



HAL
open science

**POTENTIELS NUTRITIONNEL ET
TECHNOLOGIQUE DES TUBERCULES DURCIS DE
L'IGNAME *Dioscorea dumetorum* (Kunth) pax :
ETUDE DU DURCISSEMENT POST -RECOLTE ET
DES CONDITIONS DE TRANSFORMATION DES
TUBERCULES DURCIS EN FARINE**

Gabriel J. M. Medoua Nama

► **To cite this version:**

Gabriel J. M. Medoua Nama. POTENTIELS NUTRITIONNEL ET TECHNOLOGIQUE DES TUBERCULES DURCIS DE L'IGNAME *Dioscorea dumetorum* (Kunth) pax : ETUDE DU DURCISSEMENT POST -RECOLTE ET DES CONDITIONS DE TRANSFORMATION DES TUBERCULES DURCIS EN FARINE. Autre. Université de Ngaoundéré, 2005. Français. NNT: . tel-00011268

HAL Id: tel-00011268

<https://theses.hal.science/tel-00011268>

Submitted on 28 Dec 2005

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

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

**POTENTIELS NUTRITIONNEL ET TECHNOLOGIQUE DES TUBERCULES
DURCIS DE L'IGNAME *Dioscorea dumetorum* (Kunth) pax :**

**ETUDE DU DURCISSEMENT POST -RECOLTE ET DES CONDITIONS
DE TRANSFORMATION DES TUBERCULES DURCIS EN FARINE**

Par

MEDOUA NAMA Gabriel Jean Marie

Mle 98D008EN

DEA en Sciences Alimentaires et Nutrition

THESE au Département de Sciences Alimentaires et Nutrition

Soutenue publiquement le 03 août 2005 à l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-
industrielles pour l'Obtention du grade de

DOCTEUR / Ph. D.

UNIVERSITE DE NGAOUNDERE

Président du Jury	ETOA François-Xavier, Professeur, Université de Yaoundé 1
Rapporteur	MBOFUNG Carl M. F., Professeur, Université de Ngaoundéré
Examineurs	NGALANI Joseph Antoine, Directeur de Recherches, IRAD Yaoundé NUMFOR Festus Ambe, Maître de Recherches, IRAD Ekona NDJOUENKEU Robert, Professeur, Université de Ngaoundéré TCHIEGANG Clergé, Maître de Conférences, Université de Ngaoundéré

Page de signatures

Nous acceptons que la thèse intitulée *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* soit soutenue par Monsieur **MEDOUA NAMA Gabriel Jean Marie** à l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences agro-industrielles pour l'obtention du Doctorat en Sciences Alimentaires et Nutrition de l'Université de Ngaoundéré.

Le Responsable de la formation doctorale

Le Chef de département de Sciences Alimentaires et Nutrition

Le Directeur de l'ENSAI

Résumé

Les tubercules de *Dioscorea dumetorum* (Kunth) pax sont une importante source de nutriments et d'énergie. Stockés dans les conditions qui prévalent en milieu tropical, ils subissent un phénomène de durcissement caractérisé par la perte de l'aptitude à ramollir pendant la cuisson. Ce travail a été réalisé dans le but de déterminer les mécanismes de durcissement post-récolte des tubercules, d'évaluer les modifications physico-chimiques au cours du stockage et de rechercher les conditions de pré-traitement des tubercules durcis en vue de leur transformation en une farine utilisable dans des formulations alimentaires. Les résultats obtenus ont montré que le durcissement des tubercules de *D. dumetorum* s'effectue suivant un mécanisme multiple qui inclut l'hydrolyse du phytate comme contributeur minimal de la difficulté-à-cuire et la perte en polyphénols totaux via le mécanisme de lignification comme contributeur majoritaire. Ce durcissement a été dissocié en deux composantes, réversible et irréversible, qui ont été respectivement associées au phytate et aux polyphénols totaux. La modélisation du phénomène de durcissement a montré que la vitesse de la réaction du durcissement irréversible est plus dépendante de la température et de l'humidité relative que celle du durcissement réversible. Le stockage des tubercules de *D. dumetorum* dans les conditions qui prévalent en milieu tropical (19-28°C, HR 60-85%), a entraîné une diminution significative ($P \leq 0,05$) des facteurs antinutritionnels (polyphénols totaux, tannins, phytate, oxalates, inhibiteurs de trypsine et d' α -amylase) et une augmentation des propriétés fonctionnelles des farines (capacité d'absorption d'eau, indice de solubilité à l'eau, capacité d'absorption d'huile, indice hydrophile-lipophile, plus petite concentration gélifiante, capacité de gonflement de la pâte), exception faite sur la densité de la pâte. La variation des différents paramètres évalués s'est effectué en deux principales phases, entre les jours 2 et 21 puis entre les jours 28 et 56. La germination des tubercules ayant été enregistrée après 28 jours de stockage, il

a été suggéré que le durcissement post-récolte et la germination influencent les paramètres physico-chimiques des tubercules. Si le trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans des solutions de NaCl ou de *kanwa* a permis une augmentation significative du taux de ramollissement du tubercule pendant la cuisson, il ne permet pas de surmonter totalement le durcissement des tubercules. Le pré-traitement au *kanwa* a entraîné une variation significative ($P \leq 0,05$) des propriétés fonctionnelles des farines de *D. dumetorum* ainsi qu'une amélioration de la qualité des protéines et de la biodisponibilité *in vitro* des sucres. Le rouissage naturel des tubercules durcis comme méthode de pré-traitement quant à lui a permis d'obtenir un ramollissement total des tubercules après 7 jours de fermentation naturelle et une réduction significative ($P \leq 0,05$) des facteurs antinutritionnels. Seule la lignine n'a pas été affectée par la fermentation des tubercules. Les propriétés fonctionnelles des farines ont été significativement affectées par la fermentation des tubercules. De plus, la fermentation a entraîné une augmentation significative ($P \leq 0,05$) de la teneur en protéine, de la qualité des protéines et de la biodisponibilité *in vitro* des sucres. L'étude de la gélatinisation a montré que la température de gélatinisation des farines de *D. dumetorum* est comprise entre 70 et 75°C. La gélatinisation des tranches d'igname suit une cinétique d'ordre 1 de la forme générale $\ln(1 - \alpha) = k_G.t$. La constante de vitesse de gélatinisation (k_G) diminue avec la baisse de la température de cuisson et l'augmentation du temps de stockage des tubercules. La fermentation et le traitement au *kanwa* ont présenté une influence significative sur la vitesse de gélatinisation des tubercules durcis de *D. dumetorum*. La substitution partielle de la farine de blé par les farines d'ignames-durcies ont montré sur la base des analyses multivariés (ACH et ACP) que le blé et les farines composées blé/igname-durcie traitée au *kanwa* à tous les taux de substitution utilisé dans cette étude, constituent le même groupe.

Les farines composées blé/igname-durcie pourraient être utilisées comme ingrédient de base dans la formulation des bouillies infantiles.

Mots Clés : *Dioscorea dumetorum*, Difficulté-à-cuire, Stockage, durcissement post-récolte, Farine.

Abstract

Dioscorea dumetorum (Kunth) pax tubers constitute a good source of nutrients and energy. Their storage under tropical ambient conditions renders them susceptible to a hardening phenomenon characterised by loss of the ability to soften during cooking. This study was carried out with the aim of determining tuber hardening mechanism, evaluate physicochemical changes occurring during tuber storage and to find out pre-treatment conditions of hardened tubers for their processing into flour. Results obtained showed that *D. dumetorum* tubers hardening follows a multiple mechanism, which includes phytate hydrolysis as a minimal contributor to cooked hardness and total phenols loss via a lignification-like mechanism as a major contributor. Tuber hardening was separated into two factors, reversible and irreversible which were respectively associated with phytate and total phenols. Modeling of the hardening process indicated that the rate of the irreversible reaction was more dependent on storage temperature and relative humidity than the reversible reaction. Storage of *D. dumetorum* tubers under tropical ambient conditions (19-28°C, RH 60-85%), significantly ($P \leq 0.05$) decreased antinutritional factors (total phenols, tannin, phytate, oxalates, trypsin and α -amylase inhibitors) and increased functional properties of flours (water absorption capacity, water solubility index, oil absorption capacity, hydrophilic-lipophilic index, least gelification concentration, swelling capacity). The physicochemical parameters varied with storage in two main phases, from days 2 to 21 and from days 28 to 56. Since sprouting of most tubers was observed after 28 days of storage, the results suggest that post-harvest hardening and sprouting influence the physicochemical properties of *D. dumetorum* tubers. If steeping of *D. dumetorum* hardened tubers into NaCl or *kanwa* solutions significantly increased tubers softening rate during cooking, it did not totally reverse tuber hardness. *kanwa* pre-treatment significantly affected functional properties of *D. dumetorum* flours and improved

on protein quality and sugar bioavailability. Fermentation of hardened tubers as pre-treatment method resulted in completely soft tubers after 7 days of natural fermentation and significantly reduced antinutritional factors. Only lignin was not affected by tubers fermentation. Functional properties of the flours were also influenced significantly by tubers fermentation. The least gelatinisation concentration increased with fermentation time and the other properties decreased. More over, fermentation significantly increased protein content, protein quality and sugars bioavailability of *D. dumetorum* tubers. Studies on gelatinisation showed that gelatinisation temperature of *D. dumetorum* occurs between 70-75°C. Gelatinisation process of *D. dumetorum* follows a first order reaction of the general form $\ln(1-\alpha) = -k_G.t$. The gelatinisation rate constant (k_G) decreased with cooking temperature and with increase of tuber storage time. Soaking in *kanwa* solution and natural fermentation significantly affected the gelatinisation rate of *D. dumetorum* hardened tubers. Partial substitution of wheat flour by hardened-yam flour showed on the basis of multivariate techniques (hierarchical cluster analysis and principal component analysis) that wheat and *kanwa*-treated-hardened-yam/wheat composite flours, for all substitution levels used in this study constituted the same cluster.

Keywords: *Dioscorea dumetorum*, Hard-to-cook, Storage, Post-harvest hardening, Flour

Remerciements

Cette Thèse a été élaborée par nos soins dans l'unité de formation doctorale et de spécialisation en Sciences Alimentaire et Nutrition de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-industrielles de l'Université de Ngaoundéré.

J'exprime mes sincères remerciements au Centre de Recherches en Alimentation et Nutrition (CRAN) de l'Institut de Recherches Médicales et d'études des Plantes Médicinales (IMPM)/MINRESI qui a mis à ma disposition d'importants moyens logistiques pour la réalisation de ce travail.

Que Monsieur MBOFUNG M. F. Carl., Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-industrielles (ENSAI) de l'Université de Ngaoundéré, qui malgré ses multiples occupations, n'a ménagé aucun effort pour la direction de ce travail, trouve ici le témoignage de mon respectueux attachement.

Que Monsieur MBOME LAPE Israël, Maître de Recherches à l'IMPM, qui m'a ouvert son espace de travail soit assuré de ma profonde reconnaissance.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur AGBOR-EGBE Tom, Maître de Recherches à l'IMPM, pour l'aide et les conseils précieux dont il m'a gratifié tout au long de ce travail.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à mon Chef, Docteur RIKONG ADIE Honorine, du CRAN/IMPM, pour sa grande compréhension qui m'a permis de réaliser ce travail en toute quiétude. J'associe à ces remerciements, tous mes collègues de l'IMPM.

Ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon aîné, Docteur NJINTANG YANOU Nicolas, pour la sympathie, la collaboration et l'aide qu'il n'a jamais cessé de m'apporter.

J'exprime ma gratitude à tous les membres du corps enseignant de l'ENSAI en particulier les Professeurs C. TCHIEGANG, R. NDJOUENKEU et R. KAMGA pour leur dévouement lors de notre formation, et leurs conseils et suggestions.

Je remercie tous ceux qui ont contribué à ce travail en m'aidant à réaliser, ou en réalisant pour moi certaines opérations : Monsieur EFFA ONOMO Pierre pour la collecte des échantillons, le Département de Biochimie de l'Université de Pretoria pour l'analyse des acides aminés et Monsieur Pierre KITISSOU, Directeur Qualité à la Société le Grand

Moulin du Cameroun pour la détermination des paramètres rhéologiques et du nombre de chute de Hagberg.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon père MEDOUA BELLA Florent, à ma mère NTSAMA NGONO Marie Thérèse, à Monsieur et Madame ATANGANA ainsi qu'à tous les membres de ma famille pour le soutien dont ils m'ont gratifié pendant la réalisation de ce travail.

Toute ma gratitude à C. Makamto, J. J. Tsafack, V. Essa'a, O. Adjoudji, G. Yadang, V. Passo, A. C. Ndzana, B. Ngo Bakopki, C. S. Minka, L. Etame, M. Chelea, B. L. Bello et J. Bonglaisin pour l'ambiance de famille.

Attestation du superviseur

Je certifie que les résultats enregistrés dans la présente Thèse résultent des travaux de recherche menés par Monsieur Medoua Nama Gabriel Jean Marie sous ma supervision.

