les trois quarts des villages environ (Bell *et al.*, 2000). La quasi-totalité de la production de ces pays est autoconsommée. Au Bénin, au Ghana, au Nigeria, en République Centrafricaine, au Togo, en Côte d'Ivoire, au Liberia, au Cameroun et au Tchad, la production de taro est en majorité le fait de petites exploitations paysannes dont la préoccupation primaire est d'assurer leur propre subsistance (FAO, 2007). La disponibilité en racines et tubercules par rapport à la demande est tributaire du cycle cultural et de la saisonnalité des spéculations. Les périodes de mise en place et de récolte, ainsi que la durée d'exploitation des parcelles dépendent des zones écologiques. A titre d'exemple, au Tchad, le cycle cultural des différentes spéculations est de 9 à 12 mois pour le manioc, 6 à 10 mois pour le taro, 3 à 4 mois pour la patate douce. En général, le manioc et le taro sont cultivés une fois l'an, la

patate douce une à deux fois par an.

I. 4. La maturité

Le cycle de développement complet des Aracées est similaire. Il est généralement de 5 à 12 mois pour le taro et le macabo. Mais la différence se trouve dans la durée de la période allant de la germination à la floraison. Cette durée est de 18 mois chez *Amorphophallus* et moins de 12 mois chez *Colocasia esculenta* (Ivancic et Lebot, 2000). Le cycle de développement de *Colocasia esculenta* peut être découpé en trois phases:

La phase d'installation : Elle correspond à la période allant de la plantation à l'apparition des premières feuilles. C'est la période zéro du cycle.

La phase de développement végétatif : Elle est caractérisée par la formation et le développement des racines et des cormes. Elle est aussi marquée par un renouvellement des feuilles et une possible floraison. En effet, la formation et le développement des racines commencent quelques jours après la phase d'installation suivie du rapide développement des jeunes pousses. Jusqu'à la maturité, pendant que les premières feuilles jaunissent et tombent, apparaissent de nouvelles feuilles. Le rythme de renouvellement des feuilles dépend des facteurs climatiques et du stade de développement de la plante. Il est très ralenti à l'approche de la maturité. La formation de la corne principale commence environ trois mois après l'installation (Onwueme, 1999). Pour les cultivars produisant beaucoup de cormes secondaires (cormels), la formation de ceux-ci suit immédiatement celle de la corne principale. Les différents cultivars du taro fleurissent rarement (Caburet *et al.*, 2007). Mais quand la floraison a lieu, elle intervient au moment de la croissance maximale de la plante, soit trois à quatre mois après l'installation, donc au moment

de la mise en place de la corne principale. La première indication de l'apparition de l'inflorescence est la formation d'une feuille drapeau. Une fois le drapeau apparu, la première inflorescence apparaît le plus souvent une à trois semaines après. La floraison est beaucoup influencée par les facteurs climatiques. Les stress dus à l'environnement peuvent arrêter l'initiation florale. Dans ce cas, seule la feuille drapeau indique l'aptitude à la floraison (Ivancic et Lebot, 2000).

La phase de maturation : Au cours de cette phase, il y a réduction du nombre total de feuilles par plante, diminution de la longueur des pétioles, ralentissement du développement des jeunes pousses et le grossissement des cornes. Ainsi, le développement de l'appareil aérien ralentit au profit de celui des cornes. Lorsque les conditions du milieu deviennent difficiles, le développement des jeunes pousses diminue et les cornes permettent à la plante de résister (Onwueme, 1999). Les tubercules sont matures entre 6 et 9 mois après la plantation et peuvent rester en terre jusqu'à 12 mois (Manner and Taylor, 2010). Au Tchad, la récolte des tubercules de taro Sosso se fait entre 6 et 10 mois selon la demande.

Changements au cours de la maturité : Au cours de la vie sur la plante, le tubercule subit une phase de croissance, puis de maturation. Les différentes étapes de la vie du tubercule précédant la récolte jouent un rôle fondamental dans la qualité du tubercule et de ses dérivés. Le tubercule durant sa période de croissance, accumule plus ou moins de substances de réserve telles que l'amidon. Ces substances servent à assurer la continuation du métabolisme après récolte (Manner and Taylor, 2010). La maturation des tubercules correspond à un ensemble de changements biochimiques et physiologiques conduisant à l'état de maturité et conférant au tubercule ses caractéristiques organoleptiques. Au-delà de l'état de

maturité, le tubercule entre dans une période de sénescence conduisant à la désorganisation cellulaire et à la mort. Parmi les changements biochimiques subis par le tubercule, certains sont directement perçus par le consommateur, tels que la dégradation des chlorophylles, au cours de la maturation qui se résorbent et laissent apparaître progressivement d'autres pigments. Il se produit aussi une augmentation de la teneur en sucres qui se produit par dégradation de l'amidon sous l'action de l'amylase (Manner and Taylor, 2010).

I. 5. Valeur nutritive du taro

De nombreux travaux (Njintang, 2003 ; Himeda, 2004 ; Aboubakar, 2009) ont rapporté la composition chimique du taro. Il en ressort que le taro est un aliment essentiellement énergétique avec une teneur en glucides de 60 à 90%. L'amidon représente 66 à 86% de ces glucides (Aboubakar *et al.*, 2008). La teneur en amylose varie entre 17 et 31% (Njintang, 2003). La variation de la teneur en amylose peut être due à la méthode de détermination de ce dernier, à la méthode d'extraction de l'amidon ou à la variété et l'écologie du tubercule. D'après les travaux de Huang *et al.* (2000), la teneur en fibres alimentaires dans le taro varie entre 3,6 et 3,8%. Les recherches ont montré qu'une consommation accrue de fibres alimentaires peut réduire l'incidence de certaines maladies comme les diabètes, les cardiopathies ischémiques, le cancer du côlon et divers autres troubles digestifs. A ce titre, les fibres semblent agir comme un tamis moléculaire, retenant les substances cancérigènes qui autrement seraient remises en circulation dans l'organisme; elles absorbent aussi l'eau, favorisant ainsi l'émission des selles (Fiagan, 2007).

Le taro a une faible teneur en lipides (0,4-0,7%) et en protéines (1,0 à 4,5%) (Nip *et al.*, 1997). Cothineeranat *et al.* (2006) ont montré que le taux des protéines des tubercules de manioc varie avec la croissance. Dans les racines et tubercules, la

qualité des protéines, quant à leur composition en acides aminés essentiels, peut être comparée à celle des protéines animales contenues dans la viande de bœuf, les cerfs ou le lait (Fiagan, 2007). Les racines et tubercules contiennent généralement une bonne quantité de lysine mais leur teneur en acides aminés sulfurés est insuffisante (Fiagan, 2007). Njintang, (2003) a montré en effet que le taro contient la plupart des acides aminés (Tableau 1).

Le potassium est la principale substance minérale du taro avec une teneur de 1% (Sefa-Dedeh & Agir-Sackey, 2004). Les travaux de Huang *et al.* (2007) ont montré une augmentation de la teneur en potassium du tubercule de taro en fonction du degré de maturité. Le même phénomène a été observé par Contreras-Padilla *et al.* (2011) sur la teneur en calcium du figuier (*Opuntia ficus-indica* var. *redonda*) au cours de la maturité. En revanche, les conclusions de Trèche & Agbor-Egbe (1996) sur deux espèces d'igname ont montré que la teneur en fer, zinc, calcium et magnésium diminue avec le degré de maturité. Quand au sodium, il est très peu abondant, raison pour laquelle le taro est particulièrement utile à l'alimentation des hypertendus qui doivent limiter leur consommation en sel. Le sens de la variation des minéraux avec le degré de maturité ne semble pas être le même pour tous les tubercules. Cette variation contradictoire justifie davantage le choix des paramètres dans ce travail.

Tableau 1 : Profil en acides aminés des tubercules de taro (Njintang, 2003)

| Acides aminés (%) | Variété de taro | |
|-------------------------------------|-----------------|-------------|
| Acides aminés essentiels | Ibo Ngaoundéré | Sosso Tchad |
| Thréonine | 4,5 | 4,10 |
| Isoleucine | 4,04 | 4,19 |
| Leucine | 10,72 | 10,37 |
| Lysine | 5,43 | 5,55 |
| Méthionine + Cystéine | 0,12 | 0,10 |
| Phénylalanine | 5,93 | 5,57 |
| Tyrosine | 1,46 | 1,05 |
| Phénylalanine + Tyrosine | 7,39 | 6,62 |
| Valine | 6,40 | 6,27 |
| Histidine | 2,22 | 2,52 |
| Acides aminés non essentiels | | |
| Alanine | 5,93 | 6,08 |
| Acide aspartique | 16,07 | 15,23 |
| Acide Glutamique | 12,03 | 12,33 |
| Glycine | 6,18 | 6,08 |
| Proline | 4,78 | 4,73 |
| Serine | 6,07 | 5,76 |
| Arginine | 6,32 | 6,72 |

I. 6. Les cristaux d'oxalates de calcium et l'âcreté

Le taro contient des quantités considérables d'oxalates sous forme des cristaux d'oxalates calciques encore appelés raphides et d'oxalates solubles. L'oxalate soluble tend à précipiter le calcium et à le rendre inassimilable par l'organisme. La teneur en oxalates totaux dans le taro varie entre 2,05 et 4,21% (Nip *et al.*, 1989). La variation de cette teneur pourrait être attribuée à la maturité du tubercule tel que démontré par Contreras-Padilla *et al.* (2011) sur le figuier. Le taux élevé des cristaux d'oxalates de calcium dans certaines variétés de taro, a longtemps été utilisé pour expliquer le goût âcre de ce végétal et l'irritation qu'il provoque. Cependant, cette hypothèse ne peut pas expliquer tous les phénomènes associés à ces problèmes. Selon Nip (1997) 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. D'une part, les travaux de Njintang (2003) ont confirmé ces résultats 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 ces cellules. 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. Le séchage et le broyage des tranches entraînent une libération des raphides dans la pâte, ce qui pourrait avoir des conséquences sur la texture. A l'opposé, une cuisson préalable des tubercules avant séchage et broyage limite l'éjection des raphides et garantit probablement la bonne texture de la pâte. A 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 (Hodgkinson, 1977).

I. 7. Transformation de tubercule en farine

La transformation du taro en farine, comme la plupart des tubercules, nécessite deux principales opérations qui sont le séchage et le broyage.

I. 7. 1. Le séchage

Le séchage est une opération qui permet la réduction de la teneur en eau jusqu'à une humidité susceptible de permettre la conservation du produit sur une longue période. Les tubercules de taro sont périssables à cause de leur taux d'humidité élevé et des activités métaboliques importantes qui s'y déroulent après la récolte et doivent donc être vendus ou consommés frais dans un délai très court. A défaut d'être vendus ou consommés frais dans un délai très court, les tubercules se détériorent et deviennent impropres à la consommation. Le séchage permet aux paysans d'allonger la durabilité des produits, de diminuer les pertes post-recoltes et d'ajouter de la valeur à leurs produits. Ces paysans utilisent le séchage solaire direct traditionnel.

I. 7. 1. 1. Le séchage solaire direct traditionnel

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

- La forte dépendance vis-à-vis des conditions climatiques : Sécher un produit en

saison sèche donne de bons résultats. Mais dès l'arrivée de la saison des pluies, ou lors d'une dégradation momentanée des conditions climatiques, le séchage à l'air libre s'avère inopérant et les pertes sont importantes.

- La faible qualité nutritionnelle et microbiologique du produit séché, ainsi que ses caractéristiques organoleptiques parfois médiocres de goût, d'aspect, voire d'odeur. Les effets cumulés d'une exposition directe au soleil (perte en vitamines, brunissement), de l'activité enzymatique (destruction du produit) et du développement microbien (risque de présence d'éléments pathogènes) donnent des produits finaux indésirables (Rozis, 1985).

- L'importance du temps que nécessite cette pratique. Les personnes chargées du séchage consacrent une grande partie de leur temps à la préparation, à la manipulation, à la protection contre les nuisibles.

- La mauvaise protection face aux nuisibles. Le séchage à l'air libre sans système de protection efficace expose le produit à toutes sortes d'attaques extérieures (prélèvement par les rongeurs, infestation par les insectes...), à des contaminations d'ordres diverses comme les ions métalliques qui pourraient dans certaines circonstances être responsables du brunissement non enzymatique par complexation avec les composés phénoliques (Malmbergrand & Theander, 1985).

1. 7. 1. 2. Le séchage solaire direct amélioré

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

une autre claie de même nature (Ouaouich *et al.*, 2005). Ces dispositions empêchent tout contact du produit avec le milieu extérieur (insectes...). Les claies ainsi recouvertes sont déposées sur un support d'environ 1 mètre de haut et exposées directement au soleil. Quels que soient les progrès réalisés, cette méthode de séchage est loin de satisfaire les exigences du consommateur et aux critères de qualité requis sur les marchés. En effet, un séchage solaire direct traditionnel ou amélioré reste dépendant de la source d'énergie qui est le soleil. La nuit et en temps nuageux, le processus de déshydratation ralentit et peut même s'arrêter, allongeant la durée de séchage. De plus, les réhydratations multiples des produits influencent négativement leur qualité. Ceci a amené à concevoir des méthodes de séchage où l'air chaud est produit régulièrement et les paramètres de séchage maîtrisés. C'est le cas du séchage électrique (Ouaouich *et al.*, 2005).

1. 7. 1. 3. Le séchage électrique

On distingue le séchage par ébullition et le séchage par entraînement. On parle de séchage par ébullition quand le produit atteint la température d'ébullition de l'eau. S'agissant du séchage par entraînement, le produit à sécher est mis en contact avec un courant d'air plus ou moins chaud. L'air chaud transmet une part de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matières de la surface du solide vers l'agent séchant. La méthode la plus utilisée dans l'industrie pour la déshydratation des denrées alimentaires est le séchage à l'air chaud, avec différents types de séchoirs (Vaughan & Judd, 2003). En fonction des caractéristiques de la matière première et du produit final, certaines conditions sont nécessaires pour réaliser le séchage. Divers paramètres interviennent dans la qualité du produit séché. La

composition physico-chimique du produit final est dépendante de la variété, du degré de maturité du végétal et des conditions climatiques (Gherghel *et al.*, 1999). Cependant, plusieurs chercheurs ont souligné que le séchage à l'air chaud (à des températures élevées) provoque une dégradation importante de la qualité attribuée aux aliments tel que : la couleur, la texture et la capacité de réhydratation (Yongsawatdigul & Gunasekaran, 1996 ; Feng & Tang, 1998).

I. 7. 2. Le broyage

Après l'opération de séchage des tranches des tubercules, le broyage permet de réduire la taille des particules en vue d'obtenir des poudres. Le broyage implique des contraintes quant à la dimension de la taille des particules. Cette taille est contrôlée en utilisant des tamis de différentes mailles. Le type de moulin utilisé a un impact majeur sur la qualité et le rendement des farines produites (Ward *et al.*, 1995). La farine de cossette ou «télibo-lifin» au Bénin est obtenue par concassage puis mouture 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, identiques à ceux classiquement utilisés pour la mouture des céréales, mais équipés de tamis à très grandes mailles ont été réalisés au Nord-Cameroun. Les cossettes issues de ce concassage sont ensuite réduites en farine à l'aide d'un moulin à meules ou d'un broyeur à marteaux équipé d'un tamis fin (Hounhouigan et Akisoe, 1997). Les farines de taro précuit 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 (Nip *et al.*, 1997).

I. 8. Utilisations

La farine de taro a des particules de tailles très fines variant de 1 à 4 μm (Jane *et al.*, 1992), ce qui lui confère une grande digestibilité à son amidon. Mais, cette farine est d'une utilité limitée pour l'industrie. En Afrique, le taro est presque exclusivement consommé à l'état frais. A part le séchage de tubercules frais ou précuits, entiers ou coupés en morceaux, aucune forme de transformation n'est connue en Afrique. Pour l'utilisation finale, les tubercules séchés sont transformés en farine. Cette farine peut servir à la préparation de divers plats (pâte, bouillie etc.). On trouve à Hawaii et en Polynésie un produit de transformation du taro très populaire qui s'appelle « poi ». Il s'agit d'une masse semi-liquide fermentée, au goût acidulé. On l'obtient par cuisson sous pression suivie d'un lavage, épluchage puis pilage. Ensuite, intervient le passage à travers une série de passoirs. La fermentation passera avant l'enrichissement avec des noix de coco. Dans le sud du Tchad et en particulier dans le Mayo Kebbi, les tubercules sont pelés, tranchés puis séchés et transformés en farine. D'une part, la farine composée de taro et de riz, est utilisée pour la préparation des aliments tels que le couscous ou la bouillie pour l'alimentation des enfants et des adultes. D'autre part, 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 (Aboubakar, 2009). Le taro est généralement consommé au Cameroun sous forme d'une pâte homogène appelée « achu » (Njintang, 2003). Dans la préparation de cet aliment, les tubercules sont préparés pendant 2 à 3 heures de temps, pelés et pilés dans un mortier. Cette pâte est consommée accompagnée d'une émulsion d'huile de palme dans l'eau très épicée appelée sauce jaune. Cet aliment est d'une très grande valeur socioculturelle dans les groupes ethniques Bamiléké et Ngemba de l'Ouest et du Nord-Ouest du

Cameroun. Partout où on produit la boule de taro, sa valeur sociale est considérable. Sur le plan nutritionnel, le taro sert de nourriture de base à plusieurs millions de personnes à travers le monde et son importance n'est plus à démontrer.

I. 9. Contraintes liées à l'utilisation de la farine de taro

I. 9. 1. Le brunissement

On distingue le brunissement enzymatique et la réaction de Maillard appelée encore brunissement non enzymatique (Cheftel et Cheftel, 1984 ; Kroll *et al.*, 2000).

I. 9. 1. 1. Le brunissement enzymatique

On appelle brunissement enzymatique, la transformation enzymatique dans ses premières étapes, de composés phénoliques en polymères colorés, le plus souvent bruns ou noirs. Les enzymes responsables du brunissement appartiennent au groupe des phénolases qui ont le cuivre comme groupement prosthétique (Cheftel et Cheftel, 1984). Ces enzymes ont besoin de l'oxygène pour leur activité. La Figure 2 montre la réaction du brunissement enzymatique. Les réactions commencent avec une hydroxylation suivie d'une oxydation enzymatique avec la formation des quinones (orthoquinone de couleur rouge). Les quinones sont des composés très réactifs et réagissent normalement avec des pigments bruns de poids moléculaire élevé. Le brunissement enzymatique est toujours indésirable, car il réduit l'acceptabilité de l'aliment. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour contrôler le brunissement enzymatique: le blanchiment (haute température en un temps court) qui inactive les enzymes; le dioxyde de soufre qui inhibe les phénolases; l'acide ascorbique qui empêche le brunissement en réduisant la quantité de o-quinone formée à partir de l'acide dihydroxyphénolique par les phénolases (Kroll *et al.*, 2000).

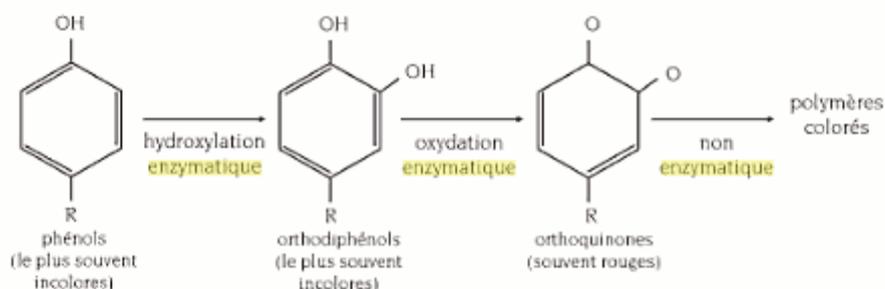


Figure 2: Réaction du brunissement enzymatique (Kroll *et al.*, 2000).

1. 9. 1. 2. Réaction de Maillard

La réaction de Maillard qui est la conséquence de la réaction entre les carbonyles (aldéhydes, cétones et sucres réducteurs) et les amines libres des acides aminés, des peptides et des protéines se passe selon les étapes suivantes :

- Condensation de Maillard : La première réaction du processus correspond principalement à l'addition nucléophile d'une fonction amine libre (ex : acide aminé, protéine, peptide) sur la fonction carbonylée d'un sucre réducteur (ou autre composé à fonction carbonyle libre). Elle conduit après isomérisation à la formation de glycosylamines N-substituées (aldosylamines ou cétosylamines). Les glycosylamines issues d'amines et de protéines sont relativement stables, tandis que celles issues d'acides aminés subissent rapidement un réarrangement dit d'Amadori.
- Réarrangement d'Amadori : Les glycosylamines (aldosylamines ou cétosylamines) subissent plus ou moins rapidement des transformations. Les cétosamines résultent du réarrangement d'une aldosylamine selon Amadori, tandis que les cétosylamines donnent des aldosamines par réarrangement dit de Heyns. Ces réactions sont catalysées par la fonction carboxyle des acides aminés : ainsi l'acide aminé agit comme catalyseur dans la condensation glucose-glycine, et la cétosamine qui se

forme est la D-fructoseglycine (Maillard, 1912).

- Scission : Une coupure des cétosamines et des aldosamines obtenus peut conduire à la formation de petites molécules carbonylées ou acides, qui, par condensation aldolique, donneront les polymères et produits odorants caractéristiques de la réaction de Maillard.

- Déshydratation forte : Par chauffage en milieu acide, les cétosamines donnent naissance à des substances de type furaldéhyde ou déshydrofuraldéhyde, en particulier le 5-hydroxyméthylfurfural.

- Déshydratation modérée et dégradation de Strecker : Lorsque la déshydrogénation est plus modérée, des substances réductrices sont obtenues : réductones et déshydroréductones. Celles-ci réagissent avec des acides aminés et entraînent leur dégradation par décarboxylation et transformation en aldéhydes : c'est la réaction de Strecker. La condensation de deux aminocétones, produits secondaires de la réaction de Strecker, donne des pyrazines, substances aromatiques très actives. Elles sont très présentes dans les produits alimentaires auxquels elles donnent des arômes particuliers plus ou moins désirables. Les réductones donnent également, par réaction avec des acides aminés puis de multiples réactions intramoléculaires, des composés très colorés (Maillard, 1912).

- Scission ou polymérisation : Les composés obtenus lors des réactions 3, 4 et 5 donnent par scission : des produits volatils et odorants, par polymérisation : des mélanoïdines. Ces produits sont caractéristiques de la réaction de Maillard.

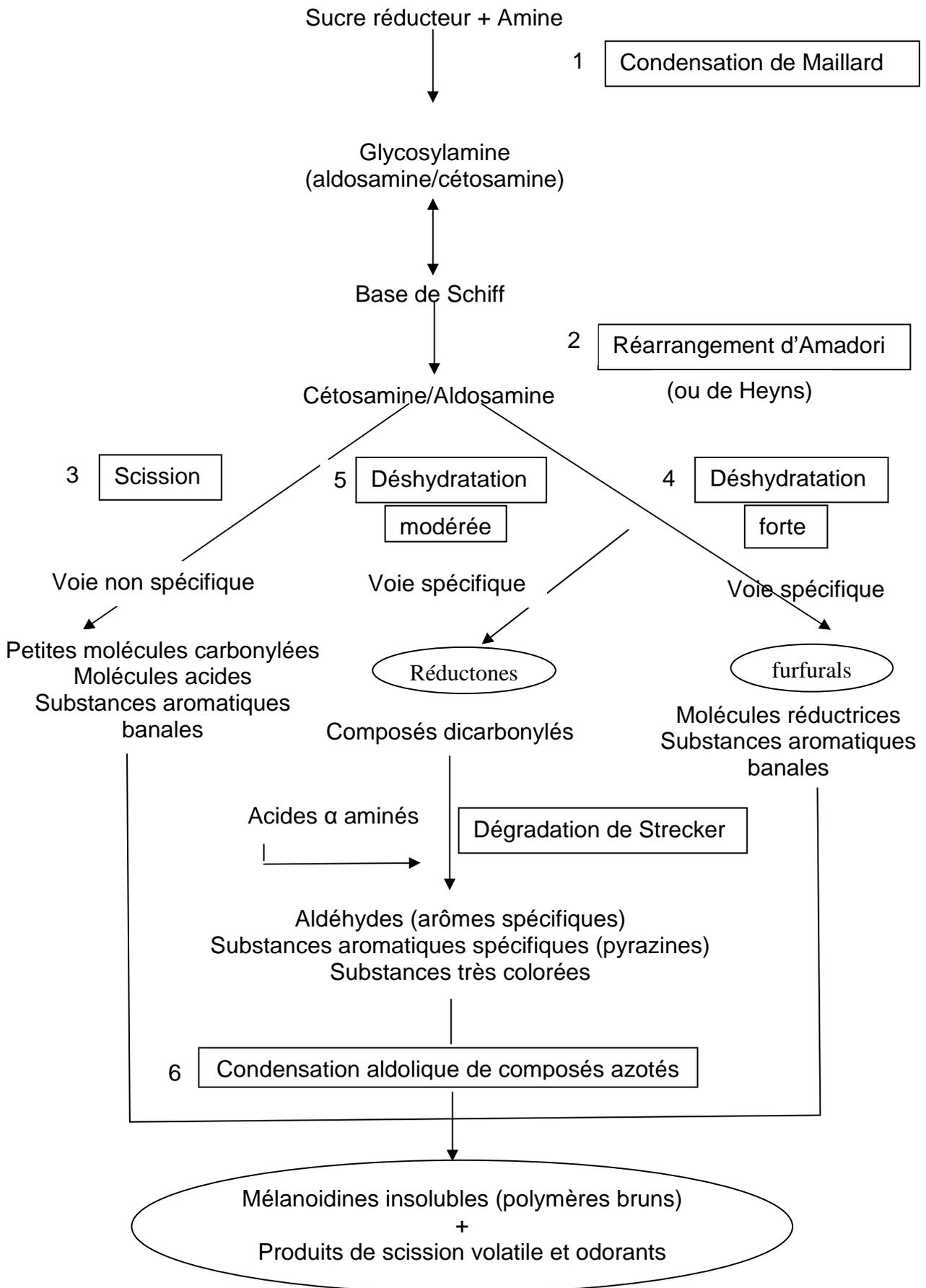


Figure 3 : Etapes de la réaction de Maillard (Maillard, 1912)

Toutefois, dans ses travaux, Njintang (2003) a montré un brunissement non enzymatique à médiation phénolique de taro Sosso. Les résultats de ces travaux ont montré que la variété 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. Pendant le pilage des tubercules cuits, il a été observé un brunissement intense, particulièrement dans la variété Sosso du Tchad. D'une part, ce type de brunissement souvent observé chez 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. A cet effet, il a été montré une corrélation significative négative entre le degré de brunissement et l'acceptabilité de la pâte (Njintang, 2003).

I. 9. 2. La couleur

I. 9. 2. 1. Couleur et colorimétrie

Chacun perçoit et interprète différemment la couleur (anomalies visuelles, situation géographique, éducation, goût). Cette sensation colorée existe parce que les rayonnements lumineux vont interagir sur l'objet et émettre d'autres rayonnements (réfléchis) perceptibles par l'œil puis interprétés par le cerveau. La couleur n'a donc pas de réalité physique, c'est une interaction résultante entre la lumière qui éclaire un objet et est vue par un observateur/œil. C'est la notion de triplet. Pour pallier tous ces facteurs influençant la vision de la couleur, la colorimétrie a été créée : elle permet de quantifier la couleur en donnant des valeurs numériques aux trois facteurs de classement : tonalité, saturation et clarté.

1. 9. 2. 2. Espace colorimétrique

Les premières recommandations de la CIE (commission internationale d'éclairage) concernant la colorimétrie furent publiées en 1931. Il existe un grand nombre d'espaces colorimétriques, le plus utilisé étant : CIE 1976 (L^* , a^* et b^*). Ce système est connu aussi sous le nom de CIE 1976. On retrouve dans cet espace la méthode de repérage tridimensionnel reprenant la théorie des trois paires antagonistes : blanc-noir, rouge-vert, jaune-bleu. Pour distinguer ce système, il a été convenu d'affecter à tous les paramètres une étoile. Chaque point peut être représenté par ses coordonnées rectangulaires L^* , a^* et b^* :

L^* : clarté ou luminance ;

a^* : composante chromatique rouge-vert ;

b^* : composante chromatique jaune-bleu.

1. 9. 2. 3. Changement de la couleur

La couleur est le facteur le plus important de l'apparence attribuée aux aliments, puisqu'elle influence l'acceptabilité du produit par le consommateur. Beaucoup de réactions peuvent affecter la couleur durant les traitements des aliments et leurs dérivés. Les plus communes sont : la dégradation des pigments, les réactions de brunissement (réaction de Maillard) et l'oxydation de l'acide ascorbique (Barreiro *et al.*, 1997 ; Lee et Coates, 1999). La mesure des coordonnées L^* , a^* et b^* peut être utilisée indirectement pour estimer le changement de la couleur des aliments, puisqu'elle est plus simple et rapide que l'analyse chimique (Maskan, 2001). Dans le cas du taro Rosso, compte tenu du brunissement de sa pâte pendant la cuisson, la détermination des paramètres de la couleur (L^* , a^* et b^*) sera faite sur les farines et les pâtes en fonction du degré de maturité et du mode de séchage.

I. 10. Amidon

I. 10. 1. Extraction de l'amidon

Les tubercules contiennent plus d'amidon, en poids sec, que presque toutes les autres cultures vivrières, et sont, par ailleurs, faciles à extraire à l'aide de technologies simples. La production artisanale d'amidon à des fins diverses, dont la blanchisserie et l'ajout aux sauces comme épaississant, est très répandue en Afrique. Pour obtenir de l'amidon, on râpe les racines, on mélange la pulpe avec de l'eau et on extrait l'amidon par filtration, décantation ou, en cas de transformation semi-industrielle ou industrielle, par centrifugation. La transformation des racines permet d'obtenir après séchage 20 à 25 % d'amidon. La productivité des procédés traditionnels est faible et la qualité du produit varie beaucoup en fonction des conditions de séchage et de la qualité de l'eau utilisée au cours de l'opération. En dehors du Nigeria et de l'Afrique du Sud, l'industrie d'extraction de l'amidon est quasiment inexistante en Afrique. Dans la majorité des pays d'Afrique tropicale, les tubercules sont une denrée de base et constituent une réserve importante en cas de perte d'autres cultures vivrières, et de plus en plus une culture de rente pour le marché urbain. Les politiques gouvernementales ne tendent guère à promouvoir la production d'amidon à partir de tubercules, même si plusieurs pays importent des amidons qui pourraient être produits localement à partir de ces tubercules (FAO, 2006). A ce titre, le taro variété Sosso constitue une source par excellence pour l'extraction de l'amidon et pour une éventuelle utilisation industrielle.

I. 10. 2. Composition de l'amidon

I. 10. 2. 1. Amylose et amylopectine

Les amidons sont des mélanges en proportions variables de deux types de constituants, l'amylose et l'amylopectine.

L'amylose est un polymère linéaire de résidus de D-glucose attachés par des liaisons α (1-4) (Figure 4). Sa masse moléculaire peut aller de 20000 (maïs) à 300000 (pomme de terre). Dans les granules d'amidon ce polymère est présent sous forme cristallisée, en raison particulièrement du grand nombre de liaisons hydrogènes existant entre les groupements hydroxyles. Les liaisons hydrogène de l'amylose sont responsables également de l'adsorption d'eau, ainsi que de la formation de gels (par création de réseaux tridimensionnels) au cours de la rétrogradation après gélatinisation. Du fait de sa nature cristalline, l'amylose ne gonfle qu'à une température élevée (Buleon *et al.*, 1998).

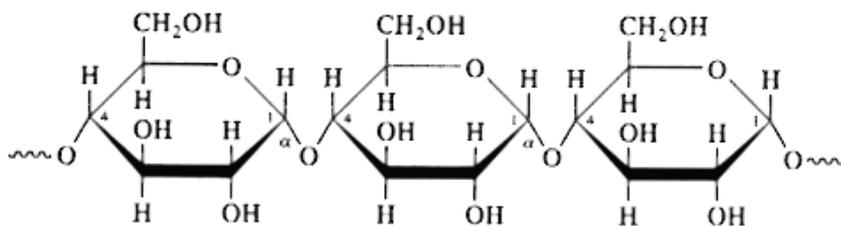


Figure 4 : Structure de l'amylose (Horton *et al.*, 1994)

La teneur en amylose varie selon la méthode de dosage mais surtout selon le degré de maturité du tubercule. La teneur en amylose augmente de 12% à 20% avec la maturité des tubercules de pomme de terre (Geddes *et al.*, 1965). Sugimoto *et al.* (1995) ont montré que la teneur en amylose de la pomme de terre a tendance à augmenter après la première maturité (deux mois). En revanche, Liu *et al.* (2003) ont démontré que la teneur en amylose diminue après la première récolte (deux mois) et reste sans changement pendant la suite du développement. Christensen & Madsen (1996) ont observé que la teneur en amylose était constante pendant le stade avancé du développement de tubercule de pomme de terre. Cet ensemble des

résultats contradictoires montrent la complexité des facteurs influençant la teneur en amylose des tubercules.

L'amylopectine est un polymère ramifié de D-glucose (Figure 5). Les liaisons sont du type α (1-4), sauf au niveau des branchements, où elles sont du type α (1-6). L'amylopectine présente un degré de cristallinité bien inférieur à celui de l'amylose. Sa masse moléculaire varie de 200000 à 1000 000 environ. L'amylopectine absorbe beaucoup d'eau à la cuisson, et est en grande partie responsable du gonflement des granules d'amidon. Les granules d'amidon riches en amylopectine sont plus faciles à dissoudre dans l'eau, à 95°C, que ceux qui contiennent beaucoup d'amylose.

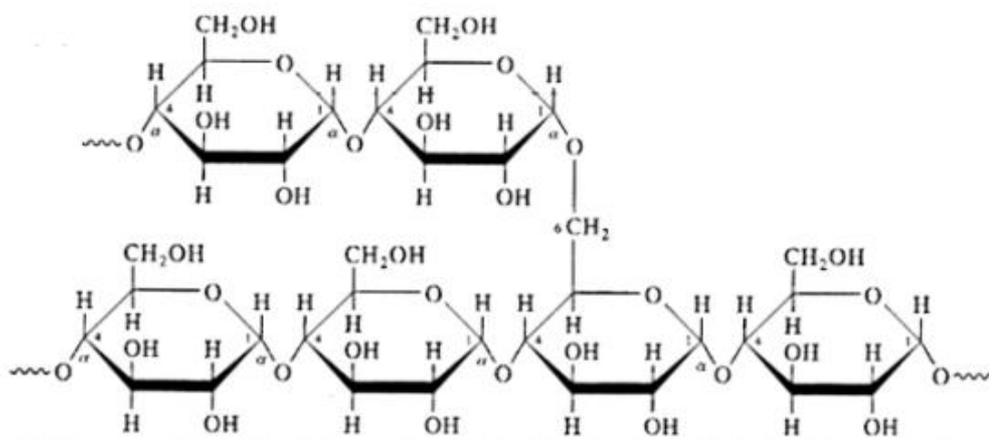


Figure 5: Structure de l'amylopectine (Horton *et al.*, 1994)

Du fait de l'encombrement stérique, les molécules d'amylopectine n'ont pas tendance à recristalliser, et possèdent de ce fait un pouvoir élevé de rétention d'eau, contrairement à celles d'amylose. Les solutions d'amylopectine ne rétrogradent pas (Buleon *et al.*, 1998). Les deux polymères ont des structures très différentes, l'amylose étant linéaire et l'amylopectine très ramifiée et chacun joue un rôle déterminant dans la fonctionnalité finale de l'amidon naturel et de ses dérivés:

viscosité, résistance au cisaillement, gélatinisation, texture, solubilité, pouvoir adhésif, stabilité du gel, gonflement au froid et rétrogradation, tout dépend du ratio amylose/amylopectine (Kaur *et al.*, 2007).

I. 10. 2. 2. Le phosphore

Dans les amidons, le phosphore est présent sous forme de mono-ester de phosphate (phosphore estérifié), de phospholipide ou de phosphate inorganique (Taggart, 2004). La teneur en phosphore de six cultivars de pomme de terre a été influencée par le degré de maturité et la température environnementale (Noda *et al.*, 2004). La teneur en phosphore des amidons de tubercules est plus élevée comparée à celle des amidons des céréales et ce phosphore, présent sous forme de mono-ester de phosphate dans les tubercules est généralement lié aux groupements hydroxyles en positions C₆ et C₃ des unités de glucose de l'amylopectine (Aprianita, 2010). Ces mono-esters de phosphate peuvent au cours des transformations contribuer à l'augmentation de la viscosité, de la capacité d'absorption d'eau, de la transparence et de la stabilité des gels d'amidon. La présence des mono-esters de phosphate sur les chaînes-B de l'amylopectine peut diminuer la température de gélatinisation en diminuant l'interaction entre les doubles hélices (Jane *et al.*, 1997). La diminution du gonflement et de la transparence des pâtes à base des farines de céréales a pour origine la formation des complexes entre les phospholipides et l'amylose et les branchements de l'amylopectine (Taggart, 2004).

I. 10. 3. Utilisations des amidons

L'industrie utilise des amidons de diverses origines : blé, orge, maïs, pomme de terre, riz et manioc. Chaque année, 60 millions de tonnes d'amidon sont extraits de diverses cultures de céréales, de racines et tubercules pour être utilisés dans une

palette impressionnante d'applications (FAO, 2006). Environ 10% de cet amidon est tiré du manioc. L'amidon de manioc est un produit qui offre de nombreuses utilisations sous diverses formes modifiées (dextrine, amidon pré-gélatinisé, amidon oxydé, amidon compact ou amidon stabilisé, etc.). L'amidon naturel n'est pas utile pour beaucoup d'applications du fait qu'il est assez instable et peut se contracter, perdre sa viscosité, etc., quand il est exposé à de hautes températures, à des acides ou à une action mécanique (Numfor, 1998). L'amidon de manioc est particulièrement adhésif en raison de sa viscosité, ce qui en fait une excellente matière première pour les applications industrielles comme les industries textile et papetière. Il s'utilise également dans de nombreuses autres industries. Malgré tout, ce potentiel est encore très peu exploité en Afrique (Numfor, 1998).

I. 11. Quelques caractéristiques de la farine et de l'amidon

I. 11. 1. Influence du degré de maturité

L'influence du stade de maturité à la récolte sur la composition en nutriments des farines a été illustrée par de nombreux travaux. Pendant la période de croissance des organes de réserve de deux espèces d'ignames au Cameroun, il y a augmentation des teneurs en amidon et en protéines brutes et diminution des teneurs en glucides membranaires, glucides solubles et en certains éléments minéraux exprimés par rapport à la matière sèche (Trèche *et al.*, 1982). Chotineeranat *et al.* (2006) ont montré que le taux des fibres dans la farine de manioc diminue alors que celui des cendres augmente avec le degré de maturité (6 à 12 mois). D'autres travaux montrent des résultats contradictoires quant aux sucres solubles. Certaines espèces les accumulent au cours de leur cycle végétatif (*Colocasia esculenta*, *Ipomea batatas*), alors que chez *Dioscorea cayenensis* le taux diminue régulièrement au cours du temps. Les pratiques qui consistent à laisser dans

le sol après maturité les tubercules des espèces qui ne se conservent pas (manioc, igname *Dioscorea dumetorum*) et qui permettent ainsi d'étaler leur période de consommation, s'accompagnent, en fait, de pertes notables de rendements en énergie et nutriments par rapport aux récoltes effectuées aux stades optimaux (Trèche et Guion, 1979). La date de récolte doit donc être soigneusement choisie en fonction des objectifs recherchés. Sur les mêmes espèces d'igname, on constate, lorsqu'on se rapproche du stade de maturité une augmentation importante du gonflement à 75 et 95 °C pour les deux espèces et de la taille des grains d'amidon pour *Dioscorea rotundata* (Trèche, 1988). Compte tenu de l'importance des variations observées, en particulier pour le gonflement, on peut s'attendre à des différences de comportement très marquées lors de l'application de certains procédés culinaires ou de traitements technologiques plus élaborés.

I. 11. 2. Capacité d'absorption d'eau

C'est un paramètre technologique indispensable permettant de maîtriser la consistance de la pâte. Il reflète la capacité d'hydratation, en présence d'eau liquide, de la pâte et dépend surtout de l'humidité, et du taux d'endommagement de l'amidon. La Capacité d'absorption d'eau dépend de la structure moléculaire et de la composition chimique de l'amidon (Tester & Morrison, 1990). A différentes températures la solubilisation de l'amylose des granules d'amidon pourrait également être un facteur influençant la Capacité d'absorption d'eau (Liu *et al.*, 2003).

I. 11. 3. Isothermes d'adsorption

L'activité de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température. La courbe correspondant à la teneur en eau d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HR et à température constante est appelée :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.

- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

Ces deux courbes ne sont pas naturellement les mêmes car le séchage d'un produit entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles.

- Il a été montré que certains produits présentent des isothermes d'adsorption différentes selon la méthode utilisée pour dégazer le produit avant de démarrer l'adsorption. On ne peut donc plus parler dans ce cas de l'isotherme (unique) d'adsorption mais spécifier en plus le mode de déshydratation utilisé.

- Les isothermes de désorption peuvent également présenter une variabilité selon le mode de préparation ou de fabrication s'il n'est pas naturel ou selon le degré de maturité ou l'espèce du produit s'il s'agit d'un produit végétal. Dans ce dernier cas, les variations sont toutefois peu importantes (Jannot, 2008).

I. 11. 4. La répartition granulométrique et la morphologie des amidons

La répartition granulométrique est un facteur important. Les farines fines s'hydratent facilement mais, ont tendance à faire des grumeaux. Par contre, les grosses particules de farine ne conduisent pas à la formation de grumeaux, mais s'hydratent lentement. La distribution granulométrique de la farine et de l'amidon en volume dépend du type des farines (Devaux *et al.*, 1998) et de la technique mise en œuvre pour la mesurer (Da Costa, 1997). La distribution granulométrique dépend aussi de l'âge physiologique de la plante. C'est le cas des travaux de Huang *et al.* (2006) sur l'igname qui ont observé que la répartition granulométrique de l'amidon d'igname augment avec la maturité. Des études antérieures effectuées sur la patate douce (Noda *et al.*, 1995), la pomme de terre (Liu *et al.*, 2003) ont montré le même

phénomène. Généralement, les amidons des racines et tubercules ont des granules volumineux et de forme ovale (Hoover, 2001). La gamme de la taille de granule d'amidon est de 2-100 μm (Cui, 2005). Le taro a la particularité d'avoir des granules de tailles plus petites (1 – 5 μm) que les autres racines et tubercules (Jane *et al.*, 1992). Au microscope, l'amidon apparait sous forme de granule de taille et de morphologie variables selon l'origine botanique. Le Tableau 2 montre les caractéristiques des granules de quelques amidons.

Tableau 2: Caractéristiques morphologiques des granules d'amidon des différentes sources (Swinkles, 1985)

| Amidon | Type | Taille (μm) | Forme |
|--------------|---------|--------------------------|-------------------------|
| Blé | Céréale | 2 - 35 | Rond, lenticulaire |
| Riz | Céréale | 3 - 8 | Polygonal, angulaire |
| Maïs | Céréale | 2 - 30 | Ronde, polygonale |
| Manioc | Racine | 4 - 35 | Ovale, tronqué |
| « Canna » | Racine | 5 - 44 | Ovale, polyédrique |
| Patate douce | Racine | 5 - 25 | Polygonale |
| Arrowroot | Racine | 5 - 70 | Irrégulière, polygonale |

I. 11. 5. La cristallinité des amidons

L'analyse de la cristallinité par la diffraction des rayons X a permis de définir

l'existence de trois principaux types de cristaux d'amidon en fonction de leur origine botanique (Imberty *et al.*, 1991).

Type A : présent dans les céréales (blé, maïs, riz...).

Type B : caractéristique des amidons de tubercules ou de racines (pomme de terre, manioc, taro...), mais d'autres travaux (Lim *et al.*, 1994) ont montré que les tubercules présentent aussi des amidons de type A.

Type C : structure intermédiaire contenant simultanément des cristallites de type A et B. Cette structure est observée dans les légumineuses (haricots, pois, fèves...).

La conformation du polysaccharide dépend des liaisons hydrogènes intramoléculaires et peut être modifiée par des processus comme l'hydratation ou les traitements hydrothermiques (gélatinisation). Ainsi, l'eau joue un rôle non négligeable sur la cristallinité et modifie sensiblement les spectres de diffraction. D'après Buleon *et al.*, 1990, la quantité de zone amorphe dépend de l'activité de l'eau. En général, l'amidon de type "A" a un degré de cristallinité plus faible comparé à celui de type "B" (Srichuwong *et al.*, 2005). Cette différence pourrait apporter quelques modifications dans la fonctionnalité des amidons. Le degré de cristallinité plus élevé donne une stabilité structurale plus élevée qui plus tard, peut entraîner une température de gélatinisation plus élevée puisque les molécules d'eau ont besoin de plus de temps pour pénétrer les régions cristallines (Moorthy, 2002 ; Srichuwong *et al.*, 2005). D'après les travaux de Liu *et al.* (2003), l'organisation de la structure semi cristalline de la pomme de terre n'a pas été affectée par le développement physiologique de la plante. Cependant, la nécessité d'avoir plus d'information sur la cristallinité d'amidon afin de déterminer le rapport entre la structure semi-cristallines et la période de croissance de tubercules de taro Sosso se fait sentir.

I. 11. 6. Les propriétés thermiques

Les propriétés thermiques mesurables à l'aide de l'analyse thermique différentielle qui permet de mesurer la différence de température entre un échantillon et une référence (matériau inerte thermiquement) en fonction du temps ou de la température, lorsqu'ils sont soumis à une programmation de température sous atmosphère contrôlée. Avec la méthode DTA, toute transformation est détectable pour toutes les catégories de matériaux. Lors d'une chauffe ou d'un refroidissement, toute transformation intervenant dans un matériau est accompagnée d'un échange de chaleur: L'analyse thermique différentielle permet de déterminer la température de cette transformation et d'en quantifier la chaleur (Donovan, 1979). Des études précédentes (Liu *et al.*, 2003 ; Huang *et al.*, 2006) ont rapporté la variabilité des propriétés thermiques (température et enthalpie de gélatinisation) de la pomme de terre et de l'igname qui est influencée par le degré de maturité. Noda *et al.* (1992) ; Svegmark *et al.* (2002) ont montré que les propriétés thermiques de la patate et de la pomme de terre augmentent avec la maturité. En revanche, Liu *et al.* (2003) ; Huang *et al.* (2006) ont observé que les propriétés thermiques de la pomme de terre et de l'igname baissent avec le degré de maturité. Ces observations montrent que la maturité à l'instar de la zone agroécologique, des conditions de culture et de récolte influence les propriétés thermiques des tubercules.

I. 11. 7. La gélatinisation

La gélatinisation ou encore l'empesage est l'une des premières étapes communes à de nombreuses applications industrielles de l'amidon. La gélatinisation correspond à un gonflement irréversible et une solubilisation partielle du grain d'amidon en excès d'eau et à des températures supérieures à 60 °C. Lors du

chauffage, les grains absorbent de l'eau dans les zones amorphes du grain provoquant un gonflement irréversible de ces zones. Ce gonflement conduit à la rupture des liaisons hydrogène dans les zones cristallines du grain et donc à la déstructuration du grain. Au fur et à mesure de la rupture des liaisons hydrogène, les constituants de faible masse moléculaire (amylose, matériel intermédiaire) diffusent hors du grain. Après traitement, l'empois d'amidon est constitué de fantômes de grains et des macromolécules solubilisées. Pendant la gélatinisation, il n'y a quasiment pas de dégradation ou de dépolymérisation des chaînes polymères du fait de la faible agitation. L'analyse thermique différentielle (AED, ou DSC) met en évidence un endotherme correspondant à une transition thermique du premier ordre (Angellier, 2005).

I. 11. 8. La rétrogradation

Après la gélatinisation, le refroidissement est suivi d'une reprise de la viscosité. Celle-ci est due à une réassociation des macromolécules (essentiellement d'amylose) qui vont former un gel. On appelle ce phénomène la rétrogradation (Zaidul *et al.*, 2007). La rétrogradation se produit en deux étapes : La première étape est la formation des régions cristallines à partir de l'amylose rétrogradé. La deuxième étape implique la formation d'une structure imposée par l'amylopectine. Ce gel va avoir tendance à être de plus en plus ferme et à expulser l'eau incluse entre les chaînes de macromolécules. On assiste alors à un relargage d'eau qui est appelé synérèse (Zaidul *et al.*, 2007). Contrairement à l'épaississement observé au chauffage, la rétrogradation est totalement indésirable.

I. 11. 9. La viscosité

La capacité de la farine ou de l'amidon à former une pâte est une propriété importante de ces derniers en tant qu'ingrédients pour améliorer la texture des

aliments. Les propriétés rhéologiques de la farine et de l'amidon jouent un rôle important dans les aliments et les applications industrielles. Le chauffage et le cisaillement appliqués pendant le processus pourraient entraîner des changements rhéologiques de la pâte et plus tard affecteraient le produit final (Katayama *et al.*, 2002). Il existe plusieurs techniques qui ont été appliquées à l'étude du comportement rhéologique de la pâte pendant le processus de chauffage. Le module de stockage (G') représente l'énergie stockée dans l'aliment tandis que le module de perte (G'') indique l'énergie absorbée ou perdue par cycle de déformation sinusoïdale. L'angle de phase (δ), indique le degré d'élasticité, c'est le rapport de G'' à G' pour chaque cycle. Ces paramètres (G'' , G' , et δ) sont employés pour évaluer les propriétés rhéologiques des échantillons d'amidon et de farines produits (Eerlingen *et al.*, 1995).

I. 11. 10. Le profil textural des pâtes

Le profil de texture consiste en la sensation ressentie lorsque ce produit est mis en bouche avant son ingestion. (Danien et Roudot, 2007). Tous les sens sont ainsi concernés : le toucher lors de la prise du produit et dans la mise en bouche, la vue lors du choix, l'ouïe lors de la mastication. Le goût et l'odorat sont théoriquement exclus, mais les études de psychorhéologie montrent que leur influence est impossible à éliminer dès lors que les tests se font dans le cadre de jury de dégustation (Bagot 1999).

L'analyse de texture instrumentale propose des méthodes très proches de la rhéologie des solides, c'est-à-dire que les principaux tests correspondent à des écrasements, torsions, percements, extensions, etc... du produit testé (Danien et Roudot, 2007). Dès lors, assez naturellement, ses praticiens se sont tournés vers la terminologie physique existante dans ce domaine, qui est très éloignée de la

terminologie en analyse sensorielle: on parle alors de caractéristiques mécaniques telles que coefficient d'élasticité, contrainte limite en compression, module d'Young, et plus de fermeté, gluant ou croquant. Cette nouvelle terminologie a l'avantage d'être parfaitement et précisément définie, ce qui la rend apte à la communication scientifique (Danien et Roudot, 2007).

I. 11. 11. Analyse sensorielle des pâtes

Connue et utilisée depuis de nombreuses années par l'industrie alimentaire, l'analyse sensorielle commence à faire des adeptes dans d'autres milieux industriels qui voient en cette méthode une façon de mieux appréhender les sensations des consommateurs vis-à-vis de leurs produits. L'analyse ou évaluation sensorielle est l'étude systématique des réponses humaines aux propriétés physico-chimiques des aliments, boissons ou autres produits de consommation (Depledt et SSHA, 2009). On la distingue en général des épreuves dites hédoniques (recherche de préférence) et des études des consommateurs. C'est l'ensemble de ces méthodes qui permettront de traduire le comportement des consommateurs lors de l'achat et de la consommation des produits. Utilisée d'abord dans le contrôle qualité, l'analyse sensorielle est vite devenue un outil indispensable au développement de nouveaux produits. Cette méthode n'est pas une simple observation ou dégustation à caractère subjectif, mais une véritable analyse objective qui est basée sur la transformation de sensations en données mesurables ; on parle d'ailleurs de métrologie sensorielle pour laquelle des normes sont définies. Dans la pratique, l'analyse sensorielle est basée sur (Depledt et SSHA, 2009):

- un panel de sujets sélectionnés par un recrutement préalable. Selon l'intensité de la sélection, on parlera de sujets naïfs, entraînés ou d'experts ;

- un local comprenant une salle de préparation des échantillons, une salle d'analyse sensorielle normalisée;
- des épreuves choisies en fonction du problème posé et des produits à analyser ; on distingue en général les épreuves discriminatives, les épreuves descriptives, les épreuves de classement ;
- des outils de traitement statistique indispensables à une analyse de l'information collectée.

Il est intéressant de constater à la fin de cette revue bibliographique que les propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la farine et de l'amidon de taro n'ont pas fait l'objet d'une étude en fonction du degré de maturité et du mode de séchage, d'où la nécessité de la présente étude. L'exploration du potentiel physico-chimique et rhéologique de la farine et de l'amidon de taro Sosso en rapport avec ces deux facteurs justifie d'avantage l'originalité de cette étude et du choix des variables.

II - MATERIEL ET METHODES

II. 1. Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la composition biochimique des farines de taro Sosso

II. 1. 1. Culture et zone d'étude

La zone d'étude se trouve dans la région de Mayo-Kebbi Est (Tchad), entre le 9^{ème} et le 11^{ème} degré de latitude Nord et le 14^{ème} et le 16^{ème} degré de longitude Est (Figure 6). Cette région a un climat tropical humide à deux saisons (saison sèche et saison pluvieuse). La saison pluvieuse dure de mai à novembre avec des fortes précipitations en août et septembre. La saison sèche va de décembre à avril avec des températures les plus élevées en mars et début avril. L'expérience a eu lieu entre le 1^{er} mai 2007 et le 1^{er} mars 2008. Le 1^{er} mai 2007 correspond à la date de plantation. La première récolte a eu lieu le 1^{er} novembre 2007, c'est-à-dire 6 mois après la plantation. Ainsi, les périodes de récolte qui correspondent aux degrés de maturités (7, 8, 9 et 10 mois) ont été effectuées de décembre à mars. Tous les tubercules ont été récoltés à chaque premier du mois (de décembre à mars) jusqu'au 1^{er} mars 2008 correspondant au dernier degré de maturité (10 mois).