(Superviseur)

MBOFUNG M. F. Carl,
Professeur

I. 5.1.3.2.1. Le curing	15
I. 5.1.3.2.2. Utilisation des inhibiteurs de la germination	15
I. 5.1.3.2.3. Traitements aux pesticides	16
I. 5.1.3.2.4. Egermage manuel	16
I. 5.1.3.2.5. Irradiation et abaissement de la température.....	16
I. 5.1.4. Durcissement post-récolte des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	17
I. 5.1.4.1. Mécanismes de durcissement des végétaux	18
I. 5.2. Transformations technologiques en vue de la consommation par l'homme.....	19
I. 5.2.1. Procédés culinaires en vue d'une consommation immédiate.....	19
I. 5.2.2. Procédés technologiques permettant une consommation différée	20
I. 5.2.2.1. Procédés traditionnels	20
a) les cossettes d'igname	20
b) la farine d'igname.....	20
I. 5.2.2.2. Procédés faisant appel à des technologies modernes	22
a) Production et utilisation de farines d'ignames selon des technologies modernes	22
I. 6. Valeur nutritionnelle des tubercules durcis de l'igname <i>D. dumetorum</i>	22
Chapitre II. Mécanismes de durcissement post-récolte des tubercules de l'igname <i>Dioscorea dumetorum</i>.....	25
II. 1. Introduction.....	25
II. 2. Matériel et méthodes.....	27
II. 2.1. Les tubercules	27
II. 2.2. Conditions de stockage	27
II. 2.3. Préparation des échantillons	28
II. 2.4. Analyses physico-chimiques.....	28
II. 2.4.1. Matière sèche	28
II. 2.4.2. Dureté.....	28
II. 2.4.3. Taux de séparation cellulaire	28
II. 2.4.4. Absorption d'eau.....	29
II. 2.4.5. Capacité de rétention d'eau.....	29
II. 2.4.6. Pertes en solides-solubles	30
II. 2.4.7. Acide phytique	30
II. 2.4.8. Polyphénols totaux.....	31
II. 2.4.9. Lignine	31
II. 2.5. Effet de l'EDTA sur l'habilité des tubercules à ramollir pendant la cuisson	32
II. 2.6. Calcul des cinétiques.....	32
II. 2.6. Modélisation des données du durcissement.....	33
II. 2.6. Analyses statistiques	34
II. 3. Résultats et discussion	34

II. 3.1. Absorption d'eau, capacité de rétention d'eau et pertes en solide-soluble.....	34
II. 3.2. Changement de texture	40
II. 3.3. Variation de la teneur en acide phytique.....	42
II. 3.4. Variation des teneurs en polyphénols totaux et en lignine	48
II. 3.5. Interrelation entre le phytate et les polyphénols totaux dans le développement de la difficulté-à-cuire	57
II. 3.6. Effet de l'EDTA sur le durcissement post-récolte des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	59
II. 4. Conclusion	70
Chapitre III. Modifications biochimiques et fonctionnelles au cours du stockage des tubercules de <i>Dioscorea dumetorum</i>	71
III. 1. Introduction	71
III. 2. Matériel et Méthodes	72
III. 2.1. Matière sèche.....	73
III. 2.2. Cendres totales.....	73
III. 2.3. Facteurs antinutritionnels	73
III. 2.3.1. Polyphénols totaux	73
III. 2.3.1.1. Tannins	73
III. 2.3.2. Acide phytique.....	74
III. 2.3.3. Oxalates totaux	74
III. 2.3.4. Inhibiteurs de trypsine	75
III. 2.3.5. Inhibiteurs de l' α -amylase	76
III. 2.4. Les propriétés fonctionnelles.....	77
III. 2.4.1. Capacité d'absorption d'eau et indice de solubilité à l'eau.....	77
III. 2.4.2. Capacité d'absorption d'huile.....	77
III. 2.4.3. Rapport hydrophile-lipophile	77
III. 2.4.4. Densité et capacité de gonflement de la pâte.....	78
III. 2.4.5. Plus petite concentration gélifiante.....	78
III. 2.5. Analyses statistiques.....	78
III. 3. Résultats et discussion.....	79
III. 3.1. Modifications biochimiques au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	79
III. 3.1.1. Teneurs en eau et en cendres	79
III. 3.1.2. Les facteurs antinutritionnels.....	82
III. 3.1.2.1. Les composés phénoliques	82
III. 3.1.2.2. L'acide phytique	84
III. 3.1.2.3. Les inhibiteurs de l' α -amylase	86
III. 3.1.2.4. Les oxalates	88
III. 3.1.2.5. Les inhibiteurs de trypsine.....	90
III. 3.2. Modifications de quelques propriétés fonctionnelles au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	92

III. 4. Conclusion.....	98
Chapitre IV. Effets du pH, de la force ionique et du kanwa sur les propriétés texturales et fonctionnelles des tubercules durcis de l'igname <i>Dioscorea dumetorum</i>.....	99
IV. 1. Introduction	99
IV. 2. Matériel et Méthodes.....	100
IV. 2.1. Les tubercules.....	100
IV. 2.2. Effet du pH et de la force ionique	100
IV. 2.2.1. Plan d'expérience et analyses statistiques	101
IV. 2.3. Effet du <i>kanwa</i>	102
IV. 2.3.1. Analyses statistiques	102
IV. 2.4. Absorption d'eau	103
IV. 2.5. Taux de séparation cellulaire.....	103
IV. 2.6. Les propriétés fonctionnelles.....	103
IV. 3. Résultats et discussion.....	103
IV. 3.1. Effet du pH et de la force ionique	103
IV. 3.2. Effet du <i>kanwa</i>	107
IV. 3.2.1. Ramollissement à la cuisson.....	107
IV. 3.2.2. Absorption d'eau	109
IV. 3.3. Propriétés fonctionnelles des farines.....	111
IV. 4. Conclusion.....	117
Chapitre V. Modifications physico-chimiques et texturales au cours du rouissage des tubercules durcis de l'igname <i>Dioscorea dumetorum</i>	118
V. 1. Introduction	118
V. 2. Matériel et méthodes.....	119
V. 2.1. Les tubercules	119
V. 2.2. Protocole expérimental	119
V. 2.2.1. Influence du système de fermentation sur le brunissement des tubercules d'ignames	119
V. 2.2.2. Effet de la fermentation sur les propriétés physico-chimiques et texturales des tubercules durcis	120
V. 2.3. Préparation des échantillons et analyses physico-chimiques.....	120
V. 2.3.1. pH et acidité titrable	120
V. 2.3.2. Analyse de la couleur.....	121
V. 2.4. Analyses statistiques.....	122
V. 3. Résultats et discussion	122
V. 3.1. Influence du système de fermentation sur le brunissement des tubercules d'ignames	122
V. 3.2. Effet de la fermentation sur les propriétés physico-chimiques et texturales des tubercules durcis	123
V. 3.2.1. Matière sèche	123
V. 3.2.2. pH et acidité titrable	125

V. 3.2.3. Ramollissement des tubercules pendant le rouissage	127
V. 3.2.4. Phytate	129
V. 3.2.5. Polyphénols totaux.....	131
V. 3.2.6. Oxalates totaux	133
V. 3.2.7. Inhibiteurs d' α -amylase.....	135
V. 3.2.8. Inhibiteurs de trypsine	137
V. 3.2.9. Lignine.....	137
V. 3.2.10. Corrélations entre l'acidité et les facteurs antinutritionnels des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> pendant la fermentation	139
V. 3.2.11. Les propriétés fonctionnelles des farines.....	140
V. 4. Conclusion	144
Chapitre VI. Influence du stockage et des conditions de pré-traitement des tubercules de l'igname <i>Dioscorea dumetorum</i> sur leur qualité nutritionnelle.....	145
VI. 1. Introduction	145
VI. 2. Matériel et méthodes	146
VI. 2.1. Tubercules et préparation des échantillons	146
VI. 2.2. Analyses chimiques.....	146
VI. 2.2.1. Protéines	146
VI. 2.2.2. Fractions protéiques	147
VI. 2.2.3. Digestibilité in vitro des protéines	148
VI. 2.2.4. Composition en acides aminés	148
VI. 2.2.5. Qualité protéique	150
VI. 2.2.6. Glucides disponibles	150
VI. 2.2.7. Digestibilité et biodisponibilité in vitro des sucres disponibles.....	151
VI. 2.3. Analyses statistiques.....	151
VI. 3. Résultats et discussion.....	152
VI. 3.2. Qualité nutritionnelle des glucides	158
VI. 4. Conclusion.....	162
Chapitre VII. Cinétiques de gélatinisation pendant la cuisson des farines de l'igname <i>Dioscorea dumetorum</i>.....	163
VII. 1. Introduction.....	163
VII. 2. Matériel et méthodes	164
VII. 2.1. Echantillons.....	164
VII. 2.2. Température de gélatinisation.....	164
VII. 2.3. Cinétiques de gélatinisation	165
VII. 2.4. Détermination de l'indice valeur bleue	165
VII. 2.5. Détermination des constantes de gélatinisation	165
VII. 2.6. Analyses statistiques	167
VII. 3. Résultats et discussion	167
VII. 4. Conclusion	179

Chapitre VIII. Propriétés technologiques des farines composées blé-igname	
<i>Dioscorea dumetorum</i> durcie.....	180
VIII. 1. Introduction	180
VIII. 2. Matériel et méthodes.....	181
VIII. 2.1. Echantillons	181
VIII. 2.2. Caractéristiques technologiques des farines	182
VIII. 2.2.1. Propriétés fonctionnelles	182
VIII. 2.2.2. Couleur	183
VIII. 2.2.3. Propriétés rhéologiques	183
VIII. 2.3. Analyse des données.....	185
VIII. 3. Résultats et discussion	186
VIII. 4. Conclusion	203
Conclusion générale.....	204
Perspectives	209
Références bibliographiques.....	210
Annexes	I
Publications relatives à la Thèse.....	I

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Composition nutritionnelle des tubercules de l'igname <i>D. dumetorum</i> frais et stockée pendant un mois dans les conditions tropicales ambiantes (18-31°C, 62-100% HR).....	24
Tableau 2 : Valeurs de <i>F</i> pour la dureté et le taux de séparation cellulaire des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	42
Tableau 3 : Variations de la teneur en phytate (mg/100g de MS) au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	44
Tableau 4 : Constantes de vitesse et demi-vie de dégradation du phytate dans les tubercules de <i>D. dumetorum</i>	44
Tableau 5 : Variation de la teneur en polyphénols totaux (mg/100g de MS) au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	49
Tableau 6 : Constante de vitesse et demi-vie de diminution des polyphénols totaux dans les tubercules de <i>D. dumetorum</i>	49
Tableau 7 : Constantes de vitesse d'augmentation de la lignine dans les tubercules de <i>D. dumetorum</i>	53
Tableau 8 : Coefficients de l'équation de régression multiple reliant la difficulté-à-cuire, les polyphénols totaux et le phytate.....	58
Tableau 9 : Constantes de vitesse du développement de la difficulté-à-cuire des tubercules <i>D. dumetorum</i> stockés à 30°C, 75% HR.....	60
Tableau 10 : Coefficients des équations de régression multiple pour la prédiction du durcissement réversible et irréversible des tubercules de <i>D. dumetorum</i> comme fonction du temps et des conditions de stockage.....	62
Tableau 11 : Paramètres du modèle pour la prédiction du durcissement réversible et irréversible des tubercules de <i>D. dumetorum</i> comme une fonction du temps et des conditions de stockage.....	65
Tableau 12 : Durcissements irréversible et réversible par rapport au durcissement total.....	66
Tableau 13 : Influence du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i> sur quelques propriétés fonctionnelles des farines obtenues à partir de ces tubercules.....	94
Tableau 14 : Plan de matrice et combinaisons des variables des échantillons.....	101
Tableau 15 : Variables utilisées dans le plan composite centré par rotation pour $K = 2$	101
Tableau 16 : Coefficients des variables dans le modèle et son R^2 correspondant.....	104
Tableau 17 : Analyse de variance pour la régression complète du modèle.....	104
Tableau 18 : Comparaison du taux de séparation cellulaire des tubercules durcis traités aux <i>kanwa</i> avec celui des tubercules non-durcis.....	108
Tableau 19 : Corrélations entre les différentes variables dépendantes et indépendantes.....	110
Tableau 20 : Influence du trempage préalable des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> dans des solutions de <i>kanwa</i> sur quelques propriétés fonctionnelles des farines issues de ces tubercules.....	113
Tableau 21 : Paramètres CIE $L^*a^*b^*$ de la couleur des ignames durcies fermentées.....	123

Tableau 22 : Corrélacion entre l'acidité et les facteurs antinutritionnels des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> pendant le rouissage naturel.	139
Tableau 23 : Effet du rouissage naturel des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> sur quelques propriétés fonctionnelles des farines issues de ces tubercules.	142
Tableau 24 : Profil protéique des tubercules de l'igname <i>D. dumetorum</i>	153
Tableau 25 : Composition en acide aminé (mg/g de protéine) des tubercules de l'igname <i>D. dumetorum</i>	155
Tableau 26 : Digestibilité et proportion utilisable des protéines de l'igname <i>D. dumetorum</i>	157
Tableau 27 : Teneurs (g/100g de MS) en glucides disponibles dans les tubercules de <i>D. dumetorum</i>	158
Tableau 28 : Constantes de vitesse pour la diffusion des sucres provenant de la digestion <i>in vitro</i> de l'amidon, à travers la membrane de dialyse.	161
Tableau 29 : Affinité de l'iode à l'amidon des faines de <i>D. dumetorum</i>	168
Tableau 30 : Paramètres cinétiques de la gélatinisation des tubercules de <i>D. dumetorum</i> au cours du stockage.....	173
Tableau 31 : Energies d'activation au cours de la gélatinisation de certains produits alimentaires.....	173
Tableau 32 : Paramètres cinétiques de la gélatinisation des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> fermentés et traités au <i>kanwa</i>	178
Tableau 33 : Quelques caractéristiques boulangères de farines expérimentales.	187
Tableau 34 : Caractéristiques boulangère et propriétés fonctionnelles des farines composées igname-durcie/blé.....	190
Tableau 35 : Chargements pour les quatre premières composantes principales Varimax rotées.....	193
Tableau 36 : Caractéristiques rhéologiques des farines composées blé/ignames-durcie de <i>D. dumetorum</i>	200
Tableau 37 : Paramètres CIE $L^*a^*b^*$ de la couleur des farines composées blé/ignames-durcies	202

Liste des Figures

Figure 1 : Cinétiques d'absorption d'eau des échantillons d'igname stockés pendant 0, 2, 4, 7 et 14 jours.	36
Figure 2 : Eau exprimable des tubercules de <i>D. dumetorum</i> stockés à 15°C, 59% HR, 30°C, 75% HR et 45°C, 86% HR.	38
Figure 3 : Cinétiques de pertes en solide-soluble des échantillons stockés pendant 0, 2, 4, 7 et 14 jours.	39
Figure 4 : Dureté des tubercules de <i>D. dumetorum</i> stockés à 15°C, 59% HR, 30°C, 75% HR et 45°C, 86% HR.	41
Figure 5 : Taux de séparation cellulaire après cuisson des tubercules de <i>D. dumetorum</i> stockés à 15°C, 59% HR, 30°C, 74% HR et 45°C, 86% HR.	41
Figure 6 : Cinétique d'ordre 1 de dégradation du phytate au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	45
Figure 7 : Courbe d'Arrhenius pour la dégradation du phytate au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	45
Figure 8 : Corrélation entre l'acide phytique et le taux de séparation cellulaire.	47
Figure 9 : Cinétique d'ordre 1 de diminution des polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	50
Figure 10 : Courbe d'Arrhenius pour la diminution des polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	50
Figure 11 : Polyphénols totaux comparés au taux de séparation cellulaire.	52
Figure 12 : Modification de la teneur en lignine au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i> à 15°C, 59% HR, 30°C, 74% HR et 45°C, 86% HR.	54
Figure 13 : Courbe d'Arrhenius pour l'augmentation de la lignine au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	54
Figure 14 : Corrélation entre les teneurs en lignine et en polyphénols au cours du stockage.	56
Figure 15 : Variations dans la contribution de R^2 à la difficulté-à-cuire avec le temps de stockage pour deux variables indépendantes, le phytate et les polyphénols totaux.	58
Figure 16 : Développement de la difficulté-à-cuire des tubercules de <i>D. dumetorum</i> stockés à 30°C, 75% HR.	60
Figure 17 : Effet de la température et de l'humidité sur le durcissement irréversible des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	63
Figure 18 : Effet de la température et de l'humidité sur le durcissement réversible des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	63
Figure 19 : Développement de la difficulté-à-cuire pendant le stockage contrôlé des tubercules de <i>D. dumetorum</i> à 15, 30 et 45°C pour une humidité relative de 59, 75 et 86%.	67
Figure 20 : Corrélation entre le durcissement réversible et la teneur en phytate des tubercules stockés à ○-○ = 15°C ; ●-● = 30°C et ◇-◇ = 45°C.	69
Figure 21 : Corrélation entre le durcissement irréversible et la teneur en lignine des tubercules stockés à ○-○ = 15°C ; ●-● = 30°C et ◇-◇ = 45°C.	69

Figure 22 : Evolution de la teneur en eau au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	80
Figure 23 : Evolution de la teneur en cendres au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	81
Figure 24 : Variation de la teneur en polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	83
Figure 25 : Variation de la teneur en tannins au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	83
Figure 26 : Variation de la teneur en phytate au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	85
Figure 27 : Variation de la teneur en inhibiteurs d'amylase au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	87
Figure 28 : Variation de la teneur en oxalates au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	89
Figure 29 : Variation des inhibiteurs de trypsine au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	91
Figure 30 : Variations de la capacité de gonflement de la pâte au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	96
Figure 31 : Variations de la plus petite concentration gélifiante au cours du stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	97
Figure 32 : Surface de réponse de la variation du taux de ramollissement des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> avec le pH et la concentration de NaCl.....	106
Figure 33 : Effet du <i>kanwa</i> sur le ramollissement des tubercules durcis de <i>Dioscorea dumetorum</i>	108
Figure 34 : Effet du <i>kanwa</i> sur la capacité d'absorption d'eau des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	110
Figure 35 : Effet du trempage préalable des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> sur la plus petite concentration gélifiante des farines produites à partir de ces tubercules.....	115
Figure 36 : Effet du trempage préalable des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> sur la capacité de gonflement de la pâte des farines produites à partir de ces tubercules.....	116
Figure 37 : Espace chromatique CIE $L^*a^*b^*$	122
Figure 38 : Variation de la teneur en matière sèche au cours du rouissage naturel et stérile des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i>	124
Figure 39 : Variations du pH au cours du rouissage naturel et stérile des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i>	126
Figure 40 : Variations de l'acidité titrable au cours du rouissage naturel et stérile des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i>	126
Figure 41 : Variations du degré de ramollissement des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> au cours du rouissage naturel et stérile.....	128
Figure 42 : Variations de la teneur en phytate au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i>	130
Figure 43 : Variation de la teneur en polyphénols totaux au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i>	132

Figure 44 : Variation de la teneur en oxalates totaux au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i>	134
Figure 45 : Variation de la teneur en inhibiteurs d'amylase au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i>	136
Figure 46 : Variation de la teneur en inhibiteurs de trypsine au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i>	138
Figure 47 : Effet du rouissage naturel des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> sur la plus petite concentration gélifiante des farines.....	143
Figure 48 : Effet du rouissage naturel des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> sur la capacité de gonflement de la pâte des farines.....	143
Figure 49 : Chromatogramme de la solution standard d'acide aminé Sigma AA S-18	149
Figure 50 : Biodisponibilité <i>in vitro</i> des sucres dans les tubercules de <i>D. dumetorum</i> frais, cuits, durcis, durcis et germés, durcis et fermentés, durcis et traité au <i>kanwa</i>	161
Figure 51 : Variation de la gélatinisation des échantillons de <i>D. dumetorum</i> avec la température de cuisson.	168
Figure 52 : Cinétique de gélatinisation de l'amidon des tubercules de <i>D. dumetorum</i> stockés.	171
Figure 53 : Relations entre la température et la constante de vitesse de gélatinisation des tubercules stockés.....	172
Figure 54 : Relation entre les paramètres de gélatinisation de l'amidon et le temps de stockage des tubercules de <i>D. dumetorum</i>	174
Figure 55 : Cinétiques de gélatinisation des tubercules durcis de <i>D. dumetorum</i> fermentés et traités au <i>kanwa</i>	176
Figure 56 : Relations entre la température et la constante de vitesse de gélatinisation des tubercules durcis fermentés et traités au <i>kanwa</i>	177
Figure 57 : ACH sur la farine de blé et les 15 farines composées blé/igname-durcies.....	192
Figure 58 : Dendogramme (ACH) pour les caractéristiques boulangères et les propriétés fonctionnelles des farines	195
Figure 59 : Scores et chargements Varimax rotés pour les deux premières CP.....	197

Liste des planches

Planche 1 : Tubercules de <i>D. dumetorum</i>	6
Planche 2 : Tige à enroulement sénestre.	6
Planche 3 : feuilles de <i>D. dumetorum</i>	7

Liste des abréviations

- ACH : Analyse en classification hiérarchique
- ACP : Analyse en composantes principales
- AE : Activité émulsifiante
- ANOVA : Analyse à sens unique de la variance
- AACC : American Association of Cereal Chemists
- AOAC : Association of Official Analytical Chemists
- AUI : Unités amylasiques inhibées
- BAPNA : benzoyl-DL-arginine *p*-nitroanilide hydrochloride
- CAE : Capacité d'absorption d'eau
- CAH : Capacité d'absorption d'huile
- CG : Capacité de gonflement
- Cf : Confère
- CIE : Commission Internationale de l'Eclairage
- CP : Composante principale
- D10 : Farine composée 90% blé/10% igname-durcie
- D20 : Farine composée 80% blé/20% igname-durcie
- D30 : Farine composée 70% blé/30% igname-durcie
- D40 : Farine composée 60% blé/40% igname-durcie
- D50 : Farine composée 50% blé/50% igname-durcie
- DO : Densité optique
- DMSO : Diméthylsulfoxyde
- EDTA : Acide éthylène diamine tétraacétique
- F10 : Farine composée 90% blé/10% igname-durcie-fermentée
- F20 : Farine composée 80% blé/20% igname-durcie-fermentée

F30 : Farine composée 70% blé/30% igname-durcie-fermentée

F40 : Farine composée 60% blé/40% igname-durcie-fermentée

F50 : Farine composée 50% blé/50% igname-durcie-fermentée

FAO : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

HR : Humidité relative

HPLC : High Performance Liquid Chromatography

IHL : Indice hydrophile-lipophile

ISE : Indice de solubilité à l'eau

K10 : Farine composée 90% blé/10% igname-durcie-traitée au *kanwa*

K20 : Farine composée 80% blé/20% igname-durcie-traitée au *kanwa*

K30 : Farine composée 70% blé/30% igname-durcie-traitée au *kanwa*

K40 : Farine composée 60% blé/40% igname-durcie-traitée au *kanwa*

K50 : Farine composée 50% blé/50% igname-durcie-traitée au *kanwa*

MS : Matière sèche

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

p/v : poids par volume

PDCAAS : Digestibilité protéique ajustée à l'indice chimique

PPCG : Plus petite concentration gélifiante

SE : Stabilité de l'émulsion

SGMC : Société le Grand Moulin du Cameroun

SPSS : Statistical package for the social sciences

TCA : Acide trichloroacétique

TSC : Taux de séparation cellulaire

TUI : Unités tryptiques inhibées

Introduction générale

Les ignames sont des plantes à racines et tubercules dont l'utilisation comme aliment de base en Afrique remonte à plus de cinq siècles (Coursey, 1972); elles appartiennent au genre *Dioscorea* qui regroupe plus de 600 espèces réparties en une cinquantaine de section (Degras, Arnolin, Poitout & Suard, 1977). Au Cameroun, seules 8 espèces (*Dioscorea dumetorum*, *D. esculenta*, *D. bulbifera*, *D. schimperiana*, *D. semperflorens*, *D. alata*, *D. burkilliana* et *D. cayenensis-rotundata*) sont couramment cultivées et consommées par les populations (Lyonga, 1976; Dumont, Hamon & Seignobos, 1994).

D. dumetorum possède une valeur nutritionnelle supérieure à celle des autres ignames (Trèche, 1989; Mbome Lape & Trèche, 1994, Agbor-Egbe & Trèche, 1995). Il se caractérise par une relative facilité de culture (tuteurage facultatif, récolte mécanisable), de forts rendements (40 T/ha dans les stations agronomiques), une bonne teneur en protéines (9,6 g/100g de matière sèche) avec une composition en acides aminés essentiels assez équilibrée (Trèche, 1989; Agbor-Egbe & Trèche, 1995), une bonne digestibilité de l'amidon du fait de sa structure cristalline proche de celle de l'amidon des céréales (Mbome Lape & Trèche, 1994) et une bonne rétention de l'azote et de certains minéraux (Bewa, Charlet-Lery & Szylit, 1979; Trèche & Guion, 1982; Trèche, 1989; Mbome Lape & Trèche, 1994; Mbome Lape, Agbor-Egbe & Trèche, 1995).

En dépit de ces qualités, l'utilisation des tubercules de *D. dumetorum* comme aliment est entravée par un phénomène de durcissement post-récolte qui limite sa durée de conservation et entraîne d'importantes pertes post-récoltes, aux conséquences économiques néfastes pour les cultivateurs. En effet, quelques heures après la récolte, les tubercules durcissent et deviennent résistants à la cuisson et à la mastication même après une cuisson

prolongée (Trèche & Delpeuch, 1982 ; Sealy, Renaudin, Gallant, Bouchet & Brillouet, 1985 ; Sefa-Dedeh & Afoakwa, 2002). Hormis cette dépréciation de la qualité culinaire du tubercule du fait du durcissement, aucune autre modification au cours du stockage pouvant justifier le rejet de ce tubercule n'a été rapportée. Il a par contre été rapporté que même durcis, les tubercules de *D. dumetorum* possèdent une composition nutritionnelle supérieure à celle des autres tubercules et comparable à celle des céréales (Trèche, 1989 ; Agbor-Egbe & Trèche, 1995 ; Trèche & Agbor-Egbe, 1996). Tout ceci fait que même durci, *D. dumetorum* est un aliment potentiel pour la résolution des problèmes de famine et de malnutrition.

Dans le but d'apporter une plus-value aux tubercules de *D. dumetorum* comme importante source d'aliment et d'énergie, Trèche, Mbome Lape & Agbor-Egbe (1984) ont développé un schéma de transformation des tubercules frais en farine. Mbome Lape (1991) a apporté des modifications à ce schéma de transformation tout en amorçant un essai d'utilisation des tubercules durcis dans la formulation de bouillies infantiles à faible viscosité.

Toutefois, tous les procédés de production de farines à partir des tubercules durcis de *D. dumetorum* développés à ce jour donnent des produits aux qualités organoleptiques médiocres. De même, les mécanismes par le biais desquels les tubercules durcissent et deviennent difficiles à cuire ne sont pas toujours complètement élucidés. Par conséquent, les problèmes posés par le durcissement des tubercules de *D. dumetorum* demeurent non résolus, ce qui conduit les agriculteurs à abandonner progressivement la culture de cette igname, ou alors les obligent à cuire les tubercules immédiatement après la récolte.

Ainsi, la maîtrise des mécanismes de durcissement des tubercules de *D. dumetorum* et la transformation des tubercules durcis en une farine utilisable dans la formulation des produits alimentaires pourrait permettre une meilleure valorisation de cette igname par

l'ouverture de nouveaux circuits économiques qui entraîneraient un surcroît de revenus pour les populations, mais aussi préserver cette importante ressource phylogénétique et contribuer à la lutte contre la faim et la malnutrition.

Cette étude a pour objectif général de valoriser l'igname *D. dumetorum*. Plus spécifiquement, il s'agira de :

- déterminer les mécanismes de durcissement post-récolte des tubercules ;
- évaluer les modifications biochimiques et fonctionnelles au cours du stockage des tubercules ;
- déterminer les conditions de pré-traitement des tubercules durcis en vue de leur transformation en une farine utilisable dans les formulations alimentaires.

Les hypothèses à vérifier dans cette étude sont :

- **Hypothèse 1** : le durcissement des tubercules de *D. dumetorum* s'effectue via les mécanismes généralement associés au durcissement des végétaux à savoir le mécanisme pectine-phytate et le mécanisme de lignification.
- **Hypothèse 2** : le stockage des tubercules de *D. dumetorum* dans les conditions qui prévalent en milieu tropical entraîne une variation significative de leur teneur en antinutriments, ainsi que des propriétés fonctionnelles des farines produites à partir de ces tubercules.
- **Hypothèse 3** : un pré-traitement adéquat des tubercules durcis de *D. dumetorum* peut permettre leur utilisation dans les formulations alimentaires.

Chapitre I. Revue de la littérature

I. 1. Généralités sur les ignames

Les ignames appartiennent à la famille des Dioscoréacées, composée de plantes herbacées ou faiblement lignifiées aux tiges le plus souvent annuelles, volubiles, comportant des vaisseaux supplémentaires elliptiques et au système souterrain en partie pérenne (Degras *et al.*, 1977). La famille des Dioscoréacées comporte deux genres hermaphrodites (*Stenomeris* et *Avetra*) et trois genres dioïques (*Tamus*, *Rajania* et *Dioscorea*) dont seuls les deux derniers donnent des tubercules comestibles ; le genre *Rajania* est limité aux Antilles où l'espèce *Rajania cordata* est parfois consommée (Degras, 1980).

Le genre *Dioscorea* qui représente la quasi-totalité des ignames comestibles regroupe plus de 600 espèces réparties en une cinquantaine de sections surtout distribuées dans les régions intertropicales (Coursey, 1967 ; Degras *et al.*, 1977). Selon les statistiques de la FAO (1999), l'Afrique totalise 96% de la production mondiale des ignames alimentaires.

I. 2. Les ignames au Cameroun

Les ignames sont largement cultivées au Cameroun. Toutefois, l'essentiel de la production est localisée à l'Ouest particulièrement dans les régions de Bambui, Babungo, Bafang, Ekona, en pays Banen et Yambassa, et au Nord dans la plaine de Mbé (Lyonga, 1976 ; Dumont *et al.*, 1994). Huit espèces (*Dioscorea dumetorum*, *D. esculenta*, *D. bulbifera*, *D. schimperiana*, *D. semperflorens*, *D. alata*, *D. burkilliana* et *D. cayensis-rotundata*) y sont couramment cultivées et consommées par les populations (Dumont *et al.*, 1994).

L'importance de la production nationale d'igname est mal connue. Cependant, pour la période de 1979 à 1987, les statistiques de la FAO font apparaître une surface cultivée annuellement allant de 83 000 à 85 000 hectares avec une production variant entre 400 000 et 420 000 tonnes. A partir de 1988, les mêmes statistiques font passer la surface cultivée de 55 000 à 28 000 hectares avec une production chutant de 203 000 à 80 000 tonnes en 1991, ce qui fait clairement apparaître une nette régression de la culture de l'igname au Cameroun et justifie la recherche des voies de diversification de l'utilisation de cette importante source alimentaire.

I. 3. Biologie de *Dioscorea dumetorum* et situation dans la systématique botanique

L'igname *D. dumetorum* appartient à l'embranchement des spermatophytes, sous-embranchement des Angiospermes, classe des Monocotylédones, ordre des Dioscoréales, Famille des Dioscoreaceae et genre *Dioscorea* (Degras, 1980). Au Cameroun, *D. dumetorum* est représenté par 23 cultivars (Lyonga, 1976).

I. 3.1. Caractéristiques morphologiques

Comme les autres ignames, *D. dumetorum* comprend une partie souterraine, avec un système racinaire et des tubercules, et une partie aérienne constituée de lianes feuillées qui fournissent les organes de reproduction sexuée (Degras, 1986 ; Hamon, Dumont, Zoundjhekpon, Tio-Touré & Hamon, 1995).

I. 3.1.1. Les racines et les tubercules

D. dumetorum présente 3 à 12 tubercules obconiques, assez petits (200 à 500 g) restant localisés dans la couche superficielle du sol. Il présente de nombreuses racines tuberculaires inermes. Ses tubercules se caractérisent par un épiderme fin et une chaire de couleur blanche ou jaune safran (Hamon *et al.*, 1995).