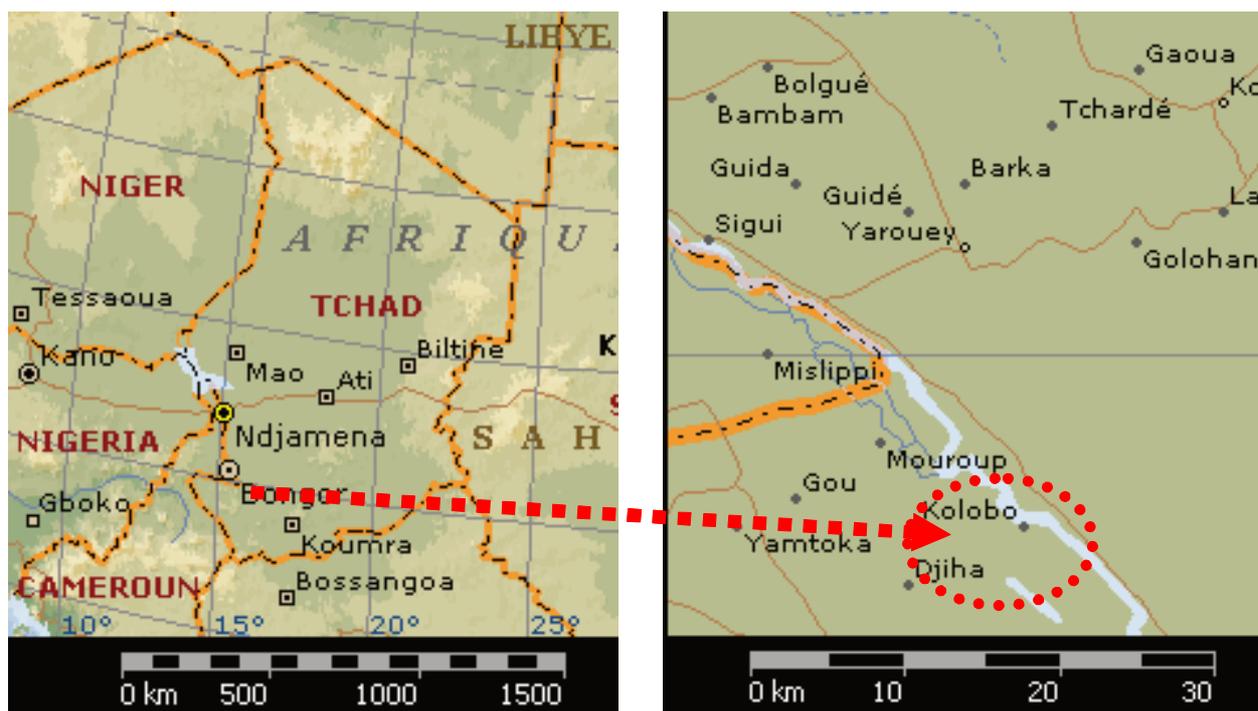


Figure 6 : Localisation de la zone d'étude

II. 1. 2. Echantillonnage

Un champ expérimental de 10 parcelles de 40 pieds a été mis en place. La plantation a été faite en billons de 20 mètres de long à intervalle de un mètre. On compte 20 pieds par billon et 2 billons par parcelle, soit une densité de plantation, recommandée comme optimale, de 15000 pieds par hectare (Lyonga, 1973). A chaque date de récolte retenue (6, 7, 8, 9 et 10 mois après la plantation) et pour chaque mode de séchage, nous avons déterré dans chaque parcelle 2 pieds par billon (4 pieds par parcelle). Autrement dit nous avons 40 pieds pour chaque traitement. A chaque degré de maturité, les tubercules ont été récoltés et acheminés au laboratoire où ils ont été lavés abondamment à l'eau de robinet pour éliminer la paille, les traces de poussières et produits d'origines diverses. Les échantillons ainsi traités ont été utilisés au plus tard dans les deux jours qui suivaient.

II. 1. 3. Production des farines

Les farines ont été produites par pelage du tubercule (à l'aide d'un couteau inoxydable), tranchage (0,5 cm d'épaisseur) à l'aide d'une trancheuse de cuisine électrique Siemens munie d'une lame en acier inoxydable et séchage. Le séchage électrique s'est effectué dans une étuve électrique (étuve THERMOSI, Modèle SR 1000) ventilée à 40 °C pendant 24 heures. Le séchage solaire (24 heures) s'est fait sur des claies constituées d'un cadre en bois dont le bas est recouvert d'une toile type moustiquaire en matière synthétique. Les tranches de taro Sosso sont disposées sur la toile et le tout est recouvert par une autre claie de même nature. Ces dispositions empêchent tout contact du produit avec le milieu extérieur (insectes...). Les claies ainsi recouvertes sont déposées sur un support d'environ 1 mètre de haut et exposées directement au soleil. Après le séchage, les tranches ont été broyées à 200 µm à l'aide d'un broyeur à couteaux AFK SM 3.3 P. Les farines obtenues à partir des cinq degrés de maturité (6, 7, 8, 9 et 10 mois) et de deux modes de séchage ont été utilisées pour les différentes analyses.

II. 1. 4. Caractérisation biochimique des farines de taro Sosso

II. 1. 4. 1. Teneur en eau

La teneur en eau des tubercules frais et des farines de taro Sosso a été déterminée par la méthode AOAC 925.10 (AOAC, 1990).

Principe : Le principe consiste à éliminer la teneur en eau des tubercules frais et des farines de taro Sosso par dessiccation à 105°C à l'étuve.

Mode opératoire : Pour ce faire, la coupelle à vide a été d'abord nettoyée, séchée et pesée (M_0). Une quantité de tubercule frais ou de farine (5 g) a été introduite dans la coupelle ($M_1=M_0+5$ g) et l'ensemble a été placé à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage, la coupelle a été sortie de l'étuve, refroidie dans

un dessiccateur (P_2O_5) et pesée (M_2) à nouveau. La teneur en eau (%) a été déterminée par la formule suivante :

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

II. 1. 4. 2. Teneur en cendres totales

La teneur en cendres totales des farines de taro Sosso a été déterminée par la méthode AOAC 920.87 (AOAC, 1990).

Principe : Le principe de la méthode consiste en une incinération de 3 à 5 g de poudre (contenus dans des creusets en porcelaine préalablement séchés) dans un four à moufle à 550°C.

Mode opératoire : Le creuset de minéralisation à vide a été d'abord nettoyé, séché et pesé (M_0). Le creuset contenant le produit humide (3 à 5 g) a été de nouveau pesé (M_1) et placé à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage, la coupelle a été sortie de l'étuve, puis refroidie dans un dessiccateur (P_2O_5) avant d'être pesée (M_2). Une fois pesés, les creusets ont été introduits dans le four à 550 °C, incinérés pendant environ 6 heures, refroidis dans le dessiccateur et pesés à nouveau. La teneur en cendres est la masse de produit restant dans le creuset après minéralisation rapportée à la masse sèche totale du produit.

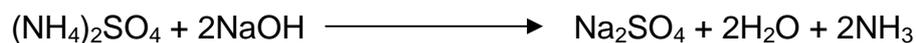
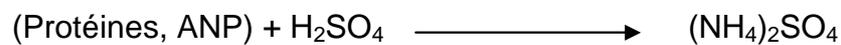
II. 1. 4. 3. Teneur en protéines totales

La détermination de la teneur en protéines totales a été effectuée selon la méthode de Kjeldahl AOAC (1999).

Principe : Cette méthode est basée sur la transformation de l'azote organique en azote minéral sous forme ammoniacale $(NH_4)_2SO_4$ par l'action oxydative de l'acide sulfurique bouillant sur la matière organique en présence d'un catalyseur.

Mode opératoire : Environ 0,1 g de farine de taro Sosso a été introduit dans

des matras (tubes de minéralisation) puis 2 mL de H₂SO₄, 1mL de peroxyde d'hydrogène et une pincée de catalyseur (Na₂SO₄ + CaSO₄ + Se) y ont été ajoutés. Ensuite, le tout a été minéralisé sur une rampe (Kjeldatherm, Gerhardt, Les Essarts le Roi, France) à 400°C pendant 2 heures. Le sulfate d'ammonium (NH₄)₂SO₄ est le produit essentiel de la minéralisation, obtenu par l'ajout d'acide sulfurique (H₂SO₄). Ensuite une base forte a été ajoutée (NaOH) en volume égal au volume de H₂SO₄ à l'aide d'un système de type microanalyse (Vapodest 50, Gerhardt, Les Essarts le Roi, France) selon la réaction suivante :



où ANP = azote non protéique.

L'hydroxyde d'ammonium (NH₄OH) formé au cours de la distillation est entraîné par la vapeur d'eau et récupéré dans une solution d'acide borique. La formation du borate d'ammonium ((NH₄)₃BO₃) fait augmenter le pH de la solution. La solution est ensuite titrée par l'acide sulfurique. Le volume d'acide sulfurique ajouté correspond à l'ammonium contenu dans l'échantillon de départ. La teneur en azote total (Nt) est alors calculée pour 100 g d'échantillon sec selon la formule suivante :

$$\text{Nt}(\%) = \frac{(V_1 - V_0) \times \text{MN}_2 \times \text{N} \times 100}{1000 \times \text{Ms}}$$

Avec Nt: azote total pour 100 g d'échantillon, V₁ : Volume de H₂SO₄ en mL nécessaire à la titration de l'échantillon, V₀ : Volume de H₂SO₄ en mL nécessaire à la titration du blanc, MN₂ : Masse moléculaire atomique de l'azote soit 14 g/mole, N:

Normalité de l'acide sulfurique, Ms: Matière sèche de la prise d'essai en g.

Azote non protéique (ANP):

Dans une fiole de 50 mL, 0,5 g de farine a été introduit, puis 20 mL de TCA 24 %. Le contenu a été agité pendant 1 heure et complété jusqu'au trait de jauge avec du TCA 12 %. Ensuite le mélange a été filtré et 2 mL du filtrat ont été minéralisés comme indiqué précédemment et l'azote non protéique (ANP) a été dosé.

$$\text{ANP}(\%) = \frac{(V_1 - V_0) \times MN_2 \times N \times 100}{1000 \times Ms}$$

Le pourcentage de protéines totales (Pt) a été déterminé de la manière suivante :

$$Pt = (Nt - ANP) \times 6,25$$

II. 1. 4. 4. Teneur en sucres disponibles

Les sucres disponibles des farines de taro Sosso ont été dosés par la méthode de Fischer et Stein (1961).

Principe : En présence de l'acide sulfurique 1,5 N et à chaud, les sucres disponibles sont hydrolysés en sucres simples. En présence des sucres simples (réducteurs) et à chaud, l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS) donne un complexe rouge-brun (l'acide 3-amino 5-nitrosalicylique) qui présente un maximum d'absorption à 540 nm.

Mode opératoire : Pour l'extraction des sucres disponibles 0,5 g d'échantillon ont été introduits dans un tube à essai contenant 20mL d'eau distillée, laissés 1 heure à température ambiante, puis porté à ébullition pendant 1 heure dans un bain marie à 100° C. Après refroidissement, 10 mL d'éthanol à 70%, 0,5 mL de sulfate de zinc (2 g / 100 mL), et 0,5 mL de ferrocyanure de potassium (10,6 g / 100 mL) ont été ajoutés. Le mélange a ensuite été laissé au repos pendant 15 minutes puis

centrifugé. Le surnageant a été recueilli dans une fiole de 50 mL et le volume ajusté au trait de jauge avec de l'eau distillée.

Pour le dosage, 0,5 mL d'extrait ont été mélangés à 0,5 mL d'eau distillée, 0,25 mL de DNS et l'ensemble a été chauffé au Bain-marie bouillant (100°C) pendant 5 minutes; puis le volume total a été ajusté à 5 mL avec l'eau distillée. La gamme d'étalonnage a été préparée de la même manière et l'échantillon est remplacé par une solution de maltose à 1mg/mL. La densité optique a été lue au spectrophotomètre à 540 nm contre un blanc.

II. 1. 4. 5. Teneur en lipides totaux

Les lipides totaux ont été déterminés par la méthode de Bourelly (1982).

Principe : Le principe de la méthode est basé sur l'extraction complète au Soxhlet de tous les corps gras présents dans un échantillon.

Mode opératoire : Les lipides ont été déterminés par différence de poids après extraction des lipides au Soxhlet. Pour ce faire, de petites enveloppes en papier filtre ont été préalablement séchées pendant 1 heure à l'étuve à 105°C et refroidies dans un dessiccateur; puis une prise d'essai (5g) de poudre sèche y a été introduite et l'ensemble a été pesé. Les lipides ont été extraits durant 8 heures à l'hexane (250 mL). Après extraction, les enveloppes contenant les poudres délipidées ont été séchées pendant 24 heures à l'étuve puis pesées. La teneur en lipides, exprimée en grammes pour 100 g de matière sèche représente le rapport de la différence de poids du sachet avant et après l'extraction sur la masse sèche de la poudre.

II. 1. 4. 6. Dosage des minéraux

La teneur en minéraux (K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu et Zn) a été déterminée par la méthode d'Onwuliri et Anekwe (1992).

Principe : Le principe de la méthode consiste à déterminer la teneur en minéraux par spectroscopie d'absorption atomique après solubilisation des cendres de farine en milieu acide.

Mode opératoire : Les cendres (1 g) ont été dissoutes dans 10 mL d'acide chlorhydrique puis complétées avec 100 mL d'eau distillée. 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 10 mL de chlorure de lanthane (18 g d'oxyde de lanthane + 250 mL d'HCl concentré dans 100 mL d'eau distillée) avant de compléter la fiole de 100 mL jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée (Onwuliri et Anekwe, 1992).

II. 1. 4. 7. Profil des acides aminés

La détermination des farines de taro Sosso a été faite par chromatographie liquide haute performance en phase inverse (Colonne PTC RP-18,220 mm de longueur, 2,1 mm de diamètre interne et une pré-colonne, Applied Biosystems, Applied Biosystems, Foster City, CA, USA). Les échantillons de farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage ont été hydrolysés sous vide à 150°C pendant 60 min dans un appareil Pico-Tag (Waters, Milford, MA, USA) en présence de HCl 6 N avec 1% de phénol, puis récupérés par de l'eau ultra pure et déposés sur un « auto dérivateur analyseur - 420a » de marque Applied Biosystems (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA). La dérivation au phényle isothiocyanate (PITC) a été faite en pré-colonne. La séparation des acides aminés a été faite sur une chaîne HPLC (Applied Biosystems model 172A: Corp, Foster City, CA, USA)

avec une colonne de phase inverse PTC RP-18 (2,1 x 220mm) série 238638, lot N° 02M9-40531 Brownlee (Applied Biosystems model 172A: Corp, Fosters City, CA, USA). Les solvants utilisés pour cette analyse sont l'acétate de sodium 45 mM pH 5,90 (A) et un mélange de 30% d'acétate de sodium 105 mM, pH 4,60 et 70 % acétonitrile (B), et la détection a été faite à 254 nm. L'acquisition et l'exploitation des résultats ont été faites par le logiciel Model 600 Data Analysis System (Applied Biosystems, Applied Biosystems, Foster City, CA, USA). Les paramètres du gradient sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3: Gradient d'élution des acides aminés par chromatographie liquide haute performance en phase inverse

| Etapes | Temps (min) | Solvant A (%) | Solvant B (%) |
|--------|-------------|---------------|---------------|
| 1 | 0,1 | 100 | / |
| 2 | 0,2 | 100 | / |
| 3 | 10 | 62 | 38 |
| 4 | 20 | 42 | 60 |
| 5 | 25 | / | 100 |
| 6 | 30 | / | 100 |
| 7 | 31 | / | 100 |
| 8 | 0 | 95 | 5 |

II. 1. 4. 8. Indice chimique

L'indice chimique des farines de taro Sosso a été déterminé par la méthode de Chavan *et al.* (2001).

Principe : Le principe de la méthode consiste à identifier les acides aminés limitant en calculant l'indice chimique connaissant la composition en acides aminés.

Mode opératoire : On détermine le pourcentage de chaque acide aminé essentiel de la protéine à tester par rapport à l'acide aminé essentiel correspondant de la protéine de référence (FAO, 1985). L'indice chimique est noté IC. C'est l'un des paramètres d'évaluation de la valeur nutritionnelle des aliments. L'indice chimique est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$IC = \frac{\% \text{ acide aminé de l'échantillon}}{\% \text{ acide aminé de référence}} \times 100$$

Les valeurs de la protéine de référence (FAO, 1985) utilisées sont leucine = 6,6 ; Isoleucine = 2,8 ; Lysine = 5,7 ; Méthionine + Cystéine = 2,6 ; Phénylalanine + tyrosine = 6,2 ; Tryptophane = 1,1 ; Histidine = 1,9 ; Valine = 3,5 ; Thréonine = 3,3.

II. 1. 4. 9. Protéines solubles

La solubilité des protéines des farines de taro Sosso dans l'eau a été déterminée selon la méthode décrite par Oshodi et Ekperingin (1989).

Principe : Le principe de la méthode est basée sur la détermination de la fraction des protéines totales soluble dans l'eau.

Mode opératoire : 25 mL d'eau distillée ont été introduits dans un tube à centrifuger contenant 50 mg de farine de taro Sosso. Le contenu du tube a été ensuite mélangé (à l'aide d'un agitateur) à température ambiante pour dissoudre la farine. Le mélange a été ensuite centrifugé à 2500 trs/min pendant 30 min pour éliminer le matériel insoluble. Les protéines ont été dosées dans le surnageant par la méthode de Lowry *et al.* (1951).

II. 1. 4. 10. Teneur en oxalates totaux

La teneur en oxalates totaux a été déterminée par titration à chaud d'extrait d'échantillon à l'aide d'une solution de KMnO_4 (0,01 M) (AACC, 1999).

Principe : Le principe de la méthode consiste en une digestion, précipitation et titration à chaud.

Mode opératoire : Dans la procédure, environ 0,5 g 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 CaCl_2 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 a été fait au moyen d'une solution d'acide oxalique 0,2 M.

II. 1. 4. 11. Teneur en fibres brutes

La teneur en fibres alimentaires des farines de taro Sosso a été déterminée

par la méthode AACC 32-07 (AACC, 1999) avec quelques modifications.

Principe : Le principe de cette méthode est basé sur une combinaison de méthodes enzymatiques et gravimétriques. Le taux de fibres est équivalent au poids du résidu du produit gélatinisé puis digéré successivement par l' α -amylase, une protéase et l'amyloglucosidase moins le poids des protéines résiduelles et des cendres.

Mode opératoire

Digestion : Dans des Erlenmeyers 0,2 g de chaque échantillon de farine a été mélangé avec 10 mL de solution tampon phosphate, pH 6,0 et 0,02 mL d'une solution d' α -amylase d'*Aspergillus Niger* (Roche : Basel, Switzerland) y a été ajouté. Les Erlenmeyers ont par la suite été recouverts avec du papier aluminium et introduits dans un bain-marie maintenu à 90°C sous agitation pendant 15 min. Après refroidissement, le pH des solutions a été ajusté à $7,5 \pm 0,2$ par ajout de 10 mL d'une solution de NaOH 0,275 N. Dès lors, 0,02 mL de protéase du pancréas bovin (Type I : P 4630-1G) a été ajouté et l'ensemble a été incubé pendant 30 min au bain-marie à 60 °C. Après refroidissement, le pH a été à nouveau ajusté entre 4,0 et 4,06 par addition de 2 mL de HCL 0,325 M. Un volume de 0,02 mL d'une solution d'amyloglucosidase d'*Aspergillus Niger* (Roche : Basel, Switzerland) a été alors ajouté et l'ensemble a été incubé dans les mêmes conditions qu'après ajout de NaOH. Ensuite, 4 volumes d'éthanol à 90 ° ont été ajoutés de façon à compléter le volume de la solution à 50 mL. Afin de permettre une précipitation complète, les solutions ont été incubées une nuit entière.

Filtration : La filtration des solutions a été effectuée à travers du papier filtre Whatmann N°1. Le résidu a été lavé avec 12 mL d'éthanol à 78% puis enveloppé dans le papier filtre utilisé, et séché à l'étuve à 105 °C pendant 24 h et pesé. Une

moitié du résidu a été utilisée pour la détermination du taux de cendres par incinération dans un four à moufle pendant 3 heures et l'autre moitié a servi à la détermination des protéines résiduelles par la méthode de Lowry *et al.* (1951). Le taux de fibres alimentaires (Tf) exprimé en gramme pour 100 g de matière sèche dans les échantillons a été déterminé par la différence entre le poids du résidu sec et celui des protéines résiduelles et des cendres.

$$Tf(\%) = \frac{[Mr - (Mpr + Mc)] * 100}{Ms}$$

Avec Mr = masse du résidu; Mpr = masse des protéines résiduelles; Mc = masse des cendres et Ms = matière sèche dans la prise d'essai.

II. 1. 4. 12. Amidons totaux

La teneur en amidons totaux a été déterminée par la méthode enzymatique décrite par BeMiller & Whistler (1997) avec de légères modifications.

Principe : Le principe de la méthode est basée sur la conversion totale de l'amidon en D-glucose par les enzymes purifiées indiquées pour l'amidon (α -amylase et amyloglucosidase d'*Aspergillus Niger* (Roche : Basel, Switzerland)) et le dosage du D-glucose libéré par une enzyme ou un réactif spécifique (Acide 3, 5 dinitrosalicylique par exemple).

Mode opératoire : Une prise d'essai de 30 mg de farine de taro Sosso a été dispersée dans un tube contenant 6 mL d'éthanol 80% (v/v). Après ajout du diméthylsulfoxyde (DMSO) le tube a été porté au bain- marie agité bouillant pendant 30 min. L'amidon solubilisé a été ensuite hydrolysé par addition de 60 μ L d' α -amylase d'*Aspergillus niger* (Roche: Basel, Switzerland) puis, retourné au bain-marie agité.

Après 5 minutes, le tube a été sorti du bain puis refroidi et 1 mL d'une solution tampon acétate pH 4,5 (0,4 M) et 40 µL d'amyloglucosidase d'*Aspergillus Niger* (EC 10115) y ont été ajoutés et l'ensemble a été porté à 50 °C. Les contenus des tubes ont été par la suite centrifugés (3000 g, 10 min), et 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 en utilisant le facteur de multiplication 0,9 (Goni *et al.*, 1997).

II. 2. Caractérisation physico-chimique de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité

II. 2. 1. Echantillonnage

L'extraction a été faite sur les farines (séchage électrique) de taro variété Sosso de cinq maturités (6, 7, 8, 9 et 10 mois).

II. 2. 2. Extraction de l'amidon

L'extraction de l'amidon a été faite sur les farines de 5 degrés de maturité issues du séchage électrique suivant la méthode modifiée de Sathe *et al.* (1982). Dans la procédure d'extraction, 1 kg de farine a été suspendu dans 10 L d'eau distillée contenue dans un récipient et l'ensemble agité pendant 30 min. Le récipient a été par la suite recouvert à l'aide de papier aluminium et placé à 40 °C pendant 5 h pour permettre l'extraction de l'amidon. Le mélange ainsi obtenu a été centrifugé à 4500 trs/min pendant 15 min. Au culot obtenu, 10 L d'une solution de NaCl 2% ont été ajoutés et l'ensemble agité pendant 10 min. Le récipient a été recouvert à nouveau de papier aluminium et laissé au repos pendant 12 h avant d'être centrifugé à 4500 trs/min pendant 15 min. Le culot a été lavé à plusieurs reprises avec de l'eau distillée puis une solution de NaOH 0,03 M a été ajoutée et l'ensemble laissé au repos à 4 °C pendant 12 h. Le mélange a été une fois de plus centrifugé à 4500 trs/min pendant 15 min. Le culot a été ensuite lavé à l'eau plusieurs fois et passé à travers un tamis de maille 100 µm pour l'élimination des fibres. L'ensemble des surnageants obtenus a été centrifugé et le culot (amidon humide) obtenu a été étalé sur une plaque en aluminium et séché dans un séchoir électrique ventilé (Riviera et Bar, France) à 30±2 °C pendant 12 h. Les amidons secs ainsi obtenus ont été scellés dans des sacs en polyéthylène et stockés à 4 °C pour les différentes analyses.

II. 2. 3. Caractérisation de l'amidon

II. 2. 3. 1. Composition chimique

Les teneurs en eau, cendres, protéines brutes, lipides ont été déterminées selon les procédures décrites au chapitre II.

II. 2. 3. 2. Teneur en amylose

La teneur en amylose des amidons de taro Sosso a été dosée selon la méthode de Mc Grane *et al.* (1998).

Principe : En solution aqueuse iodo-iodurée (I_2 -IK) diluée, l'amylose native forme un complexe avec l'iode. La réaction correspond à une inclusion d'iode sous la forme $(I_2)_nI^-$ dans le canal de l'hélice de l'amylose. L'iodure est indispensable pour la stabilisation des séquences d'iode (I_2). L'intensité de la couleur du complexe est fonction de la teneur en amylose.

Mode opératoire :

Extraction des lipides : la première étape dans la détermination de l'amylose consiste en une délipidation de l'amidon. Une masse de 20 mg d'amidon en poudre a été introduite dans un tube à essai. 5 mL de méthanol 85% ont été ajoutés et le tube a été placé dans un bain-marie à 60 °C. L'extraction a été faite pendant 30min en agitant le tube occasionnellement dans un bain agitateur. La solution obtenue a été centrifugée à 2000 trs/min pendant 30 min. L'extraction a été répétée (au méthanol à 85% à 60 °C au bain-marie) trois fois en écartant à chaque fois le surnageant.

Solubilisation : Le culot a été introduit dans un tube à essai à vis muni d'un bouchon. 2 mL de NaOH 1 M et 4 mL d'eau distillée y ont été ajoutés. Le tube a été bouché et placé dans un bain-marie à 95 °C pendant 30 min. sous agitation. Au bout de ce temps, le tube a été retiré, c'est la solution « S » prête pour le dosage.

Dosage : 0,1 mL de solution « S » a été pipeté et introduit dans un tube à essais ; 5 mL d'acide trichloroacétique (TCA) à 1%, 0,05 mL de solution de I₂-IK 0,01N (1,27 g d'I₂ par litre d'eau distillée + 3 g de KI) et de l'eau distillée y ont été ajoutés. La lecture de la DO se fait à 620. Une solution d'amylose standard à 1 mg/5mL a été utilisée pour réaliser la gamme étalon et la teneur en amylose (T_A) a été calculée par la formule suivante :

$$T_A = \frac{100 \times q \times V_T \times 100}{V \times 1000 \times (100 - Te) \times m}$$

où T_A: la teneur en amylose en g/100g d'amidon sec; q : la quantité d'amylose en mg dans chaque prise d'essai; V_T: le volume total en mL de la solution (S); V : le volume de la solution S dans chaque tube à essai (0,1 mL); m : la masse de la prise d'essai en mg (20mg); Te : la teneur en eau résiduelle des amidons.

II. 2. 3. 3. Teneur en phosphore

Le dosage de la teneur en phosphore des amidons de taro Sosso a été fait selon la méthode AOAC (2000).

Principe : En milieu acide et en présence du molybdate d'ammonium ((NH₄)₆Mo₇O₂₄ ,4H₂O) les phosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développe une coloration bleue ayant un maximum d'absorption à 690 nm. Certaines formes pouvant être hydrolysées au cours de l'établissement de la coloration et donner des phosphates, le développement de la coloration est accéléré par l'utilisation d'un catalyseur : le tartrate double d'antimoine et de potassium.

Mode opératoire : Environ 2,5 mL de chacune des solutions d'amidon (S) précédemment préparées ont été introduites dans des fioles et compléter à 50 mL

avec de l'eau distillée puis 2 mL de la solution réactive y ont été ajoutés. La solution réactive a été préparée en mélangeant 100 mL de H₂SO₄ 5 N, 10 mL de solution d'émétique (tartrate double d'antimoine et de potassium), 30 mL de molybdate d'ammonium et 60 mL de solution d'acide ascorbique. L'ensemble a été homogénéisé et laissé reposer pendant 30 min et l'absorbance a été lue à 690 nm contre un blanc obtenu par addition de 2 mL de la solution réactive à 10 mL d'eau distillée. La concentration en phosphore mg/L d'une série de tubes a été déterminée à partir de la gamme d'étalonnage de phosphate à 10 mg/L. La teneur en phosphore en g (Tp) pour 100g d'amidon sec a été calculée par la relation suivante :

$$T_p = \frac{X \times 100 \times V_c \times \%C}{V_i \times m \times 1000}$$

où X : concentration du phosphore (mg/L); V_c : volume total de la solution des cendres (mL); %C: teneur en cendres (g/100g MS); V_i: volume de la solution d'essai (ML); m: quantité des cendres utilisées pour obtenir V_c (g).

II. 2. 3. 4. Capacité d'absorption d'eau et Indice de solubilité

La capacité d'absorption d'eau (CAE) des amidons de taro Sosso a été déterminée par la méthode modifiée de Phillips *et al.* (1988).

Principe : Le principe de la méthode est de mettre en évidence la quantité d'eau en grammes retenue par 100 g d'amidon après saturation et centrifugation.

Mode opératoire : Une masse d'amidon M₀ égale à 1 g a été mélangée à 10 mL d'eau distillée et l'ensemble a été agité pendant 30 min à l'aide d'un agitateur de type Bioblock compsas et centrifugé à 5600 trs/min pendant 30 minutes dans une centrifugeuse de marque SIGMA type Bioblock Compsas. Le culot (M₂) a été récupéré, pesé et porté à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Le poids du culot sec

(M₁) a été déterminé. La capacité d'absorption d'eau réelle (CAEr) a été calculée ainsi qu'il suit :

$$CAEr (\%) = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \times 100$$

L'indice de solubilité a été déterminé selon la méthode d'Anderson *et al.* (1969) et calculé par la formule :

$$IS (\%) = \frac{(M_0 - M_1)}{M_0} \times 100$$

II. 2. 3. 5. Gonflement :

Le gonflement a été effectué par la méthode d'Okezie et Bello (1988).

Principe : le principe de la méthode consiste à déterminer le volume occupé par l'amidon après un temps bien précis.

Mode opératoire : Un volume bien déterminé (10 mL) de chaque échantillon d'amidon a été introduit dans une éprouvette graduée (volume initial). 50 mL d'eau distillée ont été introduits dans l'éprouvette. Le volume occupé par l'amidon gonflé (volume final) a été lu après 30 min. Le taux de gonflement est donné par la formule suivante:

$$Tg = \frac{\text{volume final}}{\text{volume initial}} \times 100$$

II. 2. 3. 6. Propriétés thermiques des amidons

Les propriétés thermiques ont été effectuées par Analyse Thermique Différentielle.

Principe : Cette technique 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 d'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.

Mode opératoire : Les thermogrammes de l'ATD des amidons de taro Sosso ont été enregistrés sur un calorimètre différentiel commandé par le logiciel *Pyris1* modèle (Perkin-Elmer Corp Norwalk. USA). Les amidons ont été dispersés dans de l'eau distillée (1:3 ; m/v) dans une capsule d'aluminium hermétiquement scellée. L'ensemble a été placé dans l'appareil et maintenu à la température ambiante à 25°C pendant 15min pour permettre une bonne homogénéisation. La capsule ainsi scellée a été par la suite chauffée jusqu'à 95°C à une vitesse de 5°C/min. L'appareil a été calibré pour la température et la mesure d'enthalpie avec de l'indium ($\Delta H = 28,43 \text{ J/g}$) 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, de pic 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 enthalpies de fusion (ΔH) ont été calculées par intégration de l'aire totale du pic de fusion.

II. 2. 3. 7. Détermination de l'isotherme d'adsorption

Les isothermes d'adsorption de l'amidon de taro ont été déterminées à 20°C selon la méthode gravimétrique statique de Wolf *et al.* (1985).

Principe : Les isothermes d'adsorption 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).

Mode opératoire : Les isothermes d'adsorption 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 bocaux de masse connue. L'ensemble a été mis dans des hygrostats avec six solutions de sel saturées (LiCl, $MgCl_2$, K_2CO_3 , NaBr, NaCl, KCl) employées pour obtenir les environnements constants d'activités de l'eau entre 0,1 et 0,9 (Bell et Labuza, 2000). Aux activités de l'eau élevées ($a_w > 0,70$), l'azide de sodium ($0,2 \text{ g.L}^{-1}$) a été augmentée dans les hygrostats pour empêcher la détérioration microbienne des amidons. Les hygrostats ont été maintenus dans un milieu thermostaté à $20 \pm 0,2$ °C. Les échantillons ont été pesés tous les trois jours. L'équilibre a été reconnu quand trois mesures consécutives de poids ont montré une différence de moins de 0,001g. La teneur en humidité de chaque échantillon a été déterminée par la méthode décrite au chapitre II et a été exprimée comme la moyenne de trois répétitions. La courbe résultante d'adsorption a été examinée selon le modèle de GAB de l'adsorption donc la forme générale est :

$$M = \frac{M_0 k_b c a_w}{[1 - k_b][1 - k_b a_w + c k_b a_w]}$$

Où M est la teneur en eau exprimée en g/100g de MS et a_w l'activité de l'eau. Le modèle de GAB a été transformé en une équation quadratique (Chen et Jayas, 1998) et les constantes M_0 (g/g), k_b et C ont été déterminées par une équation non linéaire en utilisant Sigma plot 11.0. Le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur relative (P) moyenne ont été déterminés.

$$P(\%) = \left[\sum_{n=1}^n \frac{X_{obs} - X_{pred}}{X_{obs}} \right] \frac{100}{n}$$

X_{obs} est la teneur en eau mesurée (%); X_{pred} est la teneur en eau prévue (%) et n

est le nombre des mesures.

II. 2. 3. 8. Détermination des paramètres de couleur

La blancheur de l'amidon 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). Les trois coordonnées de la couleur (Figure 7) sont des correspondants approximatifs de la luminance (L^*), de la balance «rouge-vert» (a^*) et de la balance «jaune-bleu» (b^*) et ont servi au calcul de l'indice de blancheur par la formule de Sheen (1990) et Tsai (1994) selon l'équation suivante :

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

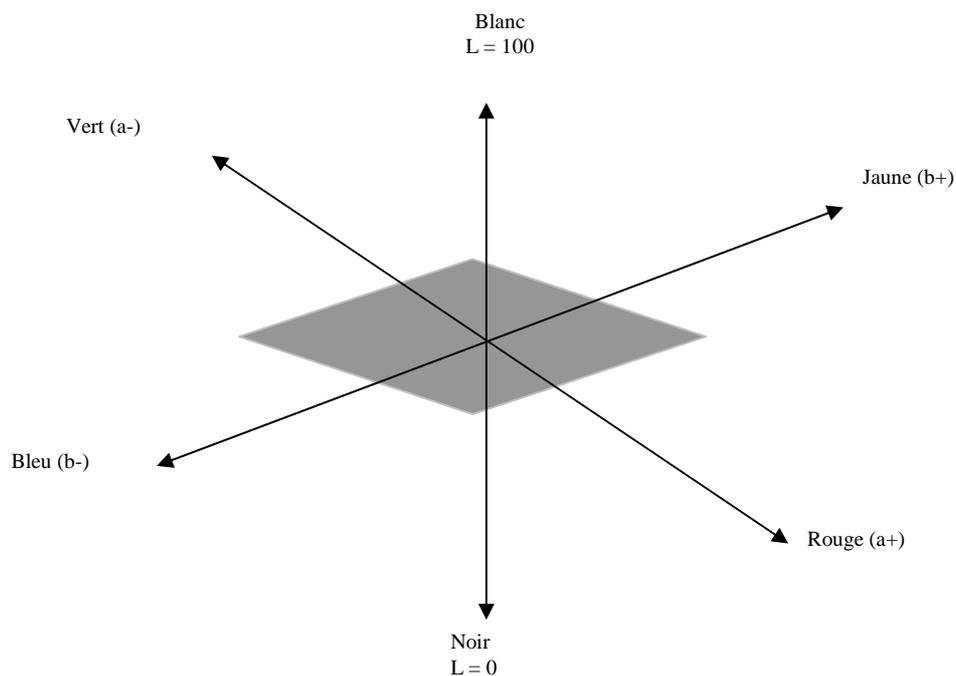


Figure 7: Espace chromatique CIE $L^*a^*b^*$

II. 2. 3. 9. Répartition granulométrique de particules d'amidon

La taille moyenne et la distribution des particules ont été déterminées à l'aide d'un granulomètre laser.

Principe : Le principe de 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. A cet effet, les grosses particules deviennent des quantités importantes de lumière aux petits angles, alors que les petites particules deviennent des quantités infimes de lumière aux grands angles. En assimilant les particules à des sphères lisses, l'angle de diffusion (θ) est relié au diamètre 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 des tailles a été réalisée avec un granulomètre Mastersizer S (Malvern Instruments, Orsay, France). La lentille utilisée 300 RF, permet de mesurer des tailles comprises entre 0,05 et 900 μm . Le faisceau laser, issu d'un tube à gaz Hélium Néon, a une puissance de 5 mW et une longueur d'onde de 632,8 nm. L'alignement du faisceau laser et la mesure du bruit de fond ont été réalisés à l'aide de l'éthanol.

Avant leur analyse, les échantillons d'amidon ont été dispersés dans l'éthanol 95% (voie humide) ou mis en suspension dans un courant d'air (voie sèche). L'obscurité de l'échantillon obtenue est comprise entre 10 et 15 % (environ 0,5 g d'amidon pour 300 mL d'éthanol). Pendant l'analyse, la suspension est mise en circulation avec une agitation à 2000 tours.min⁻¹ afin de limiter la sédimentation. Les

données brutes provenant de l'unité optique ont été traitées par le logiciel Sizer Sv2.17 (Malvern Instruments, Orsay, France) afin de calculer la taille des particules. Cinq mesures de dispersion ont été réalisées à une minute d'intervalle et deux dispersions ont été utilisées par amidon. Les courbes de distribution granulométrique mesurées en surfaces projetées et recalculées en volumes, représentent ainsi la moyenne des 10 essais réalisés.

II. 2. 3. 10. Morphologie des granules d'amidon

La morphologie des granules a été déterminée par microscopie électronique à balayage au Laboratoire de Chimie Minérale-Faculté des Sciences-UHP-Vandoeuvre-Lès-Nancy en utilisant la microscopie électronique à balayage.

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 qui est lié aux taux d'électrons secondaires et à leur accès aux détecteurs, 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 brillantes et où les trous apparaissent sombres.

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

Mode opératoire : Les poudres à analyser sont fixées sur un ruban adhésif

double face monté sur un support. Une couche de carbone de 10 nm suivie d'un mélange or/palladium est déposée à la surface des particules de poudre pour les rendre conducteurs. L'observation microscopique des poudres est réalisée sous vide secondaire (environ 10^{-5} tr) par rétro diffusion des électrons secondaires au moyen d'un microscope électronique à balayage *Hitachi S2500 (Japon)* opérant à une accélération de 17 KV.

II. 2. 3. 11. Forme de particules

La sphéricité et la convexité ont été déterminées en utilisant l'appareil QICPIC TM (Sympatec GmbH, Allemagne) équipé du module de dispersion de LIXELLTM (Sympatec GmbH, Allemagne).

Principe : le principe de la méthode repose sur la détermination de la forme des particules.

Mode opératoire : Pour chaque mesure, 0,20 g d'amidon ont été dispersés dans 75 ml d'éthanol (pour obtenir une bonne obscuration et pour éviter la superposition de particules). Trois mesures ont été conduites pour chaque échantillon selon le procédé suivi par Gaiani *et al.* (2011). Le diamètre d'un cercle égal à la surface de projection (EQPC) a été déterminé la première fois avec cet appareil. L'EQPC est défini comme le diamètre d'un cercle qui a la même surface que la surface de projection de la particule. A partir de l'EQPC, la sphéricité a été déterminée et définie comme le rapport du périmètre du cercle équivalent au vrai périmètre. Cette valeur est comprise entre 0 et 1. Plus la valeur est petite, plus la forme de la particule est irrégulière. La convexité a été aussi déterminée, ce paramètre de forme décrit la compacité d'une particule.

II. 2. 3. 12. Cristallinité des amidons

La cristallinité des amidons a été réalisée par diffraction des Rayons X pour

déterminer le type d'amidon, le degré de cristallinité et la cristallinité relative.

Principe : La diffraction des rayons X est une méthode utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins, c'est-à-dire présentant un arrangement périodique, ordonné. Les atomes s'organisent ainsi en plans réticulaires plus ou moins denses qui sont désignés par leurs coordonnées (h, k, l) dans un système de repérage de l'espace. Les corps cristallins peuvent être considérés comme des assemblages de plans réticulaires plus ou moins denses (certains plans contiennent bien plus d'atomes que d'autres). Ces plans réticulaires sont séparés par des distances (D_{hkl}) caractéristiques de la nature du réseau cristallin.

Les rayons X sont diffusés sans perte d'énergie par les particules de la matière chargée électriquement par les électrons principalement. Lorsque les objets diffusant sont disposés de manière périodique, la quantité de rayonnement diffusé n'est importante que dans les directions pour lesquelles les rayons diffusés sont en phase: c'est le phénomène de diffraction. Les conditions relatives à l'existence d'interférences constructives peuvent être exprimées par la loi de Bragg.

$$2d_{hkl} \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda \text{ (équation de Bragg)}$$

Avec λ : longueur d'onde du rayonnement incident ;

θ : angle entre le vecteur d'onde et le plan hkl ;

d_{hkl} : distance entre deux plans hkl ;

n : nombre entier correspondant à l'ordre de la réflexion.

D'un point de vue technologique, l'angle θ est mesuré afin de connaître les différences entre les plans réticulaires.

Mode opératoire : Les diffractogrammes des amidons ont été réalisés sur un diffractomètre *Jobin Yvon Sigma 2080* opérant en réflexion. Il utilise un rayonnement

$K_{\alpha 1}$ du cuivre dont la longueur d'onde est 1,5406 Å. L'échantillon est testé sous une forme désorientée, c'est-à-dire que les particules qui le composent ne sont pas organisées. Les mesures de diffraction sont effectuées sur 50 g de poudre déposés sur un porte-échantillon vertical.

Degré de cristallinité :

La méthode décrite par Nara et Komiy, (1983) a été utilisée pour évaluer le degré de cristallinité des granules d'amidon. Avec DC le degré de cristallinité, A_c la surface totale des pics de cristallinité et A_a la surface totale au niveau de la ligne de base.

$$DC(\%) = \frac{A_c}{(A_c + A_a)} \times 100$$

Cristallinité relative :

La cristallinité relative a été calculée par la méthode de Van Soest *et al.*, (1995) d'après la formule suivante :

$$CR(\%) = \frac{A_c}{A_t} \times 100$$

Avec A_c la surface totale des pics de cristallinité et A_t la surface totale au niveau de la ligne de base.

II. 3. Propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines de taro Sosso : influence du degré de maturité et du mode de séchage

II. 3. 1. Echantillonnage

L'étude a été menée sur les dix échantillons des farines obtenus au chapitre I.

II. 3. 2. Propriétés physicochimiques

La capacité d'absorption d'eau, l'indice de solubilité, le gonflement, les propriétés thermiques, l'isotherme d'adsorption, la répartition granulométrique, la forme des particules et la couleur des farines de taro Sosso ont été déterminés comme décrits précédemment.

II. 3. 3. Plus petite concentration gélifiante (PPCG)

La plus petite concentration gélifiante (PPCG) a été déterminée par la méthode de Coffman et Garcia (1977) avec quelques modifications.

Principe : Le principe de la méthode consiste à déterminer la capacité de la pâte à former le gel.

Mode opératoire : Des pâtes des farines de 2 à 18% (p/v) ont été préparées dans de l'eau distillée (5 mL), portées à ébullition et refroidies dans un courant d'eau froide. La PPCG a été définie comme celle dont le tube ne laisse pas couler la pâte lorsqu'on le retourne.

II. 3. 4. Propriétés d'empattage

Les mesures rhéologiques des gels de farine de taro Sosso de faible amplitude ont été effectuées sur chaque échantillon en utilisant un rhéomètre dynamique (Kinexus, instruments de Malvern) équipé d'un système cône-plan parallèle (diamètre = 4 cm ; angle = 2 °). Le système de géométries cône-plan fournit un cisaillement uniforme et convient aussi bien à une étude de fluides non newtoniens qu'à celle des fluides newtoniens (Yamamoto *et al.*, 2006). La contrainte et la fréquence ont été fixées à 0,5% et 1 hertz, respectivement. Des suspensions de gel des farines de taro (w/v ; 0,5 g de farine dans 5 mL d'eau distillée) ont été soumises à une rampe de température (de 50 à 90 °C à une vitesse de 2 °C/min).

Les propriétés rhéologiques telles que le module de stockage ou élastique (G'), le module de perte ou visqueux (G'') et l'angle de phase δ (G''/G') pendant le chauffage de chaque échantillon de farine ont été déterminées.

II. 3. 5. Propriétés d'écoulement des farines

Dans cette étude, l'angle de repos, l'angle de chute, la compressibilité, la dispersibilité, la densité aérée et la densité compactée des farines de taro Sosso ont été déterminés en utilisant l'appareil de contrôle de caractéristiques rhéologiques des poudres (PT-N modèle, *Hosokawa* Mi-cron Corporation, Japon).

Principe : 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.

Mode opératoire : Tous Les paramètres rhéologiques ont été déterminés à l'aide d'un testeur de poudre Hosakawa Micron Powder Tester PT-R (Hosakawa, Japon) équipé d'un logiciel pour la conduite des expériences et l'acquisition des données. Les densités aérées et compactée de chaque échantillon ont été déterminées à l'aide d'une éprouvette standardisée de 100 mL. La densité compactée a été obtenue après que la tasses remplie de poudre a subi 30 impacts normalisés pendant 3min, afin d'optimiser le réarrangement des particules. Les indices rhéologiques ont été calculés à partir des tables d'Hosokawa fournies par le constructeur. L'indice de coulabilité (dit indice de Carr ou indice de compressibilité) a été calculé selon le rapport suivant:

$$I_c = 100 \times (D_c - D_a) / D_c$$

Acec : D_c : Densité compactée (dans des conditions standardisées)

Da : densité aérée

On considère que cet indice est bon s'il est inférieur à 18.

On peut aussi calculer le ratio de Hausner (ou indice de Hausner) qui représente l'état de friction interparticulaire. Plus celui-ci est proche de 1, meilleure sera la coulabilité. Les poudres de moins bonne coulabilité ont, en général, un ratio supérieur à 1,25. Il a été calculé selon la formule suivante :

$$R_h = D_c/D_a$$

II. 4. Effet du degré de maturité et du mode de séchage sur la texture et la couleur de la pâte de taro Rosso

II. 4. 1. Echantillonnage

Les 10 échantillons des farines obtenus précédemment ont été utilisés.

II. 4. 1. 1. Préparation de la pâte de taro Rosso

La préparation de la pâte de taro Rosso a été faite sur les farines obtenues de cinq degrés de maturité et de deux modes de séchage. La pâte de taro a été préparée en mélangeant 100 g de farine dans l'eau bouillante suivie d'un pétrissage. L'ajout de la farine dans l'eau bouillante a été progressive jusqu'à l'obtention d'une humidité finale de 70%. L'ensemble a été soigneusement mélangé dans une marmite sur la plaque chauffante à l'aide d'un pilon jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène au bout de trente minutes. Le pétrissage a permis non seulement d'homogénéiser la pâte mais également de supprimer les grumeaux qui se formeraient au cours de la cuisson. Les pâtes obtenues ont été sujettes aux analyses de la couleur, sensorielles et du profil de texture.

II. 4. 2. Les précurseurs de brunissement

Afin de déterminer l'origine du brunissement des pâtes de taro Sosso, nous avons procédé à l'analyse des précurseurs de brunissement suivants :

II. 4. 2. 1. Sucres réducteurs

La détermination du taux de sucres réducteurs a été effectuée par la méthode colorimétrique au DNS (Acide 3,5 dinitro salicylique) de Fisher et Stein (1961).

Principe : Le principe de cette méthode est la réduction du DNS en milieu alcalin par les sucres et la formation d'un produit rouge brun lorsqu'il est chauffé. L'intensité de la couleur développée à 540 nm est proportionnelle à la concentration en sucres.

Mode opératoire : Environ 1 g d'échantillon a été introduit dans un tube à centrifuger. 10 mL d'éthanol eau (V/V) à 80% ont été ajoutés. L'ensemble a été mélangé en utilisant un vortex puis agité dans un bain-marie à la température ambiante pendant 30 min. Le mélange a été centrifugé à 5000 trs/mn pendant 15 min (TUV, sigma, Bioblock scientifique, Allemagne) et le surnageant a été transféré dans une fiole de 50 mL. Le résidu a été à nouveau suspendu en utilisant 10 mL d'éthanol 80% et l'opération répétée deux fois. Les surnageants ont été mis en commun et le volume de la fiole ajusté à 50 mL.

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

II. 4. 2. 2. Amines libres

Les amines libres ont été analysées selon la méthode modifiée de Devani *et al.* (1989) décrite précédemment.

Après une agitation et une extraction à l'eau, les amines ont été dosées. Le dérivé jaune N 3,5- diacétyl-1,4- dihydrolutidine a été formé et l'absorbance a été lue à la longueur d'onde maximale de 410 nm. L'étalonnage a été préparé en utilisant la solution de sulfate d'ammonium et les amines libres dans les échantillons ont été exprimées comme équivalents d'azote (N)/100 g de farine.

II. 4. 2. 3. Produits intermédiaires et finaux des réactions de Maillard

La détermination des produits intermédiaires et finaux des réactions de Maillard a été faite selon la méthode de Hendel *et al.* (1950)

Principe : La formation des produits intermédiaires de la réaction de Maillard sur la farine produite 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).

Mode opératoire : 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 15 min 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.

II. 4. 2. 4. Les composés phénoliques totaux

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

Principe : Le réactif de Folin-Ciocalteu est un mélange d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$) et d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) qui par réduction lors de l'oxydation de phénols donne un mélange d'oxydes bleus de

tungstène (W_8O_{23}) et de molybdène (Mo_8O_{23}) ; la coloration bleue obtenue présente une absorption maximale à 725 nm et est proportionnelle à la quantité de composés phénoliques.

Mode opératoire : Une masse de farine de 0,5 g a été introduite dans un erlen Meyer contenant 25 mL d'éthanol à 70% et l'ensemble a été vigoureusement agité pendant 30 min puis centrifugé (3000 trs/min) pendant 15 min. Le surnageant a été récupéré dans une fiole jaugée de 50 mL. L'opération a été reprise 3 fois. Le volume a été ajusté à 50 mL avec de l'eau distillée. L'étalonnage a été préparé à partir d'une solution d'acide gallique à 0,2 g/L.

II. 4. 3. Analyse trichromatique des couleurs des pâtes

L'analyse instrumentale des couleurs des pâtes a été effectuée par la méthode décrite au paragraphe III.

II. 4. 4. Analyse sensorielle des pâtes

Une analyse sensorielle a été effectuée en vue de déterminer les variables susceptibles d'influencer l'acceptabilité des différentes pâtes de taro Sosso. Un panel de 50 membres a été constitué sur la base de leur familiarité avec le taro. Ces membres ont une forte connaissance du taro et ont subi deux séances d'entraînement sur la pâte de taro. Il a été demandé à chaque panéliste d'évaluer quelques caractéristiques organoleptiques de chacun des échantillons suivant une échelle variant de 1 (déteste extrêmement) à 9 (aime extrêmement) (voir fiche en annexe). Les différents échantillons de taro (10) de chacune des cinq maturités et deux types de séchage ont essentiellement été évalués sur 6 variables: La couleur, le goût, l'âcreté, la masticabilité, la dureté et l'acceptabilité générale.

II. 4. 5. Profil de texture des pâtes

Le profil de texture des pâtes a été déterminé en soumettant chaque échantillon à un test de double compression sur la machine universelle Lloyd (Lloyd instrument LRX, Allemagne) commandée 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 ($2,5 \pm 0,02$ cm) soit 20 mm. Ainsi, 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 de 10 mm de diamètre soit $78,54 \text{ mm}^2$ de surface. La force maximale du capteur est de 300 N, avec une pré-charge de 0,5 N. 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 Kethireddipalli *et al.* (2002) et Singh *et al.* (2006).

A partir de courbes de double compression illustrées par la Figure 8, les paramètres physiques suivants ont été définis d'après Scher (1998):

- 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 de 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.

- l'adhésivité est le travail nécessaire pour décoller l'échantillon de la sonde.

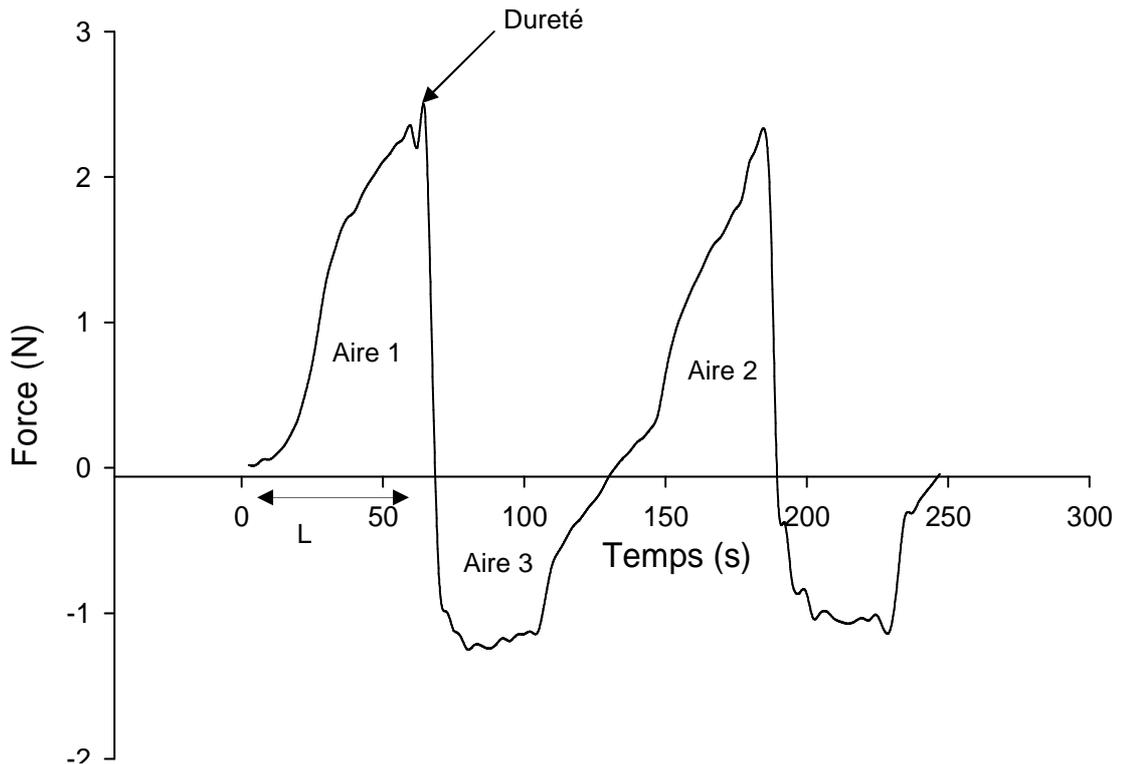


Figure 8: Courbe typique de profil de texture de la pâte de taro Sosso

II. 4. 6. Analyses statistiques

Toutes les analyses physico-chimiques et rhéologiques des farines et amidons ont été effectuées en triple. La moyenne et l'écart type ont été calculés.