Planche 1 : Tubercules de *D. dumetorum*

I. 3.1.2. Les tiges

Les tiges de *D. dumetorum* se caractérisent par un enroulement sénestre, elles sont pubescentes et épineuses jusqu'à une certaine hauteur (Hamon *et al.*, 1995).

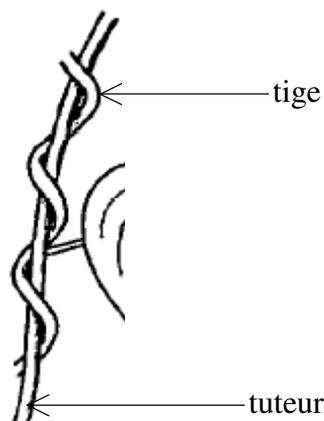


Planche 2 : Tige à enroulement sénestre.

I. 3.1.3. Les feuilles

D. dumetorum possède des feuilles trifoliées avec 3 à 5 nervures ascendantes (Planche 3). Elles sont pubescentes (plus ou moins denses à la face inférieure), épaisses et présentent un pétiole long, pubescent et parfois épineux (Hamon *et al.*, 1995).



Planche 3 : feuilles de *D. dumetorum*.

I. 4. Valeur nutritionnelle de tubercules de *Dioscorea dumetorum*

I. 4.1. Les glucides digestibles

Les glucides digestibles des tubercules d'ignames sont constitués essentiellement d'amidon et d'oses simples ou de diholosides (Trèche, 1989). Les tubercules de *D. dumetorum* sont constitués d'environ 71% d'amidon, 5% de sucres alcool-solubles, 0,9% de fructose, 0,4% de glucose et 3,4% de saccharose (Agbor-Egbe & Trèche, 1995).

I. 4.2. La fraction azotée

Avec une teneur en protéines brutes d'environ 10%, les tubercules de *D. dumetorum* présentent la valeur protéique la plus élevée comparée aux autres racines et tubercules alimentaires (Agbor-Egbe & Trèche, 1995). Les protéines de *D. dumetorum*

présentent une composition en acides aminés essentiels assez équilibrée malgré une légère déficience en lysine et un indice chimique de 93, lorsqu'ils sont comparés à une protéine de référence FAO/OMS (1973).

I. 4.3. Composition en lipides

La composition de la fraction lipidique des ignames est particulièrement intéressante car certains composants, même présents en faible quantité, peuvent avoir des fonctions physiologiques importantes pour la plante ou un intérêt nutritionnel non négligeable pour le consommateur. Les tubercules de *D. dumetorum* présentent une très faible teneur en lipides, d'environ 0,3 g/100 g (Agbor-Egbe & Trèche, 1995). Cette teneur est comparable à celle des autres racines et tubercules alimentaires ; 0,4% pour la patate (Bradbury, 1988), 0,2% pour le taro (Agbor-Egbe & Rickard, 1990) et 0,3% pour le manioc (Rickard & Coursey, 1981). Osagie (1977) a mesuré la teneur en phytostérols de *D. dumetorum* ; elle est de 24 mg/100 g de matière brute. Ces stérols sont respectivement constitués de 16% de β -sitostérol, de 50% de stigmastérol, de 25% de campestérol et de 9,7% de cholestérol.

I. 4.4. Composition minérale

Les tubercules de *D. dumetorum* présentent une teneur en cendres de 2,82% et leur teneur moyenne en éléments minéraux est de 161 mg/100g pour le phosphore, 42 mg/100g pour le calcium, 1050 mg/100g pour le potassium, 57 mg/100g pour le magnésium, 6,7 mg/100g pour le fer, 15,9 mg/100g pour le sodium, 1 mg/100g pour le cuivre et 1,9 mg/100g pour le zinc (Trèche, 1989 ; Agbor-Egbe & Trèche, 1995).

I. 4.5. Les constituants pariétaux

Les parois des cellules du parenchyme des tubercules sont constituées essentiellement de polyosides, couramment désignés sous le terme de glucides membranaires, de protéines de structure et de minéraux (Hoff & Castro, 1969); les glucides membranaires sont principalement composés de cellulose, d'hémicellulose et de substances pectiques. Les tubercules de *D. dumetorum* sont constitués de 4,2 % de cellulose, 1,6% d'hémicellulose, 4,3% de lignine et 1,6% de pentosane (Trèche, 1989 ; Agbor-Egbe & Trèche, 1995).

I. 4.6. Composition vitaminique

D'après par Bell (1981), les tubercules de *D. dumetorum* présentent des quantités non négligeables d'acide ascorbique (19,4 mg/100g de MS), de thiamine (490 µg/100g de MS), de riboflavine (250 µg/100g de MS) et de niacine (1820 µg/100g de MS).

I. 4.7. Caractéristiques de l'amidon

Les amidons contenus dans les tubercules des diverses espèces d'ignames diffèrent tant au niveau de la structure des grains qu'au niveau de certaines de leurs propriétés physico-chimiques. Les grains d'amidon de *D. dumetorum* sont de forme polygonale ou sphérique et de taille inférieur à 10 microns (Szylit *et al.*, 1977 ; Delpeuch, Favier & Charbonnière, 1978). L'amidon de *D. dumetorum* a un pH de 5,8 (Rasper, 1969) et sa teneur en amylose varie de 9,7 à 11,2% (Delpeuch *et al.*, 1978). Le spectre de diffraction aux rayons X de l'amidon de *D. dumetorum* est de type A et est comparable à celui des amidons de céréales, de manioc, de taro et de patate douce (Robin, 1976).

I. 4.7.1. Comportement de l'amidon natif au cours des traitements hydro-thermiques

La température de gélatinisation, définie comme la température à partir de laquelle 50% des grains perdent leur biréfringence en lumière polarisée, est de 68°C pour l'amidon de *D. dumetorum* (Emiola & Delarosa, 1981).

Le gonflement de l'amidon de *D. dumetorum* se réalise en deux phases comme celui de l'amidon de maïs (Delpeuch & Favier, 1981), ce qui indique l'existence de deux types de liaisons internes qui se relâchent à des températures différentes (Leach, MacCowan, & Schoch, 1959). L'amidon de *D. dumetorum* se solubilise moins vite qu'il ne gonfle (Delpeuch & Favier, 1981). La température de début d'empesage est de 73,5°C pour l'amidon de *D. dumetorum* et un pic de viscosité est atteint à 80°C (Trèche, 1989).

I. 4.7.2. Solubilisation et hydrolyse de l'amidon natif dans certaines solutions et par les enzymes

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'hydrolyse des amidons par les α -amylases bactériennes. Les résultats obtenus par Rasper (1969), Delpeuch & Favier (1980) et Trèche (1989) montrent que l'amidon de *D. dumetorum* est beaucoup plus sensible que l'amidon des autres espèces d'ignames à l'hydrolyse enzymatique.

L'observation au microscope électronique de grains soumis préalablement à une hydrolyse enzymatique montre que l'action des enzymes bactériennes sur les grains d'amidon de *D. dumetorum* débute par la destruction de la membrane amyloplastique responsable de l'agrégation des grains et se poursuit par l'attaque des grains en profondeur (endocorrosion) (Gallant, Derrien, Aumaitre & Guilbot, 1973 ; Gallant, Bewa, Buy, Bouchet, Szylit & Sealy, 1982).

I. 4.8. Utilisation digestive et métabolique

Bewa *et al.* (1979) ont signalé que si on examinait les critères de croissance et d'efficacité nutritionnelle mesurés pour les régimes à base de tubercules crus, on noterait que les régimes à base de *D. dumetorum* permettent d'obtenir chez le poulet de meilleurs résultats que les régimes contenant des tubercules d'autres espèces. Les études *in vivo* réalisées par Trèche (1989) ont montré une meilleure rétention de l'azote ingéré chez le coq et, à la fois une digestibilité des protéines plus élevée et une meilleure rétention de l'azote absorbé chez le rat et le jeune enfant pour les régimes à base de *D. dumetorum* que pour les régimes à base de *D. rotundata* quel que soit le mode de préparation des farines.

I. 5. Technologies post-récolte

Contrairement au manioc, les ignames ne peuvent se conserver longtemps en terre au-delà de leur stade de maturité. Elles doivent par conséquent être récoltées dans une période relativement courte et conservées ensuite pour allonger leur période de disponibilité (Trèche, 1989).

I. 5.1. Conservation des tubercules

En raison de leur longue période de dormance, environ deux mois, ce qui permet de conserver les tubercules stockés pendant six mois ou plus, les ignames sont longtemps apparues, contrairement aux autres plantes à racines tropicales, comme bénéficiant d'une bonne aptitude à la conservation (Barreau, 1956 ; Coursey, 1967).

En réalité, des millions de tonnes sont perdues chaque année (Coursey, 1967). Pendant la conservation, le tubercule est soumis à plusieurs facteurs d'altération. Les insectes et les pourritures causent des dégâts d'intensité très variable. Le problème le plus

constant est l'activité métabolique du tubercule qui détermine une perte de poids progressive, avec parallèlement une dégradation de la qualité culinaire et nutritionnelle.

Les pertes pondérales du tubercule atteignent couramment 25% de son poids initial au bout de cinq mois de conservation (Osagie, 1992). Des valeurs semblables ou même sensiblement supérieures ont été relevées par Girardin (1995) en Côte d'Ivoire, sur les ignames *D. cayenensis-rotundata* et *D. alata*. Passam *et al.* (1978) ont montré que les pertes de poids liées au catabolisme sont plus que triplées après la rupture de la dormance.

Quelle que soit le mode de stockage, l'aptitude à la conservation varie en fonction de l'espèce, de la variété, et des conditions de stockage (Passam, 1982). Les pertes de poids consistent en des pertes de matière sèche et en des pertes en eau (Ezeike, 1984 ; Passam, 1982).

I. 5.1.1. Facteurs physiologiques influençant la conservation des tubercules

I. 5.1.1.1. Repos végétatif et dormance

Selon Madec (1963), le repos végétatif correspond à la période au cours de laquelle les tubercules ne peuvent pas germer de façon naturelle même placés dans des conditions optimales. La dormance quant à elle est le temps pendant lequel le tubercule peut être conservé sans germer en utilisant des traitements qui retardent la germination. La durée du repos végétatif est de 3 mois chez *D. dumetorum* (Passam, 1982).

I. 5.1.1.2. Germination

La germination augmente l'intensité respiratoire et accélère l'évaporation ; en outre, elle se traduit par un transfert de matière sèche entre le tubercule et le germe et donc en une perte de poids si le germe est détaché du tubercule. Deux mois après le

débourrement des bourgeons, les germes peuvent atteindre 180 cm et représenter 10% du poids du tubercule (Adesuyi, 1973).

I. 5.1.2. Facteurs physiques influençant la conservation des tubercules

Divers facteurs physiques tels que la température et les blessures occasionnées aux tubercules à la récolte ou au cours des manipulations sont directement ou indirectement impliqués dans les pertes en cours de stockage (Passam, Read & Rickard, 1978 ; Coursey, 1967)

I. 5.1.3. Modes de stockage

Les modes de stockage sont d'autant plus efficaces qu'ils mettent les tubercules à l'abri des déprédateurs et qu'ils assurent des conditions leur permettant de minimiser les pertes sous l'influence des facteurs physiques et physiologiques.

La température de stockage présente une influence significative sur la durée de conservation des tubercules. Coursey & Nwankwo (1967) ont montré qu'un stockage en plein soleil pouvait faire monter la température des tubercules jusqu'à 50°C et occasionner des pertes de poids considérables (59% contre 19% pour un lot stocké à l'ombre après 18 semaines). La température optimale de développement de nombreux micro-organismes se situe entre 25 et 30°C (Adeniji, 1970) tandis qu'entre 15 et 20°C, la température est susceptible d'induire une dégradation irréversible dans les tubercules peu après leur retour à température ambiante (*chilling injury*) ; les tubercules stockés à une température inférieure à ce seuil s'amollissent, se gorgent d'eau et prennent une couleur brune ou grise tandis que leur intensité respiratoire augmente (Passam *et al.*, 1978).

L'humidité relative est un facteur important dont les effets sont complexes : il semble que l'air sec (faible humidité relative) accélère la déshydratation et par conséquent

les pertes de poids. A l'inverse, une humidité relative élevée favorise le pourrissement (Trèche, 1989). Selon Mozie (1984), les pertes de poids seraient significativement moins élevées à 95% d'humidité relative qu'à 85%.

Ezeike (1985) a montré que l'on pouvait réduire de moitié les pertes en stockant les ignames dans des fosses bien aérées. Mozie (1984) a mis en évidence l'effet favorable d'une ventilation intermittente par rapport à une ventilation continue. En combinant les conditions optimales d'hygrométrie et de ventilation, ce dernier est parvenu à limiter les pertes de poids de 22% pour 11 mois de stockage. Quelles que soient les conditions de réalisation d'un stockage, sa réussite dépend avant tout de l'état des tubercules mis en conservation : âge physiologique à la récolte, blessures, infestation par les insectes et les micro-organismes, début de pourrissement (Coursey, 1967).

I. 5.1.3.1. Modes de stockage traditionnels

Les modes de stockage traditionnels des ignames en Afrique ont été décrits par de nombreux auteurs (Waite, 1963 ; Martin, 1972 ; Amon, 1973 ; Coursey, 1976 ; Lancaster & Coursey, 1984). Les tubercules peuvent être laissés dans le sol jusqu'au moment de la vente ou de la consommation. Si ce procédé permet de limiter les pertes de poids sous la dépendance des facteurs physiologiques et physiques (Coursey, 1967 ; Martin & Sadik, 1977), il présente des risques importants d'attaques par les insectes et les rongeurs ; par ailleurs, une inondation peut provoquer le pourrissement des tubercules et un climat trop sec rend difficile la récolte ultérieure.

Les tubercules peuvent également être disposés en tas généralement de forme pyramidale à des endroits protégés du soleil et des inondations (Miege, 1957), ou disposés sur des claies dans des sortes de hangar ou sous des maisons bâties sur pilotis (Barreau,

1956). Parfois, les tubercules sont suspendus à des traverses soutenus par deux piquets (Barreau, 1956) ou aux arbres (Ngong-Nassah, Lyonga, & Ayuk-Takem, 1980).

I. 5.1.3.2. Modes de stockage faisant appel à des technologies non traditionnelles

La réduction des pertes en conservation des ignames a été recherchée par diverses méthodes.

I. 5.1.3.2.1. Le *curing*

C'est une méthode qui consiste à exposer les tubercules pendant une période relativement brève, juste après la récolte, à une température et une hygrométrie élevées pour favoriser la cicatrisation des blessures provoquées par la récolte et éviter l'évolution des pourritures subséquentes. L'évaluation expérimentale de cette technique a cependant fourni des résultats discordants (Girardin, 1995). En effet, ce traitement ne semble être efficace que lors des blessures relativement profondes telles que celles provoquées par des coupures au couteau. En revanche, les blessures dues à des abrasions ou à un pelage sèchent mais ne se cicatrisent pas.

I. 5.1.3.2.2. Utilisation des inhibiteurs de la germination

Plusieurs travaux expérimentaux ont établi l'efficacité antigerminative de l'acide gibbérellique sous la forme GA₃ (Ireland & Passam, 1984 ; Wickham, Passam & Wilson, 1984 ; Igwilo, Ada Mbanaso, Onyia & Atu, 1988 ; Wickham, 1988). Cet effet a été confirmé en Côte d'Ivoire par Girardin (1995) qui a montré que l'allongement de la durée de la dormance induite par l'acide gibbérellique s'accompagne d'une réduction des détériorations causées par les pourritures et d'une diminution des pertes en eau des tubercules sains. Ce résultat permet de prolonger la période de bonne valeur culinaire (et

donc commerciale) des *D. cayenensis-rotundata*. En revanche, le même résultat est un inconvénient pour *D. alata* qui doit perdre de l'eau avant d'être culinairement apprécié en Côte d'ivoire (Girardin, 1995).

I. 5.1.3.2.3. Traitements aux pesticides

L'efficacité de la deltaméthrine pour contrôler les dégâts d'insectes a été démontrée sur *D. alata* (Sauphanor, Bordat, Delvare & Ratnadass, 1987) ; dans certaines conditions, le thiabendazole a diminué les pourritures sur *D. cayenensis-rotundata* (Girardin, 1995) ; le trempage des tubercules dans des solutions pesticides à base de pyréthrinoïdes, effectués dès la récolte, réduit sensiblement le taux d'infestation et les pertes dues aux insectes (Sauphanor & Ratnadass, 1985).

I. 5.1.3.2.4. Egermage manuel

L'égermage manuel périodique des tubercules d'igname permet de réduire sensiblement la perte de poids au cours de la conservation (Girardin, 1995). Cette pratique améliore parallèlement la valeur semencière du tubercule (Nwankiti, 1988).

I. 5.1.3.2.5. Irradiation et abaissement de la température

L'abaissement artificiel de la température, l'irradiation, ou encore la combinaison des deux techniques, est efficace pour prolonger la durée de la dormance et diminuer les pertes de poids des ignames (Osagie, 1992). Cependant, ces méthodes suscitent des réticences chez le consommateur, des difficultés de mise en oeuvre dans l'organisation actuelle du marché et posent des problèmes de rentabilité.

I. 5.1.4. Durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum*

Chez les tubercules de *D. dumetorum*, un phénomène de durcissement se surimpose aux mécanismes habituellement observés chez les autres espèces. Ce phénomène a été signalé pour la première fois par Lyonga, Fayemi & Agboola (1973). Dans les jours qui suivent la récolte, les tubercules présentent une résistance à la mastication qui, en raison de sa persistance après cuisson, les rend impropres à la consommation humaine. Les études menées par Trèche & Delpeuch (1982), Trèche (1989) et Sefa-Dedeh & Afoakwa (2002a) ont pu mettre en évidence que le durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum* résultait de l'apparition d'épaississements membranaires au niveau du parenchyme amylofère et qu'il s'accompagnait d'une augmentation des teneurs en certains constituants pariétaux, notamment en lignine et en pentosanes.

Concernant le déterminisme du phénomène, Trèche & Delpeuch (1982) l'attribuent à une réaction de défense des tubercules contre le milieu extérieur, en particulier contre une déshydratation trop rapide des tissus, ce qui expliquerait, d'une part, que le stockage en atmosphère inerte et le paraffinage des tubercules bloquent totalement le phénomène et que, d'autre part, les tubercules perdent moins de poids et se déshydratent moins vite que ceux des autres espèces d'igname en début de stockage avant le débourrement des bourgeons.

Les études microstructurales réalisées par Sealy *et al.* (1985) et par Afoakwa & Sefa-Dedeh (2002b) ont apporté de plus amples explications au phénomène de durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum* et confirmé certaines hypothèses émises par Trèche & Delpeuch (1982). De ces études il ressort notamment que :

- les épaississements des membranes au niveau du parenchyme amylofère sont lignifiés ;

- au cours du durcissement, une paroi secondaire vient doubler par endroits la paroi des cellules du parenchyme médullaire, essentiellement primaire dans les tissus non durcis ;
- la zone de cellules sclérenchymateuses située juste en dessous de l'épiderme pourrait avoir pour effet de limiter les pertes d'eau au cours du stockage.

Malgré le fait que ces précédentes études aient rapporté diverses modifications liées au durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum*, les mécanismes causant cette détérioration et expliquant l'échec des tubercules à ramollir pendant la cuisson ne sont toujours pas clairement connus.

I. 5.1.4.1. Mécanismes de durcissement des végétaux

Au cours du stockage, certains végétaux durcissent et deviennent difficile à cuire. Il existe plusieurs hypothèses pour expliquer ce phénomène. Le premier mécanisme postulé indique une diminution de l'acide phytique intracellulaire qui est un chélateur de calcium (Mattson, 1946 ; Mattson, Akerberg, Eriksson, Koulter-Andersson & Vahtras, 1950). Selon ce mécanisme, le stockage induit la dégradation du phytate par la phytase, libérant ainsi le calcium lié. Pendant l'imbibition de l'eau et la cuisson, le calcium libre est capable de déplacer les cations monovalents (Na^+) liés par la pectine, ce qui a pour résultat d'insolubiliser la pectine et de renforcer l'adhésion des cellules. Ce mécanisme est soutenu par le fait que le temps de cuisson des végétaux non-durcis augmente considérablement après un trempage dans des solutions de Ca^{2+} ou de Mg^{2+} , alors que la durée de cuisson des végétaux difficile-à-cuire est significativement réduite après trempage dans des agents chélateur tel que l'EDTA (Liu, Phillips, Hung, Shewfelt & McWatters, 1992 ; Aguilera & Rivera, 1992). Toutefois, ce modèle paraît insuffisant pour expliquer totalement la difficulté-à-cuire des aliments, certaines études (Crean & Haisman, 1963 ; Henderson &

Ankrah, 1985) ayant rapporté des corrélations non significatives entre la teneur en phytate et la difficulté-à-cuire. Les autres mécanismes postulés incluent les réactions de lignification (par voie enzymatique ou non) utilisant les composés phénoliques comme précurseurs et qui viendraient créer des ponts entre les pectines (Stanley, 1992 ; Garcia, Filisetti, Udaeta & Lajolo, 1998).

I. 5.2. Transformations technologiques en vue de la consommation par l'homme

A l'exception de l'espèce *D. fandrasi* qui est consommée crue (Degras, 1986), les ignames sont toujours consommées après avoir subi une série de transformations comportant une étape de cuisson (Panigrahi & Francis, 1982). Une distinction peut être faite entre les procédés culinaires appliqués aux tubercules frais en vue de la consommation immédiate et les procédés qui incluent une phase de séchage et autorisent ainsi une conservation prolongée des produits.

I. 5.2.1. Procédés culinaires en vue d'une consommation immédiate

Les procédés culinaires traditionnels ont fait l'objet de nombreuses descriptions (Bell, 1981 ; Olympio, 1982 ; Attaie, Zakhia & Bricas, 1998). C'est ainsi que plusieurs modes de préparation peuvent être distingués :

- La cuisson à l'eau, avant ou après épluchage, en tranches ou en morceaux, qui permet plusieurs modes de consommation :

- en morceau généralement accompagnés d'une sauce ;
- en ragoût dans un mélange d'huile de palme, de viande ou de poisson et d'épices, connue sous le nom de *duo akepassi* en Côte d'Ivoire, *torekou* au Bénin ou *etoh* au Ghana (Asiedu, 1991) ;

- sous forme de *foufou*, après que les morceaux aient été pilés dans un mortier jusqu'à l'obtention d'une pâte glutineuse et visqueuse.

- Le grillage des tubercules entiers sur des braises.

- La friture dans l'huile de palme de morceaux de tubercules ou de tubercules râpés donnant des sortes de beignets.

I. 5.2.2. Procédés technologiques permettant une consommation différée

I. 5.2.2.1. Procédés traditionnels

a) les cossettes d'igname

La transformation de l'igname en cossettes donne un produit intermédiaire stabilisé, plus facile à conserver que les tubercules frais. Avant consommation, les cossettes sont concassées puis moulues en farine. Pour la fabrication des cossettes d'igname, les tubercules sont épluchés, découpés ou non en morceaux, puis cuits à l'eau et séchés au soleil (Attaie *et al.*, 1998). Afin d'éviter le noircissement de la surface des tubercules lors de leur exposition au soleil et de limiter les attaques d'insectes au cours du stockage, divers produits végétaux sont parfois ajoutés à l'eau de cuisson. Ceci confère alors une coloration rougeâtre aux cossettes et rose brun clair à la farine qui résulte de leur mouture (Dumont, 1995). Le rendement de la transformation est de 100 kg de cossettes (dont la teneur en eau est de 12%) pour 240 kg de tubercules frais (Attaie *et al.*, 1998).

b) la farine d'igname

Les modes de préparation de la farine d'igname ont été décrits par de nombreux auteurs avec des variantes au niveau de la phase de cuisson ou de blanchiment préalable au séchage (Onwueme, 1978 ; Dela Rosa & Emiola, 1980 ; Bell, 1981 ; Trèche *et al.*, 1984 ; Adisa, 1985 ; Onayemi, 1986).

L'espèce *D. dumetorum* est considérée comme la plus intéressante pour la fabrication de la farine, en raison de sa teneur assez élevée en protéines et du fait que les tubercules ne subissent pas de coloration au cours du procédé de transformation (Attaie *et al.*, 1998). Toutefois, du fait du durcissement des tubercules de cette igname au cours du stockage, la fabrication de farine à partir de ces tubercules n'est actuellement possible que si la durée de conservation des tubercules frais est assez courte et insuffisante pour altérer leurs caractéristiques organoleptiques (Trèche, 1989).

La farine d'igname est utilisée dans diverses préparations culinaires. Réhydratée, elle permet de reconstituer des pâtes élastiques distinctes du *foufou*, du *foutou* ou de l'igname pilée (Dumont, 1995 ; Coursey & Ferber, 1979).

Selon Osswald (1995), la farine d'igname peut être mélangée avec du lait en poudre et du sucre cristallisé pour préparer des bouillies lactées utilisées en alimentation infantile.

La farine d'igname sert aux Philippines à préparer des desserts instantanés tels que le *halaya* qui est un plat composé d'un mélange de farine d'igname, de lait condensé, de sucre, d'eau et de vanille, le tout étant cuit au four pendant 1 heure (Rosario & Malit, 1984).

Au Japon, le *karukan* est un gâteau mousseline à pâte aérée, préparé à partir d'une farine composée de riz et d'igname (Tanque, Shimozono & Sakoda, 1993).

Le *dégalé* est un gâteau à base d'igname très consommé au Togo. Il est préparé à partir d'une farine composée d'igname et de haricot blanc, mélangée à des condiments (Picard, 1987).

La substitution partielle (jusqu'à 20%) de la farine de blé par la farine d'igname a permis de produire des pains de qualité satisfaisante. Pour la confection des pâtisseries telles que les crêpes et les gâteaux, le pourcentage d'incorporation peut atteindre 50 à 100% (Coursey & Ferber, 1979).

I. 5.2.2.2. Procédés faisant appel à des technologies modernes

Des efforts ont été entrepris pour mettre au point des procédés technologiques destinés à rendre moins fastidieuses certaines étapes de la transformation en farine et à permettre la mise sur le marché de produits nouveaux, le plus souvent obtenus en adaptant les procédés existant déjà pour la pomme de terre (Abe, 1973).

a) Production et utilisation de farines d'ignames selon des technologies modernes

L'épluchage est une étape particulièrement longue pour laquelle il n'est pas possible d'employer, sauf pour *D. esculenta* (Martin, 1974), les procédés uniquement mécaniques du type de ceux utilisés pour la pomme de terre en raison de la forme des tubercules.

Plusieurs études ont permis de préciser les conditions de réalisation de l'épluchage chimique à la soude (Rivera-Ortiz & Gonzalez, 1972 ; Steele & Sammy, 1976 ; Onayemi, Ojo & Adetunji, 1985). Si l'on note des différences d'une espèce à l'autre, les auteurs s'accordent cependant à reconnaître que l'épluchage chimique n'est pas valable pour les tubercules stockés plus de trois semaines.

Des essais ont montré la possibilité d'obtenir des biscuits par cuisson-extrusion à partir d'un mélange composé de 20 à 25% de farine d'igname, 40 à 45% de farine de céréales, 20% de saccharose, 10% d'un concentré protéique et environ 5% d'ingrédients aromatiques (Derungs, 1986) ; ces biscuits après broyage donnent des farines précuites pouvant être transformées instantanément en bouillie.

I. 6. Valeur nutritionnelle des tubercules durcis de l'igname *D. dumetorum*

La composition nutritionnelle des tubercules durcis de l'igname *D. dumetorum* en comparaison à celle des tubercules frais a fait l'objet des études de Trèche & Agbor-Egbe

(1996) et de Afoakwa & Sefa-Dedeh (2001). De ces études, il en ressort sur la base des modifications qualitatives et quantitatives des nutriments que le stockage entraîne des pertes relativement faibles et que les tubercules durcis pourraient couvrir les apports nutritionnels recommandés pour la nutrition humaine. Le Tableau 1 présentent la composition nutritionnelle des tubercules de *D. dumetorum* frais et stockés pendant un mois dans les conditions tropicales ambiantes (18-31°C, 62-100% HR).

Il est significatif de constater à la fin de cette revue bibliographique que la composition en facteurs antinutritionnels des tubercules de *D. dumetorum* n'a pas fait l'objet d'aucune étude.

Tableau 1 : Composition nutritionnelle des tubercules de l'igname *D. dumetorum* frais et stockée pendant un mois dans les conditions tropicales ambiantes (18-31°C, 62-100% HR).

<i>Hydrates de carbone (g/100g MS)</i>	<i>Tubercules frais</i>	<i>Tubercules stockés</i>
Amidon	75,6	71,1
Sucres alcool-solubles	6,3	8,0
Sucres réducteurs	0,9	1,6
Saccharose	4,8	6,4
Fibres NDF	4,6	4,2
Fibres ADF	4,1	4,1
<i>Protéines (g/100g MS) et acides aminés essentiels (g/16g d'azote)</i>		
Protéines (N × 6,25)	7,6	9,0
Isoleucine	4,1	3,2
Leucine	8,1	6,8
Lysine	5,2	4,1
Méthionine + cystéine	2,9	2,5
Phénylalanine + tyrosine	7,3	6,1
Thréonine	4,5	4,0
Tryptophane	1,2	1,2
Valine	5,8	4,3
<i>Minéraux (mg/100g MS)</i>		
Cendres	253	253
Phosphore	166	186
Calcium	37	36
Magnésium	95	103
Fer	9,1	5,5
Zinc	1,8	1,8

Source : Trèche & Agbor-Egbe (1996).