L'analyse de variance a été effectuée pour calculer les différences significatives entre les moyennes de traitement, et le test de classement multiple a

été employé pour classer les moyennes en utilisant le logiciel Statgraphics XV.

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

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

Les traces des courbes ont été effectuées en utilisant le logiciel Sigma plot.

11.0 (Systat software, C.A. USA)

III - RESULTATS ET DISCUSSION

III. 1. Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la composition biochimique des farines de taro Sosso

III. 1. 1. Composition chimique

Le Tableau 4 montre la composition proximale des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage et la teneur en eau initiale (teneur en eau des tubercules frais) en fonction du degré de maturité. La teneur en eau initiale représente le plus grand constituant des tubercules de taro Sosso et sa valeur moyenne s'étend de 71,95 à 83,14 g/100 g entre le sixième et le dixième mois de maturité. La diminution de la teneur en eau des tubercules de taro Sosso en fonction du degré de maturité pourrait être liée à l'accumulation des nutriments et surtout de l'amidon (Huang *et al.*, 2007). La teneur en eau des farines de taro Sosso est comprise entre 8 et 10%. Cette teneur est suffisante pour couvrir une période de conservation de plus de six mois (Sriroth *et al.*, 2000). A l'exception des cendres, les autres variables mesurées n'ont pas été affectées significativement par le mode de séchage. A l'opposé, l'analyse de variance a révélé que plus de 70% de la variation totale dans chacune des variables est attribuée au degré de maturité. La teneur en cendres est influencée significativement par le degré de maturité et le mode de séchage. Une corrélation significative linéaire ($r=0,86$) a été observée entre le degré de maturité et la teneur en cendres suggérant une accumulation des minéraux avec la maturité. En plus, le séchage solaire présente la valeur élevée (1,7 - 2,68%) et le séchage électrique la valeur basse (1,58 - 2,18%) témoin de la contamination des échantillons par la poussière environnante, ce qui justifie l'inconvénient du séchage solaire traditionnel par rapport au séchage électrique. La contamination des aliments séchés au soleil a été largement abordée dans la littérature (Yahya *et al.*, 2000). L'observation d'une augmentation de la teneur en cendres de la farine de taro Sosso

avec le degré de maturité est similaire aux travaux précédents rapportés par Leonel *et al.* (2005) pour la teneur en cendres de *Pachyrhizus ahipa* et ceux sur le manioc rapportés par Chotineerarat *et al.* (2006) et Akingbala *et al.* (2011). Indépendamment du degré de maturité et du mode de séchage, les teneurs en cendres rapportées dans cette étude sont inférieures à celles rapportées pour des variétés camerounaises de taro (Mbofung *et al.*, 2006) mais plus élevées que celles d'une variété de l'Inde (Kaur *et al.*, 2011). La variété, les conditions de traitement et les conditions écologiques de la culture sont autant de facteurs susceptibles d'influer sur la teneur en cendres.

Les composés les plus importants dans la farine de taro Sosso sont les sucres et les protéines. La teneur en sucres disponibles est de 42,09% (6 mois) et augmente significativement ($p < 0,05$) avec le degré de maturité pour atteindre 44,51% (10 mois) pour ce qui est du séchage solaire. Le même phénomène est observé dans le cas du séchage électrique avec des teneurs variant de 42,08% (6 mois) à 44,50% (10 mois). A cet effet, une corrélation significative linéaire positive ($r = 0,83$; $P < 0,05$) a été observée entre le degré de maturité et la teneur en sucres disponibles. La composition en protéines brutes varie respectivement de 4,48% (6 mois) à 5,52% (10 mois) et de 4,41% (6 mois) à 5,44% (10 mois) respectivement pour le séchage solaire et électrique. Ces valeurs sont significativement affectées par le degré de maturité avec une corrélation significative positive linéaire ($r = 0,96$; $P < 0,05$). Il n'existe pas de différence significative entre les deux modes de séchage pour ces deux paramètres mesurés. Les variations de la teneur en sucres disponibles et protéines brutes témoignent le métabolisme physiologique et biochimique actifs menant à leur accumulation pendant cette période de croissance. Il a été démontré pendant la maturation du manioc de 12 à 24 mois, que la teneur en

amidon a diminué de manière significative tandis qu'aucun changement crucial n'a été observé au niveau de sucres (Akingbala *et al.* 2011). Les teneurs en protéines observées sont semblables à celles rapportées par Mbofung *et al.* (2006), mais légèrement supérieures à celles rapportées par Sefa-Dedeh et Agyir-Sackey (2004) ; Aboubakar *et al.* (2008) ; Kaur *et al.* (2011). L'augmentation de la teneur en protéines de la farine de taro Sosso avec le degré de maturité est contraire aux résultats de Chotineeranat *et al.* (2006) pour la teneur en protéines brutes du manioc variété KU 50 entre 6 et 12 mois. Cette contradiction pourrait s'expliquer par le fait qu'à l'effet du degré de maturité, est souvent associée l'influence de la zone écologique, car le plus souvent les dates de plantation diffèrent d'une localité à une autre.

Tableau 4 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la composition des farines de taro Sosso

| | | Paramètres | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Mode de séchage | Degré de maturité (mois) | Teneur en eau initiale (g/100 g MF) | Teneur en eau (g/100 g MS) | Cendres totales (g/100 g MS) | Protéines brutes (g/100 g MS) | Lipides (g/100 g MS) | Fibres brutes (g/100 g MS) | Sucres disponibles (g/100 g MS) |
| Séchage solaire | 6 | 83,14±1,21 ^a | 8,16±0,02 | 1,73±0,09 ^a | 4,48±0,05 ^a | 0,40±0,02 | 2,81±0,03 ^a | 42,09±0,17 ^a |
| | 7 | 77,87±1,0 ^b | 8,15±0,02 | 1,82±0,02 ^a | 4,95±0,10 ^b | 0,41±0,01 | 2,94±0,02 ^b | 42,45±0,98 ^a |
| | 8 | 73,27±1,05 ^c | 8,15±0,02 | 2,04±0,05 ^b | 5,13±0,03 ^c | 0,40±0,03 | 3,05±0,01 ^c | 43,25±0,25 ^{ab} |
| | 9 | 72,37±0,75 ^c | 8,12±0,04 | 2,14±0,08 ^b | 5,32±0,02 ^d | 0,40±0,01 | 3,24±0,02 ^d | 44,23±0,54 ^{bc} |
| | 10 | 71,95±0,88 ^c | 8,11±0,05 | 2,68±0,16 ^c | 5,52±0,04 ^e | 0,41±0,01 | 3,44±0,02 ^e | 44,51±0,81 ^c |
| Séchage électrique | 6 | 83,14±1,21 ^a | 8,09±0,06 | 1,58±0,03 ^a | 4,41±0,04 ^a | 0,41±0,03 | 2,84±0,01 ^a | 42,08±1,52 ^a |
| | 7 | 77,87±1,0 ^b | 8,11±0,03 | 1,72±0,01 ^b | 4,89±0,03 ^b | 0,41±0,01 | 2,96±0,02 ^b | 42,53±0,40 ^a |
| | 8 | 73,27±1,05 ^c | 8,17±0,03 | 1,92±0,01 ^c | 5,03±0,02 ^c | 0,40±0,01 | 3,07±0,01 ^c | 43,22±0,21 ^{ab} |
| | 9 | 72,37±0,75 ^c | 8,12±0,01 | 2,00±0,01 ^d | 5,21±0,10 ^d | 0,41±0,02 | 3,22±0,01 ^d | 44,23±0,63 ^b |
| | 10 | 71,95±0,88 ^c | 8,05±0,01 | 2,18±0,05 ^e | 5,44±0,04 ^e | 0,40±0,02 | 3,39±0,02 ^e | 44,50±0,81 ^b |

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05.
MS = matière sèche MF = Matière fraîche

La teneur en fibres brutes de farines de taro Sosso à différents degrés de maturité et selon les deux modes de séchage est présentée dans le Tableau 4. Il y a des différences significatives entre la teneur en fibres des farines de taro Sosso récolté à différentes maturités. La teneur en fibres brutes des farines de taro Sosso étudiées s'étend respectivement pour le séchage solaire et électrique de 2,81 (6 mois) à 3,44% (10 mois) et de 2,84 (6 mois) à 3,39% (10 mois) qui est semblable aux valeurs rapportées par Njintang (2003) pour des espèces de taro originaire du Cameroun. Il est tout à fait clair que les résultats de cette étude montrent que la teneur la plus faible en fibres des tubercules de taro Sosso s'observe au premier stade de maturité (6 mois). Après cette période, la teneur en fibres croît progressivement au fur et à mesure que le degré de maturité augmente. Ce constat est valable pour tous les deux modes de séchage étudiés. Des résultats similaires ont été trouvés par Leonel *et al.* (2005), selon lesquels la teneur en fibres des tubercules de *Pachyrhizus ahipa* augmente avec le degré de maturité. Cependant, d'autres travaux indiquent que la teneur en fibres est plus élevée dans les tubercules de manioc et d'igname immatures (Trèche et Agbor-Egbe, 1996 ; Chotineeranat *et al.*, 2006). La contradiction des résultats pourrait être due à la variété, au type du sol et aux conditions climatiques. Pour la variété de taro Sosso, le mode de séchage n'a pas eu d'effet significatif ($P < 0,05$) sur la teneur en fibres brutes de farines. Le même constat a été observé par Hsu *et al.* (2003) sur trois variétés d'igname. Compte tenu de sa teneur élevée en fibres brutes, la farine de taro Sosso pourrait jouer un rôle dans la prévention du cancer du côlon, de l'obésité, de la constipation et du diabète en facilitant le transit digestif (Chen *et al.*, 2003). Au regard des teneurs en cendres totales, fibres brutes, protéines brutes et sucres disponibles élevées dans les tubercules de taro Sosso, les récoltes précoces ne sont pas conseillées dans ce cas.

III. 1. 2. Teneur en minéraux

Un aperçu de la teneur en minéraux des tubercules de taro Sosso pendant leur période de croissance et en fonction du mode de séchage est présenté dans le Tableau 5. Il en ressort que les minéraux tels que K, Na, Ca et Mg sont présents en grande quantité alors que le Fe, Mn, Cu et Zn le sont à de très petites quantités. La teneur en minéraux de chaque tubercule de taro Sosso a été calculée par rapport à la matière sèche (mg par 100g de matière sèche). Les résultats indiquent que le potassium est le minéral le plus abondant, sa teneur varie dans le cas du séchage solaire et électrique respectivement de 680,53 (6 mois) à 770,60 mg/100g (10 mois) et de 675,27 (6 mois) à 752,74 mg/100g (10 mois). Les teneurs en potassium du taro variété Sosso sont plus élevées que celles d'autres variétés (Akpan et Umoh, 2004 ; Aboubakar *et al.*, 2008). Une augmentation de la teneur en potassium des tubercules de taro en fonction du degré de maturité a été observée (Huang *et al.*, 2007). L'augmentation en potassium du tubercule de taro Sosso pendant la maturité pourrait être attribuée à la richesse du sol.

Quant au sodium, bien que significative, sa variation est relativement importante et passe de 14,29 (6 mois) à 16,25 mg/100 g (10 mois) et de 14,20 (6 mois) à 15,96 mg/100 g (10 mois) pour le séchage solaire et électrique respectivement. Ces valeurs sont supérieures à celles rapportées par Aboubakar *et al.* (2008) sur six variétés de taro originaires du Cameroun mais inférieures à celles présentées par Sefa-Dedeh et Agyir-Sackey (2004) sur le taro et le macabo du Ghana.

Tableau 5 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en minéraux des farines de taro Sosso

| Mode de séchage | Degré de maturité (mois) | Minéraux (mg/100 g MS) | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | Na | K | Ca | Mg | Mn | Fe | Cu | Zn |
| Séchage solaire | 6 | 14,29±0,17 ^a | 680,53±0,26 ^a | 19,34±0,17 ^a | 82,72±0,27 ^a | 2,28±0,09 ^a | 0,81±0,03 ^a | 0,92±0,07 ^a | 0,31±0,03 ^a |
| | 7 | 14,74±0,09 ^b | 700,02±0,29 ^b | 20,64±0,14 ^b | 88,47±0,12 ^b | 2,31±0,07 ^b | 0,83±0,08 ^b | 0,99±0,09 ^b | 0,36±0,02 ^b |
| | 8 | 15,18±0,07 ^c | 718,23±0,17 ^c | 24,8±0,22 ^c | 96,54±0,19 ^c | 2,35±0,02 ^c | 0,86±0,06 ^c | 1,04±0,04 ^c | 0,39±0,03 ^c |
| | 9 | 15,91±0,03 ^d | 740,79±0,23 ^d | 26,52±0,21 ^d | 110,39±0,13 ^d | 2,45±0,05 ^d | 0,91±0,09 ^d | 1,08±0,05 ^d | 0,46±0,04 ^d |
| | 10 | 16,25±0,09 ^d | 770,60±0,54 ^e | 31,51±0,23 ^e | 135,48±0,29 ^e | 2,58±0,06 ^e | 0,96±0,05 ^e | 1,12±0,08 ^e | 0,51±0,03 ^e |
| Séchage électrique | 6 | 14,20±0,09 ^a | 675,27±0,36 ^a | 18,73±0,26 ^a | 81,42±0,29 ^a | 2,24±0,05 ^a | 0,80±0,04 ^a | 0,89±0,03 ^a | 0,32±0,03 ^a |
| | 7 | 14,57±0,05 ^b | 695,52±0,24 ^b | 20,50±0,11 ^b | 87,42±0,14 ^b | 2,29±0,03 ^b | 0,82±0,10 ^b | 0,95±0,09 ^b | 0,35±0,02 ^b |
| | 8 | 15,12±0,04 ^c | 711,59±0,21 ^c | 23,52±0,21 ^c | 97,57±0,24 ^c | 2,35±0,08 ^c | 0,86±0,07 ^c | 1,03±0,08 ^c | 0,40±0,05 ^c |
| | 9 | 15,61±0,05 ^d | 733,21±0,13 ^d | 25,55±0,31 ^d | 106,61±0,23 ^d | 2,42±0,06 ^d | 0,89±0,03 ^d | 1,07±0,03 ^d | 0,45±0,03 ^d |
| | 10 | 15,96±0,08 ^e | 752,74±0,25 ^e | 28,64±0,17 ^e | 125,06±0,24 ^e | 2,53±0,11 ^e | 0,92±0,08 ^e | 1,10±0,04 ^e | 0,50±0,04 ^e |

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05.

MS = matière sèche

Le magnésium et le calcium sont également abondants dans les farines de taro Sosso quel que soit le degré de maturité. Comme on pourrait s'y attendre, les teneurs en calcium sont relativement élevées dans le taro Sosso, probablement du fait de son appartenance à la famille des Aracées (Nip, 1997). En effet, cette famille est très riche en cristaux d'oxalate de calcium responsable de l'irritation. Le calcium varie pour les farines séchées au soleil de 19,34 (6 mois) à 31,51 mg/100 g (10 mois) et de 18,73 (6 mois) à 28,64 mg/100 g (10 mois) pour les farines séchées électriquement. Ces résultats suggèrent que la teneur en calcium augmente avec le degré de maturité des tubercules de taro Sosso. La relation entre le degré de maturité et la teneur en calcium pourrait être attribuée aux facteurs environnementaux tels que la composition du sol, les contraintes d'eau, et les changements des conditions atmosphériques (Reyes-Agüero *et al.*, 2006). Une tendance à l'augmentation de la teneur en calcium avec le degré de maturité du figuier (*Opuntia ficus-indica* var. *redonda*) a été observée par Contreras-Padilla *et al.* (2011). Ces derniers ont corrélé l'augmentation de la teneur en calcium en fonction du degré de maturité au processus de développement de la plante et à la préparation du nouveau bourgeon floral.

La teneur en Mg des farines de taro Sosso augmente avec l'âge du taro de 82,72 (6 mois) à 135,48 mg/100 g (10 mois) dans le cadre du séchage solaire et de 81,42 (6 mois) à 125,06 mg/100 g (10 mois) pour le séchage électrique. Comparée aux autres minéraux, l'augmentation de Mg avec le degré de maturité est la plus élevée avec une variation de 63,7% et de 53,6% respectivement pour le séchage solaire et électrique. Mais, l'augmentation observée avec le degré de maturité témoigne d'une mobilisation importante du Mg pour assurer le métabolisme de plus en plus croissant dans le tubercule.

En marge de ces quatre minéraux, on a des teneurs importantes (2,24 – 2,53 mg/100 g) en Mn. Ce dernier est influencé significativement par le degré de maturité. Par ailleurs on note la présence du Fe, Cu et Zn à des quantités très faibles comparées aux autres minéraux. Bien qu'ils soient à des valeurs faibles, leur teneur est influencée significativement par le degré de maturité dans les deux modes de séchage. Les valeurs les plus faibles sont observées pour les premières maturités (six mois) alors que les plus élevées appartiennent aux tubercules matures (dix mois). Ces observations corroborent celles de Kolbe et Stephan-Beckmann (1997) qui ont rapportées des valeurs maximales du calcium, magnésium, manganèse, fer et sodium à la fin de la période de croissance de la pomme de terre. Cependant, les résultats de travaux de Trèche & Agbor-Egbe (1996) sur deux espèces d'igname ont montré que le degré de maturité des tubercules entraîne une diminution de la teneur en zinc, calcium, magnésium et fer. Le sens de la variation des minéraux en fonction du degré de maturité observé entre les différents tubercules suggère le métabolisme varié de ces tubercules. Dans le cas du taro Sosso, on peut remarquer qu'à partir de six mois, le métabolisme est très actif dans la plante afin d'accumuler d'avantage des minéraux.

III. 1. 3. Profil des acides aminés

Le profil des acides aminés des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage est présenté dans le Tableau 6. De ce tableau, il ressort que la majorité des acides aminés est présente même si certains le sont à des pourcentages très faibles (0,28% pour la cystéine et 0,81% dans le cas de la méthionine). Lors du passage du 6^{ème} au 8^{ème} mois et du 8^{ème} au 10^{ème} mois de maturation, les observations suivantes ont été notées : La majeure partie des acides aminés ne montrent aucun (coefficient de variation moins de 10%) changement

remarquable ni avec le mode de séchage ni avec le degré de maturité. D'autres par contre notamment la cystéine, la méthionine, la proline, l'alanine et l'histidine ont montré des variations contradictoires. Ces variations sont probablement dues à la sensibilité de l'instrument de HPLC. Les faibles variations de la composition en acides aminés avec le degré de maturité suggèrent une similarité dans le type de protéines synthétisées au cours de la période de croissance du tubercule de taro Sosso. En outre, on constate que l'acide aspartique et l'asparagine sont prédominants et représentent environ 15,3% des acides aminés totaux, suivis de l'acide glutamique et de la glutamine 12,4%. La tyrosine (non détectée), la méthionine (0,55%), la cystéine (0,90%), et l'histidine (1,89%) sont très peu représentés.

La prédominance des acides aminés acides dans des échantillons de taro et igname a été déjà rapportée par Mbofung *et al.* (2006) et Huang *et al.* (2007) respectivement. Les acides aminés essentiels représentent 42,11 à 43,33% (6 mois de maturité) de la composition totale. Ces résultats montrent que la teneur en acides aminés essentiels de nos échantillons est supérieure à celle de la référence FAO présentée au tableau 7 (FAO, 1985) à l'exception de la phénylalanine, méthionine, cystéine et la tyrosine. Bien qu'inférieure à la référence, la teneur en acides aminés soufrés de nos échantillons n'est pas à négliger car, les racines et les tubercules en sont généralement dépourvus (Fiagan, 2007). D'une façon générale, les teneurs en acides aminés sont supérieures à celles rapportées sur trois variétés de taro (*Colocasia esculenta* L. var. Mein, var. KS1 et var. Betelnut) taiwanais (Huang *et al.*, 2007).

Tableau 6 : Le profil des acides aminés des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

| Acides aminés | Degré de maturité (mois) | | | | | |
|---------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 6 | 8 | 10 | 6 | 8 | 10 |
| | Séchage solaire | | | Séchage électrique | | |
| THR | 7,83±0,03 ^b | 7,31±0,02 ^a | 8,49±0,04 ^c | 7,85±0,03 ^a | 8,13±0,04 ^b | 7,76±0,03 ^a |
| ILE | 6,25±0,02 ^a | 6,59±0,02 ^b | 6,93±0,04 ^c | 5,85±0,02 ^a | 6,73±0,03 ^c | 6,00±0,02 ^b |
| LEU | 6,58±0,02 ^a | 6,79±0,02 ^b | 6,60±0,02 ^a | 7,07±0,02 ^b | 7,16±0,04 ^c | 7,03±0,04 ^a |
| LYS | 8,93±0,02 ^c | 8,24±0,03 ^b | 7,95±0,03 ^a | 7,80±0,02 ^b | 8,06±0,02 ^c | 7,40±0,04 ^a |
| MET | 0,92±0,05 ^b | 1,15±0,03 ^c | 0,36±0,02 ^a | 0,82±0,02 ^b | 0,14±0,01 ^a | 2,02±0,02 ^c |
| PHE | 4,10±0,05 ^c | 3,72±0,04 ^a | 3,91±0,05 ^b | 4,41±0,04 ^b | 4,03±0,04 ^a | 4,00±0,04 ^a |
| TYR | nq | nq | nq | nq | nq | Nq |
| VAL | 5,22±0,03 ^a | 5,36±0,04 ^a | 5,52±0,04 ^b | 5,75±0,02 ^a | 5,69±0,04 ^a | 5,67±0,04 ^a |
| HIS | 2,23±0,03 ^b | 1,78±0,04 ^a | 2,35±0,04 ^b | 1,75±0,04 ^b | 1,80±0,04 ^b | 1,45±0,04 ^a |
| ALA | 3,21±0,04 ^a | 4,05±0,05 ^b | 5,14±0,04 ^c | 4,37±0,04 ^c | 4,02±0,03 ^b | 3,48±0,05 ^a |
| ASX | 14,95±0,03 ^b | 15,39±0,03 ^c | 14,93±0,02 ^a | 15,47±0,03 ^b | 15,24±0,04 ^a | 15,90±0,03 ^c |
| GLX | 12,02±0,04 ^a | 12,64±0,03 ^c | 12,24±0,05 ^b | 12,17±0,03 ^a | 12,88±0,03 ^c | 12,74±0,03 ^b |
| GLY | 9,46±0,02 ^a | 10,13±0,01 ^b | 9,51±0,02 ^a | 10,11±0,01 ^a | 10,21±0,04 ^b | 10,14±0,03 ^a |
| PRO | 7,57±0,04 ^c | 5,42±0,03 ^a | 6,52±0,02 ^b | 4,93±0,04 ^a | 5,41±0,04 ^c | 5,20±0,02 ^b |
| SER | 6,92±0,02 ^b | 7,37±0,01 ^c | 6,64±0,05 ^a | 7,82±0,03 ^c | 7,26±0,02 ^a | 7,52±0,02 ^b |
| ARG | 2,96±0,07 ^b | 2,83±0,03 ^a | 3,54±0,05 ^c | 3,44±0,04 ^c | 3,14±0,01 ^a | 3,30±0,02 ^b |
| CYS | 0,84±0,013 ^b | 1,22±0,05 ^c | 0,38±0,012 ^a | 0,39±0,02 ^b | 0,09±0,01 ^a | 0,38±0,01 ^b |

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05.

La teneur en acide aminé est exprimée en g/100 g de protéines (base sèche)

THR : Thréonine ; **ILE** : Isoleucine ; **LEU** : Leucine ; **LYS** : Lysine ; **MET** : Méthionine ; **PHE** : Phénylalanine ; **TYR** : Tyrosine ; **VAL** : Valine ; **HIS** : Histidine ; **ALA** : Alanine ; **ASX** : Acide aspartique ; **GLX** : Acide glutamique ; **GLY** : Glycine ; **PRO** : Proline ; **SER** : Serine ; **ARG** : Arginine ; **CYS** : Cystéine.

III. 1. 4. Indice chimique

La valeur nutritionnelle d'un aliment dépend de sa capacité à fournir les acides aminés de ses protéines, dans des proportions adaptées aux besoins de l'individu. La valeur nutritionnelle d'une protéine dépend donc de sa composition en acides aminés indispensables, mais également de sa biodisponibilité. L'indice chimique (Tableau 7) se révèle être un outil performant pour évaluer la qualité nutritionnelle d'une protéine car il traduit l'aptitude de la protéine analysée ou de l'aliment protéique à contenir l'ensemble des acides aminés indispensables, c'est à dire non synthétisables par l'homme. D'une façon générale, l'indice chimique des acides aminés essentiels de nos échantillons est supérieur à celui de la protéine de référence (Tableau 7). Toutefois, les acides aminés essentiels limitant sont la Méthionine + cystéine et la phénylalanine + tyrosine. L'indice chimique de ces derniers varie de 3,70 à 11,93 (Méthionine + Cystéine) et de 60 à 71,12 (Phénylalanine + Tyrosine). L'écart est très grand entre les différents acides aminés essentiels, les valeurs de l'indice chimique de la valine, de l'isoleucine, de la lysine, de la thréonine et de l'histidine sont supérieures à celles rapportées par Huang *et al.* (2007) sur quelques variétés de taro. Cependant, les valeurs de l'indice chimique de la leucine, méthionine, cystéine, phénylalanine et tyrosine obtenues par ces mêmes auteurs sont supérieures à celles du taro de type Sosso.

Généralement, la plupart des acides aminés essentiels du taro variété Sosso montrent des scores d'indice chimique relativement élevés à l'exception de la Phénylalanine, Tyrosine et Méthionine. Ceci suggère que le taro Sosso est une source d'acides aminés essentiels mais qui nécessite d'être accompagné par les denrées riches en Phénylalanine, Tyrosine et Méthionine.

Tableau 7 : Indice chimique des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

| Mode de séchage | Degré de maturité (mois) | Indice chimique (%) | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|---------------------|---------|------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|
| | | Valine | Leucine | Isoleucine | Lysine | Met + Cys | Phe + Tyr | Thréonine | Try | Histidine |
| Séchage solaire | 6 | 149,14 | 99,69 | 223,21 | 156,66 | 28,38 | 66,12 | 237,27 | / | 117,36 |
| | 8 | 153,14 | 102,87 | 235,35 | 144,56 | 38,22 | 60 | 221,51 | / | 93,68 |
| | 10 | 157,71 | 100 | 247,5 | 139,47 | 11,93 | 63,06 | 257,27 | / | 123,68 |
| Séchage électrique | 6 | 164,28 | 107,12 | 199,28 | 136,84 | 19,51 | 71,12 | 237,87 | / | 92,10 |
| | 8 | 162,57 | 108,48 | 240,35 | 141,40 | 3,70 | 65 | 246,36 | / | 94,73 |
| | 10 | 162 | 106,51 | 214,28 | 129,82 | 38,70 | 64,51 | 235,15 | / | 76,31 |

Les valeurs des acides aminés essentiels de la protéine de référence (FAO, 1985) qui ont permis le calcul de l'indice chimique : Valine = 3,5 ; Leucine = 6,6 ; Isoleucine = 2,8 ; Lysine = 5,7 ; Met + Cys = 6,2 ; Phe + tyr =6,2 ; Thréonine = 3,3 ; Tryptophane = 1,1 ; Histidine = 1,9

IC : Indice chimique (%) = (g AAE pour 100g de protéine de taro/g AAE pour 100g de protéine de référence) x100

Met = Méthionine ; Cys = Cystéine ; Phe = Phénylalanine ; Tyr = Tyrosine

III. 1. 5. Solubilité des protéines dans l'eau

La Figure 9 montre l'influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la solubilité des protéines des farines de taro Sosso dans l'eau. Les résultats indiquent que le degré de maturité des tubercules influence significativement ($P < 0,05$) la solubilité des protéines dans l'eau sans interaction avec le mode de séchage. A six mois de maturité, la solubilité des protéines est de l'ordre de 6,2% (séchage solaire) et 5,5% (séchage électrique). Lorsque le degré de maturité est de dix mois, l'augmentation de la solubilité des protéines atteint 8,6% (séchage solaire) et 7,9% (séchage électrique). Le faible taux de solubilité des protéines dans l'eau des farines de taro Sosso s'explique par le fait que les protéines de taro Sosso sont essentiellement structurales, les protéines n'étant pas mises en réserve dans les tubercules. Une protéine actuellement connue qui contribue à l'élévation du taux de protéines solubles du taro est une glycoprotéine soluble, constituant des mucilages, qui joueraient également un rôle dans la fonctionnalité des farines et des pâtes (Njintang, 2003). La mise en solution de certaines protéines structurales devrait faire appel à divers solvants tels que les alcools et les acides organiques (Bletz et Wall, 1980). C'est ce qui explique les travaux de Sathe *et al.* (1982) qui montrent que la forme Zwitterion permet une précipitation ou une baisse de la solubilité des protéines. A ce point, la charge nette est nulle, mais en réalité, le nombre de charges est maximal, donc les interactions électrostatiques aussi. La protéine tend à se resserrer sur elle-même et expulse l'eau : la solubilité est minimale. Le fait que la solubilité des protéines dans l'eau (par ricochet l'indice de solubilité) contribue à la fonctionnalité des farines montre bien l'importance des protéines. Ainsi, tout paramètre susceptible d'affecter sa teneur ou sa configuration spatiale affecterait les propriétés de la farine.

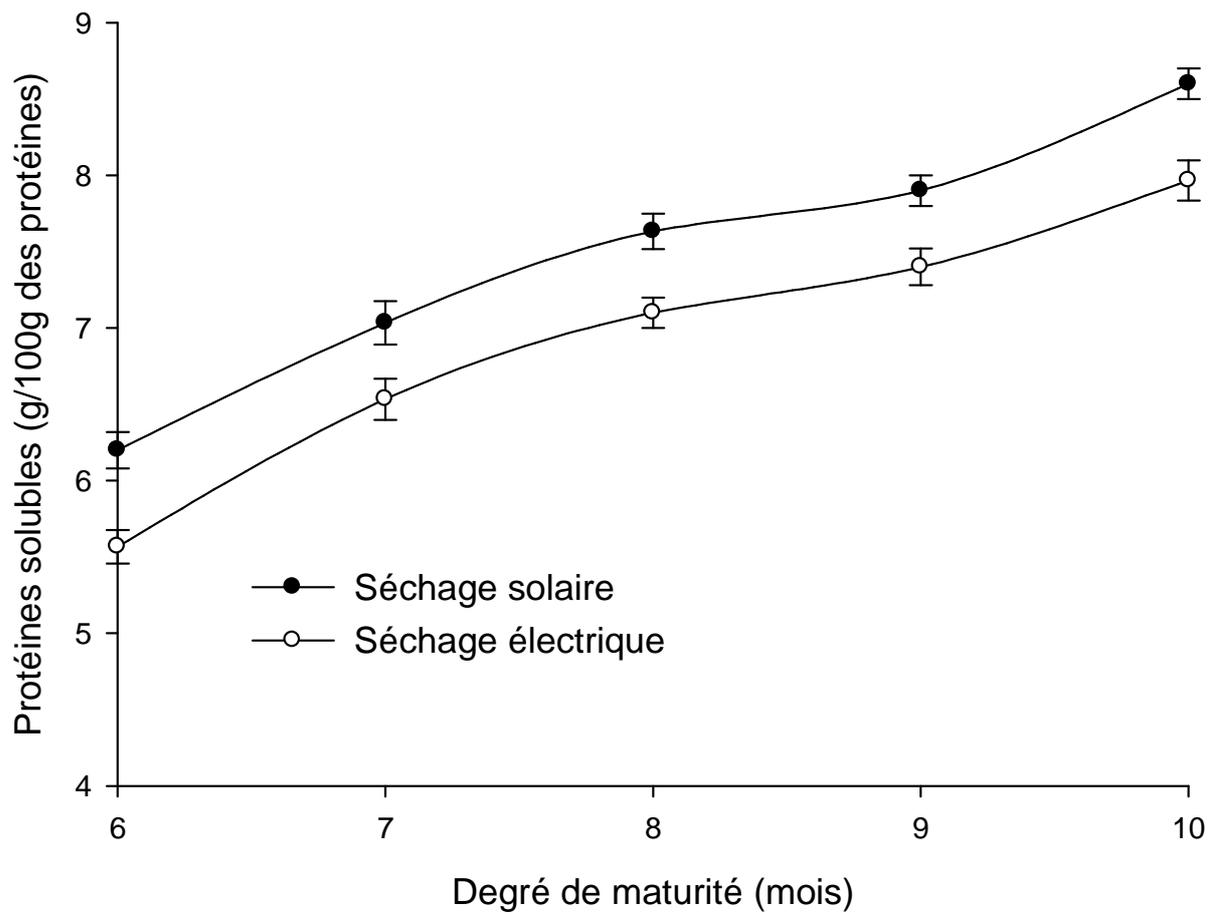


Figure 9 : Effet du degré de maturité et du mode de séchage sur la solubilité des protéines des farines de taro Sosso dans l'eau

III. 1. 6. Teneur en oxalates totaux

La teneur en oxalates de farine de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage est présentée sur la Figure 10. Elle est de 0,76% (6 mois) et augmente pour atteindre 1,11% (10 mois) pour les farines séchées au soleil. La même tendance a été observée dans le cas du séchage électrique. Selon (Contreras-Padilla *et al.*, 2011), l'augmentation quasi-linéaire lors de l'analyse des résultats de la teneur en oxalates à différentes phases de la maturité pourrait être liée à la teneur en calcium dans le sol, aux besoins de la plante pendant la croissance et aux conditions saisonnières et environnementales. Une explication pour cette tendance saisonnière qui a été suggérée par quelques auteurs (Monje et Baran, 2002; Nakata, 2003) est que les oxalates de calcium sont des réservoirs de dioxyde de carbone et de calcium. Quand la pression de vapeur de la concentration en dioxyde de carbone et en calcium dans la plante diminue significativement, quelques enzymes capables de dégrader les sels d'oxalate sont activés. Ce processus peut être bidirectionnel (Monje et Baran, 2002; Nakata, 2003). Logiquement, pendant que la teneur en calcium augmente avec le degré de maturité, la teneur en oxalates devrait diminuer mais, ce n'est pas le cas et c'est ce qui explique souvent l'implication d'autres paramètres à part le degré de maturité (Contreras-Padilla *et al.*, 2011). L'accumulation des oxalates dans les plantes affecte négativement la qualité nutritionnelle des aliments parce que ces composés se lient aux minéraux essentiels et forment les complexes qui diminuent l'absorption de calcium. La consommation des plantes tel que le taro avec de teneur élevée en oxalates peut augmenter le risque de formation de calculs rénaux chez certains groupes de personnes (Judprasong *et al.*, 2006 ; Nakata et McConn, 2007). Dans ce cas l'un des enjeux serait de minimiser son taux sur le produit final.

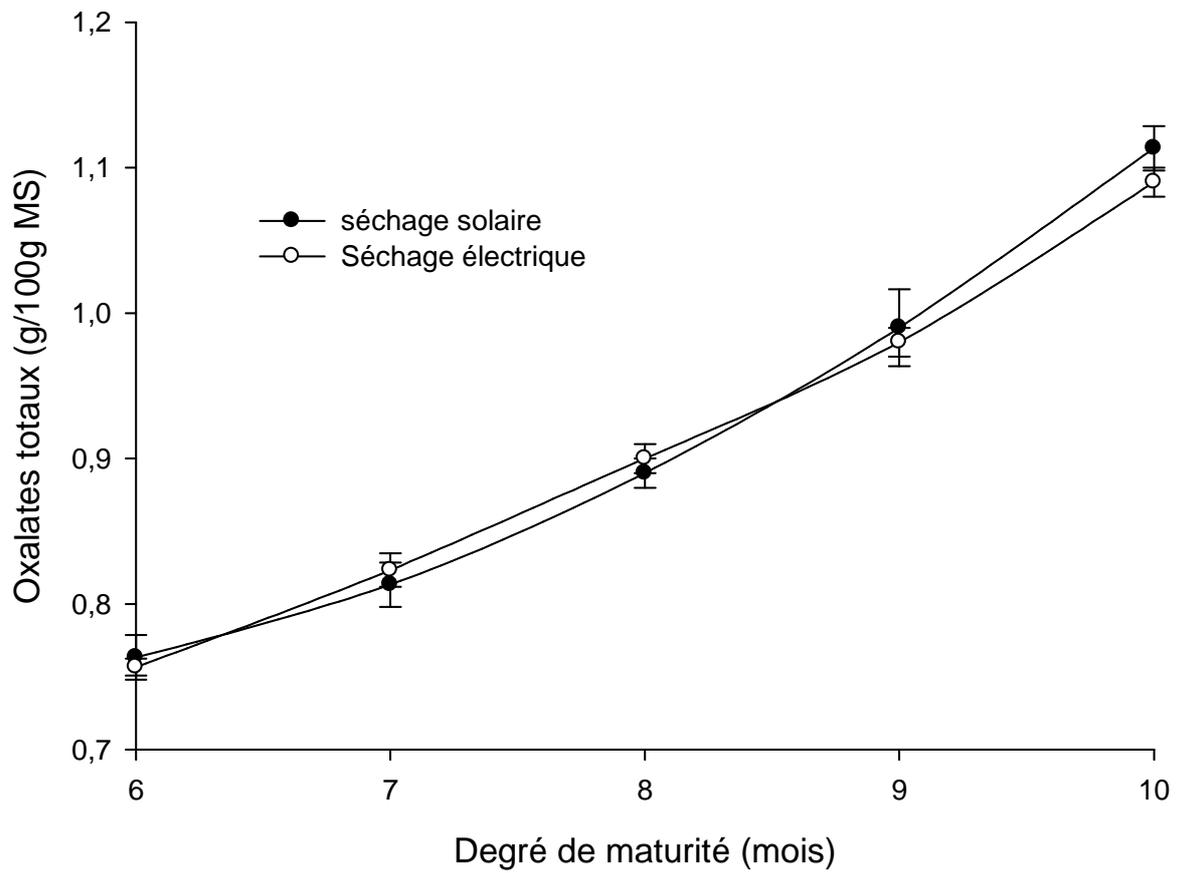


Figure 10 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les oxalates totaux des farines de taro Sosso

III. 1. 7. Teneur en amidons totaux

Les tubercules de taro Sosso contiennent des proportions élevées en amidon et peuvent aussi être utilisés pour l'alimentation ou comme ingrédients dans les aliments prêts à la consommation « *convenient foods* ». La teneur en amidon des plantes est un indicateur important pour l'évaluation de la qualité des féculents (Lisinska & Leszczynski, 1989; Pavlista, 1997). La pomme de terre avec une teneur élevée en amidon est bien adaptée à l'utilisation alimentaire et au processus industriel de l'amidonnerie (Mitch, 1984). La teneur en amidons totaux (Figure 11) des farines séchées au soleil augmente avec le degré de maturité et varie de 71,67 (6 mois) à 81,65% (10 mois). Pour les échantillons séchés électriquement, la tendance est identique à la précédente avec des valeurs comprises entre 71,25 (6 mois) et 82,23% (10 mois), mais il n'existe pas de différence significative entre les modes de séchage. Dans le présent travail, la teneur en amidon augmente graduellement jusqu'à 10 mois où les valeurs maximales de 81,65 - 82,23% ont été obtenues. Sur la base de la teneur en amidon, l'optimum de la récolte des tubercules de taro Sosso est observé entre 8 et 10 mois. Ainsi, une teneur en amidon élevée de taro Sosso pourrait être obtenue en choisissant le degré de maturité. Les travaux récents de Huang *et al.* (2006) sur l'igname ont montré que l'amidon de celle-ci varie significativement ($p < 0,05$) avec le degré de maturité et augmente entre les premiers stades de croissance (155-225 jours), avant de se stabiliser à la maturité complète (260 jours). Plusieurs travaux relatifs au temps optimal de récolte des tubercules d'igname par rapport à la teneur en amidon ont été rapportés au degré de maturité des tubercules de *Dioscorea alata* (Noda *et al.*, 1995; Trèche et Agbor-Egbe, 1996). Selon les résultats de ces auteurs, 260 jours représentent l'optimum de la récolte des tubercules d'igname pour une teneur maximale en amidon.

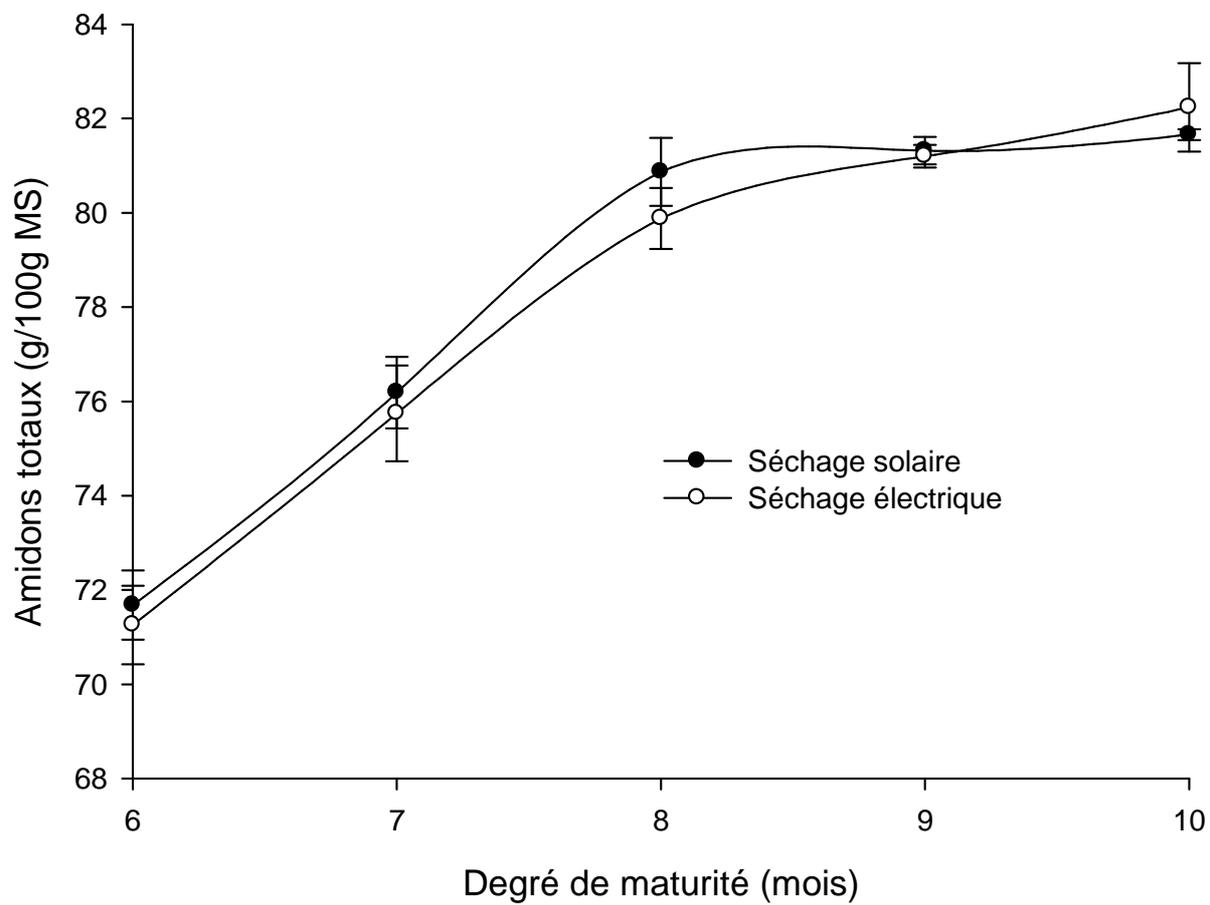


Figure 11 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les amidons totaux des farines de taro Sosso

Conclusion partielle

A la lumière des analyses menées dans cette partie, il ressort que la composition biochimique des farines de taro (variété Sosso) varie avec le degré de maturité. Le mode de séchage influence significativement la teneur en cendres.

Les teneurs en protéines brutes, en cendres, en sucres disponibles, en oxalates totaux, en fibres brutes et en amidons totaux augmentent avec le degré de maturité.

Les minéraux les plus abondants sont le potassium, le magnésium et le calcium. Le profil des acides aminés montre la prédominance des acides aminés acides.

L'analyse de la composition biochimique des farines de taro Sosso montre que l'amidon est le composé majoritaire et qu'il augmente avec le degré de maturité pour atteindre le maximum à 10 mois. Ces variations pourraient affecter les propriétés physico-chimiques des amidons y résultant et méritent d'être investiguées de ce fait.

III. 2. Caractérisation physico-chimique de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité

III. 2. 1. Composition chimique des amidons de taro Sosso

La composition chimique des amidons de taro Sosso est fonction du degré de maturité (Tableau 8). Les taux des cendres et des protéines augmentent significativement avec le degré de maturité ; alors que les teneurs en eau et en lipides ne varient pas. Il ressort de ce tableau que les teneurs en cendres, lipides et protéines brutes dans les amidons à différents degrés de maturité de taro variété Sosso sont très faibles. La pureté des amidons varie de 98,89 à 99,00%. Ces résultats corroborent ceux de Perez *et al.* (2005) sur le taro et le macabo de Venezuela. Le rendement d'extraction augmente au début de la croissance pour se stabiliser dans les derniers degrés de maturité. Le même phénomène a été observé pour l'amidon de manioc tel que démontré par Sriroth *et al.* (1999).

Tableau 8 : Composition chimique des amidons de taro Sosso en fonction du degré de maturité

| Paramètres | Degré de maturité (mois) | | | | |
|-------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Teneur en eau (%) | 7,76±0,09 | 7,78±0,20 | 7,91±0,08 | 7,85±0,26 | 7,83±0,04 |
| Cendres (%) | 0,31±0,02 ^a | 0,32±0,01 ^b | 0,32±0,03 ^b | 0,33±0,01 ^c | 0,35±0,01 ^d |
| Lipides (%) | 0,063±0,02 | 0,064±0,03 | 0,065±0,02 | 0,070±0,01 | 0,068±0,01 |
| Protéines (%) | 0,62±0,03 ^a | 0,64±0,01 ^b | 0,66±0,02 ^b | 0,69±0,002 ^c | 0,68±0,01 ^c |
| Pureté (%) | 99,00 | 98,97 | 98,95 | 98,91 | 98,89 |
| Rendement | 57,88 | 60,88 | 68,00 | 68,11 | 68,33 |

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$.

III. 2. 2. Teneur en amylose et en phosphore des amidons

La teneur en amylose des amidons de taro Sosso (Figure 12) varie de 35,90 (6 mois) à 27,65 g/100 g (10 mois), ce qui donne une diminution de 22,98%. L'amidon extrait à partir des tubercules récoltés tardivement (9 et 10 mois) a généralement une teneur en amylose faible. Des études précédentes (Liu *et al.*, 2003 ; Huang *et al.*, 2006) ont rapporté la variabilité de la teneur en amylose de la pomme de terre et de l'igname qui est influencée par le degré de maturité. Sugimoto *et al.* (1995) ont montré que la teneur en amylose de la pomme de terre a tendance à augmenter après la première maturité (deux mois). En revanche, Liu *et al.* (2003) ont démontré que la teneur en amylose diminue après la première récolte (deux mois) et reste sans changement pendant la suite du développement. Ceci suggère que les influences sur la teneur en amylose sont multiples et impliquent non seulement la maturité, mais aussi la zone agroécologique, les conditions de culture et de récolte.

La teneur en phosphore des granules d'amidon de taro Sosso varie avec le degré de maturité. Elle passe de 113,99 à 154,64 mg/100 g (Figure 12) lorsque le degré de maturité augmente de 6 à 10 mois avec un taux d'augmentation de 35,31%. Les résultats obtenus par Liu *et al.*, 2003 ont montré que le degré de maturité de la pomme de terre est corrélé à une augmentation de la teneur en phosphore. Contrairement aux données obtenues ici, les résultats de Geddes *et al.* (1965) n'ont suggéré aucune tendance apparente dans la teneur en phosphore d'amidon de la pomme de terre en fonction de la maturité. Tester *et al.* (1999) ont noté que la teneur en phosphore d'amidon de la pomme de terre augmente en fonction de la maturité des tubercules pendant que la température environnementale baisse de 25 à 10°C. Cette évidence permet de soutenir le concept qui stipule que la faible température environnementale pendant le développement des tubercules de

pomme de terre est associée à une teneur élevée en phosphore dans les granules d'amidon. A cet effet, dans cette étude, la maturité 10 mois représente la température environnementale la plus basse pendant le développement des tubercules de taro Sosso, ce qui correspond à la teneur en phosphore la plus élevée.

Par ailleurs, on note une corrélation significative négative entre la teneur en phosphore et celle en amylose ($r = -0,95$). D'une manière générale, les amidons de tubercules ayant une teneur en amylose faible, présentent des valeurs élevées en phosphore, puisque les groupes phosphates sont liés de façon covalente aux molécules d'amylopectine (Zaidul *et al.*, 2008). Une teneur élevée en phosphore permet l'obtention d'une grande viscosité de l'amidon et l'amélioration de la force du gel. Les amidons ayant une teneur élevée en phosphore peuvent être utilisés dans des applications alimentaires exigeant une haute résistance de gel (Moorthy, 2002).

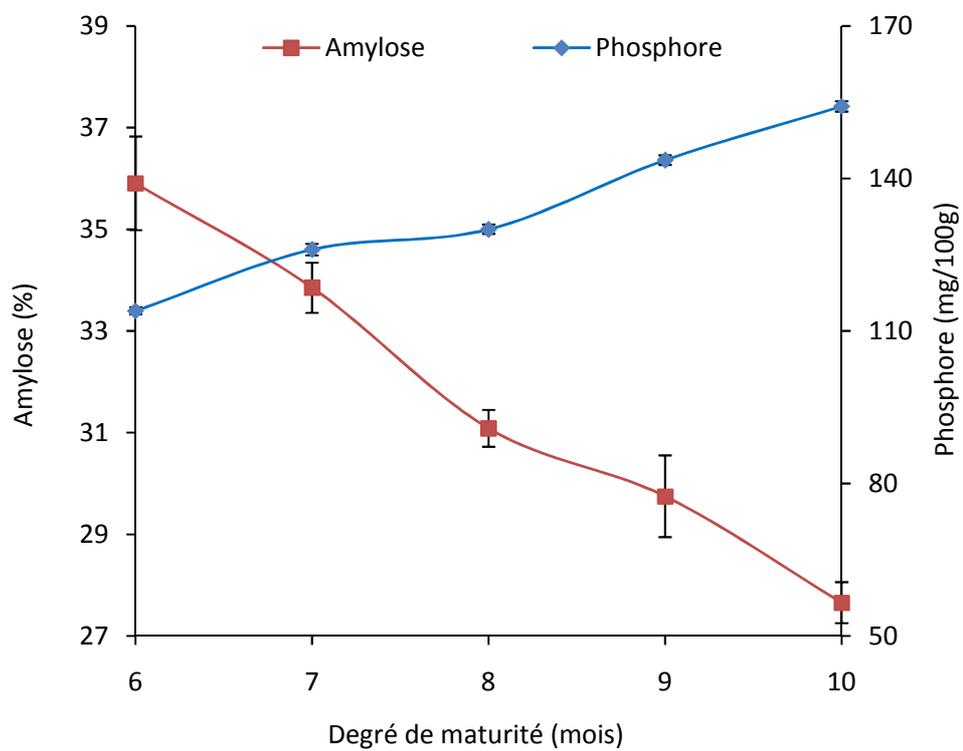


Figure 12 : Influence du degré de maturité sur la teneur en phosphore et en amylose de l'amidon de taro Sosso

III. 2. 3. Propriétés fonctionnelles des amidons

III. 2. 3. 1. Capacité d'absorption d'eau et indice de solubilité des amidons

La Figure 13 montre la capacité d'absorption d'eau réelle (CAEr) en fonction du degré de maturité et de la température pour l'amidon de taro variété Sosso. La CAEr la plus faible est 140,48g/100 g à 20°C (6 mois) et la plus élevée est 307,20g/100 g à 60°C (10 mois). La CAEr des amidons de taro Sosso est influencée par le degré de maturité. Une augmentation de la CAEr de l'amidon a été observée quand la température d'incubation augmente de 20 à 60°C comme l'indique la Figure 13. Cependant, au-delà de cette température, on observe une diminution de la CAEr de l'amidon. Les amidons de taro Sosso à différents degrés de maturité ont montré une CAEr élevée aux températures de 60 et 70°C. La variation de la CAEr avec la température se justifie par la gélatinisation de l'amidon. La température à laquelle la gélatinisation apparaît est ainsi considérée comme une caractéristique essentielle de l'amidon (Liu *et al.*, 2002). La capacité d'absorption d'eau est liée au caractère amorphe de l'amidon et donc à sa teneur en amylopectine. L'augmentation de l'aptitude à absorber de l'eau se justifie bien par celle de la teneur en amylopectine tel que observée précédemment. La quantité d'eau absorbée augmente suite à la multiplication de liaisons hydrogène qui se forment entre l'eau et les molécules d'amidon. A ce titre, l'élévation de la température qui se traduit par celle de la rupture des liaisons hydrogène entraîne une augmentation de l'hydratation de la granule (Biliaderis et Seneviratne, 1992). Les facteurs tels que le rapport amylose-amylopectine, la longueur de la chaîne, la distribution de poids moléculaire et la conformation déterminent la CAEr et la solubilité (Rickard *et al.*, 1991). La variation de la CAEr de l'amidon peut être due à la différence du degré d'engagement des groupes hydroxyles pour former l'hydrogène et les liaisons covalentes entre les

chaines d'amidon (Hoover et Sosulski, 1986). L'augmentation de la CAEr en fonction du degré de maturité couplée à l'influence de la saison a été démontrée sur quatre variétés de manioc récoltées pendant deux saisons différentes (Asaoka *et al.*, 1992). L'absorption d'eau dépend des divers traitements sur l'amidon et de la composition de cet amidon. Une teneur en amylose élevée et une présence massive du nombre des liaisons intermoléculaires réduisent globalement la capacité d'absorption d'eau (Delpeuch et Favier, 1980).