Chapitre II. Mécanismes de durcissement post-récolte des tubercules de l'igname *Dioscorea dumetorum*

II. 1. Introduction

Stockés dans les conditions qui prévalent en milieu tropical (température élevée et forte humidité relative), les tubercules de *D. dumetorum* subissent un phénomène de durcissement caractérisé par la perte de leur habilité à ramollir pendant la cuisson. Le durcissement des tubercules de *D. dumetorum* est un sérieux handicap pour la conservation de cette igname et commence dans les 24 heures qui suivent la récolte (Trèche & Delpeuch, 1982 ; Afoakwa & Sefa-Dedeh, 2001). Il se manifeste par la perte des qualités culinaires qui pourrait dériver d'un ou d'une combinaison de facteurs résultant de réactions normales mais délictueuses par inadvertance associées aux modifications texturales des tubercules. Malgré le fait que plusieurs auteurs (Trèche, 1989 ; Trèche & Agbor-Egbe, 1996 ; Afoakwa & Sefa-Dedeh, 2001 ; Sefa-Dedeh & Afoakwa, 2002a) aient rapporté des travaux sur diverses modifications liées au durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum*, les mécanismes causant cette détérioration et expliquant l'échec des tubercules à ramollir pendant la cuisson ne sont toujours pas clairement élucidés.

Chez les végétaux, les cellules sont liées les unes aux autres au niveau de la lamelle moyenne par l'intermédiaire des polymères pectiques, et c'est cette liaison cellule-cellule qui est responsable de leur texture (Waldron, Smith, Parr, Ng & Parker, 1997). Pendant la cuisson, la protopectine native à l'intérieur des lamelles moyennes se transforme en pectine soluble qui se dépolymérise rapidement, ce qui permet une entrée rapide de l'eau et des mouvements à travers les cellules (Stanley & Aguilera, 1985).

Deux principaux mécanismes ont été proposés pour expliquer la difficulté-à-cuire chez les végétaux : le mécanisme pectine-phytate et le mécanisme de lignification qui supposent que le durcissement au cours du stockage soit dû à l'augmentation de la

difficulté des cellules à se séparer pendant la cuisson, résultante de l'hydrolyse du phytate et du renforcement des membranes cellulaires par un dépôt de lignine (Stanley & Aguilera, 1985 ; Kilmer, Seib & Hosney, 1994). Parmi les interactions ou liaisons responsables du défaut de solubilisation de la lamelle moyenne pendant la cuisson, on inclut les liaisons croisées entre les substances pectiques déméthoxylées par l'intermédiaire des cations divalents et les liaisons croisées des composés phénoliques. Le mécanisme pectine-phytate suppose que les agents chélateurs tels que l'acide phytique soit enzymatiquement hydrolysés et que les cations divalents libérés migrent vers les membranes cellulaires où ils sont engagés dans des réactions croisées avec les pectines déméthoxylées de la lamelle moyenne. Le mécanisme de lignification quant à lui suppose que les composés aromatiques s'accumulent à la surface des membranes cellulaires où ils servent de précurseur dans les réactions de lignification qui viendraient créer des ponts entre les pectines.

Aguilera & Rivera (1992) ont dissocié les mécanismes de durcissement chez le haricot en deux facteurs réversible et irréversible, en trempant les graines de haricot durcies dans une solution d'acide éthylène diamine tétraacétique (EDTA), excellent agent chélateur et échangeur d'ions avant la cuisson. Le traitement à l'EDTA avait pour but d'enlever les cations divalents des graines difficiles à cuire et leur remplacement par des ions monovalents qui surmontent le durcissement Pectine-Phytate dépendant. Le durcissement a été réduit significativement par le traitement à l'EDTA ; cette portion du durcissement total réduit par un trempage à l'EDTA est qualifiée de réversible et le durcissement qui subsiste après trempage est qualifié d'irréversible.

Ce Chapitre a pour objectifs de :

- Mesurer les divers paramètres chimiques et physiques des tubercules de *D. dumetorum* au cours du stockage sous différentes conditions et établir leur rôle dans la difficulté-à-cuire.
- Etudier la relation entre le durcissement réversible et irréversible avec les conditions de stockage.
- Modéliser le phénomène de durcissement.

II. 2. Matériel et méthodes

II. 2.1. Les tubercules

Les tubercules de la variété jaune de l'igname *Dioscorea dumetorum*, ont été récoltés à maturité dans un champ à Esse dans la Province du Centre et immédiatement transportés au laboratoire (dans l'heure qui a suivi la récolte) pour les différentes analyses.

II. 2.2. Conditions de stockage

Des quantités équivalentes de tubercules de *D. dumetorum* fraîchement récoltés ont été stockées dans des conditions définies par Del Valle & Stanley (1995). 10 tubercules (environ 2 300 g) pour chaque expérience, ont été placés des dessiccateurs contenant des solutions aqueuses saturées de différents sels (NaBr, NaCl et K₂CrO₄ pour générer une humidité relative de 59, 75 et 86% respectivement) et placés dans des armoires à température constante (15, 30 et 45°C) pendant 14 jours avec des prélèvements les jours 0, 2, 4, 7 et 14. La température et l'humidité relative ont respectivement été contrôlées à l'aide d'un thermomètre et d'un humidimètre. Aucun développement de moisissure n'a été observé pendant la durée de stockage.

II. 2.3. Préparation des échantillons

Après stockage au temps indiqué, les tubercules ont été lavés à l'eau du robinet, pelés à l'aide d'un couteau inoxydable, découpés en tranches de 0,5 cm d'épaisseur à l'aide d'une trancheuse de cuisine électrique (Siemens) munie d'une lame en acier inoxydable, séchés à 40°C dans une étuve ventilée pendant 24 h et gardés à -21 °C dans des sacs étanches en polyéthylène. Juste avant leur utilisation, les échantillons séchés ont été broyés dans un broyeur à marteau (Campsas 82370, Labastide St-Pierre, France) et passés dans un tamis de 300 µm.

II. 2.4. Analyses physico-chimiques

II. 2.4.1. Matière sèche

La matière sèche a été déterminée suivant la méthode 925.10 (AOAC, 1990). Elle consiste en un étuvage sous pression atmosphérique à 105°C jusqu'à poids constant.

II. 2.4.2. Dureté

La dureté définie comme étant la résistance à l'enfoncement d'une aiguille dans les tranches d'ignames a été mesurée à l'aide d'un pénétromètre suivant le test Magness-Taylor de pénétration dans la chair avec une tige de 11 mm de diamètre. Des tranches d'ignames de 1 cm d'épaisseur ont été utilisées à cette fin, une pénétration maximale de 11 mm a été appliquée à une vitesse de 20 mm/min et la force maximale de pénétration enregistrée (Force MT) exprimée en Newton.

II. 2.4.3. Taux de séparation cellulaire

Le taux de séparation cellulaire (TSC) qui permet d'évaluer le degré de cuisson ou de ramollissement à la cuisson des tubercules a été mesuré suivant la méthode de Parker &

Waldron (1995) avec des modifications. Des tranches de tubercule de 1 cm d'épaisseur ont été cuites dans de l'eau bouillante pendant 30 min puis découpées en cubes de 1 cm de côté à l'aide d'un couteau inoxydable. 10 g d'échantillon ainsi traités (P_1) ont été mélangés à 30 ml d'eau distillée et agités à 1100 tr/min pendant 30 min à l'aide d'un agitateur magnétique (Heidolph, AM 3000 D). Le mélange obtenu a par la suite été décanté et sa teneur en solides-solubles (P_2) évaluée après séchage à l'étuve à 105°C. Le taux de séparation cellulaire a été calculé par la formule suivante :

$$TSC = \frac{P_2}{P_1 \times MS} \times 100,$$

où MS est la teneur en matière sèche de l'igname cuite.

II. 2.4.4. Absorption d'eau

L'absorption en eau des tubercules de *D. dumetorum* a été déterminée suivant la méthode 44-15A (AACC, 2000). 5 tranches de tubercule de 1 cm d'épaisseur ont été trempées dans 200 ml d'eau distillée pendant 1, 3, 6, 12 et 24 h à température ambiante. Après trempage au temps approprié, l'eau a été enlevée de la surface des tranches par imbibition à l'aide d'un papier absorbant. Le gain de poids pris comme étant la quantité d'eau absorbée a été exprimée en pourcentage d'eau absorbée et calculé en gramme d'eau absorbé par 100 g d'igname.

II. 2.4.5. Capacité de rétention d'eau

La capacité de rétention d'eau des échantillons trempés pendant 24 h a été mesurée à travers la détermination de la quantité d'eau libre suivant la méthode par centrifugation de Jauregui, Regenstein & Baker (1981). Environ 3 g d'échantillon ont été enveloppés dans du papier filtre Whatman n°3 puis centrifugés à 4000 trs/min et l'eau expressible a été calculée par l'équation suivante :

$$\% \text{ Eau Expressible} = \frac{(\text{masse échantillon non centrifugé}) - (\text{Masse échantillon centrifugé})}{(\text{Masse échantillon non centrifugé})} \times 100$$

II. 2.4.6. Pertes en solides-solubles

5 tranches de tubercules de 1 cm d'épaisseur ont été trempées dans 200 ml d'eau distillée à température ambiante pendant 1, 3, 6, 12 et 24 h. Après trempage au temps approprié, l'eau de trempage a été récupérée, partiellement séchée dans une étuve ventilée à 90°C, lyophilisée et pesée pour déterminer la quantité de solides-solubles perdues.

II. 2.4.7. Acide phytique

L'acide phytique a été déterminé par la méthode de Mohammed, Ponnampereuma & Youssef (1986). Environ 5 g d'échantillon broyé ont été placés dans un Erlen de 125 ml puis 25 ml d'acide trichloroacétique 3 % y ont été ajoutés et le mélange agité légèrement pendant 45 min à température ambiante. 8 ml du mélange ont été prélevés et centrifugés à 20 000 trs/min pendant 15 min. 5 ml du surnageant obtenu ont été mélangés à 3 ml de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1% préparée dans du HCl 1 N puis chauffés dans un bain-marie bouillant pendant 45 min, refroidis et centrifugés à 20 000 tr/min pendant 10 min. Le culot obtenu a par la suite été incubé avec 1 ml de HCl 0,5 N à température ambiante pendant 2 heures, puis 7 ml d'eau et 3 ml de NaOH 1,5 N y ont été ajoutés et le mélange chauffé dans un bain-marie bouillant pendant 15 min. Une fois refroidi, le mélange a été centrifugé à 20 000 trs/min pendant 10 min. 0,2 ml du surnageant ont été mélangés à 4,6 ml d'eau et à 2 ml de solution chromogénique puis le mélange a été chauffé à 95°C pendant 30 min. Après refroidissement, l'absorbance a été lue à 830 nm contre un blanc. L'étalonnage a été effectué en traitant 0,58 g d'acide phytique comme l'échantillon et la teneur en phytate de l'échantillon exprimé en mg pour 100 g de matière sèche.

II. 2.4.8. Polyphénols totaux

Les polyphénols totaux ont été évalués suivant la méthode spectrophotométrique utilisant le réactif Folin-Ciocalteu décrite par Swain & Hillis (1959). Environ 0,5 g d'échantillon a été pesé dans un Erlen et 25 ml d'acétone glacé 85% y ont été ajoutés. Ensuite, le mélange obtenu a été agité à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 30 min, filtré sous vide à travers un filtre Millipore HVLP de 0,5 μm et le résidu rincé deux fois avec deux aliquotes de 10 ml d'acétone glacé 85%. La somme des filtrats obtenus a été concentré dans un volume d'environ 5 ml à l'aide d'un Rotavapor à 40°C. L'extrait aqueux obtenu a été introduit dans une fiole jaugée de 25 ml, le volume complété jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée et une quantité aliquote de 200 μl pipetée dans un tube à essai. 1,38 ml d'eau distillée et 200 μl du réactif Folin-Ciocalteu ont été ajoutés puis 3 min plus tard, 400 μl de Na_2CO_3 20% ont été ajoutés dans le milieu. Le mélange a été incubé pendant 40 min dans un bain-marie à 40°C et l'absorbance lue contre un blanc à 745 nm. L'étalonnage a été réalisé à l'aide d'une solution fraîchement préparée de 0,81 mg d'acide gallique/eau distillée.

II. 2.4.9. Lignine

La lignine a été déterminée par la méthode gravimétrique après hydrolyse acide du résidu alcool-soluble préparé dans les conditions établies par Saura-Calixto, Goñi, Mañas & Abia (1991). 2,5 g d'échantillon ont été traités quatre fois avec 25 ml d'une solution à 1% (v/v) de HCl 11 N dans le méthanol pendant 1 h sous agitation continue puis centrifugés à 2000 tr/min pendant 10 min. Le résidu obtenu a été alors mélangé avec 100 ml de H_2SO_4 12 M et hydrolysé pendant 3 h à température ambiante sous agitation. La solution obtenue a été diluée avec de l'eau distillée pour obtenir une concentration de H_2SO_4 1 M, puis chauffée à 100°C pendant 2,5 h sous agitation, refroidie, filtrée sous vide à travers un filtre Millipore HVLP de 0,5 μm et rincée avec de l'eau distillée bouillante

puis de l'acétone. Le filtre contenant la lignine a enfin été séché dans une étuve à 60°C pendant une nuit et pesé. Le résultat a été exprimé en gramme de lignine par 100 g de matière sèche.

II. 2.5. Effet de l'EDTA sur l'habilité des tubercules à ramollir pendant la cuisson

L'essai avec l'EDTA s'est fait dans les conditions définies par Aguilera & Rivera (1992). 10 tranches de tubercules de *D. dumetorum* de 1 cm d'épaisseur ont été trempées dans 300 ml d'eau distillée ou dans une solution d'EDTA (EDTA Na₂ 5 %, pH 7) à température ambiante pendant 18 h et bouillies pendant 30 min dans 600 ml d'eau distillée ou de solution d'EDTA. Après refroidissement, le taux de ramollissement des tubercules a été mesuré tel que décrit précédemment.

II. 2.6. Calcul des cinétiques

Les variations au cours du temps de stockage des différents composés mesurés dans les tubercules ont été analysées à travers l'étude de leur cinétique. L'expression générale de vitesse de réaction pour les cinétiques de modification des composés dans les aliments peut s'écrire comme suit (Labuza & Riboh, 1982 ; Van Boekel, 1996) :

$$-\frac{d[C]}{dt} = k[C]^m, \quad (1),$$

où $[C]$ est la valeur quantitative du composé étudié, k la constante de vitesse de la réaction et m l'ordre de la réaction. L'équation pour le premier ordre après intégration de l'Equation (1) peut s'écrire :

$$\ln \frac{[C]_t}{[C]_0} = kt, \quad (2),$$

où $[C]_0$ et $[C]_t$ sont les concentrations du composé étudié au début du stockage et au temps t (jour) respectivement.

La dépendance de la constante de vitesse de dégradation (k_T) à la température a été quantifiée par l'équation d'Arrhenius

$$K_T = A_0 \exp(-E_a/RT), \quad (3),$$

où E_a est l'énergie d'activation (cal mole⁻¹), R la constante des gaz (1,987 cal mole⁻¹ K⁻¹), T la température absolue (°K) et A_0 une constante pré-exponentielle.

Les différents paramètres des équations ont été trouvés par analyse de régressions à l'aide du logiciel SigmaPlot 8.02.