La solubilité des amidons de taro Sosso est présentée à la Figure 14. Comme la CAEr, la solubilité de l'amidon a augmenté avec le degré de maturité ($p < 0,05$). A toutes les maturités, l'amidon exhibe une solubilité plus basse à 20°C et forme seulement une suspension temporaire lorsqu'il est agité dans l'eau. La faible solubilité de l'amidon à des températures basses se justifie par la structure semi-cristalline de granules d'amidon, sa structure granulaire et les liaisons hydrogènes formées entre les groupes hydroxyles dans les molécules d'amidon (Eliasson et Gudmundsson, 1996). La solubilité de l'amidon du taro Sosso est affectée par le degré de maturité et la température. Globalement, l'augmentation de la température d'incubation et du degré de maturité est accompagnée d'une augmentation de l'indice de solubilité (IS) dans l'eau. L'augmentation de la solubilité peut être due à la rupture des granules d'amidon et l'exposition des groupes hydrophiles sous l'effet de l'augmentation de la température. L'augmentation de IS avec la température a été observée chez six variétés de taro par d'autres auteurs (Aboubakar *et al.*, 2008). L'augmentation de l'IS serait liée au taux d'amylose élevé. En effet, ces auteurs et bien d'autres (Chiang *et al.*, 2007) ont attribué l'augmentation de la solubilité à la solubilisation de l'amylose dans l'eau de chauffage.

$$CAE = 202,382 + 11,6261*D + 21,2408*T - 18,2203*D^2 + 1,18188*D*T - 7,11809*T^2$$

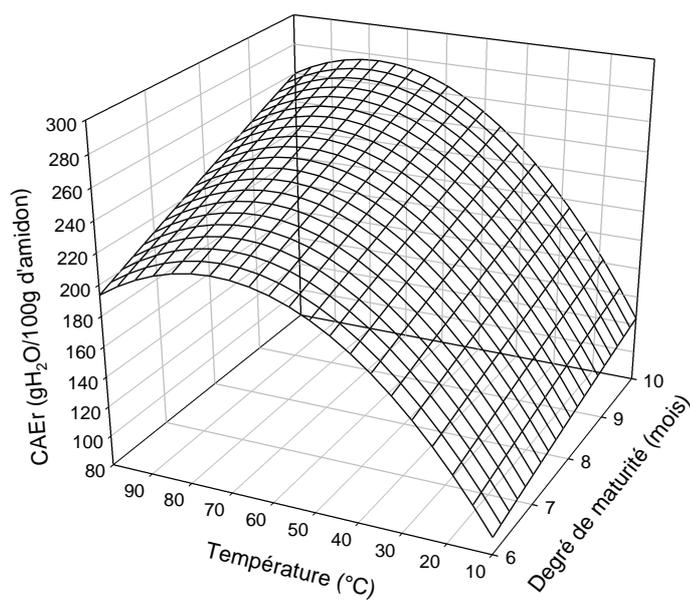


Figure 13: Capacité d'absorption d'eau réelle de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité et de la température

$$IS = 20,664 + 0,901797 \cdot D + 0,797136 \cdot T + 0,186428 \cdot D^2 - 0,13115 \cdot D \cdot T - 1,17999 \cdot T^2$$

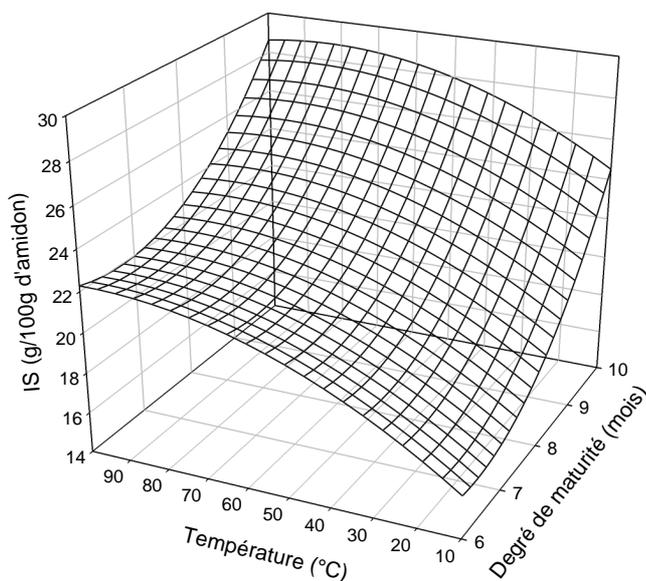


Figure 14 : Influence du degré de maturité et de la température sur l'indice de solubilité de l'amidon de taro Sosso

En effet, la cuisson de l'amidon dans l'eau induit sa gélatinisation et la solubilisation de l'amylose qui entraîne une augmentation de la fraction soluble de la farine. Concernant le taro de la variété Sosso, la diminution de la teneur en amylose avec le degré de maturité ne se traduit pas par une diminution de l'indice de solubilité. Ces résultats témoignent de la contribution de nombreuses autres molécules à la solubilité observée.

III. 2. 3. 2. Le gonflement

La Figure 15 montre l'influence du degré de maturité sur le gonflement des amidons de taro Sosso. Il ressort que le gonflement des amidons augmente avec le degré de maturité et sa valeur passe de $116,11 \pm 0,96\%$ (6 mois) à $135,83 \pm 1,44\%$ (10 mois). Le gonflement de l'amidon reflète son aptitude à absorber de l'eau et justifie la variation observée. Comme expliquée plus haut pour la capacité à absorber de l'eau, cette propriété est liée au caractère hydrophile de l'amidon et donc à sa teneur en amylopectine responsable du réseau amorphe. Les facteurs tels que le rapport amylose-amylopectine, la longueur de la chaîne et la distribution de poids moléculaire déterminent le taux de gonflement (Rickard *et al.*, 1991). Le gonflement a suivi l'ordre inverse de la teneur en amylose. Le gonflement est resté faible probablement à cause de leur caractère natif. En général lorsqu'il est chauffé, l'amidon de taro absorbe 3 à 4 fois plus d'eau que l'amidon natif (Njintang, 2003). Quand l'amidon est gélatinisé, l'organisation moléculaire est perturbée dans le granule, et les interactions eau-amidon augmentent, ayant pour résultat une augmentation substantielle du gonflement (Liu *et al.*, 2002). La variation considérable du gonflement de différentes variétés de *Colocasia* a été rapportée par Moorthy *et al.* (1993). Ces auteurs ont corrélié l'augmentation du gonflement à la taille des granules. L'amidon ayant la plus grande taille granulaire présente un faible gonflement.

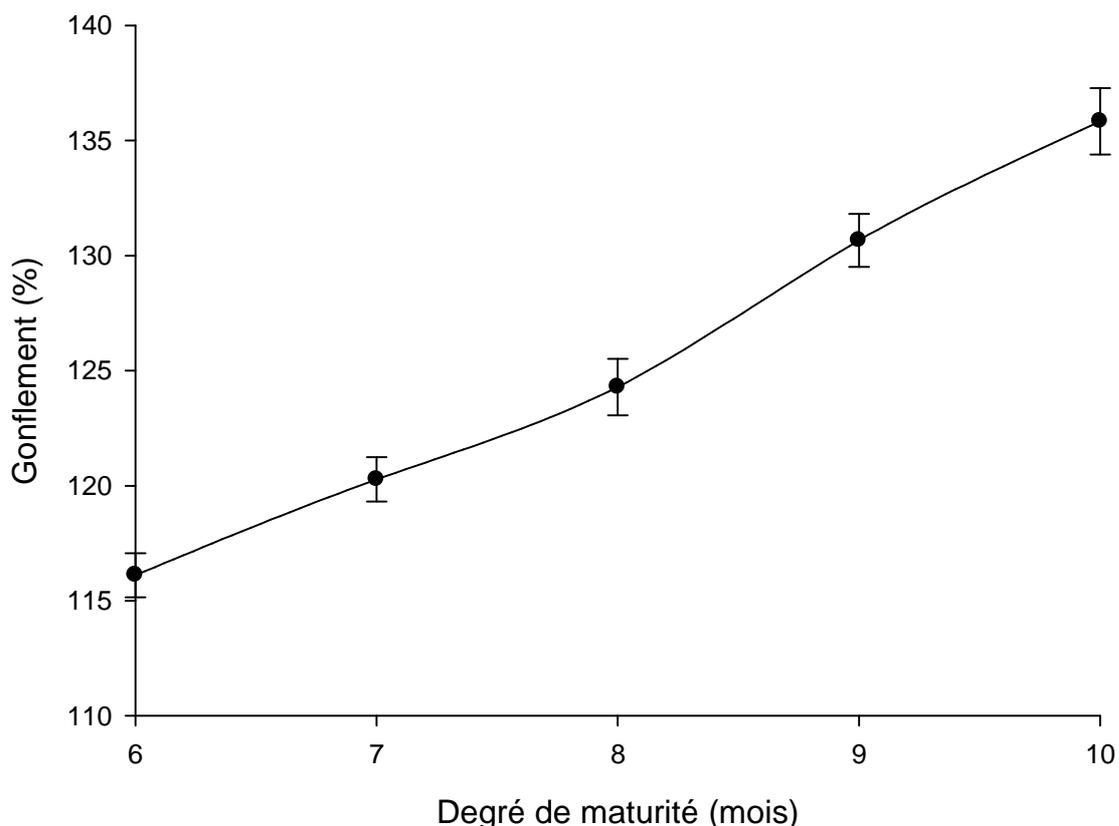


Figure 15 : Influence du degré de maturité sur le gonflement de l'amidon de taro Sosso

III. 2. 4. Propriétés thermiques des amidons

Les propriétés thermiques telles que la température de début (T_o), de pic (T_p), de fin (T_c) et l'enthalpie de gélatinisation (ΔH) de l'amidon de taro variété Sosso récolté à cinq degrés de maturité sont présentées dans le Tableau 9. Tous les amidons ont montré une transition endothermique simple pendant la gélatinisation. La température de gélatinisation (T_o , T_p , et T_c) et l'enthalpie (ΔH) augmentent significativement en fonction du degré de maturité. Une corrélation significative positive ($r = 0,98$; $p < 0,05$) a été observée entre le degré de maturité d'une part, la température et l'enthalpie de gélatinisation d'autre part. Le même phénomène a été observé pour la température de gélatinisation de l'amidon du taro et de *Trapa*

quadrispinosa Roxb pendant la croissance, tel que démontré par Wangs *et al.* (2001) et Chiang *et al.* (2007) respectivement tandis qu'une tendance inverse a été rapportée pour l'amidon de pomme de terre (Liu *et al.*, 2003 ; Huang *et al.*, 2006). Ceci pourrait être attribué à la présence des liaisons phosphates dans les amidons. Comme la température de gélatinisation reflète l'ordre du degré d'arrangement des molécules dans les granules d'amidon, l'amidon de taro Sosso à 10 mois de maturité pourrait être plus ordonné que celui à 6 mois de maturité. Pour une période de croissance végétative de dix mois, l'enthalpie de gélatinisation (ΔH) de l'amidon de taro Sosso tend à augmenter significativement avec le degré de maturité et atteint le niveau le plus élevé à dix mois. L'enthalpie de gélatinisation quant à lui est de $13,24 \pm 0,17$ J/g au degré de maturité 6 mois et augmente au fur et à mesure que le degré de maturité augmente pour atteindre la valeur de $16,27 \pm 0,21$ J/g à 10 mois. Les enthalpies élevées ont généralement été associées aux teneurs en amylose élevées dans les amidons (Jane *et al.*, 1992 ; Aboubakar *et al.*, 2008). Contrairement à cette tendance, l'enthalpie augmente avec l'abaissement du taux d'amylose chez le taro de variété Sosso. Cette augmentation de l'enthalpie pourrait s'expliquer par le fait que le profil de gélatinisation des amidons peut être influencé non seulement par leur composition (rapport amylose/amylopectine), mais également par d'autres éléments tels que l'architecture des granules (domaine cristallin/domaine amorphe), la structure moléculaire de l'amylopectine (extension du branchement, longueur de la chaîne) (Gunaratne et Hoover, 2002 ; Himeda *et al.*, 2012a).

Tableau 9: Propriétés thermiques des amidons de taro Sosso en fonction du degré de maturité

| Degré de maturité (mois) | To (°C) | Tp (°C) | Tc (°C) | ΔH (J/g) |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 6 | 72,53±0,27 ^a | 80,69±0,40 ^a | 89,27±0,41 ^a | 13,24±0,17 ^a |
| 7 | 73,50±0,36 ^b | 81,59±0,70 ^b | 90,42±0,18 ^b | 13,72±0,16 ^b |
| 8 | 74,30±0,35 ^c | 82,72±0,09 ^c | 91,36±0,48 ^c | 14,62±0,25 ^c |
| 9 | 75,21±0,35 ^d | 83,52±0,28 ^d | 92,49±0,30 ^d | 15,40±0,35 ^d |
| 10 | 76,21±0,34 ^e | 84,54±0,32 ^e | 93,19±0,35 ^e | 16,27±0,21 ^e |

To = Température de début de gélatinisation ; Tp = Température de pic de gélatinisation; Tc = Température de fin de gélatinisation ; ΔH = Enthalpie de gélatinisation

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$.

III. 2. 5. Isotherme d'adsorption des amidons de taro Sosso

La Figure 16 présente l'isotherme d'adsorption de l'amidon de taro Sosso. Les courbes montrent que la variation de la teneur en eau des amidons dépend de l'humidité relative (HR) de l'atmosphère dans laquelle ils ont été stockés. Lorsque l'HR diminue, les amidons rejettent l'eau ; par contre, si l'HR augmente, ils absorbent l'humidité (Swinkels, 1985). Sans exception, l'isotherme d'adsorption des différents degrés de maturité démontre une augmentation de l'humidité avec l'augmentation de l'activité de l'eau. Ce comportement qui se traduit par une courbe de forme sigmoïdale reflète un isotherme de Type II.

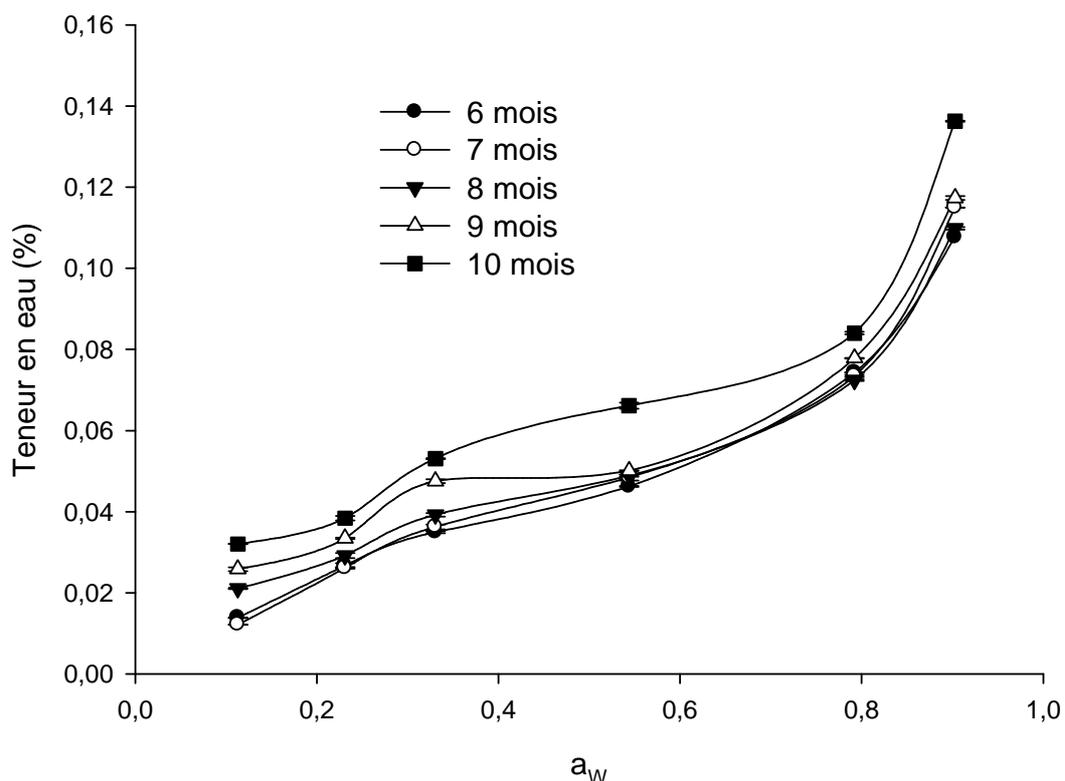


Figure 16: Isotherme d'adsorption de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité

L'isotherme d'adsorption de l'amidon est attribuable aux liaisons hydrogène entre les molécules d'eau et les groupes hydroxyles disponibles dans les régions amorphes et sur les surfaces cristallines. Le modèle de GAB a été utilisé pour décrire l'adsorption de l'amidon de taro Sosso présentée à la Figure 16. Les paramètres du modèle de GAB (M_0 , C et k_b) sont regroupés dans le Tableau 10. Les coefficients de détermination sont au-dessus de 98% et P en dessous de 10% suggérant que les résultats expérimentaux sont bien adaptés au modèle de GAB. A ce titre, les 5 paramètres du modèle ont été déterminés avec exactitude. La teneur en eau de la monocouche M_0 , correspondant à la quantité adsorbée aux emplacements spécifiques, varie de 2,67 (8 mois) à 3,36 (10 mois). L'augmentation de la teneur en eau de la monocouche avec le degré de maturité suggère une augmentation du

caractère amorphe des granules d'amidon, et par conséquent leur hygroscopicité. La teneur en eau de la monocouche déterminée dans cette étude est comprise dans la gamme (2,1–3,7%) rapportée pour l'amidon de pommes de terre (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004). Une variation significative du k_b a été observée (0,82-0,84). Des valeurs relativement élevées de k_b (0,88-0,89) ont été rapportées pour des teneurs en amylose et en amylopectine élevées de l'amidon de pomme de terre (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004). Le changement le plus important observé sur les paramètres du modèle de GAB est la valeur de C. Connue comme la constante d'énergie de surface, la valeur de C augmente sensiblement avec la maturité variant de 11,7 à 113,2. La constante la plus variable du modèle de GAB avec la température est C qui diminue à mesure que la température augmente (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004 ; Peng *et al.*, 2007). Théoriquement l'isotherme de type II exhibe généralement des valeurs de C comprises entre 2 et 50, alors que les valeurs plus élevées (50-200) reflètent l'isotherme de type I (Labuza, 1975). Cette observation suggère que pendant la croissance, la constante d'énergie de surface des granules d'amidon augmente, telle que la température de gélatinisation déterminée par DSC. Ces isothermes sont utiles à la prédiction de la durée de conservation des aliments, au contrôle du séchage et à la prévention de certains accidents comme le collage ou la prise en masse des produits alimentaires pulvérulents.

Tableau 10: Paramètres du modèle de GAB des amidons de taro Sosso en fonction du degré de maturité

| Degré de maturité (mois) | K_b | C | M_0 (g/100g) | R^2 | P |
|--------------------------|-------|--------|----------------|-------|-------|
| 6 | 0,82 | 11,73 | 2,80 | 0,99 | 6,05 |
| 7 | 0,84 | 11,73 | 2,72 | 0,99 | 10,13 |
| 8 | 0,83 | 33,93 | 2,67 | 0,99 | 5,05 |
| 9 | 0,83 | 81,94 | 2,86 | 0,99 | 6,08 |
| 10 | 0,82 | 113,22 | 3,36 | 0,98 | 7,60 |

K_b , C, M_0 (constantes du modèle de GAB) ; R^2 = coefficient de détermination; P = erreur relative moyenne

III. 2. 6. Paramètres de couleurs des amidons

La couleur est un critère très important pour la qualité des amidons, spécialement en industries alimentaires et textiles (Moorthy, 2002). Les coordonnées L^* , a^* , b^* et IB des amidons sont regroupées dans le Tableau 11. Dans le cadre de ce travail, aucune corrélation significative n'a été observée entre les coordonnées de la couleur et les autres composants des amidons. L^* varie de 98,43 à 98,85 et l'indice de blancheur de 94,95 à 96,00. Ces résultats montrent que les amidons de taro Sosso ont une blancheur acceptable (valeurs élevées de L^* et de IB). La couleur blanche indique l'absence de matériaux étrangers. Parmerter (1969) a montré que les valeurs obtenues pour la teneur en eau, les cendres et les protéines sont également des critères de pureté, car elles n'ont pas dépassé les limites maximales de la fécule de maïs. Selon Kurup et Nanda, 1994, l'amidon de tubercule pourrait avoir une bonne couleur blanche si la peau a été bien enlevée avant l'extraction. En raison de la présence des mucilages, les amidons des aracées ont souvent une mauvaise couleur et l'utilisation de l'ammoniaque a été suggérée pour l'améliorer (John, 1999). La variété Sosso pourrait être probablement riche en mucilages et en phénols qui sont généralement responsables du brunissement des aracées (Moorthy,

2002) mais ce brunissement s'observe dans le cas des farines et non des amidons. A ce titre, l'amidon de taro Sosso semble être plus blanc que l'amidon de six variétés de taro originaires du Cameroun dont la valeur de L* varie de 83 à 94 (Aboubakar *et al.*, 2008). Ceci suggère que l'amidon de taro Sosso présente une très bonne blancheur qui peut servir d'atout sur le plan industriel.

Tableau 11 : Influence du degré de maturité sur les paramètres de la couleur de l'amidon de taro Sosso

| Degré de maturité (mois) | L* | a* | b* | IB |
|--------------------------|------------|-----------|-----------|-------|
| 6 | 98,43±1,36 | 1,16±0,10 | 3,55±1,17 | 95,94 |
| 7 | 98,56±1,18 | 1,36±0,35 | 4,64±1,00 | 94,95 |
| 8 | 98,78±1,13 | 1,59±0,18 | 4,48±1,39 | 95,09 |
| 9 | 98,85±0,79 | 1,33±0,15 | 3,89±0,68 | 95,09 |
| 10 | 98,73±0,56 | 1,39±0,24 | 3,37±0,81 | 96,00 |

L* = clarté ou luminance ; a* = composante chromatique rouge-vert ; b* = composante chromatique jaune-bleu ; IB = Indice de blancheur

III. 2. 7. Microstructure et répartition granulométrique de l'amidon de taro

L'influence du degré de maturité sur la répartition granulométrique des amidons de taro (variété Sosso) est présentée dans la Figure 17. Les résultats des analyses par voie sèche sont présentés à la Figure 17 (A) sous la forme de courbes donnant le pourcentage inférieur cumulé (en volume) en fonction du diamètre des particules. On observe la présence des particules plus grandes que la taille de tamis utilisé. Cela peut indiquer une possible agglomération de particules consécutive à une mauvaise dispersion de la poudre lors de l'analyse au Malvern, mais l'écart peut provenir de la non-sphéricité des particules (Condotta, 2005). Cependant, des analyses de distribution granulométrique en voie liquide (Figure 17 (B)) ont

également été réalisées, en utilisant de l'éthanol comme milieu dispersant. Les résultats de ces analyses donnent des particules plus petites que la taille de tamis utilisé mais plus grandes que celles rencontrées généralement (1 à 5 μm) pour l'amidon de taro (Jane *et al.*, 1992). L'augmentation de la taille de nos granules d'amidon serait due à leur gonflement sous l'action de l'éthanol. Comparés à d'autres amidons des racines et tubercules, les amidons de taro Sosso ont une plus petite taille granulaire que la plupart des amidons semblables dans les rapports précédents (Hoover, 2001 ; Liu *et al.*, 2003). Aucune différence significative n'a été observée entre la taille des particules des échantillons d'amidon en fonction du degré de maturité. Ces observations sont différentes avec des études précédentes sur le manioc, l'igname et la pomme de terre qui ont eu comme conséquence l'augmentation de la taille des particules avec la période de croissance (Noda *et al.*, 1995 ; Liu *et al.*, 2003 ; Huang *et al.*, 2006). Par ailleurs, de recherches ont montré que la taille de granule de l'amidon augmente avec le poids croissant de tubercule de pomme de terre (Geddes *et al.*, 1965 ; Sugimoto *et al.*, 1995 ; Liu *et al.*, 2003). En outre, une corrélation positive a été observée entre le poids de tubercules de patate douce et la taille moyenne des granules d'amidon (Noda *et al.*, 1992). Il convient de souligner que la diffraction laser n'a pas permis de déterminer la taille réelle des granules d'amidon de taro Sosso, d'où la nécessité de les observer au microscope électronique à balayage.

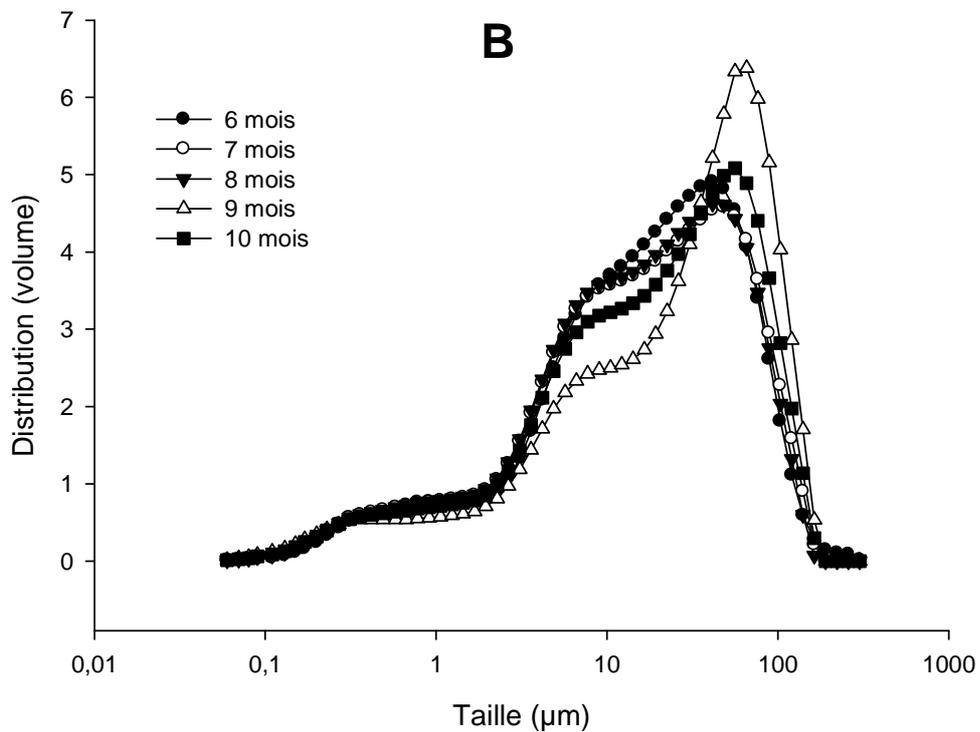
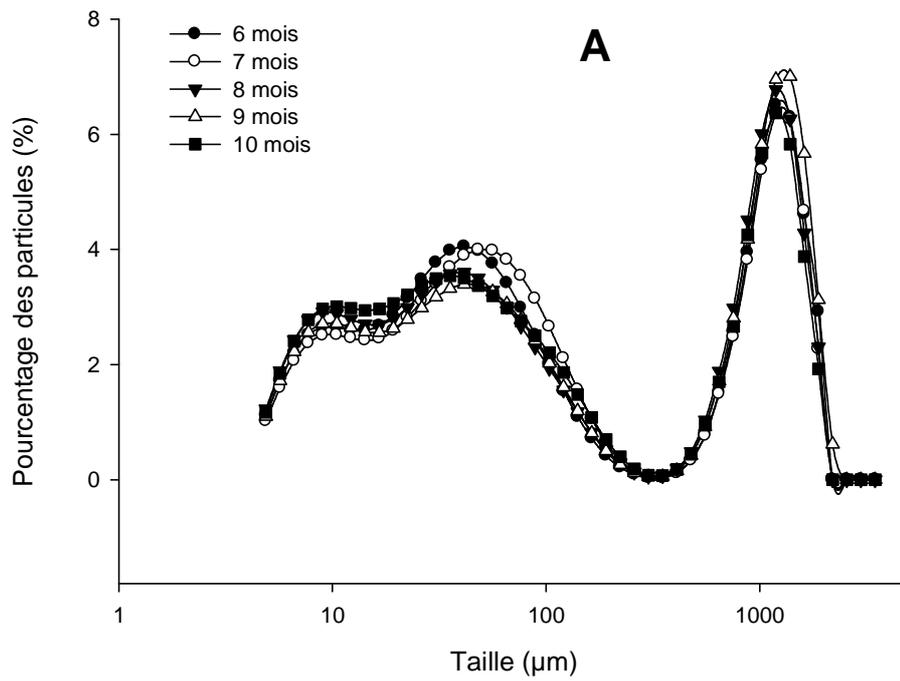
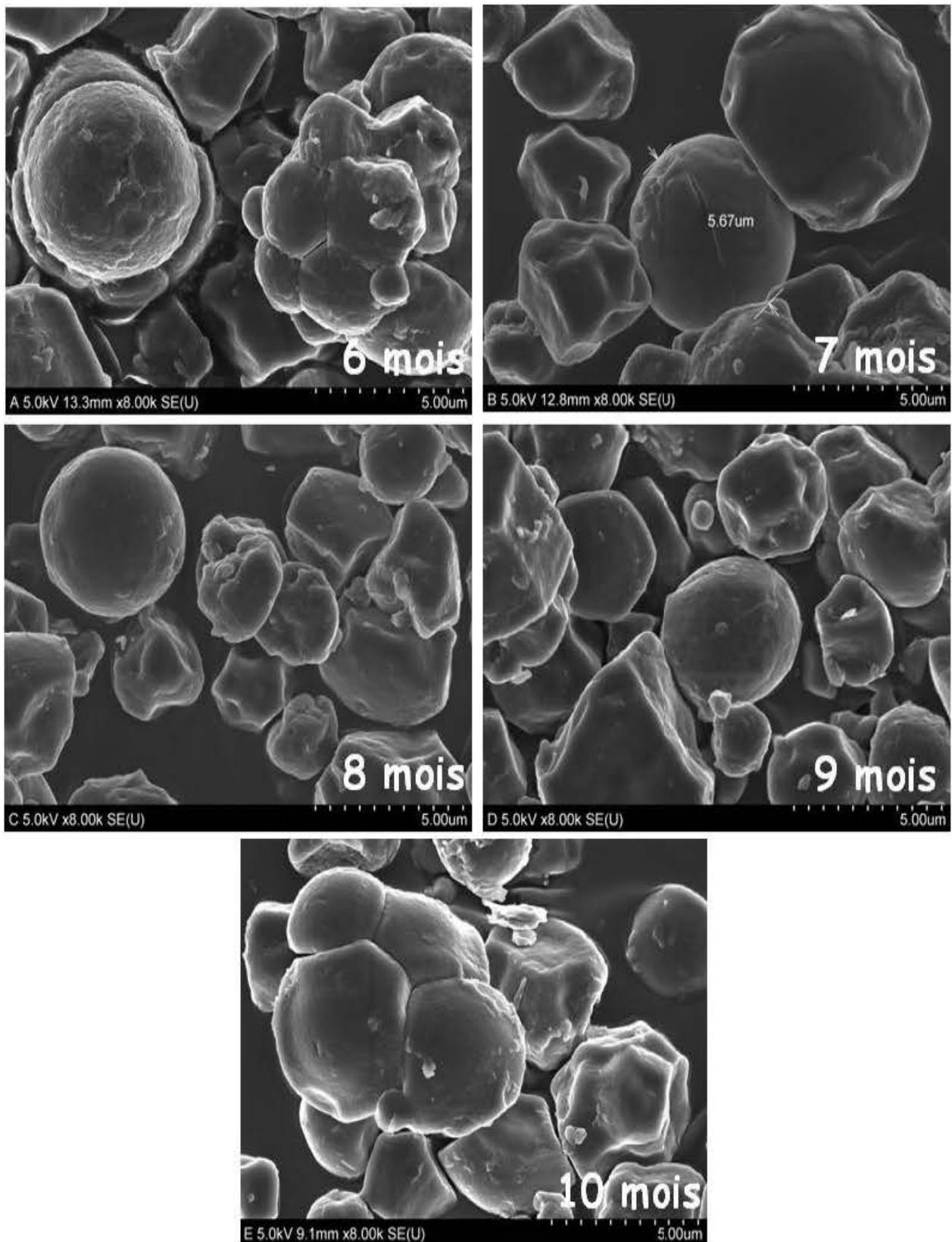


Figure 17 : Répartition granulométrique de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité. (A) : voie sèche ; (B) voie liquide

Par ailleurs, la Photographie 3 des amidons de taro Sosso montre que la taille des particules d'amidon est inférieure à 10 μm , confirmant la thèse d'une possible agglomération par voie sèche ou d'un gonflement lors de l'analyse par voie liquide. En plus, on observe que la forme des particules est irrégulière. Dues à cette irrégularité, les particules (agglomérats) de diamètre équivalent moyen plus grand que l'ouverture des tamis, ont pu traverser cette dernière, dépendant de l'orientation de la particule au moment du tamisage. A partir de ces photos, on constate que les particules plus petites se présentent sous forme d'agglomérats. Les petites particules se sont déposées sur la surface d'autres plus grandes. Ceci peut indiquer un comportement cohésif de ces particules, les forces d'interaction sont plus importantes que leur poids, ce qui peut expliquer le mécanisme de formation des agglomérats observés. En ce qui concerne les particules de tailles plus importantes, ce ne sont pas des agglomérats. Elles se présentent sous formes dispersées les unes des autres dans les photos, ce qui explique l'absence d'interaction du type cohésive entre elles. Comparativement aux amidons des autres racines et tubercules, l'amidon de taro semble avoir la plus petite taille granulaire (1 à 5 μm) que la plupart des amidons semblables (Sriroth *et al.*, 1999 ; Liu *et al.*, 2003 ; Huang *et al.*, 2006). Aucune différence significative sur la forme des granules pendant la maturation n'a été observée. Huang *et al.* (2006) ont rapporté la variation de la morphologie de 4 variétés d'amidon d'igname pendant la croissance.



Photographie 3 : Effet du degré de maturité sur la morphologie des granules d'amidon de taro Sosso observée par microscopie électronique à balayage

III. 2. 8. La forme des particules

La sphéricité et la convexité des amidons de taro variété Sosso en fonction du degré de maturité sont présentées dans les Figures 18 et 19 respectivement. La sphéricité et la convexité des amidons diminuent au fur et à mesure que la taille des particules augmente. La taille des particules variant de 1,4 à 130 μm . Aux plus petites tailles des particules d'amidon correspondent les valeurs élevées de la sphéricité et de la convexité. Une tendance similaire de la forme des particules a été observée pour cinq poudres alimentaires différentes par Gaiani *et al.* (2011). Les courbes de sphéricité et convexité montrent de valeurs faibles pour la maturité 10 mois suggérant une taille d'amidon plus élevée. A ce titre, la sphéricité et la convexité présentent une diminution avec la taille jusqu'à 20 μm pour les quatre degrés de maturité (6, 7, 8 et 9 mois) et 40 μm pour l'amidon à 10 mois de maturité. Les analyses de forme étaient habituellement effectuées à l'aide des techniques d'image (Du & Sun, 2004). Cependant les traitements de données sont longs et peu représentatifs. De nos jours, la diffraction laser couplée à la technique d'image permet de mesurer la forme de certains types de particules (Nalluri *et al.*, 2010; Yu & Hancock, 2008). Certains de ces descripteurs de forme sont la sphéricité, qui est le rapport du périmètre du cercle équivalent au vrai périmètre de la particule, la convexité décrivant la compacité d'une particule (Du & Sun, 2004). L'implication technologique de ces 2 propriétés (sphéricité et convexité) réside dans leur influence sur les propriétés d'hydratation des farines telles que la solubilité et la dispersibilité (Gaiani *et al.*, 2011).

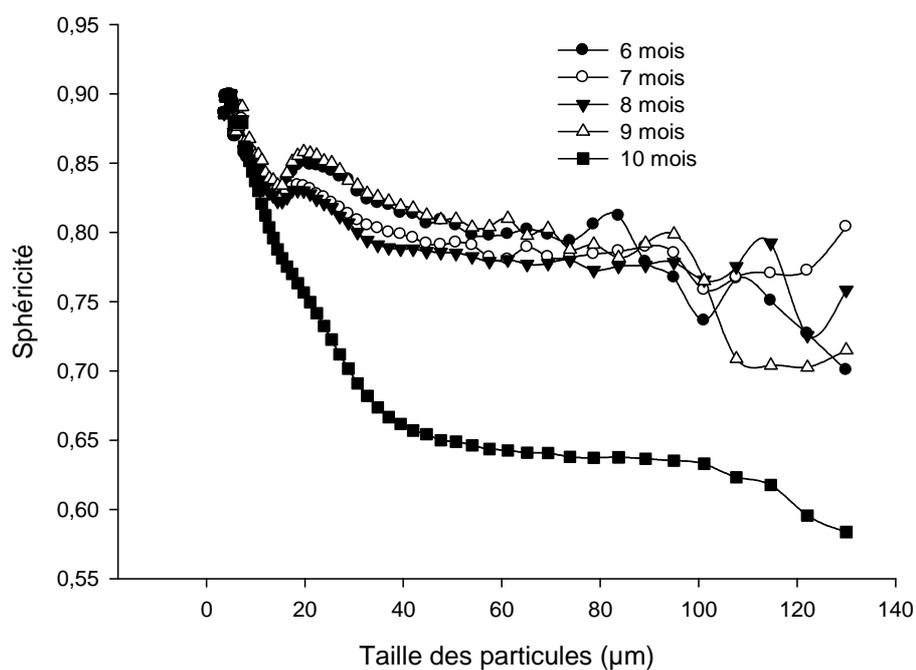


Figure 18 : variation de la sphéricité de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité

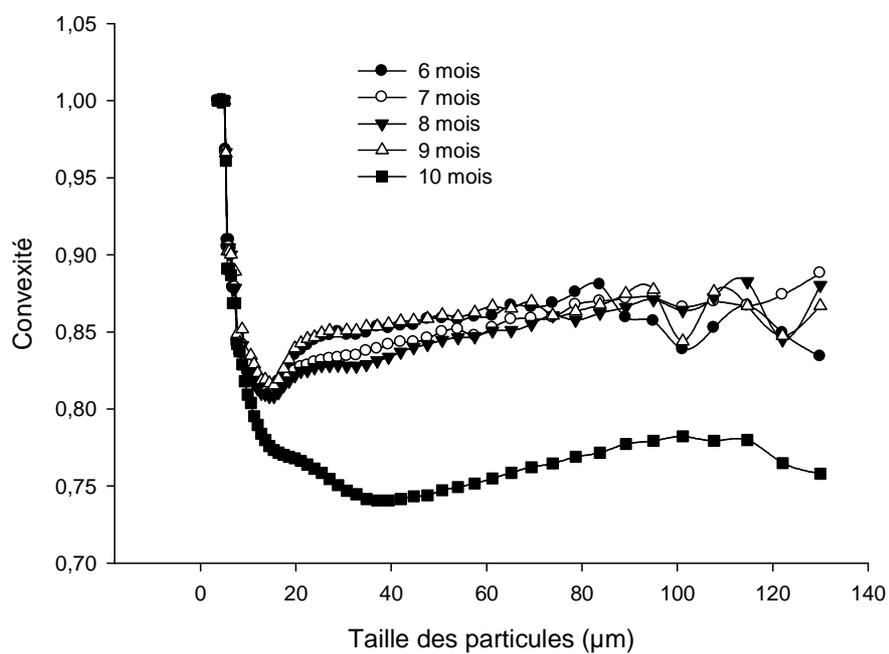


Figure 19 : variation de la convexité de l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité

III. 2. 9. La cristallinité des amidons

Les diagrammes de diffraction aux rayons X des amidons de taro Sosso à différents degrés de maturité sont présentés dans la Figure 20. Les trois pics distincts apparaissent aux angles de réflexion 2θ qui sont 17 ; 19 et 27°. Tous les amidons présentent un pic autour de l'angle de réflexion $2\theta = 27^\circ$ qui est caractéristique des amidons de Type "A" alors que les amidons des tubercules sont généralement de type B (Imberty *et al.*, 1991). Aucun pic n'a été détecté au voisinage de l'angle de diffraction $2\theta = 6,5^\circ$ caractéristique des amidons de Type "B". Ces observations suggèrent que tous nos amidons seraient de Type "A" (faible cristallinité). La structure cristalline de type "A" suggère que l'amylopectine est de courte chaîne et soit emballé dans une structure plus compactée (Jane, 2006). En plus, les diagrammes de diffraction montrent que l'organisation de la structure semi cristalline de l'amidon de taro Sosso n'a pas été affectée par le degré de maturité. Le modèle semblable de diffraction des rayons X indique que l'organisation de la structure semi-cristalline de l'amidon n'a pas été affectée par la maturité de pomme de terre, d'igname et de la patate (Noda *et al.*, 1995 ; Liu *et al.*, 2003 ; Huang *et al.*, 2006 ; Chiang *et al.*, 2007). Bien que les différences aient existé dans les intensités maximales parmi les amidons de taro examinés, plus d'informations détaillées, telles que le développement de cristallinité pendant la croissance de taro Sosso doit être étudié à l'avenir.

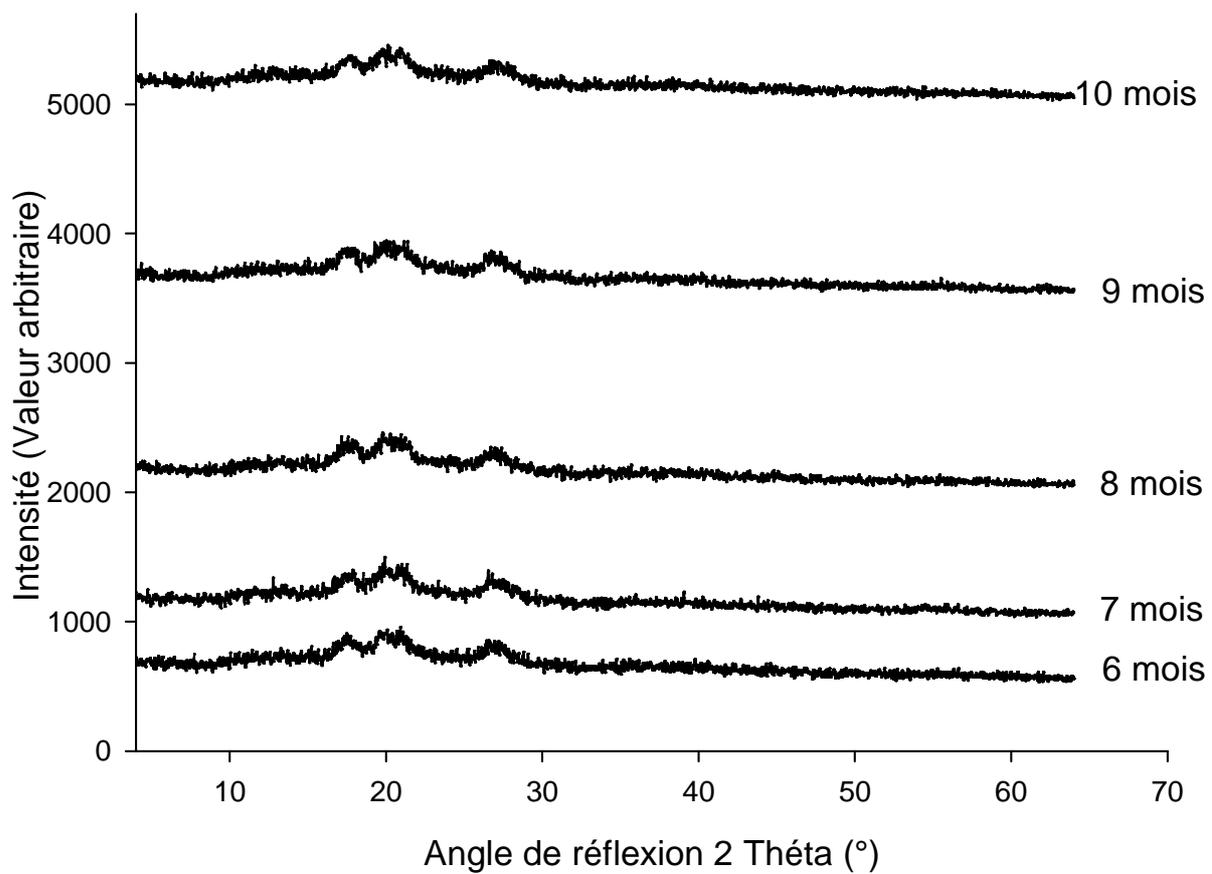


Figure 20 : Diffractogramme de l'amidon de taro Sosso des différents degrés de maturité

Le degré de cristallinité de l'amidon de taro variété Sosso varie de 27,11 à 27,47% et la cristallinité relative de 37,34 à 37,82% (Tableau 12). L'effet du degré de maturité sur la cristallinité de l'amidon de taro Sosso est non significatif. La valeur de la cristallinité absolue de l'amidon de cinq variétés de manioc varie entre 8 - 14% (Moorthy *et al.*, 1996). Cependant, Svegmark *et al.* (2002); Liu *et al.* (2003) travaillant sur l'influence de la maturité sur l'amidon de la pomme de terre, ont rapporté que celui-ci est de type B. Dans le même ordre d'idée, Huang *et al.*, 2006 ont observé en fonction du degré de maturité que l'amidon d'igname (*Dioscorea alata*) est de type B. Par contre, les travaux de Asaoka *et al.* (1992) portant sur quatre variétés de manioc ont conclu que ces derniers sont de type C avec une cristallinité variant de 15,3 à 17,3%. D'autres chercheurs ont obtenu des valeurs de cristallinité d'amidon de manioc plus élevées 38% (Zobel, 1988) et la différence pourrait être attribuée à la procédure d'analyse et les dommages apportés à l'amidon au cours de son extraction (Sriburi et Hill, 2000).

Tableau 12: Degré de cristallinité et cristallinité relative des amidons de taro Sosso en fonction du degré de maturité

| Degré de maturité (mois) | Pics de diffraction à $2\theta(^{\circ})$ | | | Degré de cristallinité (%) | Cristallinité relative (%) |
|--------------------------|---|-------|-------|----------------------------|----------------------------|
| | 17° | 20° | 27° | | |
| 6 | 17,50 | 19,90 | 26,50 | 27,22 | 37,48 |
| 7 | 17,80 | 19,93 | 26,50 | 27,11 | 37,34 |
| 8 | 17,75 | 19,90 | 27,00 | 27,31 | 37,57 |
| 9 | 17,80 | 20,00 | 27,70 | 27,47 | 37,82 |
| 10 | 17,80 | 19,95 | 27,00 | 27,40 | 37,69 |

Conclusion partielle

Cette partie avait pour objectif l'étude des propriétés physico-chimiques des amidons extraits du taro variété Sosso. Dans la limite des analyses réalisées, il ressort que :

- la teneur en phosphore, la capacité d'absorption d'eau, l'indice de solubilité, la température et l'enthalpie de gélatinisation augmentent avec le degré de maturité ;
- le degré de maturité a un effet négatif sur la teneur en amylose ;
- les granules d'amidon sont du Type-A ;

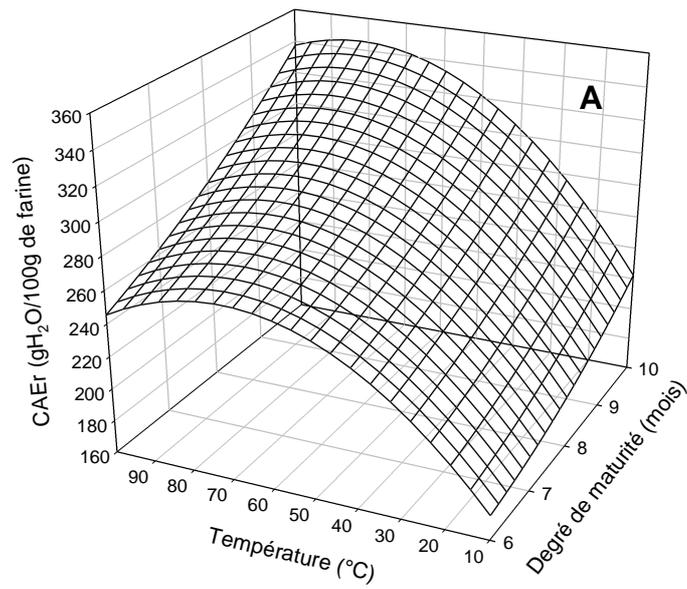
Le degré de maturité influence les propriétés physico-chimiques de l'amidon de taro Sosso. Cette conclusion peut être étoffée par l'étude des propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines issues du taro Sosso.

III. 3. Propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines de taro Sosso : influence du degré de maturité et du mode de séchage

III. 3. 1. Capacité d'absorption d'eau et indice de solubilité dans l'eau

La capacité d'absorption d'eau réelle (CAEr) des farines est représentée dans la Figure 21. L'utilisation des farines de taro Sosso dans la préparation des plats locaux tels que la boule, la bouillie et les beignets dépend largement de leur interaction avec l'eau dans le procédé de réhydratation. Dans cette étude, il a été observé que (CAEr) et l'indice de solubilité dans l'eau (IS) des farines de taro Sosso sont significativement influencés par le degré de maturité et la température. Cependant, l'évolution de ces deux paramètres n'est pas identique vis-à-vis du degré de maturité que de la température. L'examen de ces figures révèle que le degré de maturité entraîne une augmentation linéaire de la CAEr des farines de taro Sosso. Ainsi, en fixant la température, elle varie de 211,72 (6 mois) à 255,69 (10 mois) g/100 g de farine à 20 °C. Alors qu'à 100°C, elle passe de 245,03 (6 mois) à 331,03 (10 mois) g/100 g de farine. Les farines issues de tubercules à 10 mois de maturité ont une grande capacité à fixer l'eau comparées à celles issues de tubercules à maturité faible. Ces variations se justifient bien par celles observées pour l'amidon. La température entraîne une augmentation de la CAEr avec un maximum à 60°C au-dessus duquel la CAE diminue. A six mois, la CAEr passe de 211,72 (20 °C) pour atteindre 272,72 (60 °C) et retombe à 245,03g/100 g de farine (à 100°C). A dix mois, elle passe de 255,69 (20 °C) à 331,03 (100 °C) en passant par 377,14 g/100 g de farine (à 60 °C) pour le séchage solaire. L'observation est la même dans le cas du séchage électrique. La variation de la CAEr entre 60 et 80 °C pourrait être due à la gélatinisation de l'amidon qui est le composant majoritaire de nos farines de taro.

$$CAEr = 253,227 + 8,46348*D + 16,6269*T - 10,5919*D^2 + 5,20363*D*T - 5,42591*T^2$$



$$CAEr = 259,308 + 7,9998 \cdot D + 16,8233 \cdot T - 12,0184 \cdot D^2 + 2,45015 \cdot D \cdot T - 4,39609 \cdot T^2$$

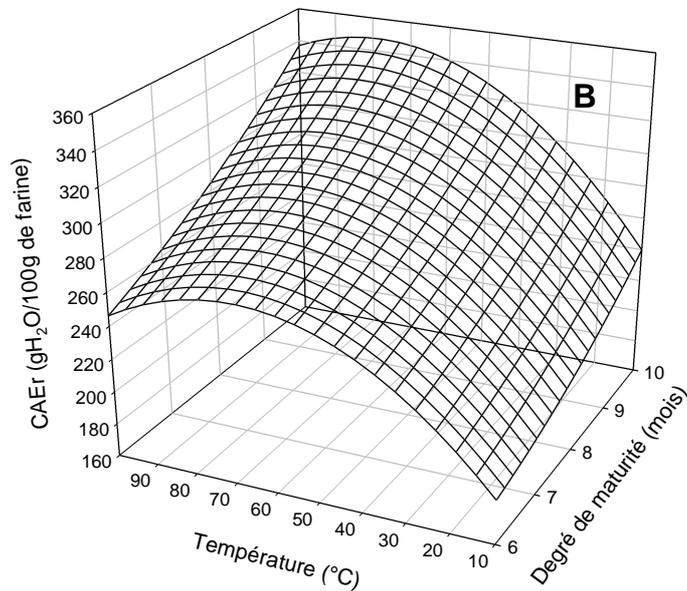
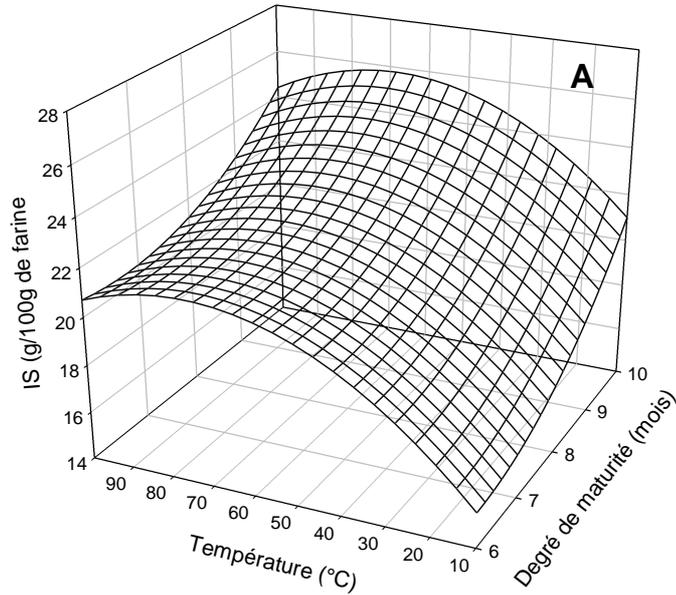


Figure 21 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la capacité d'absorption d'eau réelle des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

De plus, il s'avère que la capacité d'absorption d'eau réelle des farines de taro Sosso est plus élevée (53,8% à six mois et 23,44% à dix mois) que celle de leurs amidons. Ces résultats suggèrent que des composés autres que l'amidon contribueraient à l'absorption d'eau de la farine. C'est le cas des mucilages ou des protéines dont l'effet positif sur l'absorption a été démontré (Cheftel *et al.*, 1985 ; Chiang *et al.*, 2007). Dans la présente étude, la gamme de la capacité d'absorption d'eau (211-379 g/100 g) est plus élevée que (150-180 g/100 g) rapportée par Tagodoe et Nip (1994) pour le taro cultivé à Hawaï. Cette variation pourrait être due à la variété, mais elle pourrait être aussi due aux différences dans les méthodes analytiques utilisées par ces auteurs qui n'ont pas considéré la fraction soluble de la farine. Par conséquent, les valeurs obtenues dans ces conditions sont toujours inférieures à la capacité d'absorption d'eau réelle obtenue dans la présente étude.

La solubilité de la farine de taro Sosso dans l'eau est présentée à la Figure 22. L'indice de solubilité de la farine de taro Sosso varie de 17,46% (6 mois) à 22,30% (10 mois) à 20°C et de 20,82% (6 mois) à 23,47% (10 mois) à 100°C. D'une façon générale, l'indice de solubilité des farines de taro Sosso dans l'eau augmente significativement ($p < 0,05$) avec le degré de maturité et la température d'incubation. L'augmentation de l'indice de solubilité avec la température avait déjà été mentionnée par de nombreux auteurs notamment Aboubakar *et al.* (2008) pour six variétés de taro du Cameroun. Mais l'augmentation de l'indice de solubilité observée par ces auteurs reste élevée comparée à celle obtenue dans la présente étude probablement liée au fait que c'est le taro cuit qui a été utilisé par ces auteurs. En effet, la cuisson de l'amidon dans l'eau induit sa gélatinisation et la solubilisation de l'amylose qui entraîne une augmentation de la fraction soluble de la farine.

$$IS = 21,0155 + 0,31905 \cdot D + 1,29723 \cdot T - 1,44212 \cdot D^2 - 2,12866 \cdot D \cdot T - 0,195413 \cdot T^2$$



$$IS = 22,1871 + 0,565851 \cdot D + 1,71217 \cdot T - 1,48147 \cdot D^2 + 0,341699 \cdot D \cdot T - 1,63089 \cdot T^2$$

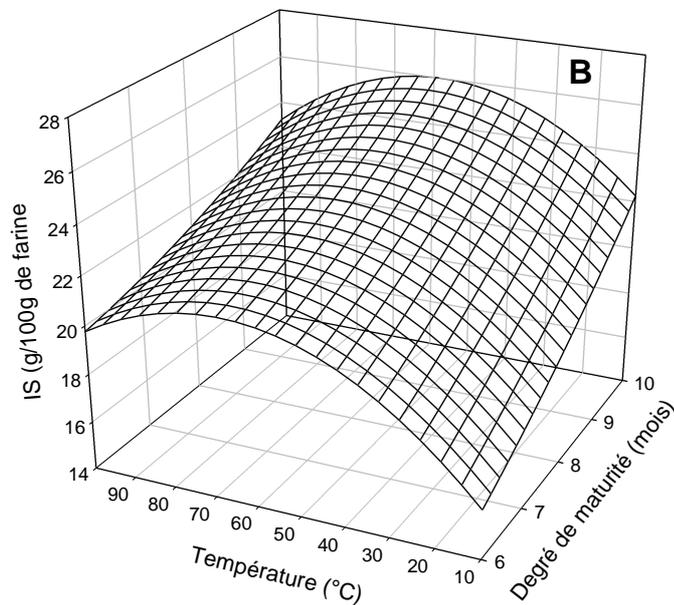


Figure 22 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur l'indice de solubilité des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

III. 3. 2. La plus petite concentration gélifiante (PPCG)

La plus petite concentration gélifiante est la quantité minimale (en gramme) de farine qui, mise dans 100 mL d'eau, permet de former un gel ferme après cuisson. La formation des gels est une propriété fondamentale des amidons et des protéines. Lorsque ces dernières sont dénaturées, elles s'agrègent pour former un réseau protéique (Cheftel *et al.*, 1985). L'amidon natif présent dans les farines serait responsable de la formation de l'empois d'amidon (à l'eau froide) et d'un gel amorphe plus ou moins rigide après gélatinisation. Il peut aussi y avoir formation d'un gel cristallin et de précipité irréversible tel que suggéré par Cheftel et Cheftel (1977). De ce qui précède, on s'attendrait à avoir un fort pouvoir gélifiant (et donc une PPCG faible) à la maturité (10 mois) à laquelle la teneur en amidon est plus élevée dans la farine. Les valeurs de PPCG (Figure 23) varient de 12 à 8% dans le cas du séchage solaire (respectivement 6 et 10 mois) et de 14 à 10% pour le séchage électrique (6 et 10 mois respectivement). Ces résultats montrent bien que les farines issues du séchage solaire présentent des valeurs de PPCG plus faibles aux farines issues du séchage électrique. D'une part, cet avantage du séchage solaire sur le séchage électrique avait déjà été démontré par Njintang *et al.* (2008). D'autre part les résultats obtenus montrent que la PPCG baisse avec le degré de maturité et sans interaction avec le mode de séchage. Alors que l'effet du degré de maturité pourrait se justifier par l'augmentation de la teneur en amidon et protéines avec le degré de maturité, l'effet négatif du séchage électrique serait la conséquence d'une plus grande vitesse de séchage. La conséquence est la densification de tranches, le croûtage et la perte de l'aptitude à fixer l'eau. Dans ce processus impliquant à la fois les protéines et l'amidon, on assiste à une compétition pour l'eau entre la gélification des protéines et la gélatinisation de l'amidon (Singh, 2001), contribuant en fin de compte à la formation d'un réseau de protéines et polysaccharides emprisonnant l'eau dans ses

mailles. L'augmentation des propriétés gélifiantes des protéines avec leur solubilité a déjà été mise en évidence dans de nombreuses études (Kaptso, 2009), et les observations faites dans ce travail suivent la même tendance. Les valeurs de PPCG dans la présente étude sont similaires à celles des faines de taro variété country coco (Njintang et Mbofung, 2006).

III. 3. 3. Le gonflement

Le gonflement de la farine indique le degré d'absorption d'eau des granules d'amidon (Carcea et Acquistucci, 1997). Le gonflement de la farine de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage est présenté dans la Figure 24. Il est fortement ($p < 0,05$) influencé par le degré de maturité et ne l'est pas par le mode de séchage. La valeur la plus élevée a été observée à la maturité 10 mois (173,25% et 178,33% respectivement pour le séchage solaire et électrique) alors que les valeurs les plus faibles ont été observées à la maturité 6 (151,46% et 156,38% respectivement). Ces valeurs de gonflement sont faibles comparées à celles obtenues par Himeda (2004) sur deux variétés (blanc et jaune) de taro cuit, probablement lié à la gélatinisation de l'amidon sous l'effet de la cuisson. En effet, dans leur structure native, les amidons absorbent moins d'eau, mais après gélatinisation, ils en absorbent plus. L'augmentation du gonflement serait liée à la gélatinisation dont ont été sujets les amidons de la farine utilisée. A ce titre, les travaux de Njintang (2003) ont montré que la farine de taro précuit absorbe 4 à 5 fois plus d'eau que la farine de taro non cuit.

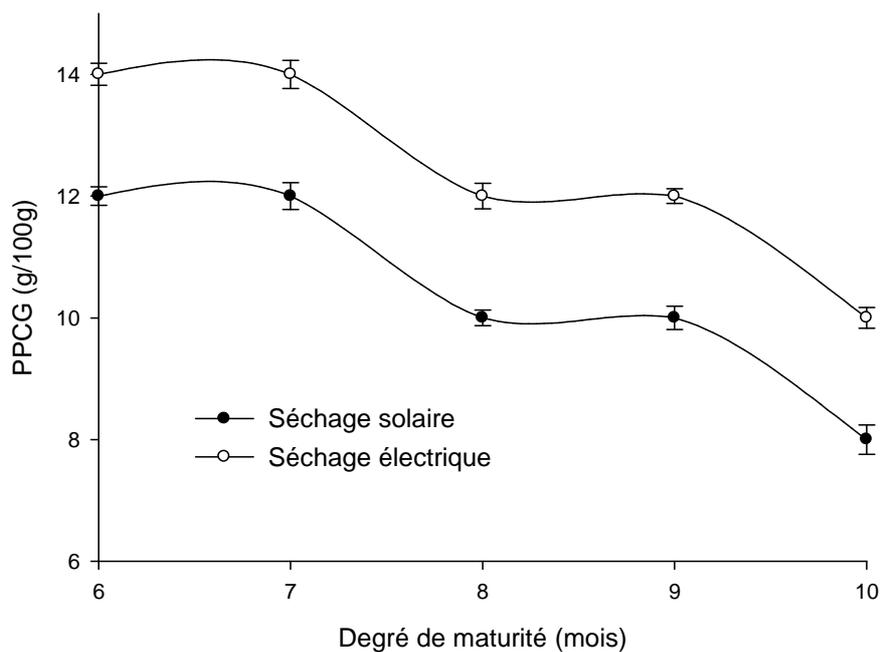


Figure 23 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la plus petite concentration gélifiante des farines de taro Sosso.

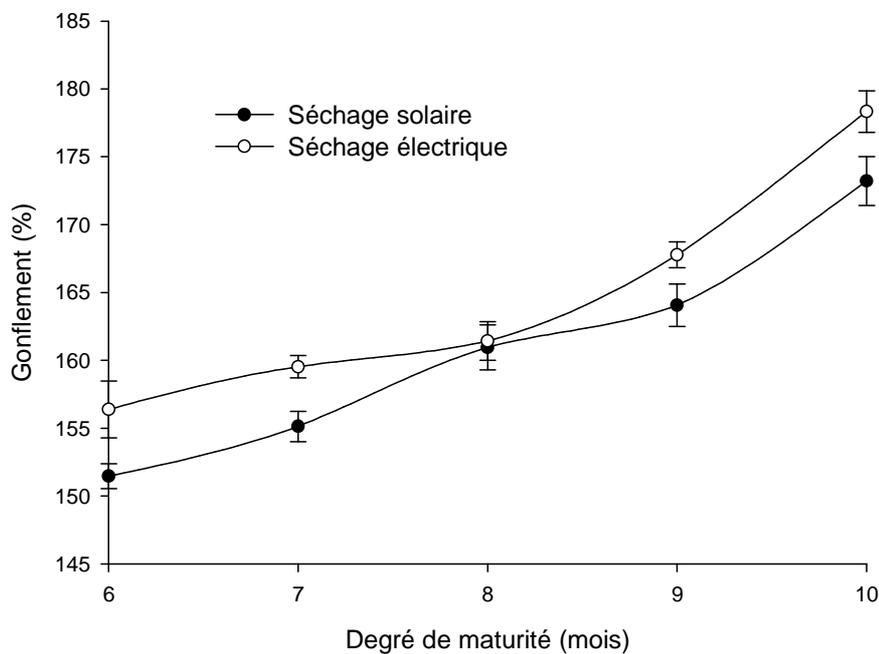


Figure 24: Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur le taux de gonflement des farines de taro Sosso.

III. 3. 4. Isotherme d'adsorption

L'aptitude des farines de taro Sosso à absorber l'eau est présentée dans la Figure 25. Cette figure correspond à l'isotherme d'adsorption qui est la courbe qui indique, à l'équilibre et pour une température déterminée, la quantité d'eau retenue par les farines en fonction de l'humidité relative de l'atmosphère. Les courbes montrent que la variation de la teneur en eau des farines dépend de l'humidité relative (HR) de l'atmosphère dans laquelle elles ont été stockées. On peut observer sur cette figure que les isothermes d'adsorption des farines de taro Sosso ont montré des allures sigmoïdes typiques des formes des constituants alimentaires (isotherme de type II). Plusieurs auteurs font référence aux trois zones générales d'une isotherme d'adsorption, présentant un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit : zone 1 (monocouche), zone 2 (multicouche) et zone 3 (eau liquide) (Mathlouthi, 2001 ; Jannot, 2008). La zone 1 pour laquelle l'activité de l'eau est comprise entre 0 et 0,3 correspond à la constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit (forces de Van der Waals entre groupements hydrophiles et molécules d'eau). L'adsorption se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant la surface externe et les pores du produit. L'eau est dans un état lié (rigidité, forte liaison H). Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée. La zone 2 pour la gamme d' a_w de 0,3 à 0,7 correspond à l'adsorption des molécules d'hydrogène sur la monocouche initiale, ou inclusion de molécules d'eau par capillarité (isotherme linéaire dans cette zone ; état intermédiaire entre solide et liquide). La partie centrale ou plateau correspond à la zone de meilleure stabilité des produits (Baldet, 2004). La zone 3 pour la gamme de 0,7 à 0,99 d' a_w est la présence de l'eau à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau microcapillaire constitue une phase continue. Ainsi, l'isotherme de sorption est

un outil extrêmement précieux pour caractériser la poudre de taro, et déterminer les conditions optimales de stockage, pour le choix d'un emballage et la détermination de la durée de péremption lors du stockage (Tunç et Duman, 2007). Cette courbe permet aussi de prévoir les transformations physico-chimiques qui peuvent avoir lieu dans le produit. Ces transformations sont à la base de la croissance microbienne, des réactions enzymatiques et non enzymatiques, du brunissement et de l'oxydation des lipides. L'ensemble de ces processus détermine le mécanisme de détérioration et qui est en liaison directe avec l'activité de l'eau dans les produits alimentaires (Erbaş *et al.*, 2005). Ces résultats suggèrent que les isothermes d'adsorption des deux modes de séchage et des différents degrés de maturité suivent bien l'allure générale de la courbe de sorption et que le modèle de GAB décrit bien les isothermes d'adsorption. Les paramètres du modèle de GAB (M_0 , C et k_b) sont regroupés dans le Tableau 13. Les résultats expérimentaux sont bien adaptés au modèle de GAB car, les coefficients de détermination sont au-dessus de 98% et P en dessous de 10%. La teneur en eau de la couche mono moléculaire M_0 varie de 2,22 à 2,83 dans le cas du séchage solaire et 2,58 à 3,06 pour le séchage électrique. La même observation pour k_b qui varie de 0,81 à 0,90 et de 0,77 à 0,85. La constante d'énergie C augmente significativement avec le degré de maturité et le mode de séchage (29,73-82,08 et 11,73-31,64) respectivement séchage solaire et électrique. On remarque que les valeurs de C sont inférieures à celles des amidons correspondants. La diminution de C avec le séchage électrique épouse la thèse selon laquelle C diminue à mesure que la température augmente (Al-Muhtaseb *et al.*, 2004 ; Peng *et al.*, 2007). Par ailleurs, les valeurs de C du séchage électrique sont dans la gamme (2-50) généralement observée pour les isothermes de type II (Labuza, 1975).

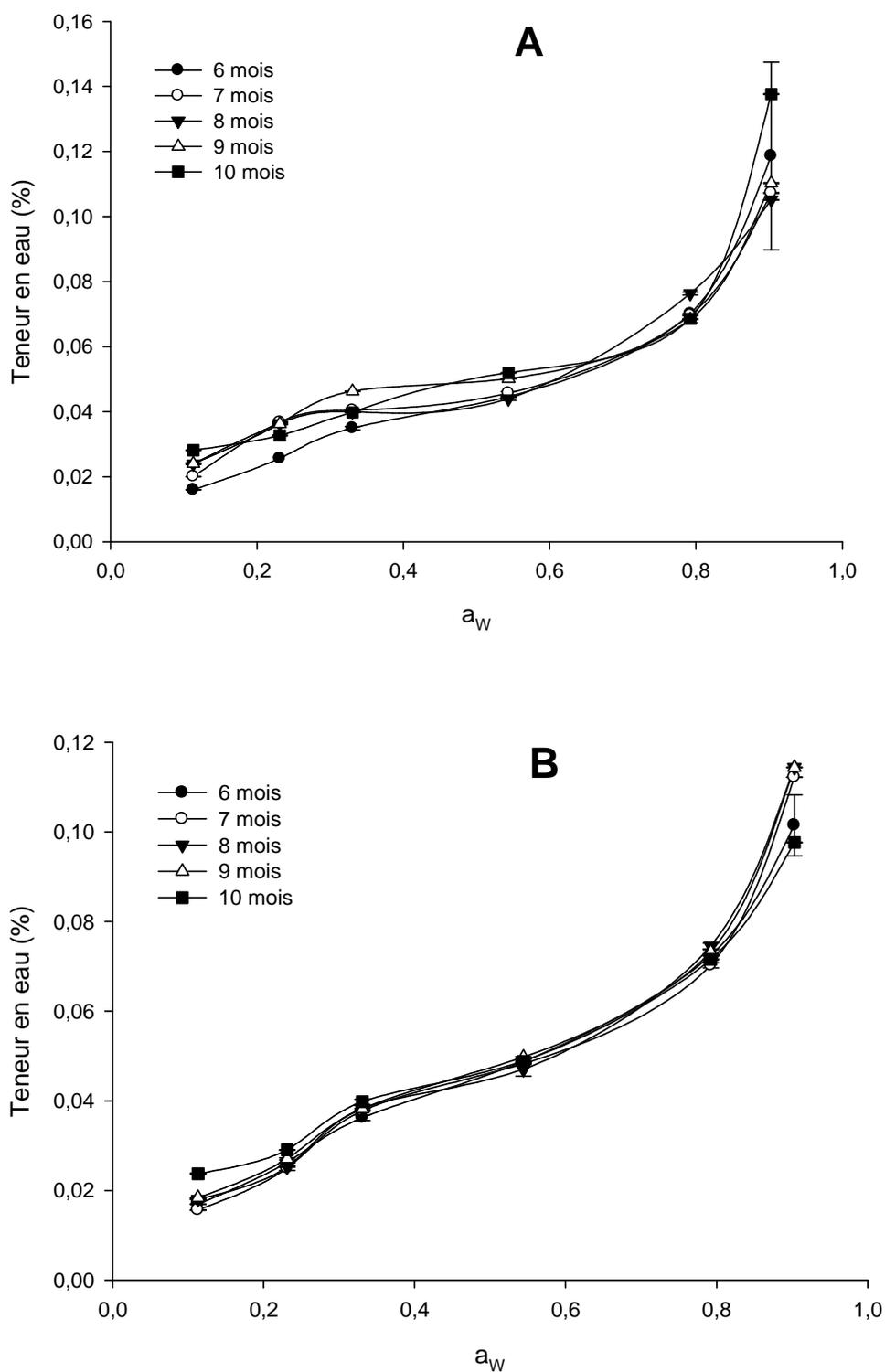


Figure 25 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur l'isotherme d'adsorption des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

Tableau 13 : Paramètres du modèle de GAB des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

| Mode de séchage | Degré de maturité (mois) | K_b | C | M_0 (g/100g) | R^2 | P |
|--------------------|--------------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| Séchage solaire | 6 | 0,89 | 29,73 | 2,22 | 0,99 | 7,76 |
| | 7 | 0,82 | 57,02 | 2,64 | 0,99 | 10,12 |
| | 8 | 0,82 | 82,08 | 2,72 | 0,99 | 6,47 |
| | 9 | 0,81 | 82,08 | 2,83 | 0,98 | 9,08 |
| | 10 | 0,90 | 82,08 | 2,37 | 0,98 | 11,59 |
| Séchage électrique | 6 | 0,77 | 11,73 | 3,06 | 0,99 | 3,61 |
| | 7 | 0,85 | 17,45 | 2,58 | 0,99 | 8,38 |
| | 8 | 0,85 | 20,57 | 2,59 | 0,99 | 6,47 |
| | 9 | 0,84 | 21,98 | 2,65 | 0,99 | 6,35 |
| | 10 | 0,77 | 31,64 | 2,91 | 0,99 | 3,44 |

K_b , C, M_0 (constantes du modèle de GAB) ; R^2 = coefficient de détermination; P = erreur relative moyenne

III. 3. 5. Répartition granulométrique

La granulométrie est une caractérisation fondamentale d'un produit pulvérulent et est en rapport direct avec les opérations de broyage et de séchage. Elle joue un rôle fondamental dans l'hydratation, première opération de la préparation des pâtes et des bouillies. Les Figures 26 et 27 montrent l'influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la répartition granulométrique des farines de taro variété Sosso.

Comme dans le cas de l'amidon, l'analyse par voie sèche (Figure 26) a révélé la présence des particules plus grandes que la taille du tamis utilisé. Ce qui

laisse penser à une possible agglomération de particules consécutive à une mauvaise dispersion de la poudre lors de l'analyse au Malvern. Et l'analyse en voie liquide (Figure 27) donne des particules plus petites que la taille du tamis utilisé mais plus grandes que celles rencontrées généralement pour le tubercule de taro (Jane *et al.*, 1992). La possibilité d'un éventuel gonflement des particules en voie humide n'est pas à exclure. Toutefois, l'étude de la répartition granulométrique en fonction du degré de maturité et du mode de séchage n'a pas permis de distinguer la taille réelle des particules. En effet, aussi bien pour la farine que pour l'amidon, la taille des granules d'amidon est extrêmement élevée. A titre d'exemple, pour les farines, les pics granulométriques se situent à 103,58 et 1192,56 μm pour l'analyse par voie sèche et à 88,91 μm par voie humide. Dans le cas de l'amidon, les pics se situent autour de 50 et 1000 μm dans le cas de l'analyse par voie sèche et entre 1-5 et 80 μm pour la voie humide.

L'examen de ces figures montre une distribution bimodale par voie sèche et monomodale par voie humide. La voie sèche fait apparaître une population de particules extrêmement hétérogène en taille et quatre à cinq fois plus étalée que celle de la voie humide. On note également que le degré de maturité de tubercules (6 à 10 mois) et le mode de séchage n'ont aucune influence sur la répartition granulométrique des farines de taro variété Sosso.

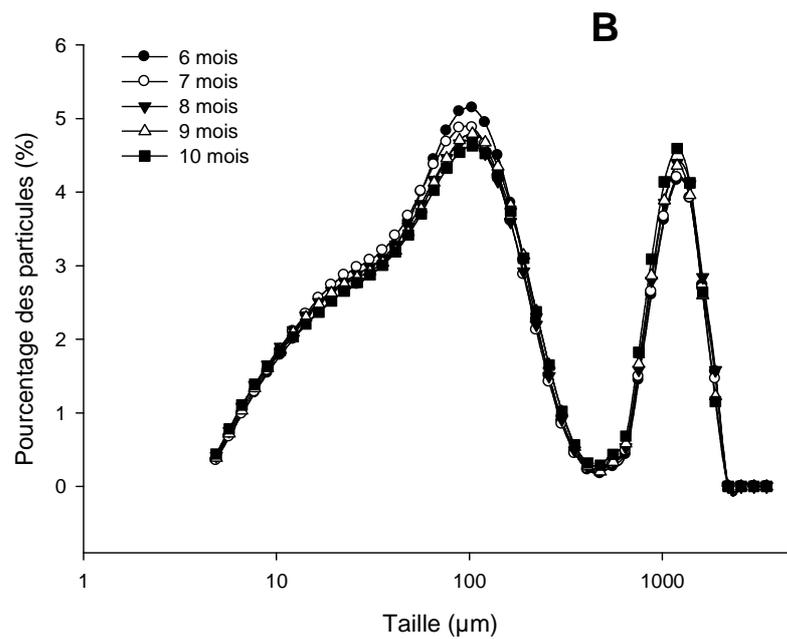
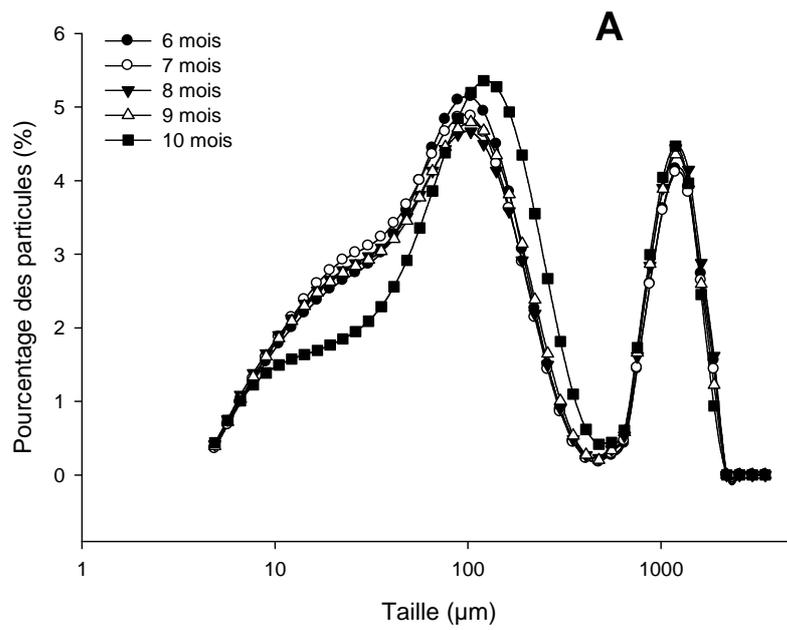


Figure 26 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la répartition granulométrique des farines de taro Sosso par voie sèche. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique.

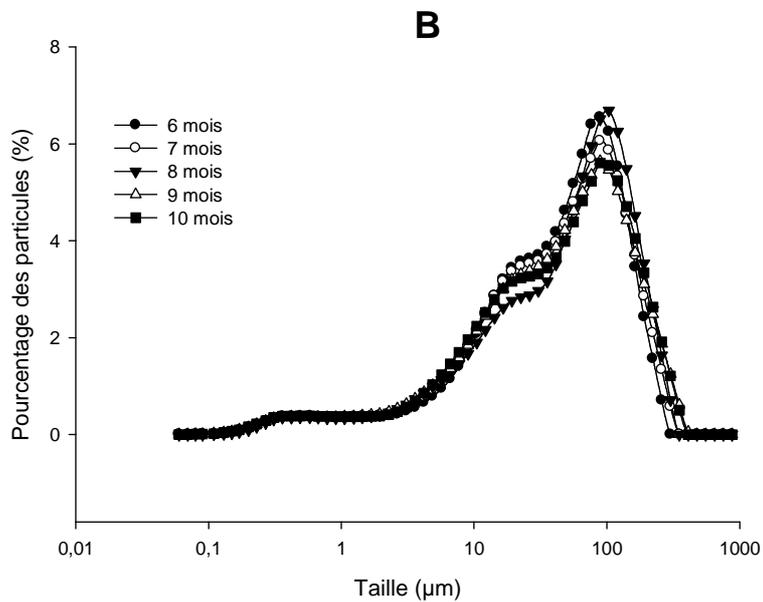
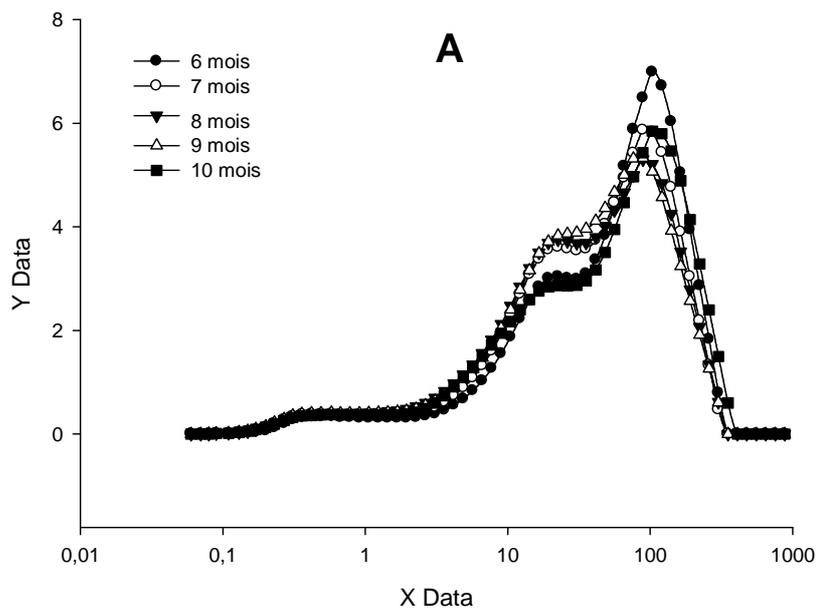


Figure 27 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la répartition granulométrique des farines de taro Sosso par voie liquide. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

III. 3. 6. La formes des particules

La sphéricité et la convexité des farines de taro variété Sosso sont présentées dans les Figures (28 et 29). La sphéricité est comprise entre 0,64 et 0,88 alors que la convexité varie de 0,8 à 1 pour tous les échantillons de farine étudiés. Les valeurs élevées de la sphéricité et de la convexité des farines de taro ont été observées à des très petites tailles des particules. La sphéricité et la convexité diminuent avec la taille des particules (Figures 28 et 29). Cependant, contrairement aux amidons, la sphéricité et la convexité des farines montrent un pic autour de 20 μm . Une tendance similaire de la forme des particules (sphéricité et convexité) a été observée pour cinq poudres alimentaires du lait et de la caséine par Gaiani *et al.* (2011). Contrairement au cas de l'amidon où on observe une démarcation nette de la maturité 10 mois, aucune différence significative n'a été observée entre les différentes farines de taro en fonction du degré de maturité et du mode de séchage. Toutefois, on remarque qu'au niveau du séchage électrique, les convexités et les sphéricités montrent une variation importante pour les tailles particulières élevées. De façon globale, la taille et la forme des particules (distribution, sphéricité et convexité) ne sont influencées ni par le degré de maturité ni par le mode de séchage.

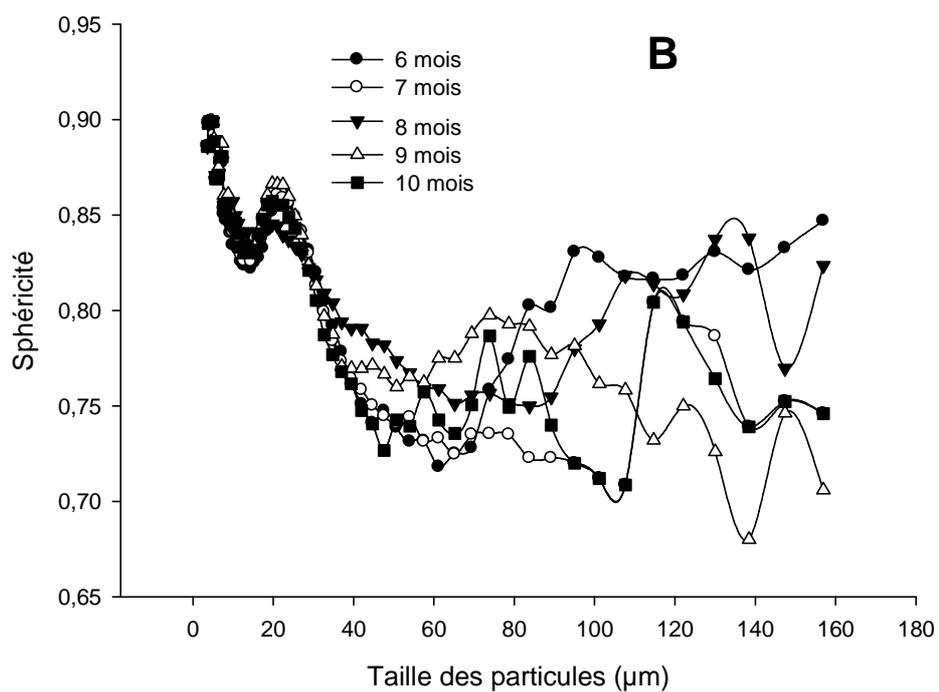
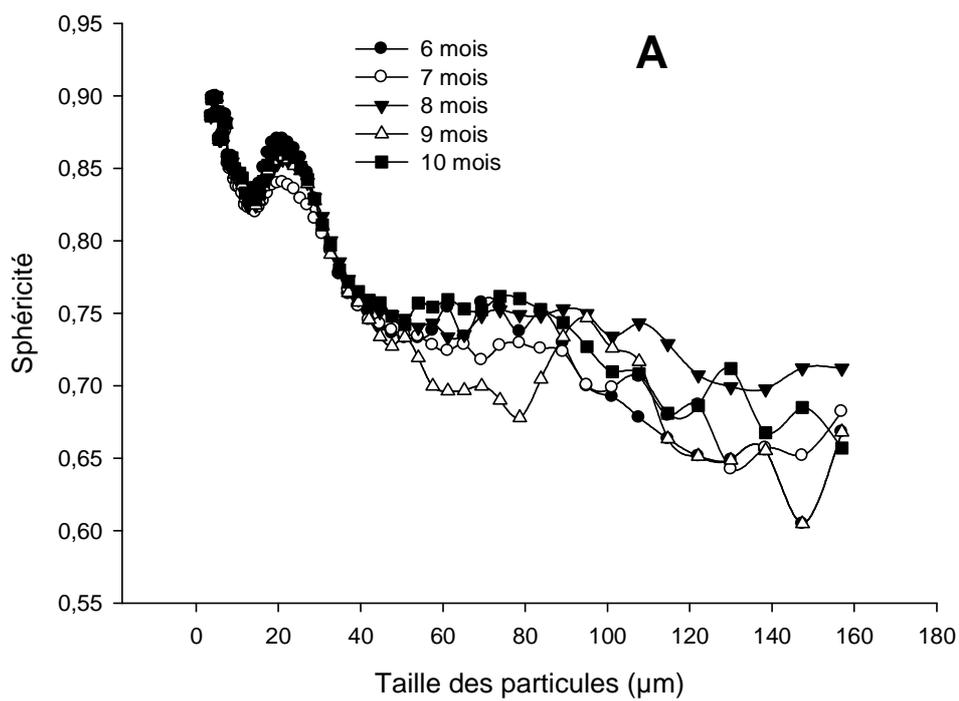


Figure 28 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la sphéricité des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

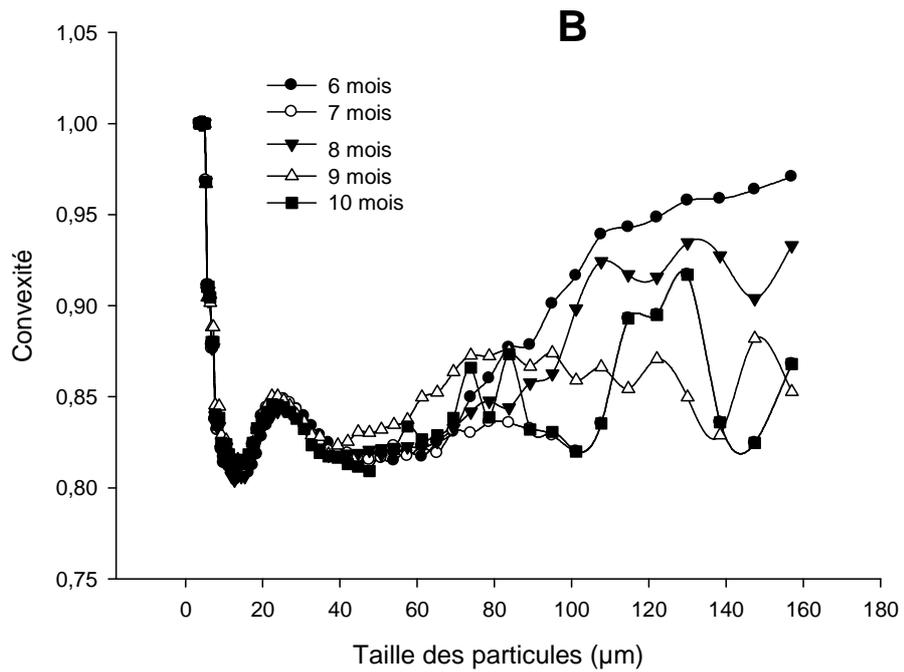
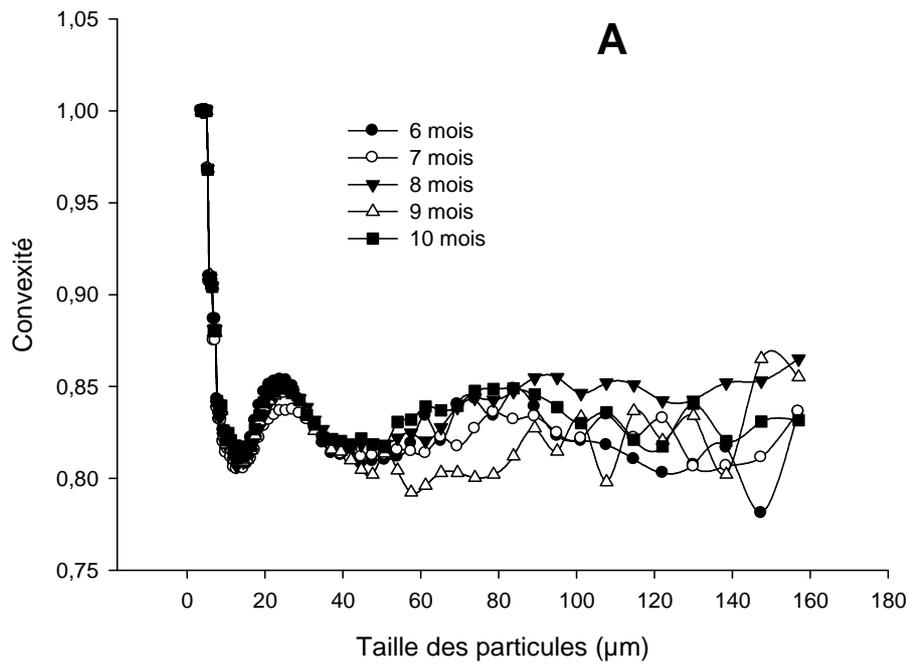


Figure 29 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la convexité des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

III. 3. 7. Propriétés thermiques

L'étude des propriétés thermiques a été réalisée par analyse thermique différentielle. Cette analyse permet d'obtenir des informations sur la variation d'énergie dégagée au cours du changement d'état de la farine de taro. Tous les échantillons des farines montrent un thermogramme avec une transition endothermique simple typique du procédé de gélatinisation (Biliaderis, 1990 ; Iturriaga *et al.*, 2004). Les températures de début (T_o), de pic (T_p), de fin (T_c) et l'enthalpie de gélatinisation (ΔH) sont présentées dans le Tableau 14. Comparativement à l'amidon, tous les paramètres de gélatinisation augmentent significativement avec le degré de maturité alors que le mode de séchage a un effet non significatif sur la gélatinisation. Les températures de début de transition (T_o) varient en fonction du degré de maturité de $69,92 \pm 0,27$ °C (6 mois) à $74,13 \pm 0,29$ °C (10 mois) pour le séchage solaire, et de $69,24 \pm 0,28$ (6 mois) à $74,02 \pm 0,42$ °C (10 mois) pour le séchage électrique. L'effet observé du degré de maturité sur les propriétés thermiques des farines pourrait être attribué aux changements dans la structure granulaire d'amidon, la teneur en amylose et en phosphore pendant la croissance du tubercule ; ceci n'a pas été cependant vérifié. Les études précédentes avaient cependant indiqué une corrélation linéaire entre l'enthalpie de gélatinisation et la taille d'amidon dans le blé (Peng *et al.*, 1999). L'augmentation de la température et de l'enthalpie de gélatinisation avec le degré de maturité suggère que la stabilité à la chaleur de la farine augmente avec la maturité. C'est une observation importante digne de la considération dans la pasteurisation/stérilisation des produits faits à partir des farines de taro Sosso. Les résultats actuels sont en accord avec ceux rapportés par Noda *et al.* (1992) pour deux variétés de patates douces. En fait ces auteurs ont indiqué que l'enthalpie libérée pendant la croissance était généralement basse pour les premiers mois de la

maturité. Par ailleurs, la température initiale de gélatinisation de la patate douce tendait à diminuer à la fin de la maturité (Noda *et al.*, 1996). En attendant les valeurs du flux d'énergie libérées sont dans l'intervalle rapporté pour d'autres variétés de farine de taro (Jane *et al.*, 1992 ; Tattiyakul *et al.*, 2007 ; Aboubakar *et al.*, 2008).

Tableau 14 : Propriétés thermiques des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

| Mode de séchage | Degré de maturité (mois) | To (°C) | Tp (°C) | Tc (°C) | ΔH (J/g) |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Séchage solaire | 6 | 69,92±0,27 ^a | 79,33±0,36 ^a | 87,59±0,48 ^a | 10,23±0,10 ^a |
| | 7 | 70,56±0,68 ^a | 80,2±0,47 ^b | 88,60±0,47 ^b | 10,82±0,15 ^b |
| | 8 | 71,64±0,60 ^b | 81,20±0,26 ^c | 89,64±0,60 ^c | 11,33±0,22 ^c |
| | 9 | 73,00±0,22 ^c | 81,97±0,14 ^c | 90,42±0,41 ^c | 12,47±0,15 ^d |
| | 10 | 74,13±0,29 ^d | 83,01±0,83 ^d | 91,73±0,63 ^d | 13,14±0,24 ^e |
| Séchage électrique | 6 | 69,24±0,28 ^a | 79,18±0,35 ^a | 87,33±0,30 ^a | 10,17±0,09 ^a |
| | 7 | 70,39±0,50 ^b | 80,18±0,25 ^b | 88,42±0,79 ^b | 10,71±0,12 ^b |
| | 8 | 71,77±0,58 ^c | 81,26±0,39 ^c | 89,88±0,67 ^c | 11,38±0,14 ^c |
| | 9 | 72,97±0,14 ^d | 82,03±0,22 ^d | 90,40±0,43 ^c | 12,64±0,10 ^d |
| | 10 | 74,02±0,42 ^e | 83,15±0,38 ^e | 91,51±0,62 ^d | 13,17±0,25 ^e |

To = Température de début de gélatinisation ; Tp = Température de pic de gélatinisation; Tc = Température de fin de gélatinisation ; ΔH = Enthalpie de gélatinisation

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$.

III. 3. 8. Propriétés d'empattage

Les propriétés élastiques et visqueuses de la farine de taro (variété Sosso) sont présentées dans les Figures 30 et 31 respectivement. Dans les courbes de

variation de la viscosité en fonction de la température, l'énergie élastique emmagasinée et restituée au cours d'une période est proportionnelle à G' , alors que l'énergie dissipée par frottement visqueux au cours d'un même cycle est proportionnelle à G'' ; si bien que G' et G'' décrivent respectivement les propriétés élastiques et visqueuses de l'échantillon. Ces modules sont d'ailleurs fréquemment appelés module élastique (pour G') et module visqueux (pour G''). Les modules G' et G'' des gels des farines de taro Sosso de cinq degrés de maturités et de deux modes de séchage augmentent jusqu'à un maximum puis décroissent pendant le chauffage. La température à laquelle G' atteint le maximum (TG') montre une faible variation entre les gels issus des farines de taro Sosso de différentes maturités et de deux modes de séchage. Le minimum de TG' est observé pour les farines à 6 mois de maturité ($76,64^{\circ}\text{C}$) alors que le maximum ($77,29^{\circ}\text{C}$) est observé pour les maturités 10 mois. Noda *et al.* (2004) ont rapporté des températures d'empattage variant de $67,1$ à $71,5^{\circ}\text{C}$ pour l'amidon de pomme de terre récolté à deux maturités différentes. Les pics les plus élevés de G' s'observent à 7071 et 7050 Pa respectivement pour 6 mois séchage solaire et 7 mois séchage électrique. Alors que ceux de G'' s'observent à 803 et 782 Pa respectivement pour 10 mois séchage solaire et 7 mois séchage électrique. Le ratio G''/G' est compris entre 0° et 45° ce qui signifie que les différents gels des farines de taro Sosso ont un comportement plus élastique que visqueux d'autant plus que le ratio joue le rôle d'un indicateur très précieux du partage entre les propriétés élastiques et visqueuses (Coussot et Grossiord, 2001).

L'ensemble des résultats relatifs au comportement rhéologique des gels des farines de taro Sosso s'interprètent qualitativement sur la base de la solubilité et du gonflement de l'amidon. Au début du chauffage, les molécules d'amylose ont été dissoutes ainsi l'augmentation de G' et G'' était relativement faible (Hsu *et al.*, 2000).

A mesure que la température augmente, G' et G'' augmentent et atteignent un maximum, qui peut être attribué au réseau des granules gonflés d'amidon (Hsu *et al.*, 2000). A température élevée G' et G'' diminuent, indiquant que le chauffage prolongé a entraîné la destruction de la structure du gel (Tsai *et al.*, 1997). Dans la plupart des cas, les températures de début et de pic des modules élastiques et visqueux sont légèrement inférieures à celles des propriétés thermiques mesurées par la DSC. Comme dans le cas des propriétés thermiques, les températures de début et de pic des modules sont faibles au premier stade comparé au dernier degré de maturité. Le degré de maturité 10 mois a présenté les pics d'élasticité et de viscosité les plus élevés dans les deux modes de séchage. L'analyse statistique a indiqué que le pic d'élasticité et de viscosité étaient sensiblement plus élevés au dernier qu'au premier stade de maturité et que la température d'empattage est significativement plus basse à la maturité 10 mois. Madsen et Christensen (1996), Liu *et al* (2003) et Noda *et al.* (2004) ont indiqué en concordance avec nos résultats, l'augmentation du pic d'élasticité et de viscosité, et la diminution de la température d'empattage pendant la croissance.

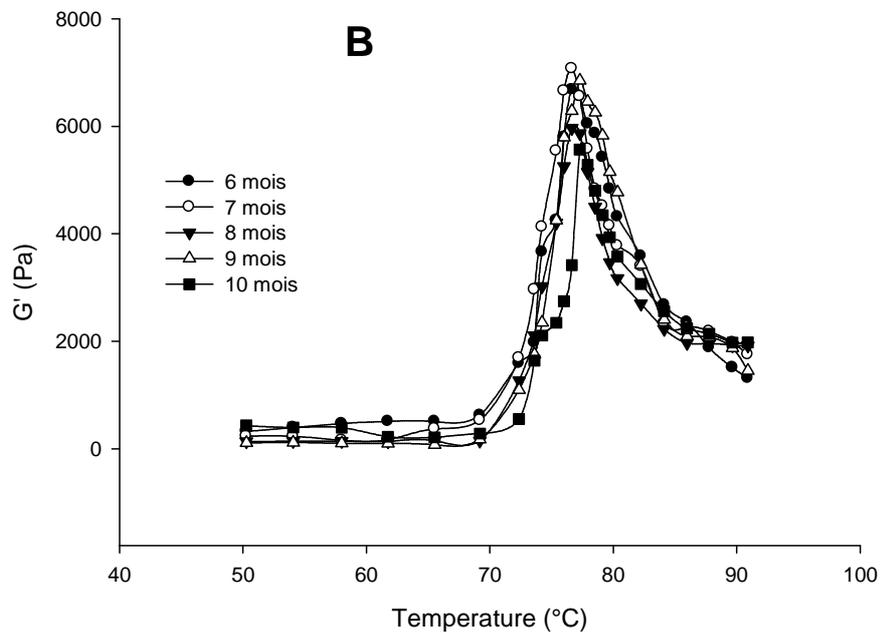
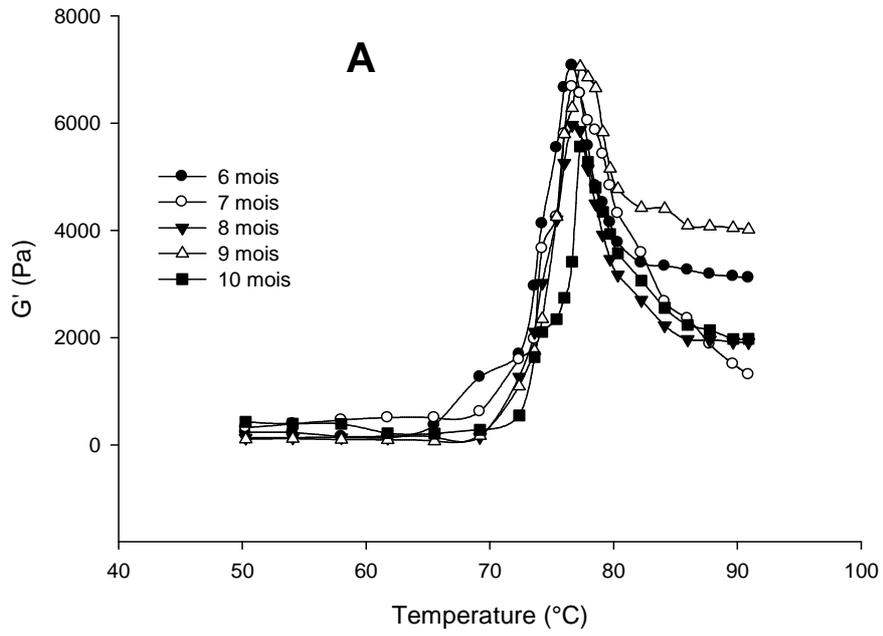


Figure 30: Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur le module élastique (G') des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

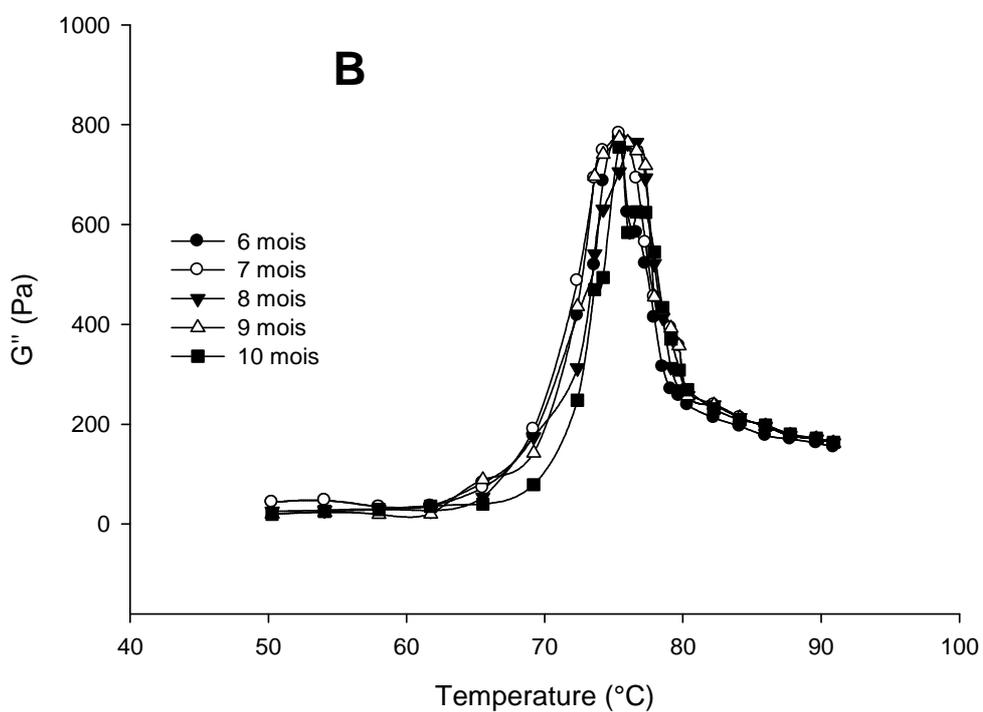
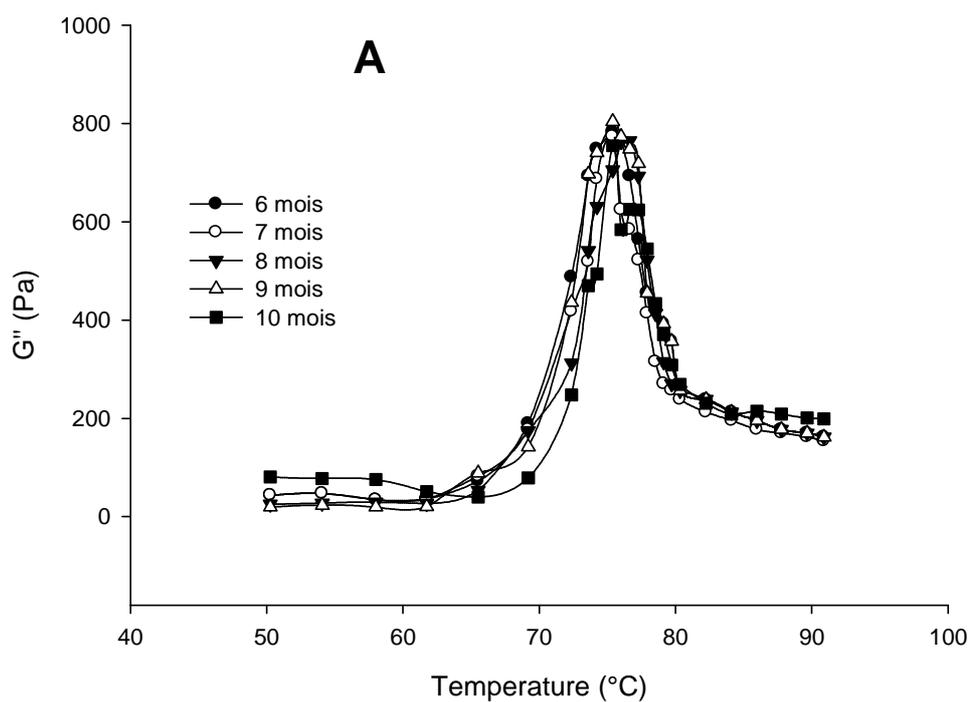


Figure 31: Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur le module visqueux (G'') des farines de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

III. 3. 9. Couleur des farines

L'effet du degré de maturité et du mode de séchage sur la couleur des farines de taro Sosso a été évalué par la mesure des paramètres de la couleur (L^* , a^* , b^* et IB) qui sont représentés dans le Tableau 15. Les valeurs de L^* représentent l'éclat de la farine. Plus la valeur de L^* est élevée, plus la farine est claire. Bien que la farine brune des tubercules soit populaire dans certains pays africains (Farombi *et al.*, 2000), la farine de couleur brune foncée n'est pas bien acceptable au Tchad. L'acceptabilité d'un aliment a une connotation fortement culturelle. Afin de déterminer l'origine du brunissement pendant la cuisson des farines de taro Sosso, les tranches de tubercules de taro ont été séchées à l'étuve et au soleil. Les paramètres de la couleur des farines de taro Sosso varient significativement en fonction du degré de maturité. Cependant, le mode de séchage entraîne également une variation non significative des paramètres étudiés.