II. 2.6. Modélisation des données du durcissement

La version simplifiée du modèle du durcissement développé par Del Valle, Aguilera, Hohlberg, Richardson & Stanley (1993), tel que proposé par Del Valle & Stanley (1995) a été utilisée pour cette étude. Un modèle cinétique d'ordre 1 a ainsi été utilisé pour prédire l'augmentation de la difficulté-à-cuire (F ; % cellules non-séparées) des tubercules avec le temps de stockage (t ; jours) comme une fonction de l'humidité relative (HR ; %) et de la température (T ; °K), c'est-à-dire

$$F = F_\infty - (F_\infty - F_0)e^{-kt}, \quad (4)$$

$$\text{où } k = (k_0 + \alpha(HR_r)e^{\frac{-E_a}{RT_r}});$$

$$F_\infty = (F_{\infty,0} + \beta(HR_r)e^{\frac{-K}{RT_r}});$$

$$HR_r = HR - 59;$$

$$\frac{1}{T_r} = \frac{1}{T} - \frac{1}{288}$$

Le terme k dans l'Equation (4) représente la constante cinétique de la vitesse de durcissement (jour⁻¹); F_0 et F_∞ la difficulté-à-cuire des tubercules au temps initial ($t = 0$) et final ($t \rightarrow \infty$) respectivement; k_0 et $F_{\infty,0}$ la constante cinétique de vitesse (jour⁻¹) et la

difficulté-à-cuire (% cellules non-séparées) respectivement, à une humidité relative de référence ($HR = 59$) et température absolue ($T = 288^\circ\text{K}$); α et β sont les paramètres du modèle reliés à HR ; E_a et K sont respectivement l'énergie d'activation (cal mole^{-1}) et la constante d'équilibre (cal mole^{-1}) de la réaction; R est la constante des gaz ($1,987 \text{ cal mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

k_0 , F_0 , $F_{\infty, 0}$, α , β , E_a et K ont été calculés en ajustant l'Equation (4) aux données expérimentales en utilisant une procédure de régression non-linéaire itérative, à l'aide des logiciels SigmaPlot 8.02 et STATISTICA 6. Les dérivées partielles résiduelles du modèle, suivant les paramètres du modèle, ont été régressées de manière itérative jusqu'à ce que le critère de convergence soit atteint. La convergence était acceptée lorsque la réduction dans la somme des carrés de l'erreur était inférieure à 10^{-6} dans une itération.

II. 2.6. Analyses statistiques

Le dispositif expérimental est factoriel $3 \times 3 \times 5$, soit 3 températures de stockage, 3 humidités relatives et 5 temps de stockage. Toutes les mesures ont été effectuées en triple. Les analyses statistiques des résultats ont été effectuées à l'aide des logiciels STATISTICA 6 (Data Analysis software system, StatSoft, Inc., USA), SPSS 10.1 et SigmaPlot 8.02. Les comparaisons entre les variables dépendantes ont été déterminées par analyse de variance (ANOVA), test de Duncan, analyse de corrélation et analyse de régression multiple. La signification statistique a été définie au niveau 5%.

II. 3. Résultats et discussion

II. 3.1. Absorption d'eau, capacité de rétention d'eau et pertes en solide-soluble

La quantité d'eau absorbée par unité de masse des tubercules augmente avec le temps de trempage (Figure 1). D'une manière générale, le profil d'hydratation des ignames stockées dans les différentes conditions est caractérisé par l'augmentation vers une

constante suivant une relation empirique de type $y = aLn(t) + b$. Les tubercules stockés à une faible température et une faible humidité relative (15°C, 59% HR) ont exhibé une plus forte vitesse d'absorption d'eau à partir du 2^{ème} jour de stockage ($P \leq 0,05$) comparée à ceux stockés à une température et humidité relative moyennes (30°C, 75% HR) et à ceux stockés à une température et une humidité élevées (45°C, 86% HR). En outre, quelles que soient les conditions de stockage, on note une diminution de la vitesse d'absorption d'eau avec la durée de stockage ($P \leq 0,05$).

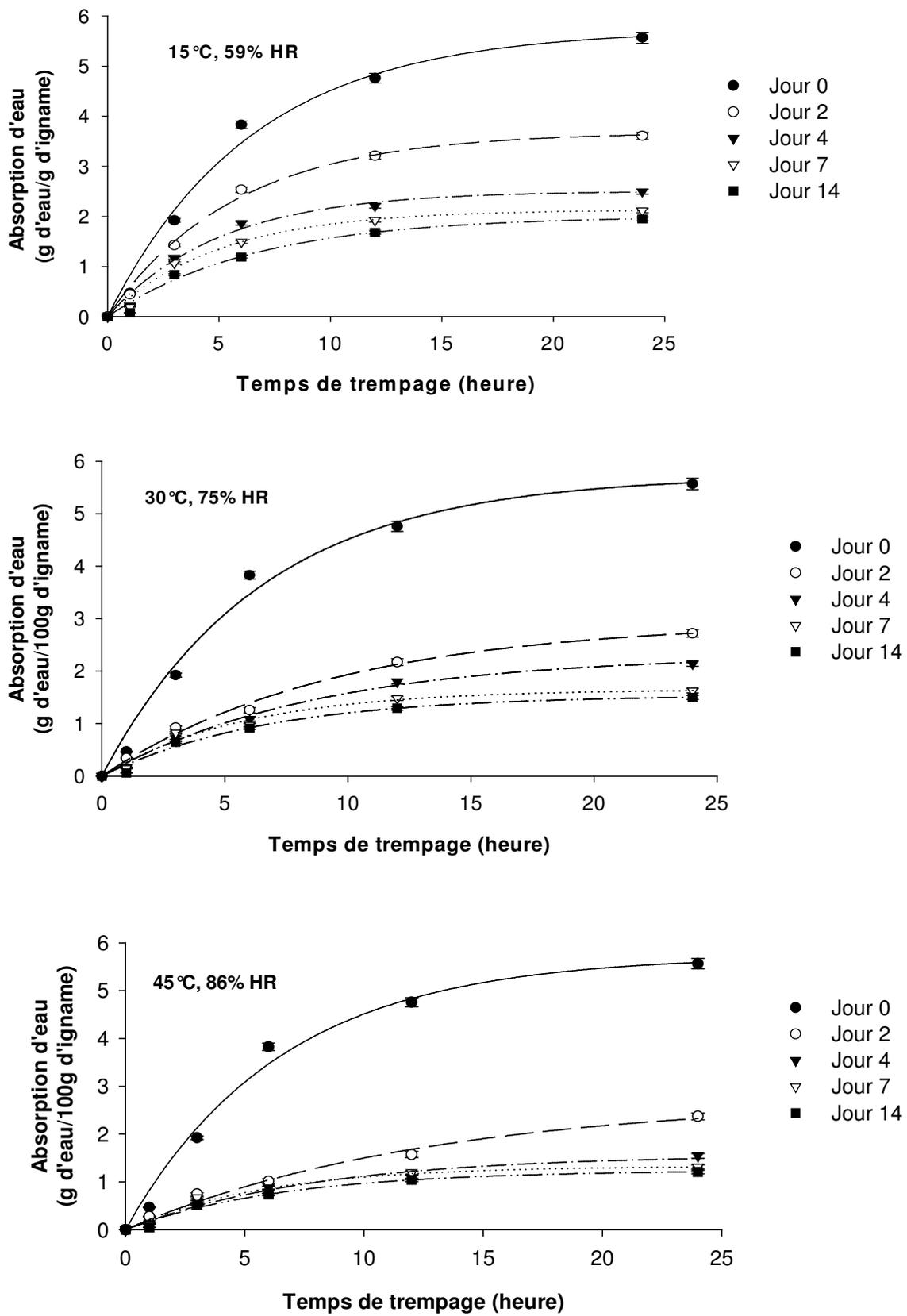


Figure 1 : Cinétiques d'absorption d'eau des échantillons d'igname stockés pendant 0, 2, 4, 7 et 14 jours.

D'autre part, l'eau expressible qui détermine la capacité de rétention d'eau augmente significativement avec le temps de stockage des tubercules (Figure 2), suggérant que l'absorption d'eau dans les cellules diminue avec le stockage des tubercules. Les tubercules stockés à une température et une humidité relative faibles (15°C, 59% HR) présentent une faible vitesse d'augmentation de l'eau expressible comparé à ceux stockés à des températures et humidités relatives plus élevés.

La diminution de la capacité des tubercules à absorber de l'eau observée dans cette étude pourrait être due aux différences microstructurales des tubercules stockés, étant donné que les études antérieures (Trèche & Delpeuch, 1979; Sealy *et al.*, 1985; Afoakwa & Sefa-Dedeh, 2002a) ont associé le durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum* à un épaissement de la membrane cellulaire. Il peut être déduit des résultats obtenus dans cette étude que l'épaissement de la membrane cellulaire des tubercules de *D. dumetorum* pendant le stockage ralentit de manière significative la capacité des tubercules à absorber de l'eau.

Un phénomène similaire à celui obtenu avec l'absorption d'eau est observé avec les pertes en solides-solubles (Figure 3) qui diminuent significativement ($P \leq 0,05$) avec le stockage.

Ces résultats indiquent que le stockage des tubercules de *D. dumetorum* affecte les échanges membranaires. Cette diminution de la perméabilité membranaire des tubercules avec le temps de stockage pourrait justifier leur échec à la cuisson. En effet, d'après Stanley & Aguilera (1985), l'échec des cellules à se séparer à la cuisson pourrait se justifier par une résistance des cellules à l'entrée et à l'écoulement de l'eau. Les résultats obtenus ici suggèrent qu'un stockage à une température et une humidité relative faibles retardent ce phénomène alors qu'une température et une humidité relative élevées l'accélèrent.

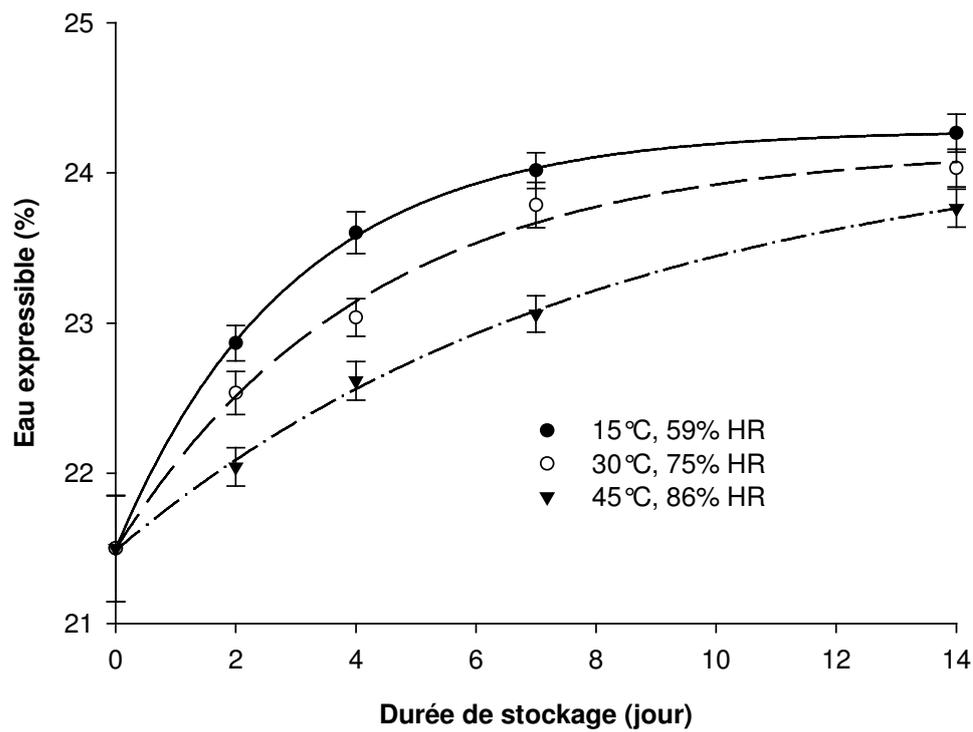


Figure 2 : Eau exprimable des tubercules de *D. dumetorum* stockés à 15°C, 59% HR, 30°C, 75% HR et 45°C, 86% HR.

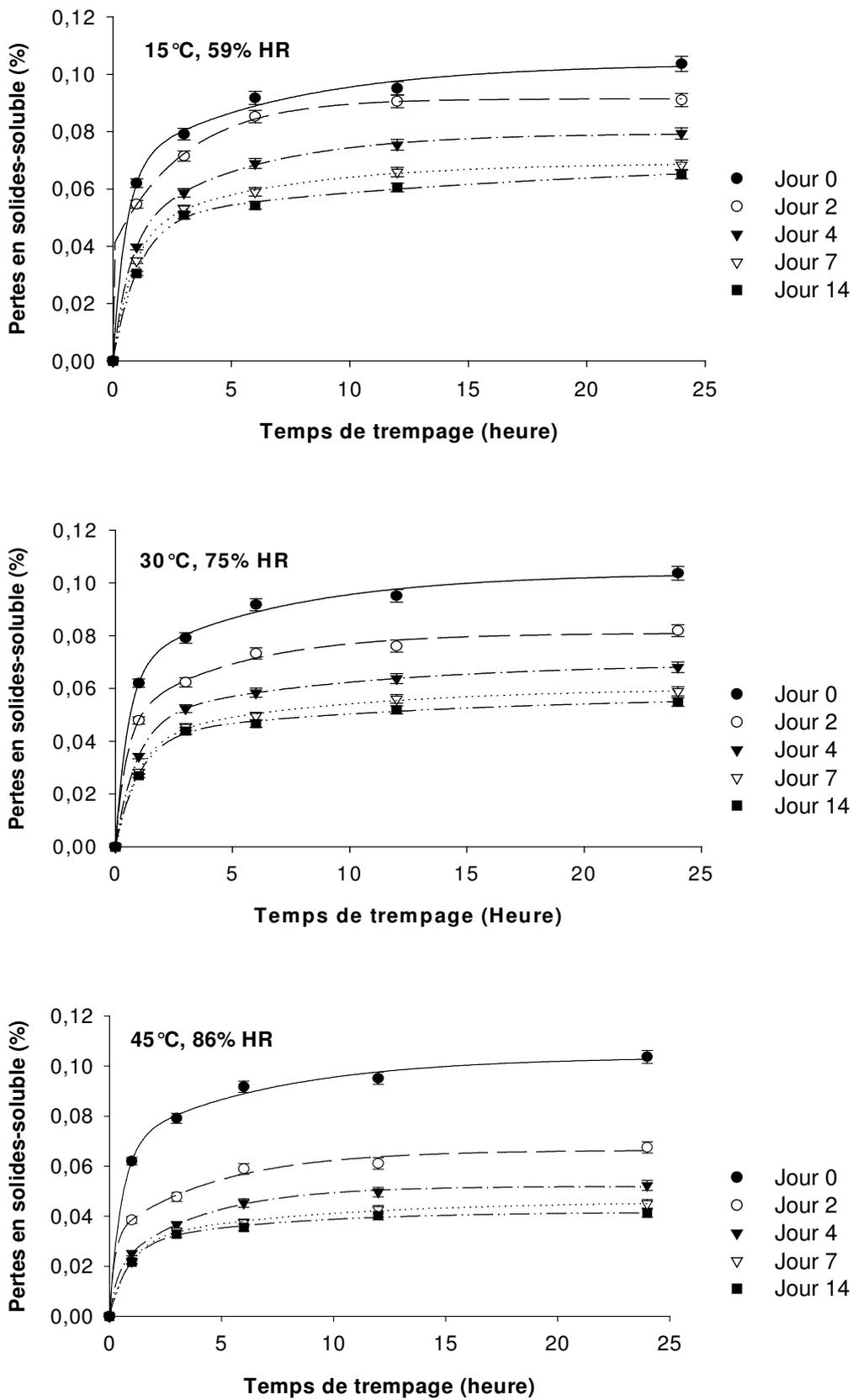


Figure 3 : Cinétiques de pertes en solide-soluble des échantillons stockés pendant 0, 2, 4, 7 et 14 jours.