En particulier la rougeur de la farine de taro diminue sensiblement ($p < 0,001$) avec le degré de maturité du tubercule ($r = -0,75$; $p < 0,001$), et particulièrement plus élevée pour les farines séchées au soleil. Au contraire, la blancheur de la farine est significativement ($p < 0,001$) élevée pour le séchage électrique et augmente sensiblement ($p < 0,001$) avec le degré de maturité ($r = 0,79$; $p < 0,001$). En outre la couleur jaune n'est pas significativement influencée par la méthode de séchage tandis que la variation inconsistante a été observée avec le degré de maturité ($p < 0,004$). L'observation particulière qui a été faite dans cette étude est la corrélation négative observée entre les coordonnées de la couleur L^* et a^* ($r = -0,86$; $p < 0,001$) ou L^* et b^* ($r = -0,54$; $p = 0,002$). Ceci signifie simplement que l'augmentation de la rougeur et de la couleur jaune de la farine modifie sa blancheur. Le développement de la couleur est une réaction importante qui se produit pendant le séchage (Sagar &

Suresh Kumar, 2010). Les résultats montrent tel que démontré dans les travaux précédents (Aboubakar *et al.*, 2008) que la farine de taro issue du séchage électrique est plus claire, moins brune et moins jaune. Les faibles valeurs de a^* et b^* des farines séchées électriquement ne reflètent pas le brunissement ci-dessus mentionné, mais plutôt l'observation visuelle de la couleur. Certaines études ont présumé que la variation de la valeur de b^* parmi les espèces serait liée à leur teneur en protéines à cause de leur rôle dans le brunissement non enzymatique (Jamin et Flores, 1998). Dans cette étude, des variations inconsistantes de b^* ont été observées avec le degré de maturité. Toutefois, les valeurs de b^* étaient systématiquement plus élevées pour le séchage solaire que pour le séchage électrique. Ces résultats suggèrent donc un brunissement important des farines issues du séchage solaire. Le brunissement non enzymatique serait à cet effet plus élevé dans la farine issue du séchage solaire. Malheureusement, l'implication des protéines, si elle était vérifiée, aurait entraîné une influence plus importante du degré de maturité que du mode de séchage. On peut toutefois penser que les implications seraient multiples et associeraient aussi bien les minéraux, que les protéines et de phénols spécifiques.

L'indice de blancheur (IB) représente la blancheur globale des produits alimentaires qui peuvent indiquer l'ampleur de la décoloration pendant le processus de séchage. Pour le taro Sosso, il est plus élevé pour les farines issues du séchage électrique. Selon Singh *et al.* (2003), la différence entre les paramètres de la couleur des échantillons peut être attribuée à l'origine biologique, au type de sol, à la température pendant la période de culture et à l'humidité du sol.

Après analyse des différents paramètres de la couleur, nous constatons d'une manière générale que nos farines brunissent même si ce brunissement diminue en

fonction du degré de maturité et du mode de séchage. Ce brunissement constitue un handicap dans l'exploitation de la farine de taro variété Sosso. La nécessité des traitements en vue d'améliorer la couleur de cette farine ou des études de déterminer la cause de ce brunissement se fait ressentir.

Tableau 15 : Influence du degré de maturité et du mode séchage sur les paramètres de la couleur des farines de taro Sosso

| Mode de séchage | Degré de maturité (mois) | L* | a* | b* | IB |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| Séchage solaire | 6 | 74,79±2,95 ^a | 2,34±0,21 ^a | 7,33±0,64 | 73,60 |
| | 7 | 78,92±0,94 ^b | 2,07±0,20 ^{ab} | 6,41±0,69 | 77,86 |
| | 8 | 80,94±0,67 ^b | 1,91±0,03 ^{bc} | 6,51±0,36 | 79,76 |
| | 9 | 81,50±0,25 ^b | 1,80±0,03 ^c | 6,64±0,41 | 80,26 |
| | 10 | 81,7±0,32 ^b | 1,63±0,04 ^d | 6,86±0,33 | 80,38 |
| Séchage électrique | 6 | 78,82±0,43 ^a | 1,88±0,06 ^a | 6,93±0,31 ^a | 77,63 |
| | 7 | 79,56±0,13 ^a | 1,81±0,09 ^b | 6,59±0,12 ^{ab} | 78,44 |
| | 8 | 80,42±1,03 ^{ab} | 1,66±0,04 ^b | 6,42±0,24 ^{ab} | 79,32 |
| | 9 | 82,19±1,88 ^{bc} | 1,62±0,04 ^c | 6,57±0,11 ^{ab} | 80,94 |
| | 10 | 82,93±0,67 ^c | 1,46±0,04 ^c | 6,72±0,02 ^b | 81,59 |

L* = clarté ou luminance ; a* = composante chromatique rouge-vert ; b* = composante chromatique jaune-bleu ; IB = Indice de blancheur

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05.

III. 3. 10. Les propriétés d'écoulement des farines

Le Tableau 16 montre les variations des propriétés d'écoulement des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage. En général, l'angle de repos et l'angle de chute augmentent significativement avec le degré de

maturité alors que les autres variables présentent de variations inconsistantes. Toutefois, l'angle de repos, l'angle de chute, les densités aérées et compactées sont significativement plus élevés pour le séchage électrique. Ce caractère compact avait déjà été suggéré plus loin pour expliquer le mécanisme de séchage électrique négatif à la formation de gels dont seront sujettes les farines. L'angle de repos indique la cohésion entre les particules de la farine. Selon Karaj & Muller (2010), plus la cohésion est élevée, plus grand est l'angle de repos. La variation observée de l'angle de repos suggère une corrélation linéaire entre l'augmentation du degré de maturité des tubercules et la cohésion dans la farine de taro Sosso (Himeda *et al.*, 2012b). Selon Cain (2002) un angle de repos au-dessus de 40° indique que la poudre est cohésive alors que pour un angle de repos en dessous de 40°, la poudre est dite non cohésive. L'augmentation de la cohésion entre les particules a été longtemps associée à une plus petite dimension particulaire (Fitzpatrick et Ahrne 2005). La densité des farines dépend du procédé utilisé, compactée ou aérée; ceci reflète la manière exigée pour charger l'emballage (Akubor, 2005). La densité compactée varie de 0,686 à 0,731 g/cm³ tandis que la densité aérée varie de 0,426 à 0,458. La densité compactée est dans la gamme (0,689-0,998 g/ cm³) rapportée par Kaur *et al.* (2011) pour le taro et la pomme de terre. Les faibles valeurs de la densité associées à la rapidité du séchage électrique indiquent le durcissement (densification) qui se produit habituellement en raison de la formation de croûte (Sagar & Suresh Kumar 2010).

Par ailleurs, l'écoulement d'une poudre alimentaire est une propriété essentielle pour sa manipulation en vrac. L'emboîtement, le mottage et la cristallisation sont des phénomènes conduisant généralement à un mauvais écoulement des poudres. A ce titre, l'indice d'écoulement (Indice de Carr) de nos

différentes farines varie de 36,84 à 38,98 suggérant que les différentes farines ne possèdent pas une bonne aptitude à l'écoulement car l'indice d'écoulement ou indice de Carr est supérieur à 18. Dans la même logique l'indice de Hausner qui représente l'état de friction interparticulaire a été calculé et les résultats montrent que les farines n'ont pas une bonne coulabilité et ceci vient confirmer les résultats de l'indice de Carr. Les farines de taro Sosso ont un indice de Hausner variant de 1,58 à 1,65 alors que dans la norme celui-ci doit être proche de 1 pour une bonne coulabilité des farines. Dans le but d'améliorer l'écoulement des farines, des agents d'écoulement sont souvent apportés en faible quantité aux poudres pour améliorer leur aptitude à l'écoulement. Cependant ces agents d'écoulement ne sont pas toujours efficaces (Graindorge, 1992).

Il est bien connu que l'écoulement des farines est une fonction de leur composition. Mais, il est important de noter que dans le cadre de ce travail, mieux que la composition, le degré de maturité et le mode de séchage ont une influence plus importante sur la rhéologie des farines. L'eau est le constituant majeur des produits alimentaires. La stabilité des produits alimentaires dépend des interactions de l'eau avec les autres molécules. Dans le cas des produits déshydratés et notamment des farines de taro, leurs propriétés d'usage (propriétés d'écoulement) sont étroitement dépendantes des modalités de liaison de l'eau avec les autres constituants (glucose notamment). Autrement dit, les propriétés d'écoulement des farines peuvent être influencées par certains constituants et propriétés des farines en dehors de la granulométrie qui est le principal facteur influençant l'écoulement des poudres (Scher *et al.*, 1998).

Tableau 16 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les propriétés d'écoulement des farines de taro Sosso

| Mode de séchage | Degré de maturité (mois) | Angle de repos (°) | Angle de chute (°) | Densité compactée (g/cm ³) | Densité aérée (g/cm ³) | Compressibilité Ic (%) | Dispersibilité | Ratio de Hausner (Rh) |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Séchage solaire | F6SS | 42,8±0,7 ^a | 29,83±0,45 ^a | 0,686±0,002 ^a | 0,4336±0,003 ^b | 37,31±0,70 ^a | 29,2±0,52 ^a | 1,58 ^a |
| | F7SS | 43,63±1,05 ^{ab} | 30,26±0,56 ^{ab} | 0,699±0,001 ^b | 0,435±0,001 ^{bc} | 37,84±0,36 ^{ab} | 29,93±0,47 ^a | 1,60 ^b |
| | F8SS | 44,66±1,06 ^{bc} | 30,86±0,75 ^b | 0,703±0,003 ^b | 0,4336±0,002 ^b | 38,78±0,79 ^b | 30,96±0,60 ^b | 1,62 ^b |
| | F9SS | 46,13±0,45 ^c | 32,03±0,32 ^c | 0,725±0,005 ^c | 0,4386±0,002 ^c | 38,98±0,73 ^b | 29,9±0,2 ^a | 1,65 ^c |
| | F10SS | 48,46±1,20 ^d | 33,1±0,26 ^d | 0,689±0,002 ^a | 0,426±0,002 ^a | 37,77±0,89 ^{ab} | 30,9±0,45 ^b | 1,61 ^b |
| Séchage électrique | F6SE | 43,4±0,45 ^a | 30,1±0,60 ^a | 0,717±0,001 ^a | 0,4526±0,001 ^b | 36,84±0,30 ^a | 30,3±0,45 | 1,58 ^a |
| | F7SE | 45,26±1,05 ^b | 30,7±0,62 ^a | 0,721±0,00 ^{ab} | 0,4563±0,002 ^c | 37,26±0,72 ^{ab} | 30,56±0,80 | 1,58 ^a |
| | F8SE | 46,03±0,37 ^{bc} | 31,4±0,72 ^b | 0,725±0,002 ^b | 0,4513±0,001 ^b | 37,53±0,13 ^{ab} | 29,76±0,90 | 1,60 ^{bc} |
| | F9SE | 46,93±0,25 ^c | 32,86±0,25 ^c | 0,731±0,003 ^c | 0,4576±0,002 ^c | 37,63±0,47 ^{ab} | 30,4±0,43 | 1,59 ^b |
| | F10SE | 48,7±0,45 ^d | 33,46±0,20 ^c | 0,719±0,002 ^a | 0,4463±0,002 ^a | 37,99±0,11 ^b | 30,43±0,65 | 1,61 ^c |

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05

III. 3. 11. Analyses en composantes principales

Dans le but d'avoir une meilleure compréhension des relations existant entre les propriétés d'écoulement, les propriétés thermiques et fonctionnelles des farines de taro Sosso étudiées dans ce chapitre, les résultats expérimentaux ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales. Cette analyse permet de représenter les variables originelles de la farine dans un espace de dimension inférieure appelé composantes principales, tout en limitant au maximum la perte d'information. La représentation des données dans cet espace de faible dimension en facilite considérablement l'analyse. La Figure 32 présente la disposition des variables dans le système de composantes principales CP1xCP2. Cette représentation appelée cercle de corrélation montre que les axes CP1 et CP2 expliquent à eux seuls 86,51% des variations des farines. Ces deux axes virtuels CP1 et CP2 sont des corrélations linéaires de toutes les variables sauf la dispersibilité et à un moindre degré la compressibilité. En effet comme on peut l'observer sur le cercle, l'axe CP1 est représenté par l'angle de repos, l'angle de chute, la capacité d'absorption d'eau (CAE), la plus petite concentration gélifiante (PPCG), le gonflement, la température de début (T_o), de pic (T_p), de fin (T_c) de gélatinisation et l'enthalpie de gélatinisation (ΔH) ; alors que l'axe CP2 est représenté par la densité compactée, densité aérée et la PPCG. Ce cercle met aussi en exergue les corrélations entre les différentes variables caractéristiques des farines. A cet effet on peut noter en relation avec le tableau des corrélations (Tableau 17) que l'angle de repos, l'angle de chute, la CAE, le gonflement, la compressibilité, la température (T_o , T_p , T_c) et l'enthalpie de gélatinisation (ΔH) sont inter-corrélés positivement, mais tous corrélés négativement à la plus petite concentration gélifiante (PPCG). D'autre part la densité compactée, la densité aérée et la PPCG sont inter-corrélés positivement.

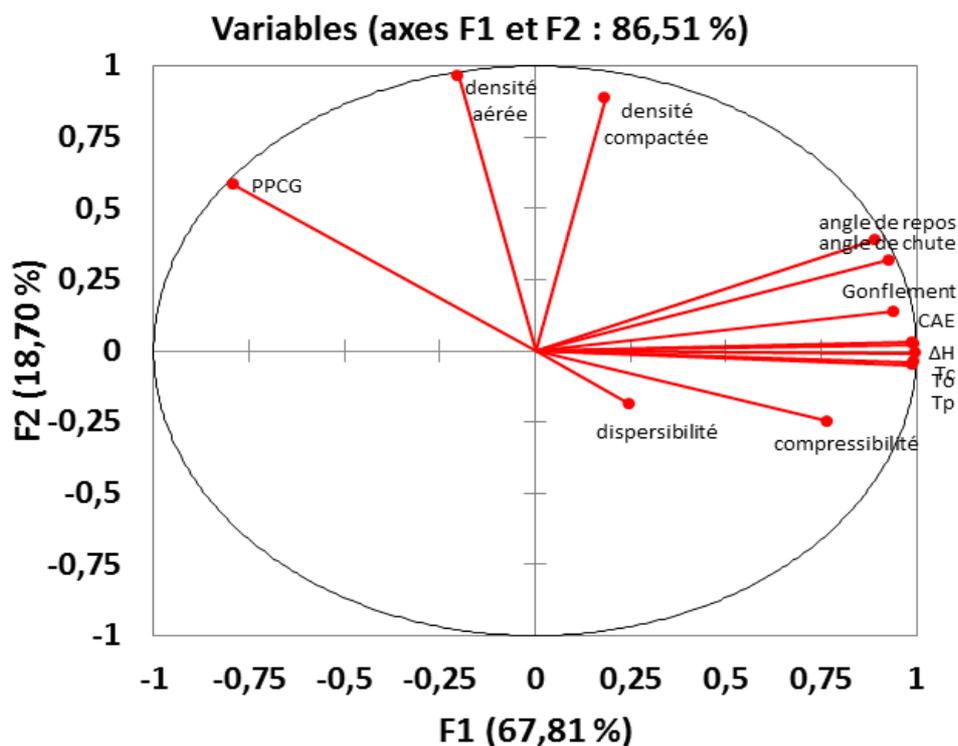


Figure 32 : Cercle de corrélation CP1xCP2 des propriétés physiques, thermiques et fonctionnelles de la farine de taro Sosso de différents degrés de maturité et modes de séchage.

On peut à cet effet déduire d'une similitude de fait entre l'angle de repos et l'angle de chute. Par conséquent, l'utilisation de ces deux variables pour caractériser les farines de taro Sosso semble redondante. On peut aussi relever la similarité entre la capacité d'absorption d'eau, la température de début (T_o), de pic (T_p), de fin (T_c) et l'enthalpie de gélatinisation (ΔH). Ce rapprochement peut s'expliquer par le fait que l'amidon qui absorbe plus d'eau est moins cristallin, conséquence d'une présence faible de liaisons hydrogènes entre les résidus de glucose adjacents (Singh *et al.*, 2003). D'autre part les études de Moorthy *et al.* (2002) ont mis en évidence l'augmentation de l'enthalpie de gélatinisation avec l'augmentation de la cristallinité de l'amylopectine. Les températures de gélatinisation élevées des amidons résulteraient d'une cristallinité élevée qui est à l'origine de la stabilité structurale et la

résistance des granules à la gélatinisation (Barichello *et al.*, 1990). Il est bien démontré que l'absorption d'eau précède la gélatinisation de l'amidon, ce qui signifie qu'une limite à l'absorption d'eau a des conséquences directes sur la gélatinisation. En effet, la PPCG qui exprime l'aptitude de la farine à former un gel est corrélée négativement à la capacité d'absorption d'eau en conformité avec la littérature (Pomeranz *et al.*, 1977). Il convient de souligner que plus la PPCG est élevée, moins la farine est apte à former le gel ; et à ce titre la corrélation observée avec la CAE démontre de la grande aptitude des farines (de grande capacité à absorber l'eau) à former le gel ($r = 0,75$). En d'autres termes, l'aptitude à former le gel augmente de façon linéaire et significative avec l'augmentation de la capacité d'absorption d'eau. Une analyse plus approfondie du cercle permet de relever quatre groupes de variables importantes pour discriminer les farines de taro : le premier groupe est celui des variables liées à la première composante principale CP1 et qui permettent de discriminer à plus de 67% la variation entre les farines de taro. Le deuxième groupe est composé essentiellement de la densité aérée, de la densité compactée et de la PPCG qui permettent d'exprimer plus de 18% des variations entre les farines et qui sont corrélées à la Composante principale CP2 ; le troisième groupe composé essentiellement de la dispersibilité renvoie à la troisième composante principale qui permet d'expliquer 7,62% des variations des farines. En fin le quatrième groupe composé de la compressibilité explique 4,46% des variances dans les farines. Ces axes virtuels sont orthogonaux et ne présentent aucune corrélation; par extension les variables associées ne présentent pas globalement des corrélations significatives bien que certaines variables peuvent contribuer à la fois pour plusieurs axes, et dans de nombreux cas de façon significative (Tableau 18).

Tableau 17 : Matrice de corrélation entre toutes les variables

| Variables | To | Tc | Tp | ΔH | Gon | PPCG | CAE | Ar | Ac | Da | Dc | Com | Dis |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|
| To | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Tc | 0,993 | 1 | | | | | | | | | | | |
| Tp | 0,991 | 0,996 | 1 | | | | | | | | | | |
| ΔH | 0,990 | 0,985 | 0,974 | 1 | | | | | | | | | |
| Gon | 0,917 | 0,942 | 0,919 | 0,935 | 1 | | | | | | | | |
| PPCG | -0,815 | -0,791 | -0,812 | -0,763 | -0,640 | 1 | | | | | | | |
| CAE | 0,988 | 0,995 | 0,987 | 0,989 | 0,946 | -0,758 | 1 | | | | | | |
| Ar | 0,871 | 0,882 | 0,862 | 0,890 | 0,925 | -0,472 | 0,895 | 1 | | | | | |
| Ac | 0,913 | 0,913 | 0,892 | 0,946 | 0,933 | -0,543 | 0,929 | 0,976 | 1 | | | | |
| Da | -0,237 | -0,202 | -0,242 | -0,172 | -0,040 | 0,723 | -0,178 | 0,188 | 0,108 | 1 | | | |
| Dc | 0,134 | 0,164 | 0,131 | 0,190 | 0,205 | 0,341 | 0,188 | 0,437 | 0,399 | 0,810 | 1 | | |
| Com | 0,746 | 0,735 | 0,745 | 0,729 | 0,551 | -0,770 | 0,741 | 0,525 | 0,589 | -0,431 | 0,144 | 1 | |
| Dis | 0,195 | 0,262 | 0,240 | 0,192 | 0,278 | -0,270 | 0,248 | 0,048 | 0,053 | -0,104 | -0,003 | 0,274 | 1 |

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,05$ (test bilatéral); (n = 3) ; To : Température de début ; Tc : température de fin ; Tp : Température de pic ; ΔH : Enthalpie de gélatinisation ; Gon : gonflement ; PPCG : Plus petite concentration gélifiante ; CAE : Capacité d'absorption d'eau ; Ar : Angle de repos ; Ac : Angle de chute ; Da : Densité aérée ; Dc : Densité compactée ; Com : Compressibilité ; Dis : Dispersibilité.

Tableau 18 : Corrélation entre les variables et les quatre axes principaux

| | F1 | F2 | F3 | F4 |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| To | 11,173 | 0,062 | 0,391 | 0,025 |
| Tc | 11,243 | 0,004 | 0,010 | 0,338 |
| Tp | 11,093 | 0,099 | 0,022 | 0,097 |
| ΔH | 11,128 | 0,038 | 0,292 | 0,087 |
| Gonflement | 10,056 | 0,787 | 0,106 | 12,142 |
| PPCG | 7,084 | 14,007 | 0,053 | 0,730 |
| CAE | 11,231 | 0,020 | 0,000 | 0,176 |
| Angle de repos | 9,030 | 6,224 | 1,609 | 1,872 |
| Angle de chute | 9,771 | 4,167 | 1,905 | 0,576 |
| Densité aérée | 0,459 | 38,348 | 1,394 | 1,255 |
| Densité compactée | 0,380 | 32,304 | 3,600 | 23,335 |
| Compressibilité | 6,663 | 2,526 | 1,832 | 55,053 |
| Dispersibilité | 0,689 | 1,414 | 88,786 | 4,315 |

La représentation des farines de taro Sosso dans le système d'axe CP1 x CP2 est indiquée sur la Figure 33. Cette figure permet de voir une distribution des farines le long de l'axe CP1 qui témoigne d'une plus grande variation des farines suivant les variables de cet axe. C'est dire que les variables de cet axe permettent de différencier à plus de 67% les farines de taro. La distribution des farines le long de cet axe fait apparaître à droite les farines de maturité élevée (10 mois), et progressivement vers la gauche les degrés de maturité faibles (6 mois) quel que soit le mode de séchage. Ainsi donc CP1, et par extension ses variables associées,

apparaît comme l'axe qui permet de distinguer les farines de degrés de maturité différents. Cette observation vient confirmer les observations faites de l'analyse des variances qui ont montré que ces variables sont influencées essentiellement par le degré de maturité et non par le mode de séchage. A ce titre, pour caractériser les farines en fonction du degré de maturité, il est conseillé de s'intéresser aux variables de la composante principale CP1 ;

- Il apparaît aussi clairement de la figure 33 que les farines de mode de séchage électrique (codées SE) se présentent au-dessus de l'axe CP1 alors que les farines de mode de séchage solaire (codées SS) se disposent en dessous de l'axe CP1. Cette organisation des farines issues des deux modes de séchage montre que l'axe CP2 est celui qui permet de distinguer les farines selon le type de séchage. A ce titre les farines obtenues par séchage électrique présentent une densité (aérée et compactée) plus élevée que celle obtenue par séchage solaire. Cette observation avait déjà été faite à la suite de l'analyse des variances qui a mis en évidence la densification de la farine par séchage électrique. De cet axe, on peut retenir que l'analyse de la densité aérée, densité compactée et de la plus petite concentration gélifiante (PPCG) permettent de différencier les farines obtenues par les deux modes de séchage, les autres variables n'apportant pas de discrimination importante.

- globalement, la distribution des farines dans le système d'axe CP1xCP2 permet d'expliquer les 86,51% des variances entre les farines, particulièrement ils permettent de schématiser les effets de la maturité et du mode de séchage. Deux variables ne semblent pas s'associer directement à un facteur, ce sont la dispersibilité qui contribue beaucoup plus dans l'axe CP3 et la compressibilité qui est mieux représenté sur l'axe CP4.

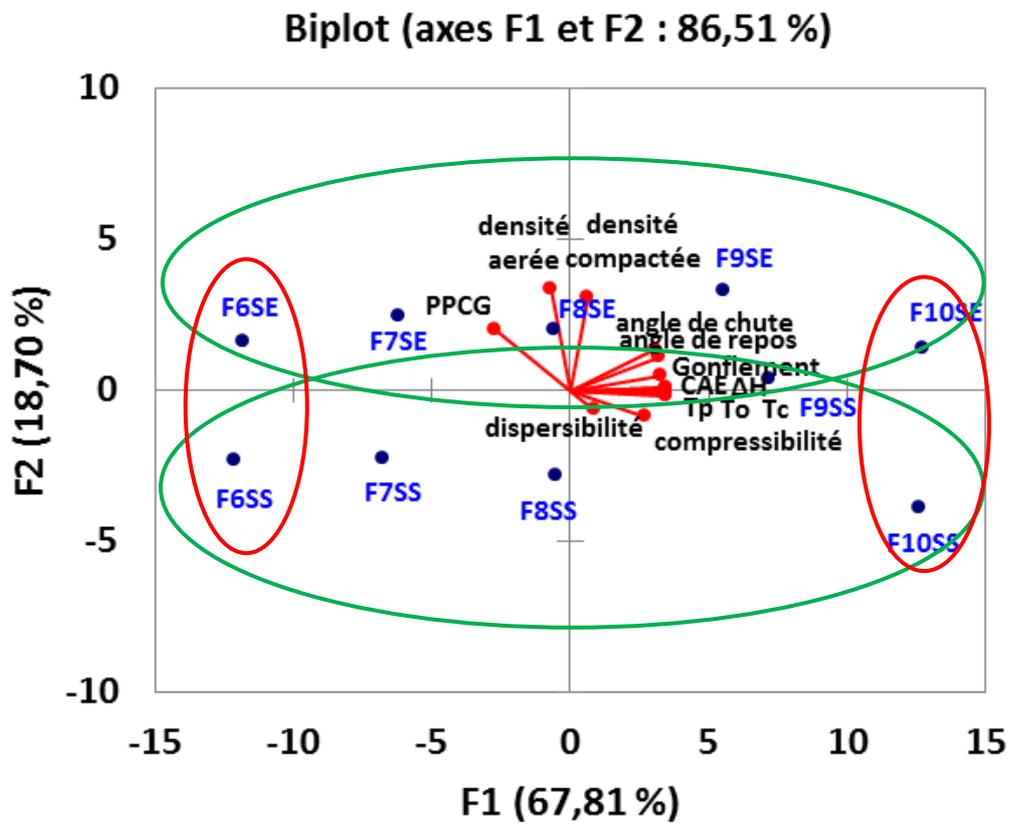


Figure 33 : Distribution des farines de taro Sosso et des variables dans le système d'axe CP1XCP2

Conclusion partielle

Aux termes de cette partie qui avait pour objectif d'étudier des propriétés physico-chimiques et rhéologiques des farines de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage ; les conclusions ci-après ont été tirées :

- le degré de maturité entraîne une augmentation de la capacité d'absorption d'eau, de l'indice de solubilité, du gonflement, de l'angle de repos, de l'angle de chute, de la température, de l'enthalpie de gélatinisation et du paramètre L^* ;
- le degré de maturité entraîne une diminution de la plus petite concentration gélifiante et du paramètre a^* ;
- le séchage solaire entraîne une diminution de la plus petite concentration gélifiante comparativement au séchage électrique
- les paramètres de la couleur indiquent un degré de brunissement plus faible pour le séchage électrique.

L'influence de la maturité et du mode de séchage peut se répercuter sur les propriétés sensorielles et instrumentales des pâtes préparées à partir des farines du taro Sosso.

III. 4. Effet du degré de maturité et du mode de séchage sur la texture et la couleur de la pâte de taro Sosso

III. 4. 1. Sucres réducteurs

La Figure 34 présente l'influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en sucres réducteurs de la farine de taro Sosso. L'analyse de variance montre que la différence significative ($p < 0,05$) qui existe entre les échantillons est essentiellement due au degré de maturité. La teneur en sucres réducteurs augmente avec le degré de maturité et varie globalement de $2,39 \pm 0,13$ (6 mois) à $2,90 \pm 0,01\%$ (10 mois). Ces observations peuvent s'expliquer par le fait que l'augmentation de la teneur en sucres réducteurs des tubercules pendant la maturité pourrait être attribuée à l'activation des enzymes impliquées dans la synthèse de saccharose ou à la formation de glucose et de fructose qui est nécessaire pour provoquer l'accumulation de sucres en éliminant le saccharose (Malone *et al.*, 2006). Au cours du cycle végétatif, le saccharose est continuellement fourni par le feuillage mais sa concentration dans le tubercule de pomme de terre est nettement plus élevée en début de tubérisation qu'à l'approche de la maturité. La teneur en glucose et en fructose (sucres réducteurs) est également plus importante dans les tubercules immatures de pomme de terre que dans ceux à maturité complète (Richardson *et al.*, 1990). C'est le cas des travaux réalisés sur la pomme de terre (Mazza *et al.*, 1983) ; et sur deux cultivars d'igname (*Dioscorea rotundata* cv. Oshei et *Dioscorea dumetorum* cv. Jakiri) par Trèche et Agbor-Egbe (1996). Selon ces auteurs, la diminution de la teneur en sucres réducteurs pourrait être attribuée à l'accumulation de l'amidon pendant la maturité. Des études antérieures ont également montré la diminution de la teneur en sucres réducteurs des tubercules de *Dioscorea rotundata* en fonction du degré de maturité (Ketiku et Oyenuga, 1973). Compte tenu des résultats en sucres réducteurs et de l'implication de ceux-ci dans la réaction de

Maillard, l'hypothèse d'un brunissement de type Maillard plus élevé dans les tubercules de taro Sosso à dix mois de maturité pourrait être envisagée. Mais, pour que cette hypothèse soit vérifiée il faut la présence dans le milieu des amines libres. C'est ce qui explique le dosage des amines libres pour voir s'il s'agit effectivement d'un brunissement de type Maillard.

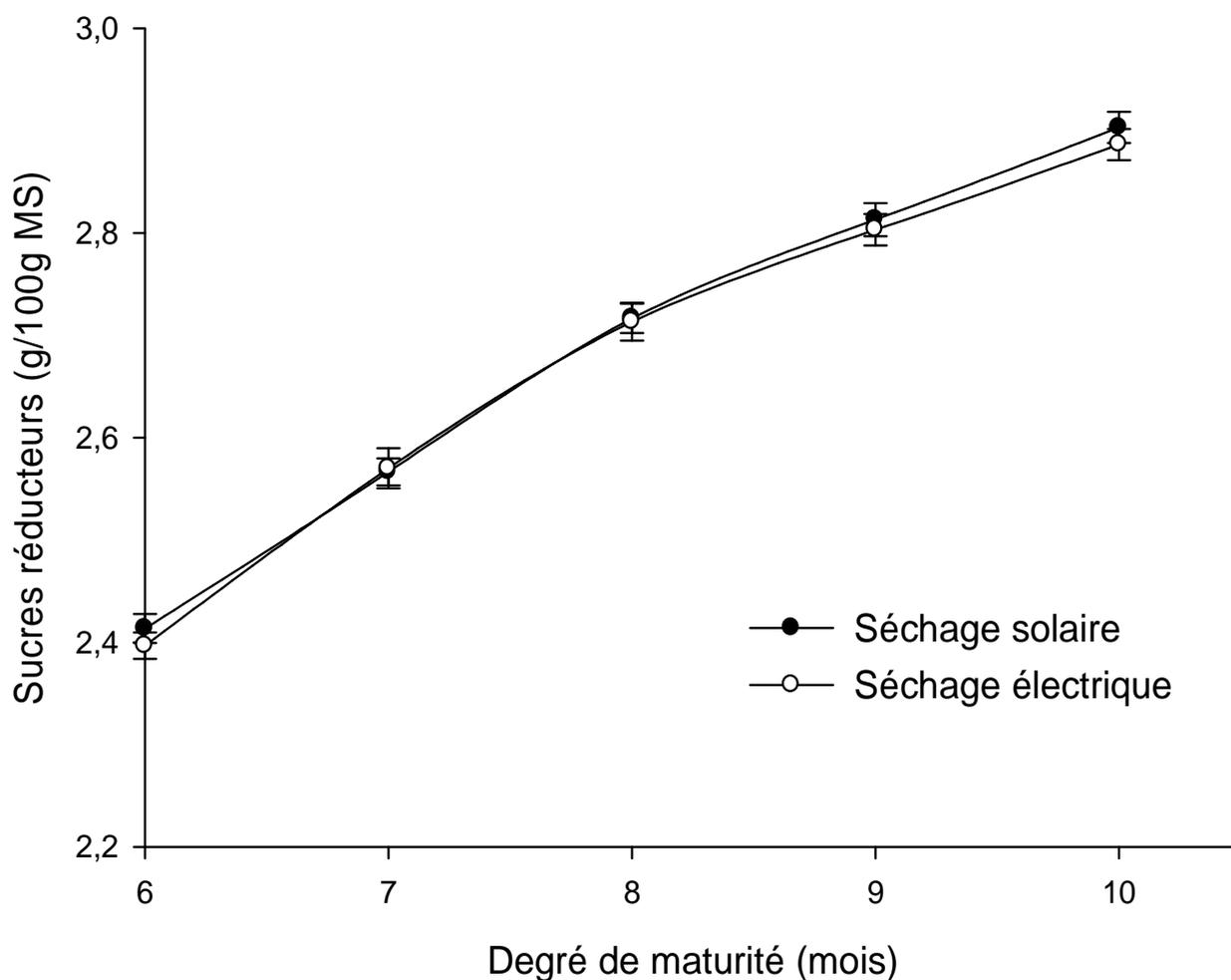


Figure 34 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en sucres réducteurs des farines de taro Sosso.

III. 4. 2. Amines libres

L'influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les amines libres des farines de taro Sosso est illustrée par la Figure 35. On constate que les degrés de maturité élevés présentent des teneurs en amines libres élevées. De six à dix mois de maturité, la croissance est continue avec des valeurs qui passent de $90,00 \pm 0,14$ à $99,15 \pm 1,14$ mg/100 g pour le séchage solaire et de $88,01 \pm 0,10$ à $97,22 \pm 0,22$ mg/100 g pour le séchage électrique. Le taux d'augmentation en amines libres est de 10,17 et 10,46% respectivement pour le séchage solaire et le séchage électrique entre le sixième et dixième mois de maturité. De façon inattendue, on observe une teneur en amines libres plus élevée pour le séchage solaire comparé au séchage électrique. Les teneurs en amines libres obtenues dans la présente étude sont similaires à celles de Njintang *et al.* (2007) pour six variétés de taro originaires du Cameroun. Cependant, elles sont largement supérieures à 5,6 mg/100 g rapportés par Hussain *et al.* (1984) pour une variété de taro (*Colocasia esculenta*). Ces différences peuvent être attribuées aux méthodes d'analyse. La méthode utilisée dans ce travail permet de déterminer tous les groupes d'amines libres des acides aminés, des protéines et autres molécules. L'augmentation étant similaire à celle des sucres réducteurs ($r=0,87$), il y a lieu de penser que l'augmentation du degré de maturité entraînerait un degré de brunissement de type Maillard plus élevé. Le produit de la réaction de Maillard étant le résultat entre les sucres réducteurs et les amines libres, la détermination des produits intermédiaires de la réaction de Maillard (A280) et des indices des produits de réaction avancée de Maillard revêt une importance pour la compréhension du mécanisme.

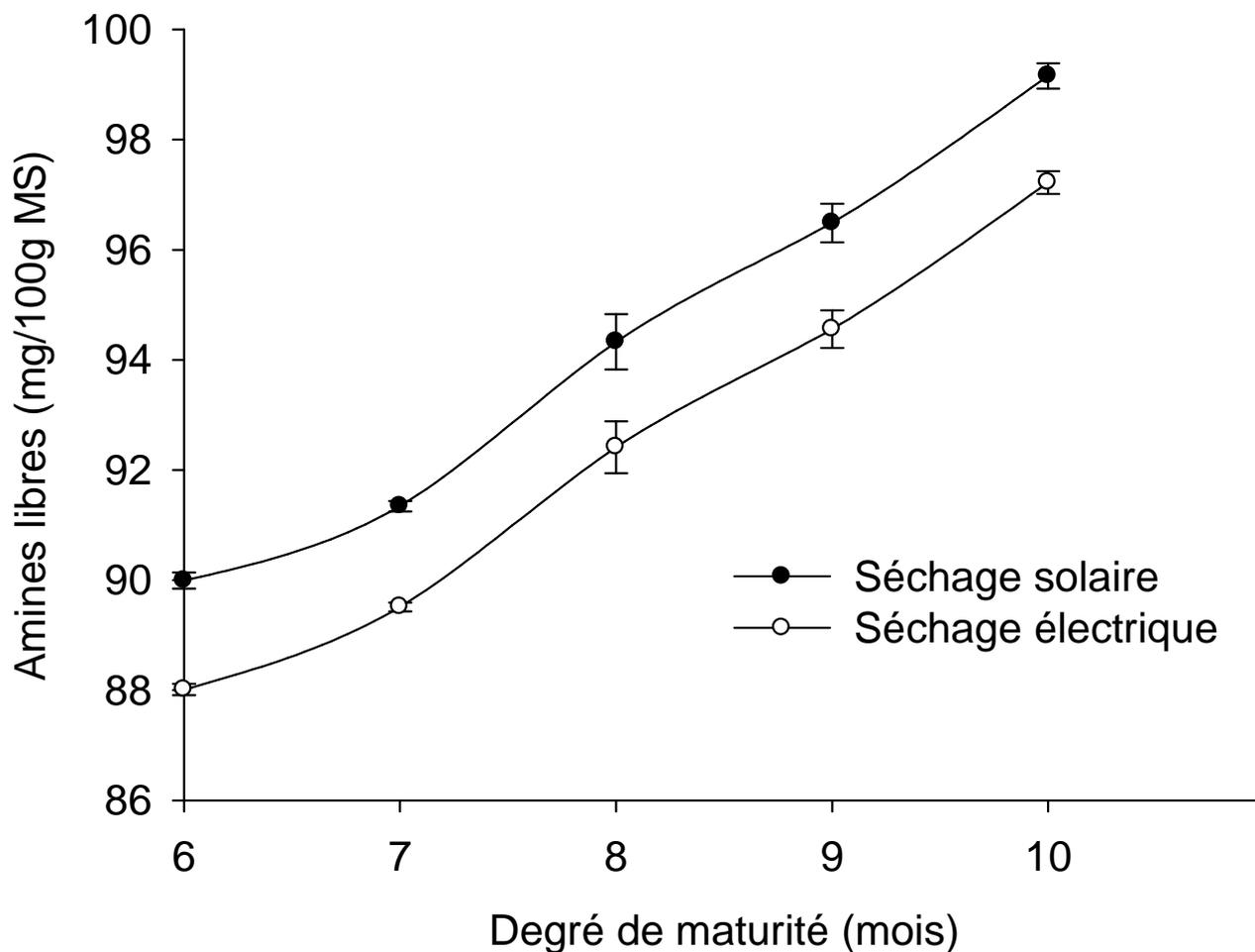


Figure 35 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en amines libres des farines de taro Sosso.

III. 4. 3. Produits intermédiaires et finaux des réactions de Maillard

L'absorbance à 420 nm (A420 nm) est une mesure facile de la conséquence de la réaction de Maillard comme il peut être estimé visuellement. Son intensité est souvent utilisée comme un indicateur de l'ampleur de la réaction de Maillard qui a lieu dans les aliments et symbolise l'étape avancée de la réaction de Maillard (Laroque *et al.*, 2008). 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 36 et 37 respectivement. A280 et A420 augmentent de façon significative ($p < 0,001$) avec le degré de maturité et indépendamment du mode de séchage. On a observé une corrélation significative positive entre A280 et le degré de maturité d'une part et entre A420 et le degré de maturité d'autre part ($r = 0,97$ et $0,99$ respectivement). Par ailleurs, une corrélation positive ($r = 0,96$, $p < 0,001$) a été observée entre A280 et A420 suggérant qu'à une teneur élevée des produits intermédiaires, est associée une teneur élevée des produits de réaction avancée de Maillard. Dans le même ordre d'idée, une corrélation significative et positive a été observée entre les amines libres et A280 ($r = 0,93$, $p < 0,01$) ou A420 ($r = 0,96$, $p < 0,001$) d'une part et entre les sucres réducteurs et A280 ($r = 0,86$, $p < 0,01$) ou A420 ($r = 0,88$, $p < 0,001$) d'autre part. Ceci suggère l'implication des acides aminés ou des protéines et des sucres réducteurs dans le brunissement des tubercules de taro Sosso 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 (Purlis, 2010). Ces observations vont dans le même sens que des travaux antérieurs qui stipulent que le brunissement pendant la cuisson des aliments est fortement influencé par leurs sucres réducteurs (Capuano *et al.*, 2008) et les amines libres (Morales *et al.*, 2007). En plus du brunissement de type Maillard causé par les sucres réducteurs et les amines libres, d'autres composants du taro peuvent entraîner le brunissement des pâtes pendant la cuisson. C'est le cas des composés phénoliques totaux qui peuvent être à l'origine du brunissement des aliments pendant la cuisson (Varoquaux *et al.*, 1991). Il devient donc judicieux de déterminer les composés phénoliques totaux en fonction du degré de maturité et du

mode de séchage pour voir leur influence sur le brunissement au cours de la cuisson des pâtes de taro Sosso.

III. 4. 4. Les composés phénoliques totaux

La Figure 38 montre l'influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les composés phénoliques totaux des farines de taro Sosso. Les résultats de l'analyse de variance ont montré un effet significatif du degré de maturité sur la teneur en composés phénoliques totaux, et un effet non significatif du mode de séchage. Les teneurs en composés phénoliques totaux augmentent de 60,59 à 99,76 mg d'acide gallique /100 g de MS. Ces chiffres indiquent une augmentation en composés phénoliques de l'ordre de 30% quand on passe du 6^{eme} au 10^{eme} mois. De façon comparative, les valeurs de composés phénoliques totaux obtenues dans le présent travail sont considérablement inférieures à celles des farines d'ignames *Dioscorea dumetorum* durcis (Medoua, 2005) et des farines de taro cuit (135,9 à 264,8 mg/100 g) (Aboubakar, 2009). Cependant, elles sont dans la gamme (35,61 à 70,23 mg/100 g) obtenue pour six variétés de taro (Njintang, 2003). Cette différence pourrait être attribuée à la variété, à l'origine géographique et aux conditions climatiques.

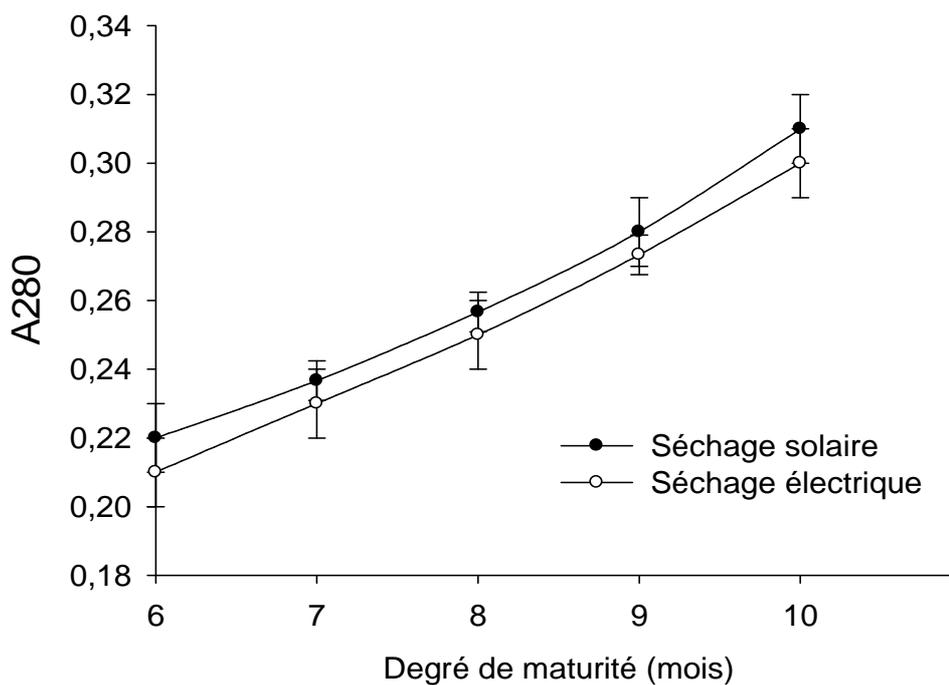


Figure 36 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les produits intermédiaires de la réaction de Maillard des farines de taro Sosso.

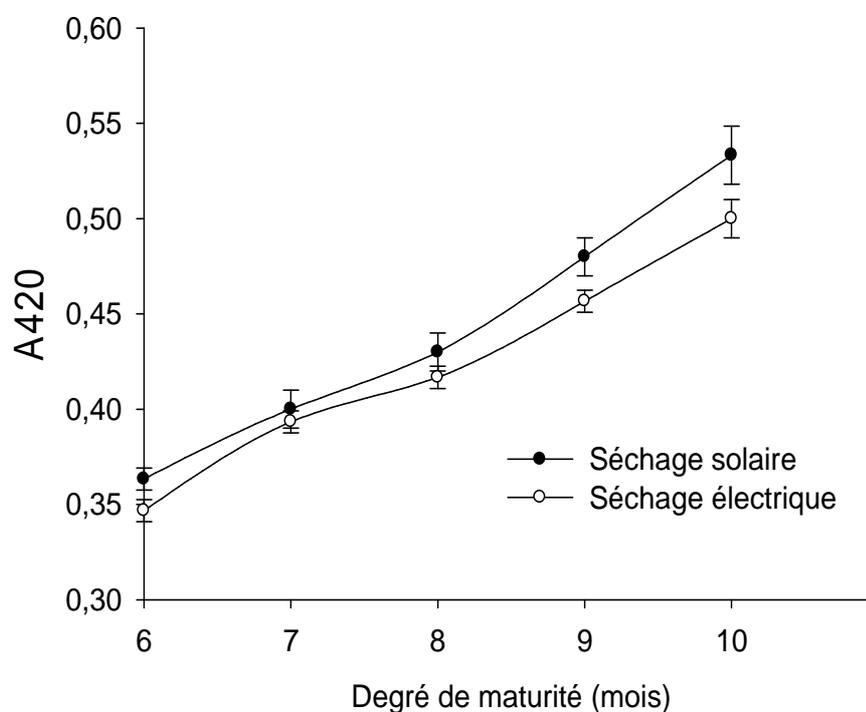


Figure 37 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les produits de la réaction avancée de Maillard des farines de taro Sosso.

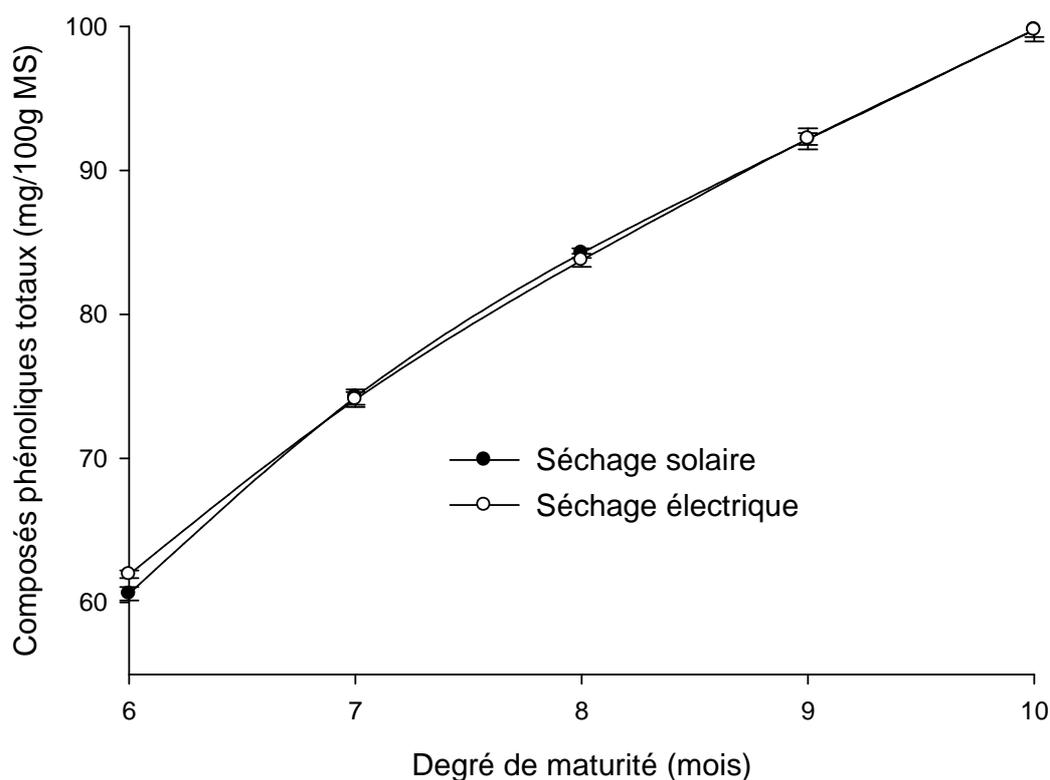


Figure 38 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur la teneur en composés phénoliques totaux des farines de taro Sosso.

III. 4. 5. Couleur des pâtes

Les coordonnées trichromatiques de la couleur (Figures 39 et 40) varient significativement aussi bien avec le degré de maturité que le mode de séchage. L'examen de ces Figures montre l'effectivité du brunissement de la pâte de taro. En effet, ce brunissement est beaucoup plus prononcé dans le cas des échantillons issus du séchage solaire qu'électrique. Par ailleurs, quel que soit le mode de séchage, le degré de maturité le plus bas présente des indicateurs de brunissement élevés. Les valeurs de L^* montrent une variation du sombre au lumineux avec des valeurs allant de $53,53 \pm 0,33$ à $60,38 \pm 0,26$ pour le séchage solaire, et de $57,43 \pm 0,48$ à $65,67 \pm 0,68$ pour le séchage électrique. La coordonnée a^* est également influencée significativement et elle correspond à cet intervalle de $4,51 \pm 0,14$ (6 mois) à $3,67 \pm 0,19$ (10 mois) et de $4,17 \pm 0,10$ (6 mois) à $3,28 \pm 0,17$ (10 mois), indicatifs d'un

rouge élevé pour les farines à maturité faible. La variation de b^* n'est pas linéaire et est comprise dans cet intervalle : $7,91 \pm 0,08$ (10 mois, séchage électrique) à $9,13 \pm 0,31$ (8 mois, séchage solaire). Dans la présente étude, le degré de brunissement diminue quand le degré de maturité augmente. En revanche, le brunissement des pâtes issues des farines séchées au soleil est plus élevé que celui des pâtes des farines séchées électriquement. Contrairement aux protéines et sucres réducteurs qui sont les deux facteurs du brunissement de Maillard et aux composés phénoliques totaux qui sont à l'origine du brunissement à médiation phénolique, les paramètres L^* et a^* de la couleur des pâtes indiquent le contraire. Autrement dit, au fur et à mesure que le degré de maturité augmente, la rougeur des pâtes diminue. Ceci montre que le brunissement des pâtes de taro Sosso pendant la cuisson n'est pas le fait de la réaction de Maillard ou du brunissement à médiation phénolique.

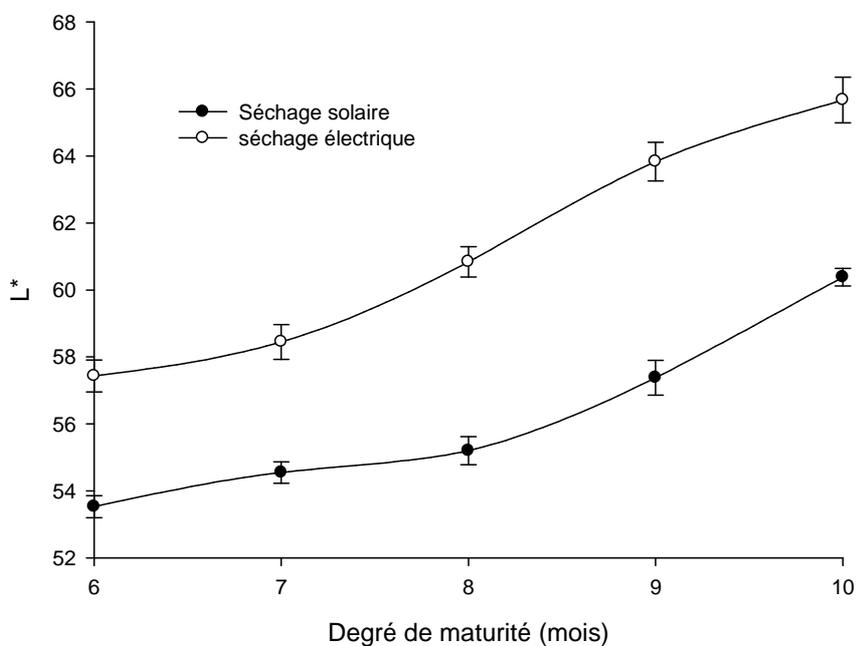


Figure 39 : L^* des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

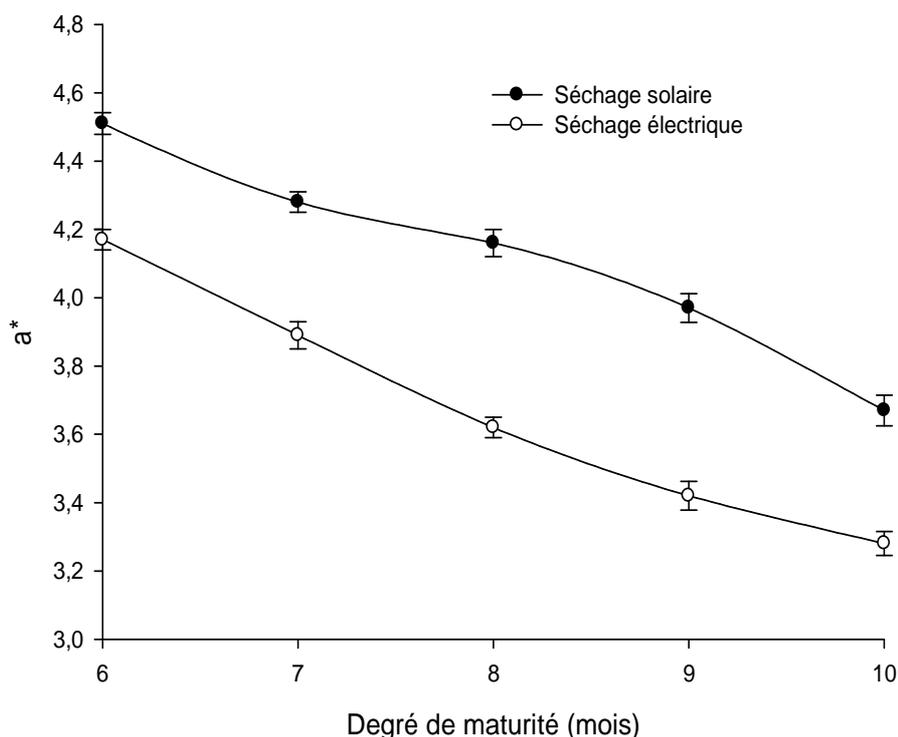


Figure 40 : a^* des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

L'observation des pâtes de taro Sosso montre effectivement un brunissement au fur et à mesure que le degré de maturité diminue (Photographie 4). De même, on observe un brunissement important pour les pâtes obtenues du séchage solaire. Ces observations montrent donc que les coordonnées L^* , a^* et b^* indiquent bien les variations de la couleur comparativement aux sucres réducteurs, amines libres et composés phénoliques qui suggéraient une augmentation de brunissement de type Maillard ou à médiation phénolique avec le degré de maturité. Il est donc très probable que même si les réactions de Maillard interviennent dans le brunissement du taro Sosso, elles seraient faibles, comparées à celle qui induit le brunissement dans le sens contraire. Mais, le mécanisme semble encore indéterminé.



Photographie 4 : Pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

III. 4. 6. Analyse sensorielle des pâtes de taro Sosso

La Figure 41 montre l'influence du degré de maturité et du mode de séchage sur l'acceptabilité de la pâte de taro Sosso. Il en ressort que les scores sensoriels concernant la couleur diffèrent significativement ($P < 0,05$) entre les pâtes. Le test de comparaison multiple de Duncan permet de constater que la couleur des pâtes (6 mois) est moins appréciée que celles des quatre autres maturités. En effet, les panelistes ont préféré la couleur des pâtes à 10 mois de maturité (dans les deux modes de séchage) et cette préférence diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la maturité 10 pour atteindre son score le plus bas à six mois ($r = 0,91$). D'autre part, les panelistes ont moins apprécié les pâtes séchées au soleil que celles issues du séchage électrique. Cette différence des couleurs entre les deux modes de séchage serait due aux réactions de brunissement de Maillard dont les indicateurs étaient plus élevés pour le séchage solaire. L'implication des sucres réducteurs et amines libres dans le brunissement de Maillard est liée aux indicateurs de la couleur par des corrélations non significatives. Ainsi, on observe une corrélation positive entre les sucres réducteurs et L^* ($r = 0,58$) d'une part et entre les amines libres et L^* ($r = 0,48$) d'autre part. Cependant une corrélation négative a été observée entre les sucres réducteurs et a^* ($r = -0,69$) et entre les amines libres et a^* ($r = -0,56$). Par ailleurs, les résultats de l'analyse sensorielle portant sur la couleur confirment les données obtenues par l'analyse des coordonnées trichromatiques et une corrélation parfaite positive ($r = 0,97$) est observée entre la couleur de l'analyse sensorielle et le degré de maturité. Toutefois, les pâtes à maturité faible ont montré une irritation faible comparée aux pâtes à maturité élevée. L'irritation dans le taro Sosso est liée à la présence des oxalates qui a en effet montré une croissance significative avec le degré de maturité, à en témoigner la corrélation positive et significative observée

entre l'âcreté et la teneur en oxalates totaux.

Des différences non significatives ont été observées par les panelistes au sujet de la dureté, de la masticabilité et du goût des différentes pâtes quel que soit le degré de maturité et le mode de séchage. D'une façon générale, ils ont apprécié modérément ces trois descripteurs de toutes les pâtes.

Tout comme la couleur, l'acceptabilité générale est aussi influencée significativement par le degré de maturité et le mode de séchage. Les pâtes séchées au soleil sont moins acceptées que celles séchées électriquement et les pâtes à maturité 6 mois sont moins acceptées que celles de dix mois. Ces différences témoignent bien du brunissement intense dans les farines de maturité faible et à séchage solaire. A cet effet, l'acceptabilité générale des pâtes a montré une variation significative d'un traitement à un autre avec le degré de maturité dix mois à séchage électrique présentant le score le plus élevé. La texture de la pâte ne semble pas être un déterminant important pour l'acceptabilité de la pâte, et à ce titre une corrélation significative a été observée entre l'acceptabilité de la pâte et la couleur ($r=0,91$).

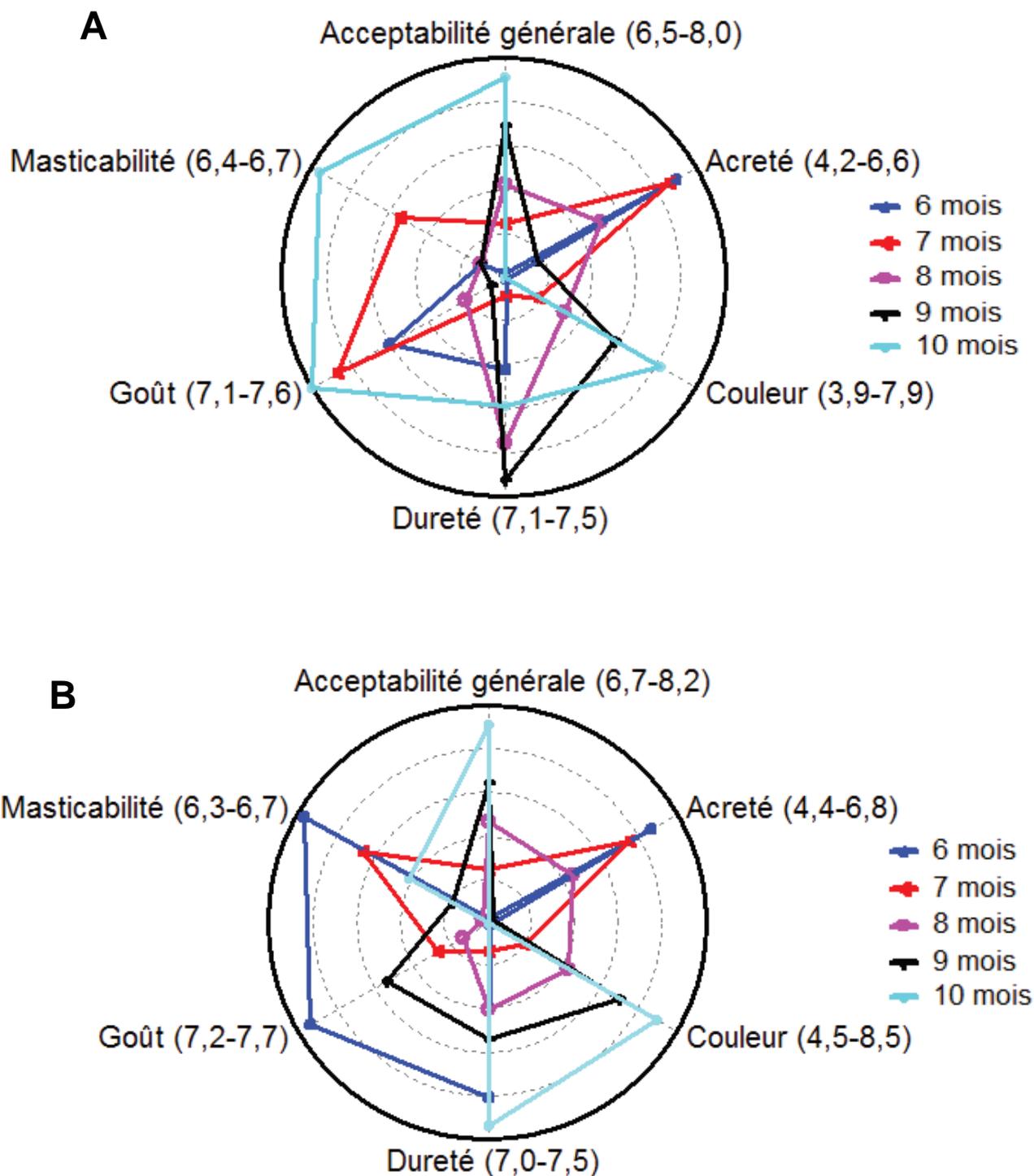


Figure 41 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur les scores sensoriels des pâtes de taro Sosso. (A) : séchage solaire ; (B) : séchage électrique

Dans le but d'avoir une visualisation des relations entre les descripteurs des pâtes de taro Sosso, les résultats expérimentaux ont été analysés en utilisant l'analyse en composantes principales. L'ACP menée sur les scores sensoriels permet de relever deux composantes principales. Les axes F1 et F2 expriment 80,71 % de la variabilité entre les différentes pâtes de taro Sosso, soit 56,04 % (F1) et 24,67 % (F2). F1 est corrélé négativement à la couleur, la dureté, l'acceptabilité générale et positivement à l'âcreté, alors que l'axe 2 est corrélé positivement à la masticabilité et au goût. Ceci montre que les différences entre les pâtes se justifient d'abord sur la base de la couleur, la dureté et l'âcreté. Ces paramètres sont tous corrélés à l'acceptabilité générale. La Figure 42 représente le cercle des corrélations des paramètres sensoriels. On peut y voir une similitude de fait entre la couleur et l'acceptabilité générale. Cette observation suppose que dans la limite de la présente étude, l'analyse de l'acceptabilité générale suffit pour expliquer à la fois la couleur. C'est ce qui explique la forte corrélation positive entre ces deux paramètres ($r= 0,91$). En revanche, ces deux descripteurs sont corrélés négativement à l'âcreté ($r= -0,94$; $r= -0,91$) respectivement. Dans la Figure 43, sont représentées les pâtes de taro Sosso dans le système d'axe CP1 et CP2. On peut y distinguer que les pâtes déviées vers la gauche des 4 plans qui composent ce diagramme sont les plus acceptées sur la base de leur couleur et texture, les pâtes à droite du diagramme sont moins acceptées globalement mais, ont une âcreté faible. Les pâtes orientées vers le goût ont le goût le plus accepté. A ce titre, on observe aisément que les pâtes à maturité 9 et 10 présentent les meilleures couleurs et texture, mais un goût et une âcreté peu appréciés. Cependant, leurs acceptabilités générales sont considérables. Les pâtes à maturité 6 et 7 mois se caractérisent globalement par leur goût moins âcre, une texture et une couleur peu acceptées.

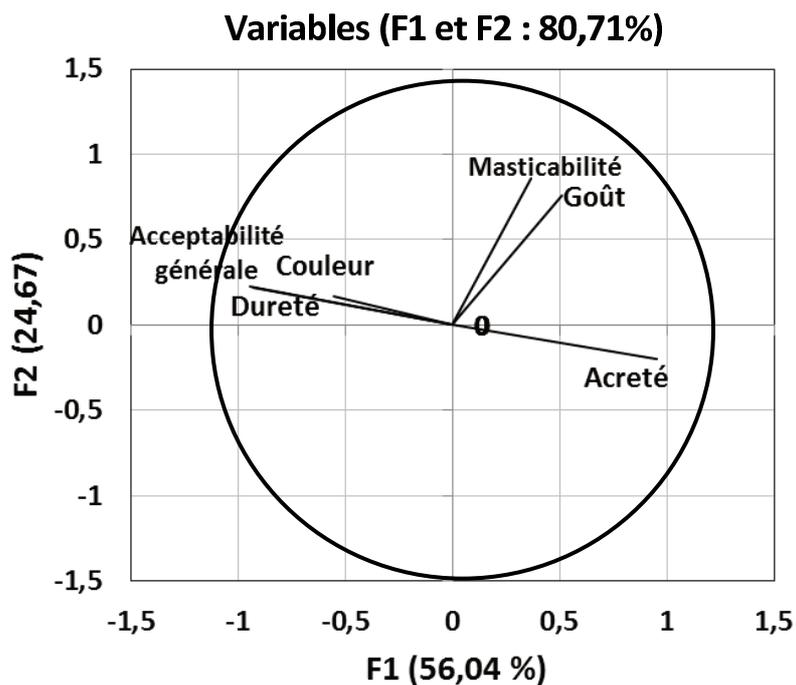


Figure 42 : Cercle de corrélation des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage.

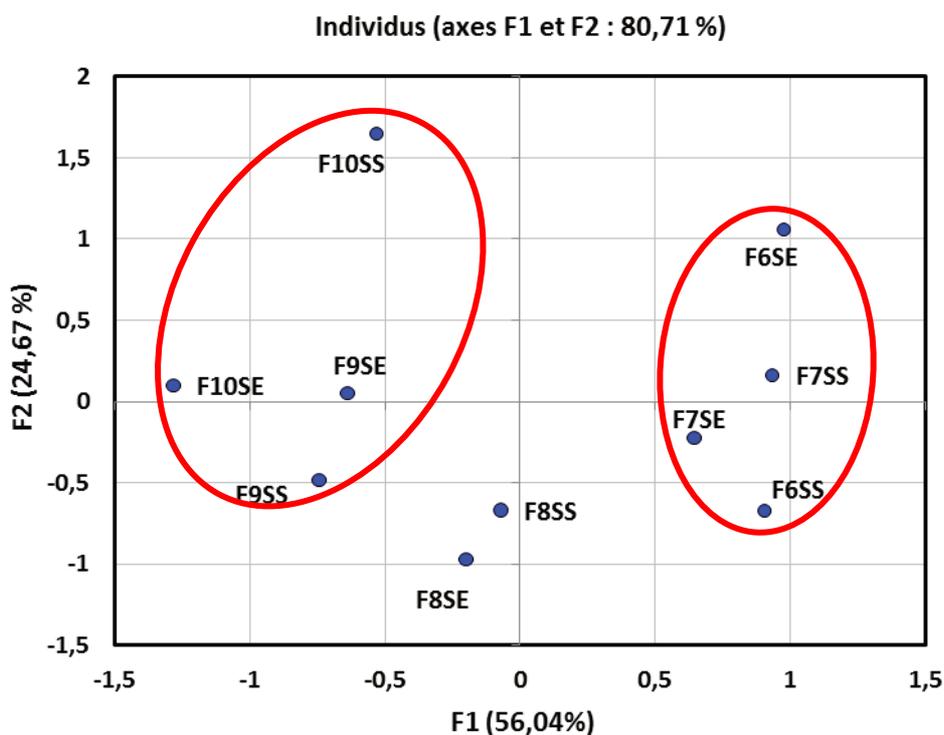


Figure 43 : Répartition des pâtes de taro Sosso de l'analyse sensorielle dans le système d'axe CP1 CP2 en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

L'analyse de classification des pâtes de taro Sosso par K-means a permis de définir 4 classes (Tableau 19 et Figure 44) dont les pâtes au centre des classes ont les caractéristiques présentées sur la Figure 45. La classe 1 (F7SE, F6SS et F7SS) représente les échantillons les moins âcres. La classe 2 (F6SE) est celle des échantillons qui ont un bon goût, une bonne masticabilité et sont moins âcres. Les échantillons de la classe 3 (F8SE, F8SS et F9SS) ont une bonne dureté. La classe 4 (F9SE, F10SE et F10SS) a la particularité de présenter des scores les plus élevés en couleur et acceptabilité générale. C'est la classe des derniers degrés de maturité et surtout ceux du séchage électrique.

Tableau 19 : Classes des pâtes de taro Sosso sur la base de l'analyse K-means

| Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| F7SE | F6SE | F8SE | F9SE |
| F6SS | | F8SS | F10SE |
| F7SS | | F9SS | F10SS |

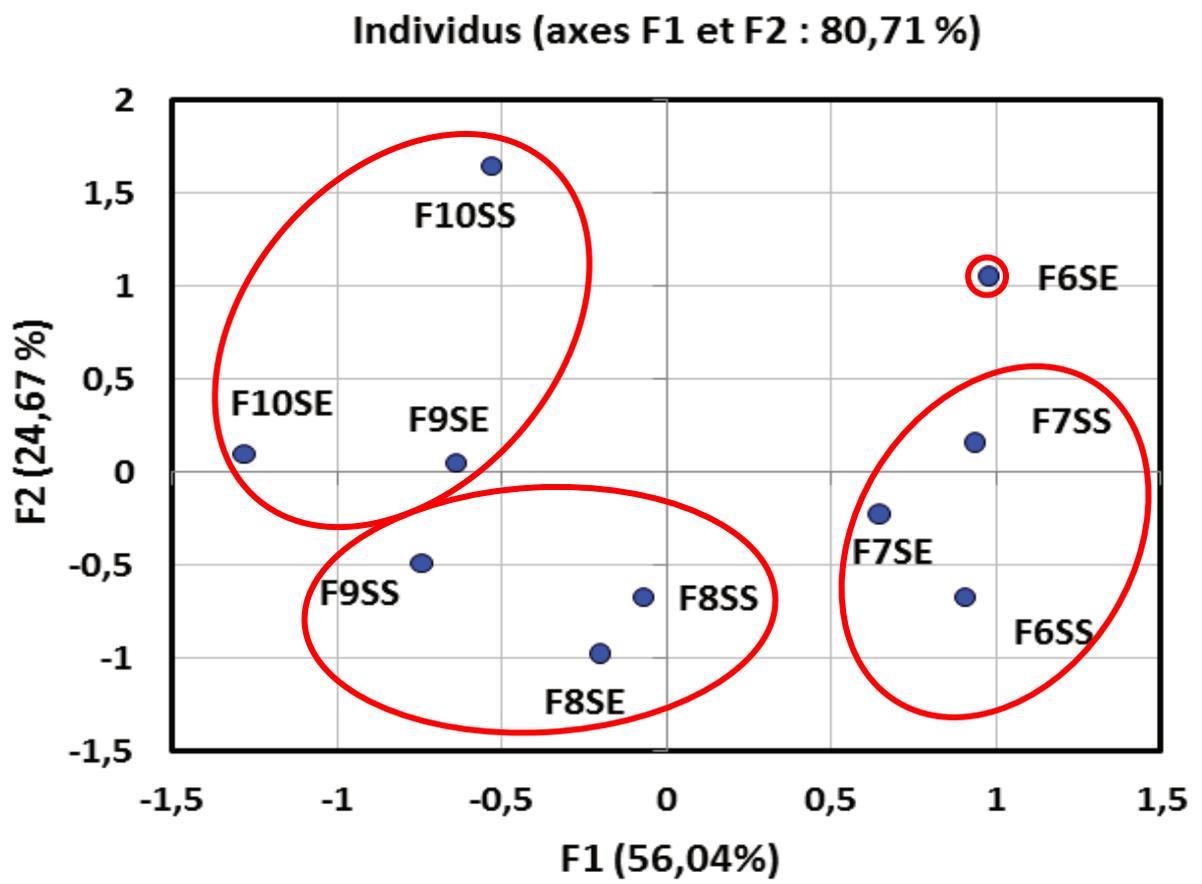


Figure 44 : Classes des pâtes de taro Sosso en fonction du K-means

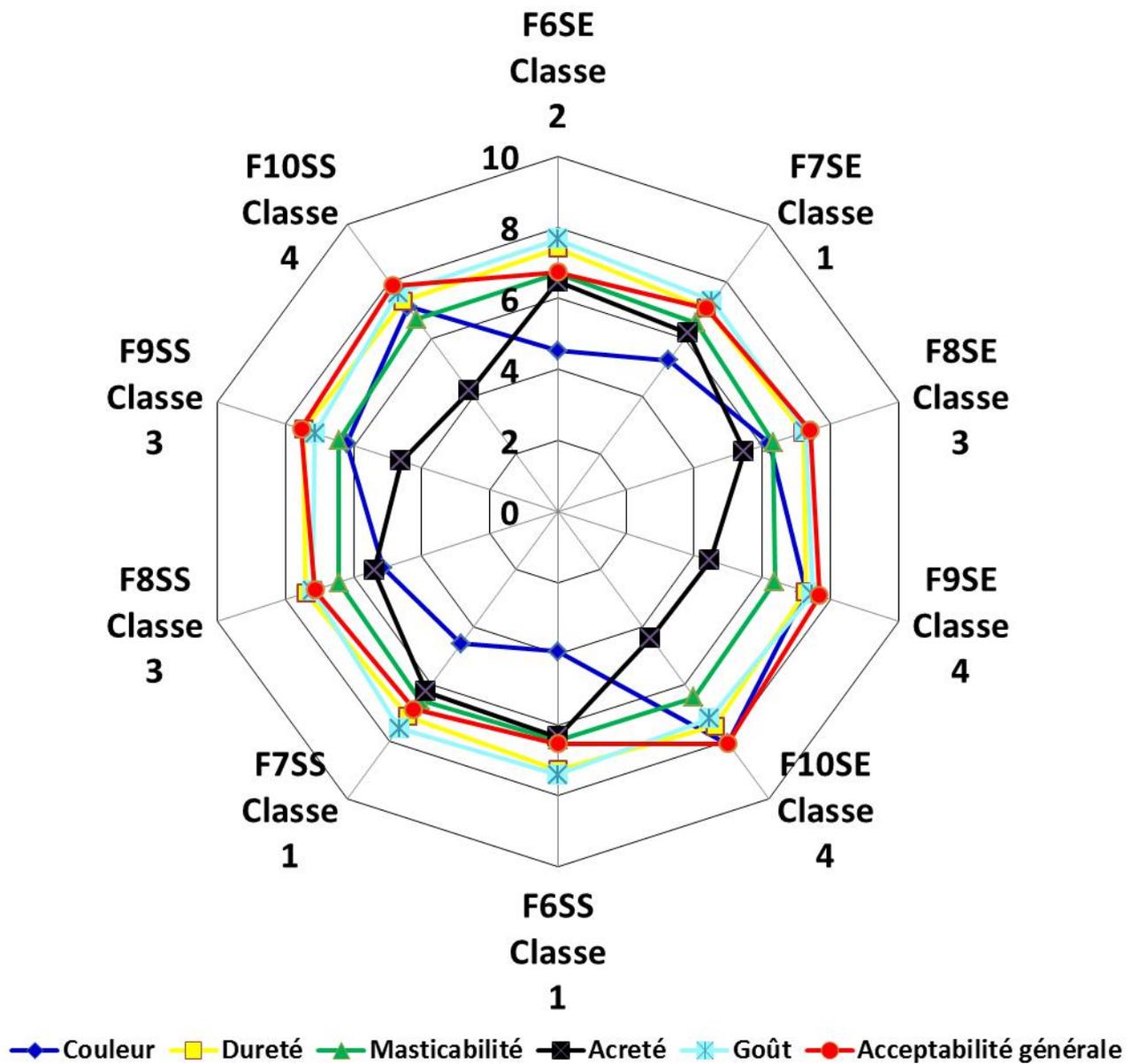


Figure 45 : Caractéristiques des pâtes de taro Sosso au centre des classes

Il ressort de ces analyses que les pâtes de taro Sosso issues des différents degrés de maturité et de deux modes de séchage n'ont pas les mêmes caractéristiques hédoniques. Cela dit, les échantillons des derniers degrés de maturité sont préférés par le panel au détriment des échantillons de degré de maturité faible. De même, pour un degré de maturité, les échantillons issus du séchage électrique sont mieux acceptés que ceux du séchage solaire. Il en est de même pour le degré de maturité qui est corrélé positivement à l'acceptabilité générale des pâtes de taro Sosso ($r=0,80$ et $r=0,94$) séchage solaire et électrique respectivement. Les scores des différents échantillons présentés sur la Figure 46 permettent de voir la préférence par le panel des échantillons de derniers degrés de maturité et surtout ceux du séchage électrique. Le fait que les pâtes de taro Sosso brunissent pendant la cuisson, suggère la présence d'un composé actif dont la teneur diminue avec le degré de maturité et qui agirait avec un élément apporté par contamination lorsque le produit est soumis au séchage solaire direct.

Acceptabilité générale

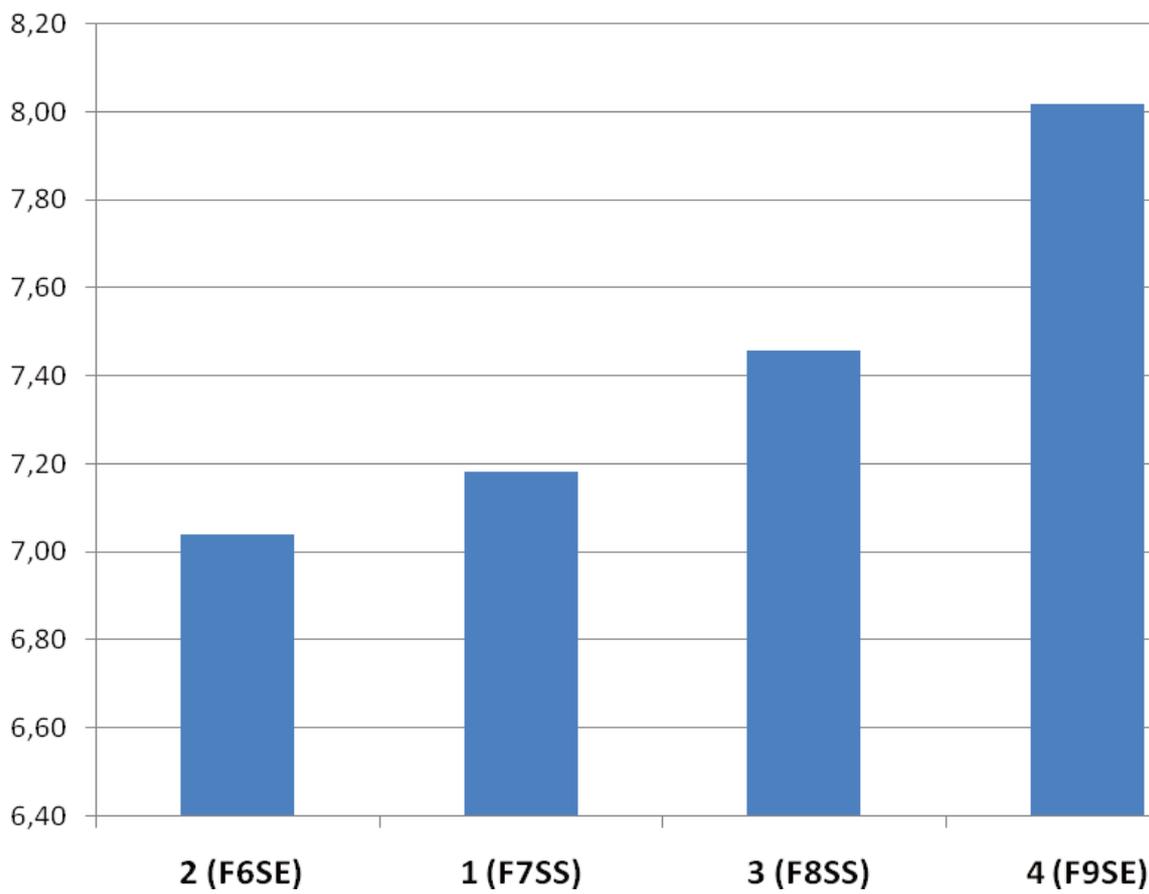


Figure 46 : Acceptabilité générale des pâtes de taro Sosso en fonction des classes

III. 4. 7. Profil de texture des pâtes de taro Sosso

La texture est définie comme un ensemble des propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques d'un produit alimentaire, perçues par les organes des sens au moment de la consommation (Bourne, 1968).

Le profil textural des pâtes de taro Sosso est caractérisé par une courbe à doubles aires positives et une aire négative. Le Tableau 20 présente les paramètres de profil de texture des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage. Il en ressort que les variables sont significativement influencées par le degré de maturité. L'augmentation du degré de maturité entraîne une diminution de la dureté et de l'élasticité qui varient respectivement de 0,70 à 0,60 N et de 0,93 à 0,83 mm. Le taux de diminution en fonction du degré de maturité est de (14,28 et 10,75%) respectivement. En plus, l'augmentation du degré de maturité entraîne également une diminution (beaucoup plus faible que précédemment) du gumminess et de la masticabilité dont les valeurs varient respectivement de 0,51 à 0,48 N et de 0,47 et 0,40 N. Contrairement à ces 4 paramètres, la cohésion et l'adhésivité augmentent avec le degré de maturité et varie de 0,73 à 0,80 et de -1,78 à -1,63 N.s avec un taux d'augmentation respectivement de 9,58 et 8,42% entre 6 et 10 mois. La variation de ces différents paramètres a pour conséquence le changement de la texture de la pâte de taro.

D'une façon générale, les valeurs des différents paramètres obtenus dans cette étude sont largement inférieures à celles obtenues par Aboubakar (2009) sur les pâtes de six variétés de taro du Cameroun. Ceci serait dû aux conditions expérimentales, car dans ses travaux, la force maximale du capteur était de 500 N alors que dans la présente étude, elle est de 300 N. Ce résultat pourrait être la conséquence de l'influence du degré de maturité et/ou du mode de séchage.

Tableau 20 : Influence du degré de maturité et du mode de séchage sur le profil de texture de la farine de taro Sosso

| Mode de séchage | Degré de maturité (mois) | Dureté (N) | Cohésion | Adhésivité (N.s) | Elasticité (mm) | Gumminess (N) | Masticabilité (N) |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Séchage solaire | 6 | 0,70±0,003 ^e | 0,73±0,001 ^a | -1,78±0,002 ^a | 0,93±0,002 ^e | 0,51±0,002 ^e | 0,47±0,00 ^e |
| | 7 | 0,68±0,001 ^d | 0,73±0,001 ^a | -1,77±0,005 ^b | 0,92±0,002 ^d | 0,50±0,004 ^d | 0,46±0,001 ^d |
| | 8 | 0,65±0,002 ^c | 0,76±0,001 ^b | -1,70±0,002 ^c | 0,88±0,001 ^c | 0,49±0,002 ^c | 0,43±0,001 ^c |
| | 9 | 0,62±0,002 ^b | 0,78±0,002 ^c | -1,66±0,001 ^d | 0,86±0,002 ^b | 0,48±0,002 ^b | 0,41±0,002 ^b |
| | 10 | 0,60±0,002 ^a | 0,80±0,001 ^d | -1,63±0,002 ^e | 0,83±0,001 ^a | 0,48±0,002 ^a | 0,40±0,001 ^a |
| Séchage électrique | 6 | 0,70±0,001 ^d | 0,73±0,003 ^a | -1,78±0,003 ^a | 0,93±0,001 ^d | 0,51±0,004 ^c | 0,48±0,004 ^d |
| | 7 | 0,70±0,001 ^d | 0,73±0,003 ^a | -1,78±0,002 ^a | 0,93±0,002 ^d | 0,51±0,001 ^c | 0,47±0,002 ^d |
| | 8 | 0,66±0,001 ^c | 0,75±0,004 ^b | -1,72±0,001 ^b | 0,89±0,002 ^c | 0,49±0,003 ^b | 0,44±0,003 ^c |
| | 9 | 0,62±0,001 ^b | 0,79±0,001 ^c | -1,67±0,001 ^c | 0,85±0,001 ^b | 0,49±0,002 ^a | 0,41±0,002 ^b |
| | 10 | 0,60±0,003 ^a | 0,81±0,001 ^d | -1,63±0,005 ^d | 0,82±0,002 ^a | 0,48±0,003 ^a | 0,40±0,002 ^a |

Toutes les moyennes suivies de la même lettre en exposant sur la même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$.

L'analyse en composantes principales du profil de texture des pâtes de taro Sosso montre l'existence de deux composantes principales. La première CP1 explique les variations entre les pâtes à 98,29% et la deuxième CP2 qui n'explique que 1,56%. L'axe F1 est corrélé positivement au gumminess, à la dureté, masticabilité et à l'élasticité tandis que la cohésion et l'adhésivité sont corrélées négativement à l'axe F1. La Figure 47 représente le cercle des corrélations des paramètres texturaux des pâtes de taro Sosso. On constate que la dureté et la masticabilité sont confondues. Ce qui suppose que l'utilisation de l'une d'entre elles suffit pour expliquer les deux. En plus, ces deux paramètres sont proches du gumminess et de l'élasticité. Ce rapprochement justifie les fortes corrélations entre les 4 paramètres, ($r=1$) entre dureté et masticabilité ; ($r=1$) entre dureté et élasticité ; ($r = 0,99$) entre élasticité et masticabilité ; ($r = 0,98$) entre gumminess et masticabilité et ($r = 0,97$) entre dureté et gumminess. Cependant, ces 4 paramètres sont opposés symétriquement aux 2 autres d'où l'existence d'une corrélation négative entre la dureté et l'adhésivité ($r=-1$) et entre la dureté et la cohésion ($r = -0,99$). Dans le système d'axe CP1 et CP2 (Figure 48), on constate que les pâtes de taro Sosso séchées au soleil et celles séchées électriquement sont opposées symétriquement dans le plan. En effet, les pâtes obtenues par séchage solaire sont orientées en dessous de l'axe CP1 alors que les pâtes obtenues du séchage électrique sont toutes orientées au-dessus de cet axe (en vert). Malheureusement, l'axe CP2 autour duquel se distribue le degré de maturité est peu représentatif (1,56%). Cet axe permet la séparation des échantillons par le degré de maturité, les pâtes de degré de maturité bas étant décalées vers la droite et les degrés élevés vers la gauche. En d'autres termes, les propriétés des pâtes de taro Sosso vont de cohésif-adhésif (9 et 10 mois) à dur-élastique-gommeux (maturité 6, 7 et 8 mois) (en rouge).

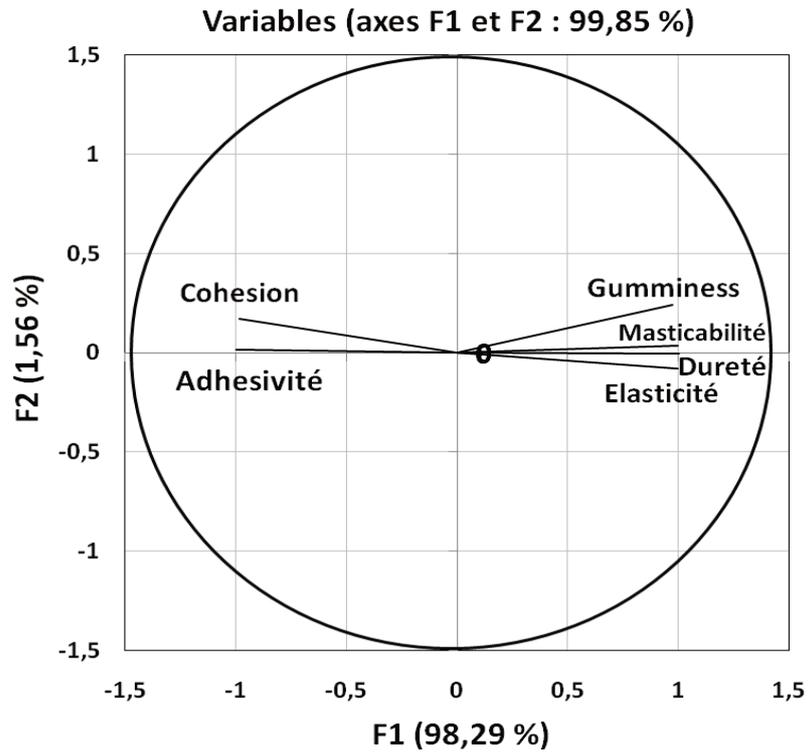


Figure 47 : Cercle de corrélation du profil de texture des pâtes de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

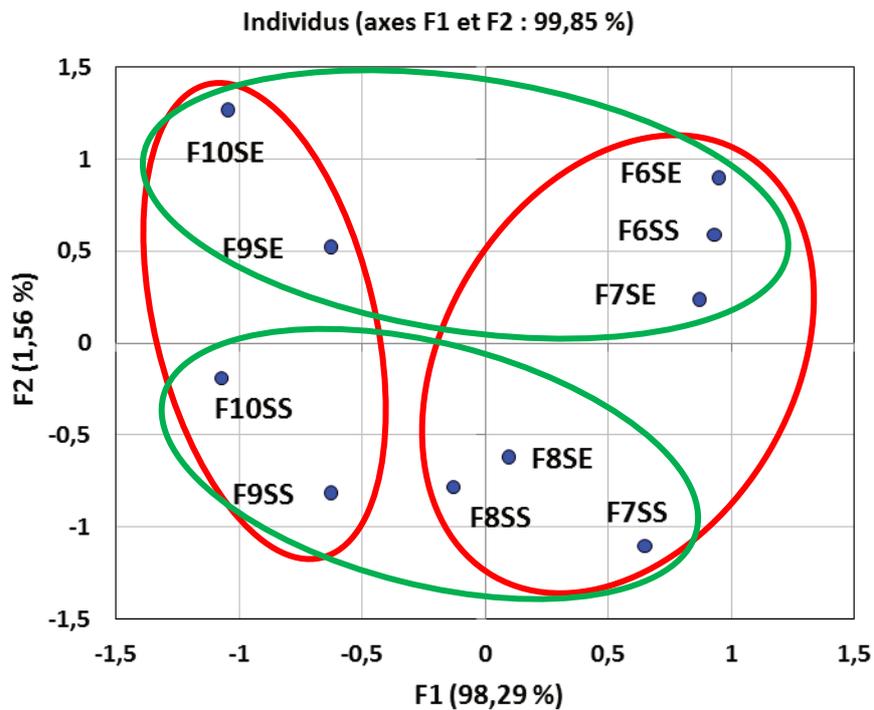


Figure 48 : Distribution des pâtes de taro Sosso du profil de texture dans le système d'axe CP1 CP2 en fonction du degré de maturité et du mode de séchage

Conclusion partielle

Cette partie avait pour objectif l'étude de l'analyse sensorielle et instrumentale des pâtes de taro Sosso en fonction de la maturité et du mode de séchage. Aux termes des expériences réalisées, les conclusions suivantes ont été tirées :

- le brunissement des pâtes de taro Sosso est plus intense dans les tubercules immatures ;
- le brunissement des pâtes de taro Sosso est beaucoup plus prononcé lorsque le séchage est effectué au soleil ;
- l'acceptabilité générale des pâtes de taro Sosso est corrélée à la couleur de celles-ci ;
- Un séchage électrique (40°C) et dix mois de maturité sont les conditions optimales pour obtenir une pâte de taro Sosso moins brunie.

DISCUSSION GENERALE

Deux propriétés fondamentales que sont la couleur et la texture conditionnent l'acceptabilité de la pâte. Ces deux propriétés sont inter corrélées en ce sens que la modification de l'une se traduit généralement par une altération de l'autre. La présente étude visait à mettre en évidence l'effet du degré de maturité et du mode de séchage sur la couleur et la texture des pâtes de taro Rosso. Cette recherche de type explicatif avait pour but de mettre en évidence les causes (degré de maturité, mode de séchage) qui expliquent les effets (couleur et texture). L'analyse de la problématique que soulève cette recherche montre que les facteurs (degré de maturité et mode de séchage, variables distales) n'agissent pas directement sur les réponses (la couleur et la texture, variables de référence) mais plutôt sur d'autres réponses (composition, propriétés fonctionnelles et mesures physiques, variables proximales) qui, à leur tour, agissent sur les variables de référence. Cette appréhension de la thématique permet la segmentation des variables de cette étude à trois niveaux tels que l'indique la Figure 49 :

1. les variables de références qui sont celles d'intérêt : la couleur et la texture de la pâte, ainsi que les variables qui expriment ces fonctionnalités ;
2. les variables proximales qui sont directement rattachées aux variables de référence. Ici, on distingue deux catégories : les variables compositionnelles et les variables physiques ;
3. Les variables distales qui sont le degré de maturité et le mode de séchage.

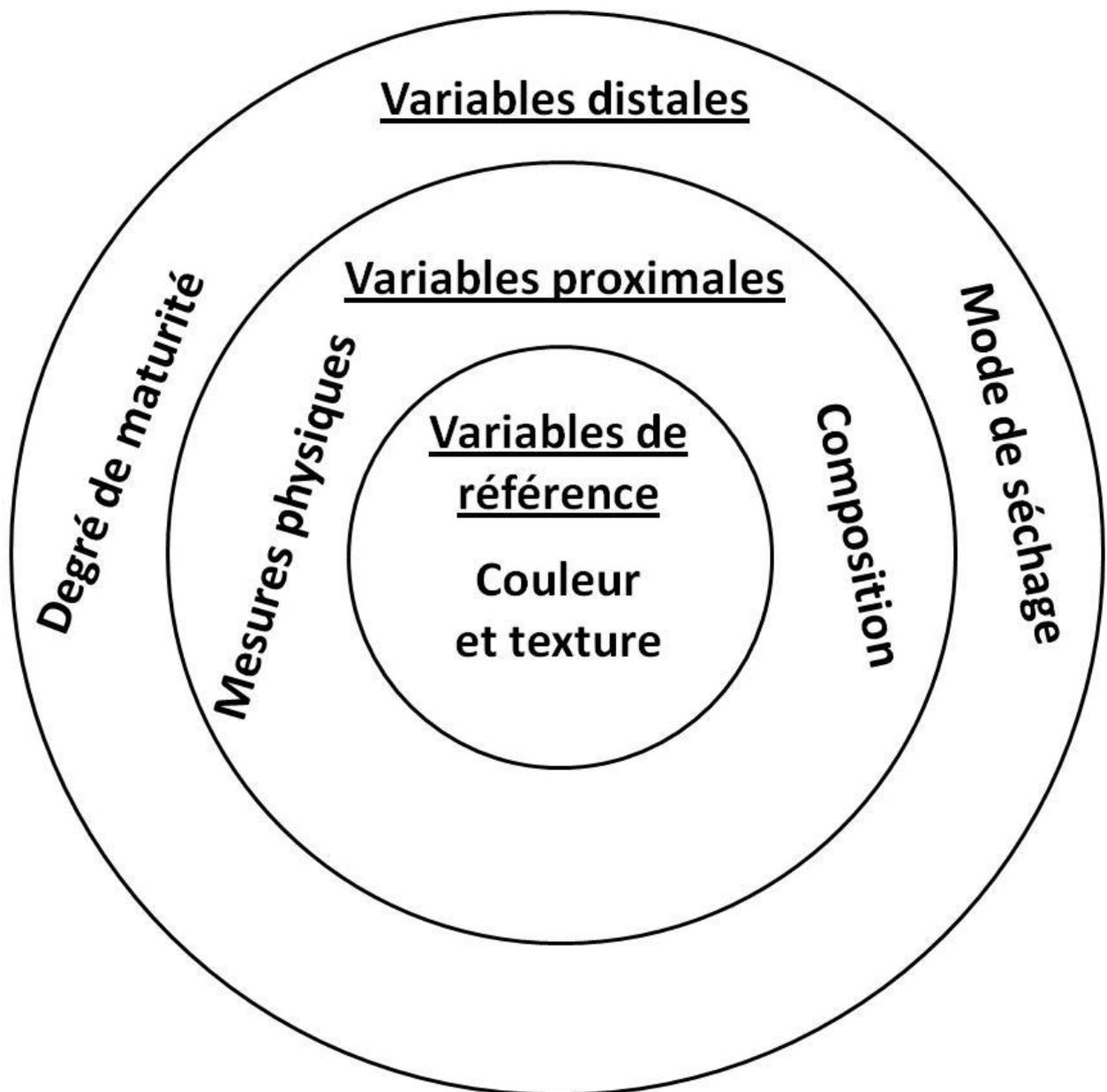


Figure 49: Répartition des variables sur la couleur et la texture des pâtes de taro Sosso

Les indicateurs relatifs à la couleur de la farine ou de la pâte sont les coordonnées L^* , a^* et b^* données par l'instrument. La pertinence de ces variables se

justifie par leur corrélation avec la couleur perçue par les consommateurs. En effet, une relation franche a été observée entre l'observation visuelle de la couleur et l'indice L^* et a^* indicateurs de la blancheur et de la rougeur. La pertinence de la problématique de notre travail se justifie à travers la corrélation significative observée entre l'acceptabilité de la pâte et la couleur. L'acceptabilité de la pâte augmente au fur et à mesure que la pâte blanchit. L'analyse de corrélation indique que plus le degré de maturité augmente, moins le brunissement est intense ; d'autre part, le brunissement est plus important lorsque le séchage est effectué au soleil. Cette variation hautement significative de la couleur avec le degré de maturité et le mode de séchage justifie d'avantage la pertinence de cette étude et du choix des variables. Ces résultats mettent en relief des conditions favorables de brunissement qui varient avec le degré de maturité et le mode de séchage. Mais quelles sont ces conditions ? La réponse à cette question s'appuiera sur les variables proximales influencées par ces deux facteurs. D'une part, les résultats de l'étude montrent que le séchage a très peu d'effet sur la composition des farines, et d'autre part, le mode de séchage entraîne une variation significative de paramètres physiques de la farine. A ce titre, la teneur en protéines, en amidon total, glucides, sucres disponibles, cendres augmentent significativement et de façon linéaire avec le degré de maturité. Pareillement, la teneur en amylose des amidons baisse ($r=-0,98$) alors que la teneur en phosphore augmente ($r=0,99$) significativement avec le degré de maturité. Le sens de la variation compositionnelle avec le degré de maturité ne semble pas être le même pour toutes les plantes. C'est ainsi que des études similaires sur la pomme de terre (Christensen et Madsen, 1996), l'igname (Trèche et Agbor-Egbe, 1996) ou encore la patate douce (Noda *et al.*, 1997) ont montré une augmentation similaire de la composition proximale. En revanche, les études sur l'igname (Huang *et al.*, 2007)

et sur *pachyrhizus ahipa* (Leonel *et al.*, 2005) ont montré plutôt une diminution de la composition proximale. Peut-on au stade actuel conclure sur le sens de la variation de la composition des plantes en général avec le degré de maturité ? Au regard de la dichotomie de comportement observée entre différentes plantes, la réponse est non. Ce qui témoigne de métabolismes variés. Dans le cas du taro Sosso, on peut noter qu'à partir de 6 mois, le métabolisme est très actif dans la plante afin d'accumuler d'avantage d'amidons, de protéines et de minéraux particulièrement le K, Mg, Ca et Na. Sur le plan qualitatif, l'amidon se charge d'avantage du phosphore mais perd de l'amylose tout en conservant sa structure de type « A ».

Contrairement au degré de maturité, le séchage influence principalement les caractéristiques physiques des farines que sont l'angle de repos, l'angle de chute, la densité aérée, la densité compactée, la compressibilité, mais aussi l'indice de blancheur. En effet, l'indice de blancheur, l'angle de repos, l'angle de chute, la densité aérée et la densité compactée sont plus élevés pour les farines issues du séchage électrique, alors que la compressibilité est plus élevée pour le séchage solaire. La couleur des farines est influencée en même temps par le degré de maturité. Il existe ainsi une imbrication étroite de la maturité et du séchage pour aboutir à un degré de brunissement de la farine qui baisse selon que le degré de maturité augmente. Le brunissement observé dans les pâtes est donc déjà amorcé pendant le séchage en liaison avec le degré de maturité et le mode de séchage. Qu'est-ce qui peut ainsi justifier cette coloration des farines ? De nombreuses hypothèses suggèrent une augmentation du brunissement de type Maillard avec le séchage. Le séchage solaire direct est généralement connu pour être sujet à des contaminations diverses. La théorie du brunissement de type Maillard démontre la relation avec des métaux (Cu, Fe) ou de leurs sels (CuO, FeO), les pH alcalins, les

sucre réducteurs ou des composés aminés. Il est notamment connu que les sels ferriques accélèrent la réaction de brunissement d'un facteur 4 à 5 ; de même, les sels de cobalt favorisent la fixation des fonctions amines alors que les sels de manganèse vont inhiber la réaction lorsque celle-ci se déroule en phase aérobie. A ce titre, l'augmentation d'éléments minéraux dans les farines obtenues par séchage solaire pourrait justifier en partie leur couleur brune. Si l'augmentation des métaux peut justifier le brunissement élevé dans les farines à séchage solaire, ceci ne saurait expliquer l'effet du degré de maturité. En effet, les éléments minéraux augmentent avec le degré de maturité alors que le brunissement baisse. Ces observations contradictoires remettent en cause les réactions de Maillard comme principaux responsables de ce brunissement. Parmi les éléments minéraux, le phosphore (dans l'amidon) a montré une augmentation très significative avec le degré de maturité. Le concept de réaction de Maillard a démontré la relation négative qui existe entre les réactions de brunissement et la teneur en phosphore. En effet, la phosphorylation au niveau de la fonction hémiacétale inhibe la réaction de brunissement car, il n'y a plus de possibilité d'ouverture du cycle. Par contre, la phosphorylation d'une autre fonction hydroxylée favorise la réaction de brunissement. De là, on peut mettre en évidence que la vitesse d'hydrolyse du groupement phosphorylé est proportionnelle à celle de la réaction de brunissement. A cet effet, la faible teneur en phosphore à maturité faible (6 mois) ne pourrait justifier le brunissement faible observé à 10 mois de maturité.

Cette contradiction est également observée avec la variation du taux de sucres réducteurs et d'amines libres qui sont corrélés positivement ($r=0,89$ et $r=0,95$ respectivement) au degré de maturité, ou encore la corrélation positive entre l'indice de blancheur et les intermédiaires de Maillard ($r=0,71$). Qu'est-ce qui peut alors

justifier l'augmentation du brunissement de la pâte et de la farine avec le degré de maturité ? Le brunissement d'origine phénolique semble également ne pas justifier la couleur. En effet, il a été observé une corrélation plutôt positive entre la teneur en phénol et l'indice de blancheur des farines ou de la pâte ($r=0,68$). On peut néanmoins penser qu'il existerait une activité polyphénoloxydasique qui serait accélérée par les métaux et donc l'activité/teneur baisse avec le degré de maturité. Cette hypothèse contradictoire à celle proposée par Njintang (2003) se justifierait par le brunissement des farines observé dans le présent travail. Mais, cette activité très lente pendant le tranchage (moins perceptible) s'accélérait pendant le processus de séchage et de cuisson.

Toutefois, il n'est d'aucun doute que les meilleures conditions de récolte et de séchage pour réduire le brunissement sont : maturité avancée (10 mois) et séchage électrique (40°C). Malheureusement, ce séchage contrairement au séchage solaire a le handicap de réduire les propriétés gélifiantes de la pâte permettant ainsi de former un gel à partir de 10% contre 8% pour le séchage solaire. La teneur en composés hydrophiles tels que les protéines et l'amidon a généralement été corrélée à la formation de gel (Xu *et al.*, 2008). Dans le présent travail, une corrélation significative a été observée entre la plus petite concentration gélifiante et la teneur en protéines ($r=-0,79$; $p<0,05$), la teneur en amidon ($r=-0,72$; $p<0,05$), la teneur en amylose ($r=0,78$; $p<0,05$) et la teneur en phosphore ($r=-0,76$; $p<0,05$). Ces résultats montrent bien que les teneurs élevées en protéines, amidon, phosphore tendent à améliorer le pouvoir gélifiant. En revanche, les teneurs en amylose élevées tendent à les réduire. En effet, les concentrations en amylose élevées favorisent la formation de cristaux dans le gel, conduisant à des liaisons intermoléculaires fortes dans l'amidon entraînant une rigidité des gels (Xu *et al.*, 2008). Ces liaisons intermoléculaires

rigides sont rompues par la présence de phosphore, de même que tous les minéraux en général aux regards de la corrélation négative avec les cendres ($r=-0,91$; $p<0,05$). La capacité à former le gel dans la plus part des cas est liée à l'habilité à fixer l'eau (Pomeranz *et al.*, 1977) et à cet effet, nous avons observé une corrélation significative négative entre la plus petite concentration gélifiante et la capacité d'absorption d'eau. Il convient de souligner que le coefficient de corrélation est d'autant plus élevé que la température pour la détermination de la capacité d'absorption d'eau est élevée (r varie de $-0,57$ à $-0,75$).

Un point important à signaler est la corrélation qui existe entre les propriétés physiques des farines et leurs compositions. Ceci démontre que même si le séchage influence essentiellement les propriétés physiques, ces dernières varient également avec la composition des farines, témoignant ainsi de l'interférence qui existe entre les différentes variables proximales. A ce titre, une corrélation significative positive a été observée entre l'angle de repos ou de chute et la teneur en amidons ($r=0,79$; $p<0,05$) et en cendres ($r=0,75$; $p<0,05$), la compressibilité et la teneur en amidon total ($r=0,52$; $p<0,05$) ou de cendres ($r=0,40$; $p<0,05$). On ne saurait donc, au regard de ces interférences présenter les effets des facteurs séchage et degré de maturité de façon dissociée, ou encore séparer les facteurs physiques des facteurs compositionnels. Dans le même ordre d'idées, on ne saurait dissocier les propriétés texturales de la pâte à sa couleur. En effet, une corrélation significative (positive pour certains, négative pour d'autres) a été observée entre les coordonnées L^* , a^* et b^* de la couleur et les paramètres du profil de texture comme la dureté, la cohésion l'adhésivité, l'élasticité et la masticabilité (Tableau 21).

Tableau 21 : Corrélation entre les paramètres de la couleur et du profil de texture des pâtes de taro Sosso

| | L* | a* | b* | Du | Co | Ad | EI | Gu | Ma |
|----|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|----------|
| L* | 1 | | | | | | | | |
| a* | -0,92 | 1 | | | | | | | |
| b* | -0,34 | 0,22 | 1 | | | | | | |
| Du | -0,66 | 0,71 | 0,05 | 1 | | | | | |
| Co | 0,72 | -0,74 | -0,10 | -0,98 | 1 | | | | |
| Ad | 0,65 | -0,70 | -0,05 | -0,99 | 0,98 | 1 | | | |
| EI | -0,70 | 0,74 | 0,04 | 0,99 | -0,99 | -0,99 | 1 | | |
| Gu | -0,51 | 0,62 | -0,01 | 0,96 | -0,89 | -0,94 | 0,92 | 1 | |
| Ma | -0,64 | 0,71 | 0,02 | 0,99 | -0,97 | -0,99 | 0,99 | 0,97 | 1 |

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,05$ (test bilatéral); L : Indicateur de la blancheur ; a* : Indicateur de la rougeur ; b* : Indicateur du jaunâtre ; Du : dureté ; Co : cohésion ; Ad : Adhésivité ; EI : Elasticité ; Gu : Guiminness ; Ma : masticabilité.*

Si on peut énoncer l'hypothèse actuelle que les conditions favorables au brunissement dans les pâtes de taro Sosso en maturité faible, ou en séchage solaire sont la présence d'enzyme polyphénol oxydase et les éléments minéraux, il serait aussi judicieux de comprendre le comportement textural des pâtes dans les différentes conditions. En effet, la dureté et l'élasticité baissent avec le degré de maturité ($r=-0,91$; $p<0,05$) alors que la cohésion et l'adhésion des pâtes augmentent avec le degré de maturité ($r=0,97$; $p<0,05$). En revanche, la texture ne semble pas montrer de variation consistante avec le mode de séchage. L'effet du degré de maturité serait probablement lié à l'effet du profil de gélatinisation des différentes farines. En effet, une augmentation de la température de gélatinisation des amidons a été associée à l'augmentation de la dureté ($r= -0,95$) et l'élasticité ($r= -0,96$), et

inversement à une augmentation de l'adhésivité ($r=0,96$) et de la cohésion ($r=0,95$). Évidemment, le profil de gélatinisation des amidons est directement lié à la variation de la teneur en amidon ainsi qu'à la variation de la teneur en amylose dont des corrélations significatives ont été observées.

En conclusion, les coordonnées L^* , a^* et b^* et l'observation à l'œil nu indiquent bien les variations de la couleur dans le sens contraire comparativement aux sucres réducteurs, amines libres et composés phénoliques qui suggéraient une augmentation de brunissement de type Maillard avec le degré de maturité. Il est donc très probable que même si les réactions de Maillard et celles des composés phénoliques puissent intervenir dans le brunissement du taro Rosso, elles seraient faibles, comparées à celle qui induit le brunissement dans le sens contraire. Mais, le mécanisme semble encore indéterminé. Il est probable qu'un phénol spécifique soit responsable de ce brunissement.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Au terme de ce travail dont l'objectif général était de caractériser la farine et l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage, il en ressort que la composition biochimique des farines de taro (variété Sosso) dépend du degré de maturité.

Les tubercules récoltés à maturité tardive (10 mois) possèdent une teneur élevée en cendres (minéraux), protéines (acides aminés et protéines solubles) et sucres disponibles. Les minéraux les plus abondants sont le potassium, le magnésium, le calcium et le sodium et ils augmentent significativement ($p < 0,05$) en fonction du degré de maturité. La teneur en oxalates totaux et en fibres brutes des farines de taro Sosso augmentent significativement ($p < 0,05$) avec le degré de maturité.

Le rendement d'extraction de l'amidon et le taux des amidons totaux augmentent avec le degré de maturité. Le gonflement et la capacité d'absorption d'eau des amidons de taro Sosso augmentent avec le degré de maturité. Le degré de maturité entraîne une augmentation significative ($p < 0,05$) de la teneur en phosphore et une diminution du taux d'amylose des amidons de taro Sosso.

Les températures de début et de pic de gélatinisation des amidons ainsi que le flux d'énergie libérée au cours du changement d'état sont élevés à 10 mois de degré de maturité.

L'amidon de taro Sosso est de Type-A et ne change pas comme sa cristallinité au cours de la maturité.

La capacité d'absorption d'eau et l'indice de solubilité des farines de taro Sosso augmentent significativement ($p < 0,05$) en fonction du degré de maturité et de la température. Le gonflement et le pouvoir gélifiant, exprimés en PPCG, augmentent

avec le degré de maturité.

Le séchage influence plus les paramètres physiques que sont les propriétés de coulement qui sont plus élevées avec le séchage électrique. De même, les cendres, augmentent dans le cas du séchage solaire.

Les coordonnées de la couleur sont influencées par le degré de maturité et le mode de séchage. L^* augmente significativement ($p < 0,05$) avec le degré de maturité pendant que a^* diminue.

Les températures de début, de pic, de fin et l'enthalpie de gélification des farines augmentent significativement ($p < 0,05$) avec le degré de maturité.

La teneur en sucres réducteurs, amines libres, phénols totaux, les indices des produits intermédiaires de la réaction de Maillard et les indices de la réaction avancée de Maillard augmentent significativement ($p < 0,05$) avec le degré de maturité.

Les caractéristiques sensorielles des pâtes de taro Sosso varient significativement ($p < 0,05$) en fonction du degré de maturité et du mode de séchage. L'acceptabilité générale des pâtes de taro Sosso est fortement corrélée à la couleur de celles-ci.

Les pâtes de taro Sosso les plus appréciées sont celles de dix mois de maturité. Les pâtes de taro Sosso issues du séchage électrique sont les mieux acceptées quel que soit le degré de maturité.

La dureté, l'élasticité, la masticabilité, la cohésion, l'adhésivité et le guinness des pâtes de taro Sosso sont influencés significativement ($p < 0,05$) par le degré de maturité.

Un séchage électrique (40°C) et dix mois de maturité sont les conditions

idéales pour l'obtention d'une pâte de taro Sosso moins brunie.

Bien que les résultats de notre travail nous ont permis de caractériser la farine et l'amidon de taro Sosso en fonction du degré de maturité et du mode de séchage d'une part, de déterminer le degré de maturité et le mode de séchage pour lesquels le brunissement est moindre dans la pâte de taro Sosso d'autre part, il serait indispensable dans le cadre de la résolution du problème:

- de déterminer le profil des composés phénoliques au cours de la maturité ;
- de tester un séchage solaire indirect afin d'éviter les contaminations extérieures.

Il serait également intéressant de procéder à un test d'incorporation de la farine de taro Sosso en panification compte tenu de sa capacité d'absorption d'eau élevée.

Compte tenu de sa teneur élevée en phosphore et des bonnes propriétés gélifiantes, il serait utile de faire des essais d'application de l'amidon de taro Sosso comme épaississant pour une utilisation industrielle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- AACC (American Association of Cereal Chemists). (1999).** Soluble, Insoluble, and Total Dietary Fiber in Foods and Food Products. (*Megazyme Amyloglucosidase/a-Amylase Method*).
- Aboubakar (2009).** Optimisation des paramètres de production et de conservation de la farine de taro (*Colocasia esculenta*). Thèse ENSAI/ Université de Ngaoundéré, 211 p.
- 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*, 86, 294–305.
- Ahromrit, A. & Nema, K. P. (2010).** Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro. *Journal of Food Science and Technology* 47, 632–637.
- Akissoe, N., Hounhouigan, J., Mestres, C. & Nago, M. (2003).** How blanching and drying affect the colour and functional characteristics of yam (*Dioscorea cayenensis rotundata*) flour. *Food Chemistry*, 82, 257–264.
- Akpan, E. J. & Umoh, I. B. (2004).** Effect of Heat and Tetracycline Treatments on the Food Quality and Acidity Factors in Cocoyam [*Xanthosoma sagittifolium* (L) Schott]. *Pakistan Journal of Nutrition*, 3 (4): 240-243.
- Akubor, P. I. (2005).** Effects of defatting on chemical, functional and storage properties of melon (*Colocynthis citrullus*) seed flour. *Journal of Food Science and Technology*, 42, 472–474.
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M. & Magee T. R. A. (2004).** Water sorption

isotherms of starch powders Part 1: Mathematical description of experimental data. *Journal of Food Engineering*, 61, 297–307.

Amiot, M. J., Aubert, S. & Nicolas, J. (1993). Phenolic composition and browning susceptibility of various apple and pear varieties at maturity. *Acta horticulturae*, 343, 67-68.

Amiot, M. J., Tacchini, M., Aubert, S. & Nicolas, J. (1992). Phenolic composition and **browning** susceptibility of various apple and pear varieties at maturity. *Journal of Food Science*, 57 (4), 958-962.

Ammar, M. S., Hegazy, A. E. & Bedeir, S. H. (2009). Using of Taro Flour as Partial Substitute of Wheat Flour in Bread Making. *World Journal of Dairy & Food Sciences* 4, 94-99.

Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeiffer, V. F. & Griffin, E. L. (1969). Roll and extrusion cooking of grain sorghum grits. *Cereal Science Today*, 14, 372-375.

Angellier, H. (2005). Nanocristaux d'amidon de maïs cireux pour applications composites. Thèse présentée pour l'obtention du titre du Docteur en Sciences et Génie des Matériaux de L'Université Joseph Fourier – Grenoble 1, pp 285.

AOAC (1990). 15th edition, Association of Official Analytical Chemists, Washington, D. C.

AOAC (1999). Official Methods of Analysis of AOAC international, 16th Ed.

AOAC (2000). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.

Aprianita, A. (2010). Assessment of underutilized starchy roots and tubers for their applications in the food industry. A thesis submitted in fulfillment of the

requirements of the degree of Master of Science. School of Biomedical and Health Sciences Victoria University, Werribee Campus, Victoria, Australia, pp 137.

Asaoka, M., Blanshard, J. M. V. & Rickard, J. E. (1992). Effect of cultivar and growth season on the gelatinisation properties of cassava (*Manihot esculenta*) starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 59, 53-58.

Bagot, J. D. (1999). *Information, sensation et perception*, Paris, Armand Colin.

Baldet, P. (2004). La mesure de l'activité de l'eau appliquée au contrôle de l'état de l'état hydrique du pollen et des graines d'arbres forestiers. http://www.inh.fr/rencontresduvegetal/s1_baldet.pdf P.Baldet, accédé le 02 avril 2011.

Barichello, V., Yada, R. Y., Coffin, R. H. & Stanley, D. W. (1990). Low temperature sweetening in susceptible and resistant potatoes: starch structure and composition. *Journal of Food Science*, 54, 1054–1059.

Barreiro, J. A., Milano, M. & Sandoval, A. J. (1997). Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 33, 359-371.

Bell, A., Mück. O. & Schuler, B. (2000). Les richesses du sol. Les plantes à racines et tubercules en Afrique : une contribution au développement des technologies de récolte et d'après-récolte. Edité par la FAO. GTZ, DES. 330 p.

Bell, L. N. & Labuza, T. P. (2000). Practical aspects of moisture sorption isotherm measurement and use, 2nd ed. AACC Egan Press, Egan, MN.

BeMiller, J. N. & Whistler, R. L. (1997). Carbohydrate, in Food chemistry, Ed. By Owen R. Fennema. Ohio state, Columbus. pp 157-223.

- Biliaderis, C. G. & Seneviratne, H. D. (1992).** On the supermolecular structure and metastability of glycerol monostearate–amylose complex. *Carbohydrate Polymers*, 13. pp 185.
- Biliaderis, C. G. (1990).** Thermal analysis of food carbohydrates, in Thermal analysis of foods (Eds. V.R.Harwalker, C.Y. Ma) Elsevier Science Publishers Ltd, Essex, pp. 168-220.
- Bletz J. A. & Wall J. S. (1980).** Identify of high molecular weight gliadin and ethanol-soluble glutenin subunits of wheat, relation to gluten structure, *Cereal Chemistry*, 57 (6): 415-421.
- Bourelly, J. (1982).** **Observation** sur le dosage de l'huile des graines de cotonnier. *Cot. Fit. Trop.*, 27(2): 183-196.
- Bourne, M. C. (1968).** Texture profile of ripening pears. *Journal of Food Science*, 33, 223–226.
- Buléon, A., Colona, P. & Leloup, V. (1990).** Les amidons et leurs dérivés dans les industries des céréales. *IAA*, 515-532.
- Buléon, A., Colona, P., Leloup, V. & Balls, S. (1998).** Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23 (2) 85-112.
- Caburet A., Lebot V., Raillaud P. & Vernier P. (2006, 2007).** Les autres plantes amylacées. *In: Mémento de l'agronome*. CIRAD/GRET, Jouve, Paris, France, pp. 831-864.
- Cain, J. (2002).** An alternative technique for determining ANSI/CEMA standard 550 flowability ratings for granular materials. *Powder Handling and Processing*, 14(3), 218–220.
- Capuano, E., Ferrigno, A., Acampa, I., Ait-Ameur, L. & Fogliano, V. (2008).**

Characterization of the Maillard reaction in bread crisps. *European Food Research and Technology*, 228 (2), 311–319.

Carcea, M. & Acquistucci, R. (1997). Isolation and physicochemical characterization of Fonio (*Digitaria exillis* Stapf). *starch. Starch*, 49,131–135.

Chavan, U. D., Mc Kenzie, D. B. & Shahidi, F. (2001). Protein classification of beach pea (*Lathyrus maritimus L.*). *Food Chemistry*, 75, 145-153.

Cheftel J. C., Cheftel H. & Besançon P. (1983). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Volume 2. Techniques et documentation, 4^{ème} édition. Lavoisier. Paris. 420 p.

Cheftel, J. C & Cheftel, H. (1977). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, tome1. *Techniques et Documentation. Lavoisier.* 271-280.

Cheftel, J. C., Cuq, J. L. & Loriend, D. (1985). Protéines alimentaires: Biochimie-Propriétés Fonctionnelles-Valeur Nutritionnelle-Modifications Chimiques. *Techniques et Documentation. Lavoisier*, 309 p.

Cheftel. J. C. & Cheftel. H. (1984). In Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, Vol 1, Chapitre 1, *Techniques et Documentation Lavoisier*, Paris, pp 6-22 ; 303-332.

Chen, C. & Jayas, D. S. (1998). Evaluation of the GAB equation for the isotherms of agricultural products. *Transactions of the ASAE*, 41, 1755–1760.

Chen, H. I., Sheu, W. H. H., Tai, T. S., Liaw, Y. P. & Chen Y. C. (2003). Konjac supplement alleviated hypercholesterolemia and hyperglycemia in type 2 diabetic subjects - a randomized double-blind trial. *Journal of the American College of Nutrition*, 22, 36-42.

Chiang, P. Y., Li, P. H., Huang, C. C. & Wang, C. C. R. (2007). Changes in functional characteristics of starch during water caltrop (*Trapa Quadrispinosa*

Roxb.) growth. *Food Chemistry*, 104, 376-382.

Chotineeranat, S., Suwansichon, T., Chompreeda, P., Piyachomkwan, K., Vichukit, V., Sriroth, K. & Haruthaithanasan, V. (2006). Effect of Root Ages on the Quality of Low Cyanide Cassava Flour. *Kasetsart Journal (Natural Science)*, 40: 694 - 701.

Christensen, D. H. & Madsen, M. H. (1996). Changes in potato starch quality during growth. *Potato Research*, 39, 43–50.

CIE (1976). Official recommendations on uniform colour spaces colour differences equations and metric colour terms. Supplement N°2 to CIE publication, N°15, Paris, France.

Coffman, C. W. & Garcia, V. V. (1977). Functional properties and amino acid content of protein isolate from mung bean flour. *Journal of Food Technology*, 12, 473-484.

Condotta, R. (2005). Coulabilité des poudres cohésives : mesures aux faibles contraintes, granulaires humides et application à une poudre industrielle. Thèse *I.N.P.T.*, 235 p.

Contreras-Padilla, M., Pérez-Torrero, E., Hernandez-Urbiola, M. I., Hernandez-Quevedo, G., Real, A., Rivera-Munoz, E. M. & Rodriguez-Garcia, M. E. (2011). Evaluation of oxalates and calcium in nopal pads (*Opuntia ficus-indica* var. *redonda*) at different maturity stages. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 38-43.

Coussot, P. & Grossiord, J. L. (2001). *Comprendre la rhéologie, de la circulation du sang à la prise du béton*. EDP Sciences, 221p.

Cui, S. W. (2005). Understanding starch and their role in foods. In S.W. Cui (Ed.), *Food Carbohydrates: Chemistry, Physical properties, and Applications* (pp

310-349). Florida.CRC Press.

Da Costa, C. J. M. (1997). Contribution à l'étude des propriétés rhéologiques des farines de blé. In fluence de la composition, de l'hydratation et de la distribution granulométrique des particules. Thèse *I.N.P.L.*, 174 p.

Danien, C. & Roudot, A. C. (2007). La terminologie de la texture des aliments. *Meta : Journal des traducteurs*. 52-2, pp. 342-351.

Delpeuch, F. & Favier, J. C. (1980). Characteristics of starches from tropical food plants; α -amylase hydrolysis, swelling and solubility patterns. *Ann. Technol. Agric.*, 29, 53-67.

Delpeuch, F., Favier, J. C. & Charbonniere, R. (1978). Caractéristiques des amidons de plantes alimentaires tropicales. *Ann. Technol. Agric.* 27, 4, 809-826.

Depledt, F. & SSHA (2009). Evaluation sensorielle : manuel méthodologique. Paris : Lavoisier, 3ème édition, 524 pages (*collection Sciences & Techniques agroalimentaires*). <http://www.lavoisier.fr/notice/fr285023.html>

Devani, M. B., Shiohoo J. C., Shal S. A. & Suhagia B. N. (1989). **Spectrophotometrical** method for micro determination of nitrogen in Kjeldahl digests. *J. Assoc. Off. Analy. Chem.*, 72(6), 953-956.

Devaux, M. F., Le Deschault de Monredon, F., Guilbert, D., Novales, B. & Abecassis, J. (1998). Particle size distribution of break, sizing and middling wheat flours by laser diffraction. *Journal Science Food Agriculture*, Vol. 78, 237-244.

Donovan, J. W. (1979). Phase transitions of the starch-water system. *Biopolymers*, 18, 263-275.

Du, C.-J. & Sun, D.-W. (2004). Recent developments in the application of image

processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science and Technology*, 15, 230e249.

Eerlingen, R. C., Jacobs, H., Block, K. & Delcour, J. A. (1995). Effects of hydrothermal treatments on the rheological properties of potato starch. *Carbohydrate Research*, 297, 347-356.

Eliasson, A. C. & Gudmundsson, M. (1996). Starch: Physicochemical and functional aspects. In A. C. Eliasson (Ed.). *Carbohydrates in food* (pp. 31–503). New York: Marcel Dekker.

Erbas, M., Ertugay, M. F. & Certel, M. (2005). Moisture Adsorption Behaviour of Semonila and Farina. *Journal of Food Engineering*, 68,191–198.

FAO (2008). FAO **Statistics** Division. <http://www.faostat.fao.org/site/535/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor> [accessed June 12, 2010]. Consulté le 27 février 2011.

FAO. (1985). Energy and protein requirements. In *Report of a joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation, WHO Technical reports series No. 724*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2006). Cassava processing-utilization of cassava products. <http://www.fao.org/docrep/X5032E/x5032E06.html>. Consulté le 23 septembre 2010.

FAO. (2007). FAOSTAT On-line. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization. <http://faostat.fao.org/default.aspx>. Consulté le 12 mars 2011.

Farombi, E. O., Britton, G. & Emerole, G. O. (2000). Evaluation of the antioxidant activity and partial characterization of extracts from browned yam flour diet. *Food Research International*, 33, 493–499.

Feng, H. & Tang, J. (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted

bed. *Journal of Food Science*, 63, 679-683.

Fiagan, S. Y. (2007). Première rencontre des projets de développement des plantes racines et tubercules du FIDA en Afrique de l'Ouest et du Centre. *Les utilisations du monde*. Yaoundé Novembre 2007.

Fisher, E. H. & Stein, E. A. (1961). DNS colorimetric determination of available carbohydrates in foods. *Biochemical Preparation*. 8, 30–37.

Fitzpatrick, J. J. & Ahrne L. (2005). Food powder handling and processing: Industry problems, knowledge barriers and research opportunities. *Chem Eng Process*, 44, 209–214.

Gaiani, C., Boyanova, P., Hussain, R., Murrieta Pazos, I., Karam, M. C., Burgain, J. & Scher, J. (2011). Morphological descriptors and colour as a tool to better understand rehydration properties of dairy powders. *International Dairy Journal*, 21, 461-469.

Geddes, R., Greenwood, C. T. & Mackenzie, S. (1965). Studies on the biosynthesis of starch granules. Part III. The properties of the components of starches from the growing potato tuber. *Carbohydrate Research*, 1, 71–82.

Gherghel, A., Klaus, M. & Burzo, I. (1999). *Valorificarea fructelor proaspete*, Editura Ceres, București, 132-152.

Goni, I., Garcia-Alonso, A. & Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research* 17 (3): 427–437.

Graindorge P. (1992). Contribution à l'étude par analyse des données des modes d'action des additifs d'écoulement pulvérulents en mélange avec des poudres alimentaires. Thèse ENITIAA, Nantes.

Gunaratne, A. & Hoover, R. (2002). Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches.

Carbohydrate Polymers 49, 425–437.

Hendel, C. E., Bailey, G. F. & Taylor, D. H. (1950). Measurement of non-enzymatic browning of dehydrated vegetables during storage. *Journal Food Technology*, 4, 344-346.

Himeda, M. (2004). Etude physico-chimique et sensorielle des farines et biscuits à base de farines composées taro-blé. Mémoire du DEA en Sciences Alimentaires et Nutrition, ENSAI, Université de Ngaoundere, pp 83.

Himeda, M., Njintang Y. N., Nguimbou. R. M, Gaiani, C., Facho, B., Scher, J. & Mbofung C. M. F. (2012a). Physicochemical, Microstructure, Rheological and Thermal properties of taro (*Colocassia esculenta*) starch harvested at different maturity stages. *International Journal of Biosciences*, 2, 14-27.

Himeda, M., Njintang Y. N., Gaiani, C., Nguimbou R. M, Facho, B., Scher, J. Mbofung C. M. F. (2012b). Physico-chemical and thermal properties of sosso-taro (*Colocasia esculenta sp*) powders as affected by state of maturity and drying method. *Journal of Food Science and Technology*, DOI 10.1007/s13197-012-0697-9.

Hodgkinson, A. (1977). Oxalic acid in Biology and Medecine, Academic London.

Hoover, R. & Sosulski, F., 1986. Effect of cross linking on function properties of legume. *Starches/Stärke*. 38, 149–155.

Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 45, 253–267.

Horton, Moran, Ochs, Rawn & Scrimgeour (1994). *Principes de Biochimie*. Ed. DeBoeck Universités.

Hounhouigan, D. J. & Akissoe, H. N. (1997). Diagnostic des systèmes techniques de transformation de l'igname en cossettes séchées au Bénin. In *L'igname*,

Plante Séculaire et Culture d'Avenir. Actes du Séminaire International, Cirad-Inra-Orstom-Coraf, Montpellier Cirad, Montpellier, Berthaud, J. Bricas, N., Marchand, J.-L., Eds. pp 349-351.

Hounhouigan, D. J., Kayode, A. P., Bricas, N. & Nago, M. C. (2003). Les caractéristiques culinaires des ignames recherchées en milieu urbain au Bénin. *Les Annales des Sciences Agronomiques du Bénin* 4, 143–160.

Hsu, C-L., Chen, W., Weng, Y-M. & Tseng, C-Y. (2003). Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods. *Food Chemistry*, 83, 85–92.

Hsu, S., Lu, S. & Huang, C. (2000). Viscoelastic changes of rice starch suspensions during gelatinization. *Journal of Food Science*, 65, 215–220.

Huang, A. S., Titchenal, C. A. & Meilleur, B. A. (2000). Nutrient composition of taro corms and breadfruit. *Journal of Food Composition Analysis*, 13, 859–864.

Huang, C. C., Chen, W. C. & Wang, C. C. R. (2007). Comparison of Taiwan paddy- and upland-cultivated taro (*Colocasia esculenta* L.) cultivars for nutritive values. *Food Chemistry*, 102, 250-256.

Huang, C. C., Chiang, P. Y., Chen, Y. Y. & Wang, C. C. R. (2007). Chemical compositions and enzyme activity changes occurring in yam (*Dioscorea alata* L.) tubers during growth. *Lebensmittel Wissenschaft & Technologie*, 40, 1498–1506.

Huang, C. J., Lin, M. C. & Wang, C. R. (2006). Changes in morphological, thermal and pasting properties of yam (*Dioscorea alata*) starch during growth. *Carbohydrate Polymers*, 64, 524–531.

Hussain, M., Norton, G. & Neale, R. J. (1984). Composition and nutritive value of cormels of *Colocasia esculenta* (L.) Schott. *Journal of the Science of Food*

and Agriculture, 35 (10), 1112-1119.

Imberty, A., Buléon, A., Tran, V. & Pérez, S. (1991). Recent advances in knowledge of starch structure, *Starch/Stärke*, 43 (10), 375-384.

Iturriaga, L., Beatriz, L. & Maria, A. (2004). Thermal and physicochemical characterization of seven argentine rice flours and starches. *Food Research International*, 37, 439–447.

Ivancic, A. & Lebot, V. (2000). The genetics and breeding of taro. CIRAD, (Edition) Paris, France, 194 p.

Jamin, F. F. & 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.

Jane, J. L. (2006). Current understanding on starch granule structures. *Journal of Applied Glycoscience*, 53, 205–213.

Jane, J., Shen, L., Chen, J., Lim, S., Kasemsuwan, T. & Nip, W.K. (1992). Physical and Chemical studies of taro starches and flours. *Cereal Chemistry*, 69(5): 528-535.

Jane, J., Wong, K. S. & McPherson, A. E. (1997). Branch-structure difference in starches of A and B type X-ray patterns revealed by their Naegali dextrans. *Carbohydrate Research*, 300, 219-227.

Jannot, Y. (2008). **Isothermes** de sorption: Modèles et détermination. Référence URL : <http://www.thermique55.com/principal/sorption.pdf>, accédé le 19 mars 2011.

John, J. K. (1999). Studies on physico-chemical and functional properties of *Dioscorea* (sp) starches. Ph. D. Thesis, Kerala University, Trivandrum.

Jones, D. M., Trim, D. S. & Wheatley, C. C. (1996). Improving processing

technologies for high quality cassava flour. *In* D. Dufour, G. M. O' Brien, R. Best, (eds.). *Cassava Flour and Starch: Progress in Research and Development*. International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Columbia. 409 p.

Judprasong, K., Charoenkiatkul, S., Sungpuag, P., Vasanachitt, K. & Nakjamanong, Y. (2006). Total and soluble oxalate contents in Thai vegetables, cereal grains and legume seeds and their changes after cooking. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19, 340–347.

Kaptso, K. G. (2009). Potentiel technologique des farines de niebe (*Vigna unguiculata*) et de voandzou (*Vigna subterranea*) pour la preparation du koki (gâteau de pâte cuite à la vapeur). Thèse ENSAI/ Université de Ngaoundéré, 266 p.

Karaj, S. & Müller, J. (2010). Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of *Jatropha curcas* L. *Ind Crops Prod*, 32, 129–138.

Katayama, K., Komae, K., Kohyama, K., Kato, T., Tamiya, S. & Komaki, K. (2002). New sweet potato line having low gelatinisation temperature and alters starch structure. *Starch*, 54, 51-57.

Kaur, A., Singh, N., Ezekiel, R. & Guraya, H. S. (2007). Physicochemical, thermal and pasting properties of starches separated from different potato cultivars grown at different locations. *Food Chemistry*, 101, 643–651.

Kaur, M., Kaushal, P. & Sandhu, S. K. (2011). Studies on physicochemical and pasting properties of Taro (*Colocasia esculenta* L.) flour in comparison with a cereal, tuber and legume flour. *Journal of Food Science and Technology* DOI 10.1007/s13197-010-0227-6.

- Kethireddipalli, P., Hung, Y.-C., McWatters, K. H. & Phillips, R. D. (2002).** Effect of milling method (wet and dry) on the functional properties of cowpea (*Vigna unguiculata*) pastes and end product (akara) quality. *Journal of Food Science*, 67(1): 48-52.
- Ketiku A. O. & Oyenuga V. A. (1973).** Changes in carbohydrate constituents of yam tuber (*Dioscorea rotundata* Poir) during growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 24, 367-373.
- Kolbe, H. & Stephan-Beckmann, S. (1997).** Development, growth and chemical composition of potato crop (*Solanum tuberosum* L.) II. Tuber and whole plant. *Potato Research*, 40, 135–153.
- Kroll, J., Rawell, H. M. & Seidelmann, N. 2000.** Physicochemical properties and susceptibility to proteolytic digestion of myoglobin-phenol derivatives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 1580-1587.
- Kurup, G. T. & Nanda, S. K. (1994).** Storage and drying systems, in *Advances in horticulture*, Vol. 8 (Eds. K. L. Chadha, G. G. Nair) Malhotra Publications, New Delhi, 589-607.
- Labuza, T. P. (1975).** Interpretation of sorption data in relation to the state of constituent water. In R. Duckworth (Ed.), *Water relations in foods*. New York: Academic Press pp. 155–172.
- Laroque, D., Inisan, C., Berger, C., Vouland, E., Dufossé, L. & Guérard, F. (2008).** Kinetic study on the Maillard reaction. Consideration of sugar reactivity. *Food Chemistry*, 111, 1032-1042.
- Lee, C.Y., Kagan, V., Jaworski, A. W. & Brown, S. K. (1990).** Enzymatic browning in relation to phenolic compounds and polyphenoloxidase activity among various peach cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 38, 99-

101.

- Lee, H. S. & Coates, G. A. (1999).** Thermal pasteurisation effects on colour of red grapefruit juices. *Journal of Food Science*, 64, 663-666.
- Leonel, M., Ferrari, T. B., Sarmiento, S. B. S. & Oliveira, M. A. (2005).** Planting time, developmental stages and characteristics of roots and starch of *Pachyrhizus ahipa*. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)*, 62, 6, 528-533.
- Lim, S. T., Kasemsuwan, T. & Jane, J. L. (1994).** Characterization of phosphorus in starch by ³¹P nuclear magnetic spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 71, 468-472.
- Lisinska, G. & Leszczynski, W. (1989).** Potato science and technology. London, UK: *Elsevier Applied Science*, pp. 16–43 and 166–233.
- Liu, Q., Charlet, G., Yelle, S. & Arul, J. (2002).** A study of phase transition in the starch-water system. I. Starch gelatinization at high moisture level. *Food International*, 35, 397–407.
- Liu, Q., Weber, E., Currie, V. & Yada, R. (2003).** Physicochemical properties of starches during potato growth. *Carbohydrate Polymers*, 51, 213–221.
- Lowry, O. R., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. & Randall R. J. (1951).** Protein measurement with the folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193-265.
- Lu, T-J., Lin, J-H., Chen, J-C. & Chang, Y-H. (2008).** Characteristics of taro (*Colocasia esculenta*) starches planted in different seasons and their relations to the molecular structure of starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 2208–2215.
- Lyonga, S. N. (1973).** Tubercules et plantes à racines. I.R.A.T. Rapport synthétique. Cameroun.

- Madsen, M. H. & Christensen, D. H. (1996).** Changes in viscosity properties of potato starch during growth. *Starch/Stärke*, 48, 245–249.
- Maillard, L. C. (1912).** Action des acides aminés sur les sucres: formation des mélanoidines par voie méthodique. *C R Hebd. Séances Acad. Sci.*, 154, 66-68.
- Malmbergrand, A. G. & Theander, O. (1985).** Determination of chlorogenic acid in potato tubers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 33, 549-551.
- Malone, J. G., Mittova, V., Ratcliffe, R. G. & Kruger, N. J. (2006).** The response of carbohydrate metabolism in potato tubers to low temperature. *Plant Cell Physiol.*, 47(9), 1309-1322.
- Manner, H. I. & Taylor, M. (2010).** Farm and Forestry Production and Marketing Profile for Taro (*Colocasia esculenta*). In: Elevitch, C.R. (ed.). Specialty Crops for Pacific Island Agroforestry. Permanent Agriculture Resources (PAR), Holualoa, Hawai'i. <http://agroforestry.net/scps>.
- Marigo, G. (1973).** Méthode de fractionnement et d'estimation des composés phénoliques chez les végétaux. *Analysis* 2, 106-110.
- Marquez, G. & Anon, M. C. (1986).** Influence of reducing sugars and amino acids in the color development of fried potatoes. *Journal of Food Science*, 51(1), 157–160.
- Maskan, M. (2001).** Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 169-175.
- Mathlouti, M. (2001).** Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control*, 12, 409-417.
- Matthews, P. (2004).** Genetic diversity in taro, and the preservation of culinary knowledge. *Ethnobotany Journal*, 2 (1547), 55–77.

- Mazza, G., Hung, J. & Dench, M. J. (1983).** Processing/ nutritional quality changes in potato tubers during growth and long term storage. *Can. Inst. Food Sci. Technol.* 16, 39-44.
- Mbofung, C. M. F., Aboubakar, Njintang, Y. N., Abdou Bouba, A. & Balaam, F. (2006).** Physicochemical and functional properties of six varieties of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flour. *Journal of Food Technology*, 4, 135–142.
- Mc Grance, S. J., Cornell, H. J. & Rix, J. C. (1998).** A simple and rapid colorimetric method for the determination of amylose in starch products. *Starch/Stärke*, 50, 158-163.
- Medoua N. G. J. M. (2005).** Potentiels nutritionnel et technologique des tubercules durcis de l'igname *Dioscorea dumetorum* (Kunth) pax : Etude du durcissement post récolte et des conditions de transformation des tubercules durcis en farine. Thèse ENSAI/ Université de Ngaoundéré, 229 p.
- Mitch, E. L. (1984).** Potato starch: Production and uses. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller, & E. F. Paschall (Eds.), *Starch: Chemistry and Technology* (pp. 479–490). New York: Academic Press.
- Monje, P. V. & Baran, E. J. (2002).** Characterization of calcium oxalates generated as biominerals in cacti. *Plant Physiology*, 128, 707–713.
- Moorthy, S. N., Thankamma Pillai, P. K. & Unnikrishnan, M. (1993).** Variability in starch extracted from taro. *Carbohydr. Polym*, 20, 169-173.
- Moorthy, S. N., Wenham, J. E. & Blanshard, J. M. V. (1996).** Effect of solvent extraction on the gelatinization properties of starch and flour of five cassava varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 72, 329-336.
- Moorthy, S.N. (2002).** Physicochemical and functional properties of tropical tuber

starches. A review. *Starch/Stärke*, 54, 559–592.

Morales, F. J., Açar, Ö. Ç., Serpen, A., Arribas-Lorenzo, G. & Gökmen, V. (2007).

Degradation of free tryptophan in a cookie model system and its application in commercial samples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (16), 6793–6797.

Nakata, P. A. & McConn, M. M. (2007). Calcium oxalate content affects the

nutritional availability of calcium from *Medicago truncatula* leaves. *Plant Science*, 172, 958–961.

Nakata, P. A. (2003). Advances in our understanding of calcium oxalate crystal

formation and function in plants. *Plant Science*, 164, 901–909.

Nalluri, V. R., Schirg, P., Gao, X., Viridis, A., Imanidis, G. & Kuentz, M. (2010).

Different modes of dynamic image analysis in monitoring of pharmaceutical dry milling process. *International Journal of Pharmaceutics*, 391, 107e114.

Nara, S. & Komiy, T. (1983). Study on relative crystallinity of moist potato starch.

Starch, 35, 407-410.

Nip, W. K. (1997). Taro: in Processing Vegetables, Science and Technology. Eds

D.S. Smith, J.N. Cash, W.K. Nip & Y.H. Hui. Technomic Publishing CO., Inc, Pennsylvania, USA. pp 355-387.

Nip, W. K., Muchille, J., Cai, T. & Moy J. H. (1989). Nutritive and non-nutritive

constituents in Taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) from American Samoa, *J. Haw. Pac. Ag*, 1-5.

Nip, W. K., Vargo, D. & Whitaker, C. S. (1997). “Application of taro flour in cookie

Formulation”. *International Journal of Food Science and Technology*, 29, 463-463.

Njintang Y. N. & Mbofung C. M. F. (2003). Kinetics of starch gelatinisation and

mass transfer during cooking of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) slices. *Starch/Stärke*, 55, 170-176.

Njintang Y. N. (2003). Study on the production of taro (*Colocasia esculenta* L Schott) flour for use in the preparation of achu (a taro based-food). Ph. D thesis. University of Ngaoundere. 185p.

Njintang, N. Y., Parker, M. L., Moates, G. K., Faulds, C. B., Smith, A. C., Waldron, K. W., Mbofung, C. M. F. & Scher, J. (2008). Microstructure and creep-recovery characteristics of achu (a taro based paste) made from freeze dried taro chips as affected by moisture content and variety. *Journal of Food Engineering*, 87, 172–180.

Njintang, Y. N. & Mbofung, C. M. F. (2006). Effect of precooking time and drying temperature on the physico-chemical characteristics and invitro carbohydrate digestibility of taro flour. *LWT, Journal of Food Technology*, 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. (2007). 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.

Noda, T., Takahata, Y. & Nagata, T. (1992). Developmental changes in properties of sweet potato starches. *Starch/Stärke*, 44, 405–409.

Noda, T., Takahata, Y., Sato, T., Hisamatsu, M. & Yamada, T. (1995). Physicochemical properties of starches extracted from sweet potato roots differing in physiological age. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43, 3016–3020.

Noda, T., Takahata, Y., Sato, T., Ikoma, H. & Mochida, H. (1996). Physicochemical

properties of starch from purple and orange fleshed sweet potato roots at two levels of fertiliser. *Starch-Starke*, 48, 395–399.

Noda, T., Takahata, Y., Sato, T., Ikoma, H. & Mochida, H. (1997). Combined effects of planting and on starch properties of sweet harvesting dates potato roots. *Carbohydrate Polymers*, 33, 169-176.

Noda, T., Tsuda, S., Mori, M., Takigawa, S., Matsuura-Endo, C., Saito, K. Mangalika, W. H. A., Hanaoka, A. Suzuki, Y. & Yamauchi, H. (2004). The effect of harvest dates on the starch properties of various potato cultivars. *Food Chemistry*, 86, 119–125.

Numfor, F. (1998) : Transformation du manioc en amidon pour utilisation industrielle. Pages 40 – 85, in : APICA (1998) : Rapport de l’atelier international sur les « petites technologies de transformation du manioc ». Douala, Cameroun, 132 pages.

Okezie, O. B. & Bello, A. B. (1988). Physicochemical and functional properties of winged beans flour and isolate compared with soy isolate. *Journal of Food Science*, 53(2): 450-454.

Onwueme, I. (1999). Taro cultivation in Asia and the Pacific. FAO RAP Publication: 1996/16. FAO, Bangkok, Thailand.
<http://www.fao.org/docrep/005/AC450E/ac450e00>. Consulté le 22 mars 2011.

Onwuliri, V. A. & Anekwe, G. E. (1992). Proximate and elemental composition of *Bryophyllum pinnatum* (Lim). *Medical Science Research*, 20, 103–104.

Onyeike, N. E., Olungwe, T. & Uwakwe, A. A. (1995). Effect of heat-treatment and defatting on the proximate composition of some Nigerian local soup thickeners. *Food Chemistry* 53, 173- 175.

Oshodi, A. A. & Ekperigin, M. M. (1989). Functional properties of Pigeon Pea

(*Cajanus cajan*) flour. *Food Chemistry*. 34: 187- 191.

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

Parmerter, S. M. (1969). Starch. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2nd ed, Vol. 18, pp. 676-691. John Wiley, New York.

Pavlista, A. D. (1997). Potato types: Their characteristics and uses. *The American Biology Teacher*, 59, 26–34.

Peng, G., Chen, X., Wu, W. & Jiang, X. (2007). Modeling of water sorption isotherm for corn starch. *Journal of Food Engineering*, 80, 562–567.

Peng, M., Gao, M., Abdel-Aal E-S. M., Hucl, P. & Chibbar, R. N. (1999). Separation and characterization of A- and B- type starch granules in wheat endosperm. *Cereal Chem* 76:375–379.

Pérez, E., Schultzb, F. S. & Pacheco de Delahaye, E. (2005). Characterization of some properties of starches isolated from *Xanthosoma sagittifolium* (tannia) and *Colocassia esculenta* (taro). *Carbohydrate Polymers*, 60, 139–145.

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. *Journal of Food Science*, 53, 805–809.

Pomeranz, Y., Shogren, M. D., Finney, K. F. & Bechtel, D. B. (1977). Fiber in breadmaking. Effects on functional properties. *Cereal Chemistry* 54(1), 25–41.

Purlis, E. (2010). Browning development in bakery products – A review. *Journal of Food Engineering*, 99, 239–249.

Ramirez, M. (1997). Caractérisation des propriétés physico-chimiques et

fonctionnelles d'amidons de racines et tubercules tropicaux. Diplôme d'Université chimie et technologies des matériaux organiques. Université Montpellier II. 36 p.

Reyes-Agüero, J. A., Aguirre, R. J. R. & Valiente-Banuet, A. (2006). Reproductive biology of *Opuntia*: a review. *Journal of Arid Environments*, 64, 549–585.

Richardson, D. L., Davies, H. V. & Ross H. A. (1990). Potato tuber sugar content during development and storage (10°C): possible predictors of storage potential and the role of sucrose in storage hexose accumulation. *Potato Res.* 33, 241-254.

Rickard, J. E., Asaoka, M. & Blanshard, J. M. V. (1991). The physicochemical properties of cassava starch. *Trop. Sci.* 31, 189-207.

Rodríguez-Miranda, J., Ruiz-López, I. I., Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C. E., Delgado-Licon, E. & Vivar-Vera, M. A. (2011). Development of extruded snacks using taro (*Colocasia esculenta*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends. *LWT - Food Science and Technology* 44, 673-680.

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

Sagar, V. R. & Suresh Kumar, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 47,15–26.

Santisopasri, V., Kurotjanawong, K., Chotineeranat, S., Piyachomkwan, K., Sriroth, K. & Oates, C. G. (2001). Impact of water stress on yield and quality of cassava starch. *Industrial Crops and Products*, 13(2): 115-129.

Sathe, P. D., Deshpande, S. S., & Salunkhe, D. K. (1982). Isolation and partial

characterisation of black gram (*Phaseolus mango* L.) starch. *Journal of Food Science*, 47, 1524-1527.

Scher, J. (1998). Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires. Techniques de l'Ingénieur. F2, F 3 300.

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

Sefa-Dedeh, S. & Agyir-Sackey, E. K. (2004). Chemical composition and the effect of processing on oxalate content of cocoyam *Xanthosoma sagittifolium* and *Colocasia esculenta* cormels. *Food Chemistry*, 85, 479–487.

Sheen, L. Y. (1990). Studies of microcapsules of essential oils of basil, garlic, and ginger. PhD dissertation, Graduate Institute of Food Science, National Chung-Shin University, Taiwan.

Singh, J., McCarthy, O. J. & Singh, H. (2006). Physico-chemical and morphological characteristics of New Zealand Taewa (Maori potato) starches. *Carbohydrate Polymers*, 64, 569–581.

Singh, J., Singh, N., Sharma, T. R. & Saxena, S. K. (2003). Physicochemical, rheological and cookie making properties of corn and potato flours. *Food Chemistry*, 83 (2003), 387–393.

Singh, U. (2001). Functional properties of grain legume flours. *Journal of Food Science and Technology*, 38(3): 191-199.

Spriggs, M. J. (1997). *The island Melanesians. The peoples of South-East Asia and the Pacific*. Blackwell Publishers Ltd, Cambridge, 326 p.

Sriburi, P. & Hill, S. E. (2000). Extrusion of cassava with either variation in ascorbic acid concentration or pH. *International Journal of Food Science and*

Technology, 35, 141-154.

Srichuwong, S., Sunarti, T. C., Mishima, T., Isono, N. & Hisamatsu, M. (2005).

Starches from different botanical sources II: contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. *Carbohydrate Polymers*, 62, 25-34.

Sriroth, K., Piyachomkwan, K., Wanlapatit, S. & Oastes, C. G. (2000). Cassava starch technology: The Thai experience. *Starch/Stärke*, 52, 439–449.

Sriroth, K., Santisopasri, V., Petchalanuwat, C., Kurotjanawong, K., Piyachomkwan, K. & Oates, C. G. (1999). Cassava starch granule structure-function properties: influence of time and conditions at harvest on four cultivars of cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 38, 161-170.

Sugimoto, Y., Yamashita, Y., Hori, I., Abe, K. & Fuwa, H. (1995). Developmental changes in the properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) starches. *Journal of Applied Glycoscience* (Oyo Toshitsu Kagaku) 42, 345–353 (in Japanese with English summary).

Svegmark, K., Helmersson, K., Nilsson, G., Nilsson, P. O., Anderson, R. & Svensson, E. (2002). Comparison of potato amylopectin starches and potato starches influence of year and variety. *Carbohydrate polymers*, 47, 331-340.

Swinkels, J. J. M. (1985). Composition and properties of commercial native starches. *Starch/Stärke*, 37, 1-5.

Taggart, P. (2004). Starch as an ingredient: manufacture and implication. In A.C. Eliason (ed). *Starch in Food* (pp 363-392). England. CRC Press.

Tagodoe, A. & Nip, W. K. (1994). Functional properties of raw and precooked taro (*Colocasia esculenta*) flours. *International Journal of Food Science and Technology*, 29, 457–462.

- Tattiyakul, J., Pradipasena, P. & Asavasaksakul, S. (2007).** Taro *Colocasia esculenta* (L.) Schott amylopectin structure and its effect on starch functional properties. *Starch-Starke*, 59, 342–347.
- Tester, R. F. & Morrison, W. R. (1990).** Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal Chemistry*, 67, 551–557.
- Tester, R. F., Debon, S. J. J., Davis, H. V. & Gidley, M. J. (1999).** Effect of temperature on the synthesis, composition and physical properties of potato starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 2045–2051.
- Trèche, S. & Agbor-Egbe, T. (1996).** Biochemical changes occurring during growth and storage of two yam Species. *International journal of Food Science and Nutrition*, 47, 93-102.
- Trèche, S. & Guion, P. (1979).** Étude des potentialités nutritionnelles de quelques tubercules tropicaux au Cameroun. Influence de la maturité à la récolte. *Agron. Trop.*, 34, 127-137.
- Trèche, S. (1988).** Contribution à l'étude des potentialités nutritionnelles des ignames (*Dioscorea* spp.). Thèse de Doctorat es-sciences, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Trèche, S., Gallon, G. & Joseph, A. (1982).** Évolution des teneurs en éléments minéraux au cours de la maturation et de la conservation des tubercules d'ignames (*Dioscorea dumetorum* et *D. rotundata*). Incidences nutritionnelles, *Revue Science et Technique (Sci. Santé)*, n° 3 : 69-79.
- Tsai, L. J. (1994).** Research and development of extrudates containing porcine blood. Master thesis, Graduate Institute of Food Science and Technology, National Taiwan University, Taiwan.

- Tsai, M. L., Li, C. F. & Lii, C. Y. (1997).** Effects of granular structure on the pasting behavior of starches. *Cereal Chemistry*, 74, 750–757.
- Tunç, S. & Duman, O. (2007).** Thermodynamic Properties and Moisture Adsorption Isotherms of Cottonseed Protein Isolate and Different Forms of Cottonseed Samples. *Journal of Food Engineering*, 81 (1), 133 – 143.
- Van Soest, J. J. G., Tournois, H., De Wit, D. & Vliegenthart, J. J. G. (1995).** Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier transform IR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 279, 201-214.
- Varoquaux, P., Varoquaux, F. & Breuils, G. (1991).** Browning potential of various Cichorium endivia L. cultivars as a function of harvest time. *Lebensmittel Wissenschaft & Technologie*, 24(3): 270-273.
- Vaughan, J. G. & Judd, P. A. (2003).** *The Oxford Book of Health Foods*, Oxford University Press, 61.
- Wang, C. R., Wu, S. P., Lai, L. S. & Huang, S. S. (2001).** The changes of composition and physicochemical properties of taro tuber during growth. *Taiwanese Journal of Agricultural Chemistry and Food Science*, 39, 173–184.
- Ward, C. D. W., Resurreccion, A. V. A. & McWatters, K. H. (1995).** A systematic approach to prediction of snack chip acceptability utilizing discriminant functions based on instrumental measurements. *Journal of Sensory Study*, 10, 181-201.
- Wolf, W., Spiess, W. E. L., Jung, G., Weisser, H., Bizot, H. & 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.

Xu, Y. L., Xiong, S. B., Li, Y. B. & Zhao, S. M. (2008). Study on creep properties of indica rice gel. *Journal of Food Engineering*, 86, 10–16.

Yahya, M. G., Yahya, S. A. & Faiz, K. B. (2000). Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying, III; chemical analysis and sensory evaluation data of the dried samples (grapes, tomatoes and onions). *Renew Energ*, 19, 203–212.

Yamamoto, H., Makita., E., Oki, Y. & Otani, M. (2006). Flow characteristics and gelatinization kinetics of rice starch under strong alkali conditions. *Food Hydrocolloids*, 20, 9–20.

Yongsawatdigul, J. & Gunasekaran, S. (1996). Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20, 145-156.

Yu, W. & Hancock, B. C. (2008). Evaluation of dynamic image analysis for characterizing pharmaceutical excipient particles. *International Journal of Pharmaceutics*, 361, 150 -157.

Zaidul, I. S. M., Absar, N., Kim, S. J., Suzuki, T., Karim, A. A., Yamauchi, H. & Noda, T. (2008). DSC study of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, cassava, and yam starches. *Journal of Food Engineering*, 86, 68-73.

Zaidul, I. S. M., Norulaini, N. A. N., Omar, A. K. M., Yamauchi, H. & Noda, T. (2007). RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, yam and cassava starches. *Carbohydrate Polymers*, 69, 784-791.

Zobel, H. F. (1988). Molecules to granules- A comprehensive starch review. *Starch/Stärke*, 40, 44-50.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET CONFERENCES AVEC COMITE DE LECTURE

Publications dans les revues à Comité de lecture :

Himeda Makhlouf, Njintang Y. N., Nguimbou. R. M, Gaiani, C., Facho, B., Scher, J. & Mbofung C. M. F. (2012). Physicochemical, Microstructure, Rheological and Thermal properties of taro (*Colocassia esculenta*) starch harvested at different maturity stages. *International Journal of Biosciences*, 2, 14-27.

Himeda Makhlouf, Njintang Y. N., Gaiani, C., Nguimbou R. M, Facho, B., Scher, J. Mbofung C. M. F. (2012). Physico-chemical and thermal properties of sosso-taro (*Colocasia esculenta sp*) powders as affected by state of maturity and drying method. *Journal of Food Science and Technology*, DOI 10.1007/s13197-012-0697-9.

Himeda Makhlouf, Njintang Y. N., Fombang E., Facho B., Kitissou P., Scher J. & Mbofung C. M. F. (2012). Chemical composition, functional and sensory characteristics of wheat-taro composite flours and biscuits. *Journal of Food Science and Technology*, DOI 10.1007/s13197-012-0723-y.

Nguimbou Richard Marcel, **Himeda Makhlouf**, Njintang Yanou Nicolas², Tatsadjieu Ngouné Léopold, Facho Balaam, Scher Joel, Mbofung Carl M.F. (2012). Comparative physicochemical, thermal and microstructural properties of starches from two underutilized taro ecotypes. *International Journal of Biosciences*, 2(4), 64-74.

Conférences avec comité de lecture:

Communication orale

Himeda M., Nguimbou R. M, Njintang Y. N., Scher J., Facho B. & Mbofung C. M. F. (2010). Influence de la maturité sur les propriétés physico-chimiques de l'amidon de taro (*Colocassia esculenta*). Atelier International CORUS IRD: « Valorisation des racines et tubercules tropicaux sous valorisés » 21 – 22 mai 2010, Université de Ngaoundéré.

Par affiche (posters)

Himeda M., Nguimbou R. M, Njintang Y. N., Scher J., Facho B. & Mbofung C. M. F. 2011.

Influence de la maturité sur les propriétés physico-chimiques de l'amidon de taro (*Colocasia esculenta*) variété sosso du Tchad. Séminaire Ecole Doctorale RP2E « Biodiversité - Ingénierie Ecologique » 20 janvier 2011, Faculté des Sciences, L'Université de Lorraine, Vandoeuvre Nancy, France.

**AUTORISATION DE SOUTENANCE
DU DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE**

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur AMVAM ZOLLO P.H., Professeur, Université de Yaoundé 1,
Monsieur MONTET Didier, Maître de Conférences, CIRAD Montpellier**

Le Président de l'Université de Lorraine, autorise :

Monsieur HIMEDA MAKHLOUF

à soutenir devant un jury de l'UNIVERSITE DE LORRAINE, une thèse intitulée :

**"Propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la farine et de l'amidon de taro
(*Colocasia esculenta* L.Schott) variété Sosso du Tchad en fonction de la maturité et du
mode de séchage"**

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Intitulé du doctorat : **" Procédés Biotechnologiques et Alimentaires "**

Fait à Vandoeuvre, le **10 Août 2012**

Le Président de l'Université de Lorraine,

Pierre MUTZENHARDT



Propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la farine et de l'amidon de taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) variété Sosso du Tchad en fonction de la maturité et du mode de séchage

RESUME

Les résultats montrent que la teneur en cendres, protéines brutes, sucres disponibles, oxalates totaux, amidons et phosphore augmente significativement ($p < 0,05$) avec la maturité. En revanche la teneur en amylose baisse avec la maturité. La capacité d'absorption d'eau, l'indice de solubilité, la température et l'enthalpie de gélatinisation (ΔH) des farines et amidons augmentent significativement ($p < 0,05$) en fonction du degré de maturité. Quel que soit le degré de maturité, les granules d'amidon ont présenté un diffractogramme caractéristique de type "A". Les précurseurs de brunissement augmentent significativement ($p < 0,05$) avec le degré de maturité. Le paramètre L^* des farines et des pâtes augmente alors que a^* diminue en fonction du degré de maturité. Le paramètre L^* est plus élevé et a^* moins élevé dans le cas du séchage électrique que le séchage solaire. Les caractéristiques sensorielles des pâtes de taro Sosso sont affectées positivement par le degré de maturité et le séchage électrique. L'acceptabilité générale des pâtes de taro Sosso est corrélée à la couleur de celles-ci. Cette étude suggère que 10 mois de maturité de taro Sosso et le séchage électrique (40°C) sont des conditions favorables à l'obtention des pâtes de qualité acceptable.

Mots clés : taro Sosso, degré de maturité, mode de séchage, farine, amidon, propriétés sensorielles.

Physicochemical and rheological properties from taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flour and starch of Sosso Chad variety as affected by drying method and maturity stage

ABSTRACT

Results showed that the ash content, crude proteins, available sugars, total oxalate, starch and phosphorus content increased significantly with the maturity stage. On the other hand the amylose content decreased as function of the maturity. The water adsorption capacity, the water solubility index, the temperature and the enthalpy of gelatinization of the flour and starch increased significantly with the maturity stage. Irrespective of the degree of maturity the starch granules diffractogramm were exhibited an "A" type cristallinity. The browning indicators increased significantly ($p < 0.05$) with the maturity stage of the tuber. The color coordinate L^* of the flours and that of its dough increased while a^* decreased with the maturity stage. These two coordinates lend themselves better with electric drying than solar drying. The sensory characteristics of the taro Sosso dough were positively affected by the maturity stage and electric drying. The overall acceptability of taro Sosso dough was correlated with its color. These results suggest that 10 months of the taro Sosso maturity and the electric drying (40°C) are the best conditions to obtain the acceptable pastes. These optimum conditions might be used to produce the taro flour at industrial scale.

Keys words: taro Sosso, degree of maturity, drying method, flour, starch, sensory properties.