II. 3.2. Changement de texture

Les mesures de la dureté et du taux de séparation cellulaire pendant la cuisson ont été utilisées pour déterminer les propriétés texturales des tubercules de *D. dumetorum* au cours du stockage. La dureté et l'habilité des tubercules à ramollir pendant la cuisson sont significativement affectées par les conditions et le temps de stockage. Quelles que soient les conditions de stockage, la dureté des tubercules augmente avec le temps de stockage (Figure 4) tandis que l'on observe une diminution du taux de séparation cellulaire (Figure 5). Une corrélation significative a été trouvée entre la dureté et le taux de séparation cellulaire ($r = -0,774$; $P < 0,01$), ce qui indique que le durcissement des tubercules au cours du stockage se traduit par un échec des cellules à se séparer au cours de la cuisson. Le durcissement post-récolte des tubercules, caractérisé par la difficulté des cellules à se séparer pendant la cuisson serait lié à un renforcement de la liaison cellule-cellule au niveau de la lamelle moyenne pendant le stockage. Les résultats obtenus dans cette étude sont en phase avec les observations ultrastructurales effectuées par Afoakwa & Sefa-Dedeh (2002a) qui ont trouvé une augmentation prononcée de l'épaisseur des membranes cellulaires de la lamelle moyenne avec le durcissement des tubercules. Il a été proposé que le durcissement des tubercules de *D. dumetorum* au cours du stockage soit causé par un dépôt additionnel des constituants membranaires, qui entraîne un épaissement et une lignification des membranes de la lamelle moyenne des cellules membranaires dans les tubercules (Trèche, 1989 ; Afoakwa & Sefa-Dedeh, 2002a). Ceci pourrait expliquer les changements de texture des tubercules de *D. dumetorum* au cours du stockage.

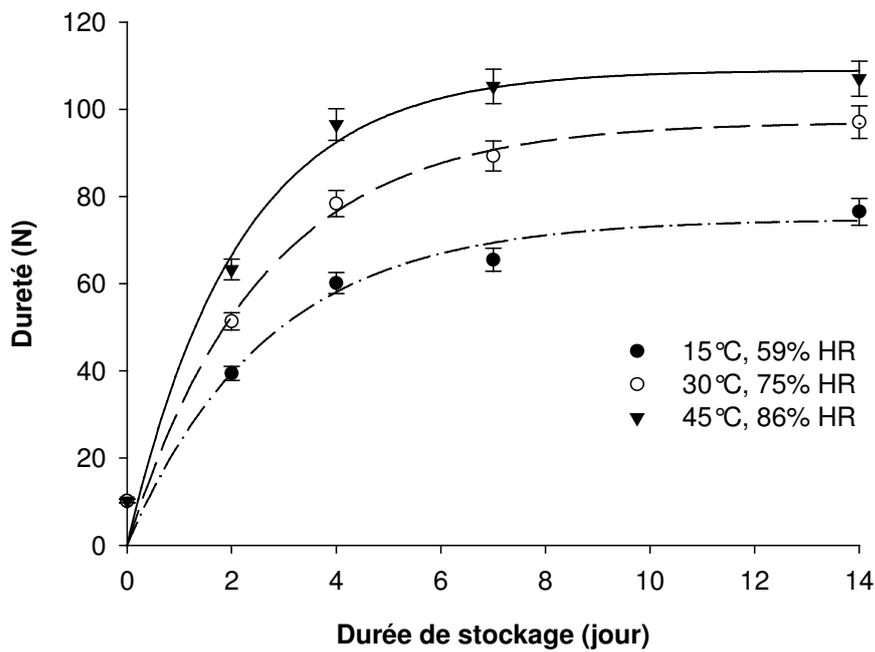


Figure 4 : Dureté des tubercules de *D. dumetorum* stockés à 15°C, 59% HR, 30°C, 75% HR et 45°C, 86% HR.

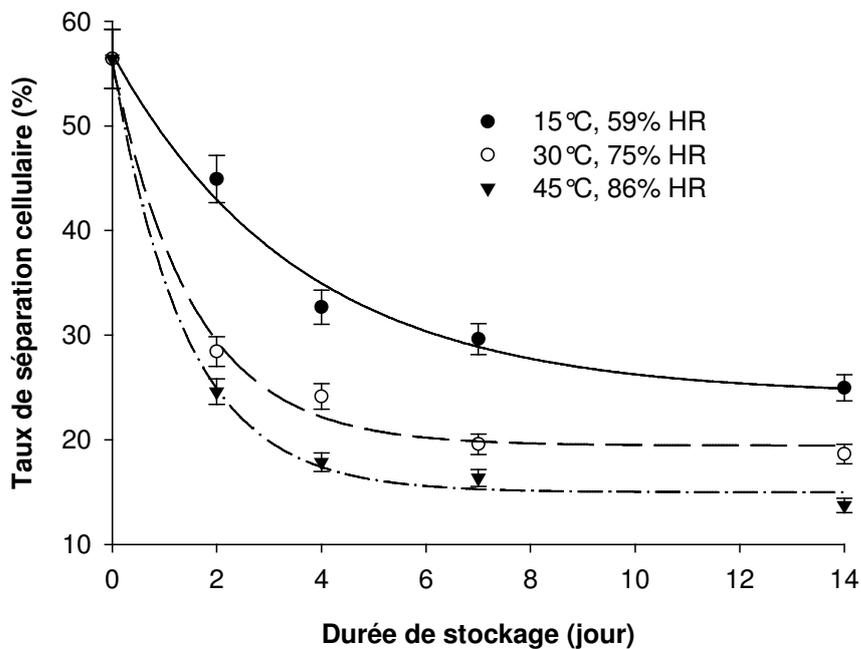


Figure 5 : Taux de séparation cellulaire après cuisson des tubercules de *D. dumetorum* stockés à 15°C, 59% HR, 30°C, 74% HR et 45°C, 86% HR.

Les échantillons stockés à une faible température et une humidité relative faible présentent une faible vitesse de durcissement comparés à ceux stockés à une température et une humidité relative élevées, ce qui suggère que le durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum* soit sous la dépendance des conditions de stockage. L'analyse de variance a montré que les conditions et le temps de stockage affectent significativement ($P \leq 0,05$) la dureté et le taux de séparation cellulaire des tubercules pendant le stockage (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs de F pour la dureté et le taux de séparation cellulaire des tubercules de *D. dumetorum*.

Variables	Dureté	Taux de séparation cellulaire
Temps de stockage	189,66*	85,18*
Condition de stockage	73,27*	254,76*

* Significatif à $P < 0,05$.

II. 3.3. Variation de la teneur en acide phytique

Les données présentant l'effet du stockage sur la teneur en phytate des tubercules de *D. dumetorum* sous les différentes conditions de stockage sont présentées au Tableau 3. L'analyse de variance (ANOVA) a montré un effet significatif ($P \leq 0,05$) du temps et des conditions de stockage des tubercules sur la teneur en acide phytique. On note une diminution de la teneur en phytate avec le temps de stockage. Ce résultat est comparable à celui obtenu par Hincks & Stanley (1986) au cours du stockage du haricot. Les pertes en phytate au cours du stockage des végétaux ont été attribuées à l'activation de la phytase (*meso*-inositol hexaphosphate phosphohydrolase), enzyme naturellement présente chez les végétaux (Mattson *et al.*, 1950 ; Henderson & Ankrah, 1985).

Utilisant la régression linéaire, les données des pertes en phytate ont été analysées à l'aide de l'équation standard intégrée de vitesse (Equation (2)) pour déterminer l'ordre et la constante de vitesse de la réaction de dégradation. Un coefficient de corrélation $\geq 0,9$ a été obtenu dans tous les cas (Figure 6), confirmant ainsi que la dégradation du phytate au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum* suit une cinétique d'ordre 1 à toutes les conditions de stockage. Le temps nécessaire pour que la teneur en acide phytique diminue de 50% de sa teneur initiale a été calculée à partir de la constante de vitesse tel que « $0,693/k$ »

Le Tableau 4 montre les constantes de vitesse et les temps de demi-vie ($t_{1/2}$) du phytate des tubercules de *D. dumetorum*. Il en ressort que les vitesses de dégradation du phytate peuvent être classées en 3 catégories (lente, moyenne et élevée), en fonction des conditions de stockage : 15°C, 59% HR ; 30°C, 75% HR et 45°C, 86% HR. La vitesse de dégradation du phytate des tubercules stockés à faible température et faible humidité relative (15°C, 59% HR) est significativement inférieure à celle des tubercules stockés dans les conditions de température et d'humidité relative plus élevées (HR, 30°C, 75% HR et 45°C, 86% HR). La Figure 7 présente la courbe d'Arrhenius pour la dégradation du phytate dans les tubercules de *D. dumetorum*. Sa nature linéaire indique que la perte en phytate est sous la dépendance de la température de stockage. L'énergie d'activation (E_a) est égale à 3,52 kcal.mole⁻¹.

Tableau 3 : Variations de la teneur en phytate (mg/100g de MS) au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

Jour de stockage	Conditions de stockage		
	15°C, 59% HR	30°C, 75% HR	45°C, 86% HR
0	655,3 ± 2,6 ^a	655,3 ± 2,6 ^a	655,3 ± 2,6 ^a
2	623,6 ± 1,5 ^b	584,2 ± 1,0 ^b	562,6 ± 1,8 ^b
4	566,7 ± 3,4 ^c	542,5 ± 2,5 ^c	512,9 ± 2,4 ^c
7	536,3 ± 2,6 ^d	497,6 ± 2,2 ^d	456,0 ± 3,2 ^d
14	494,6 ± 1,2 ^e	454,8 ± 2,5 ^e	397,7 ± 2,5 ^e

Moyenne ± écart type ; n = 3

Les moyennes dans une colonne ayant les exposants différents sont significativement différentes à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

Tableau 4 : Constantes de vitesse et demi-vie de dégradation du phytate dans les tubercules de *D. dumetorum*.

	Conditions de stockage		
	15°C, 59% HR	30°C, 75% HR	45°C, 86% HR
k (jour ⁻¹)	0,019	0,025	0,034
$t_{1/2}$ (jour)	36,5	27,7	20,4
R^2	0,92	0,90	0,91

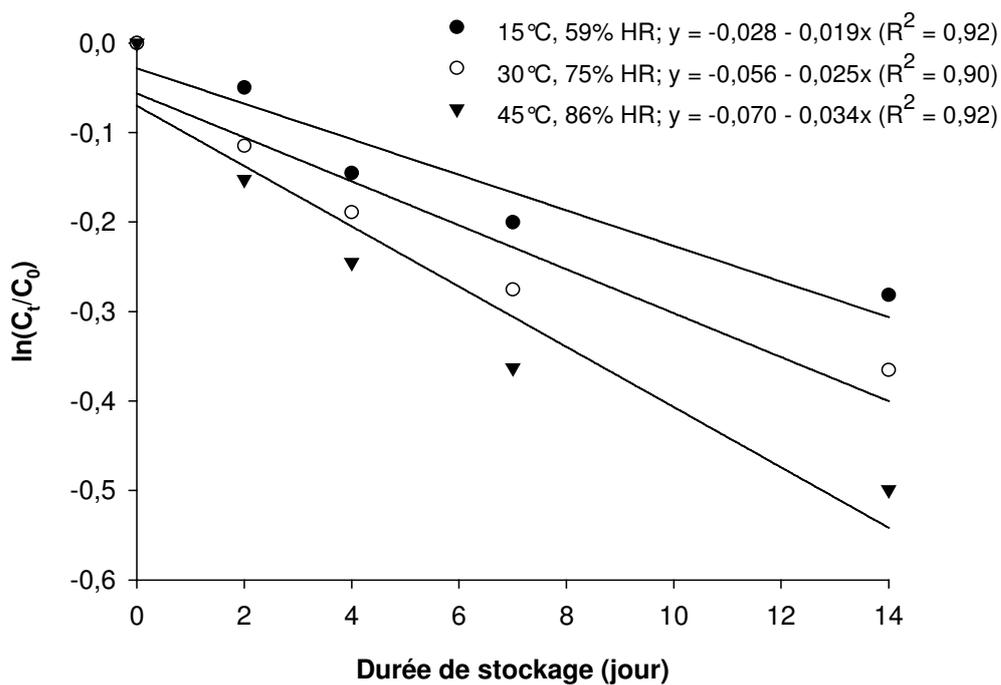


Figure 6 : Cinétique d'ordre 1 de dégradation du phytate au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

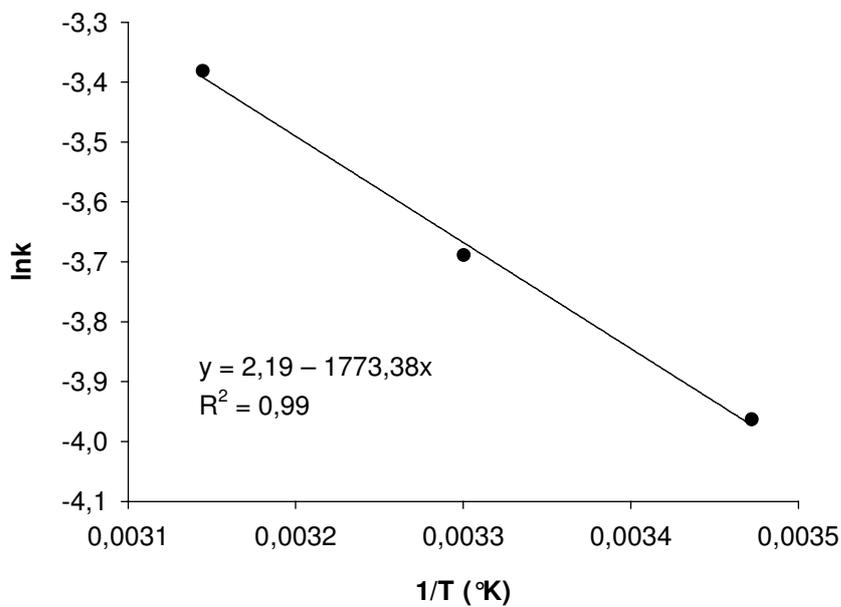


Figure 7 : Courbe d'Arrhenius pour la dégradation du phytate au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

La dégradation des phytates observée dans cette étude a été associée au phénomène de durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum*. Une tendance générale a été observée entre la vitesse de diminution du phytate et le développement de la difficulté-à-cuire des tubercules (Figure 8). Il existe une corrélation significative ($r = 0,878$; $P < 0,01$) entre ces deux paramètres. Ceci suppose que le phytate est un facteur opérant dans le phénomène de durcissement et la difficulté-à-cuire des tubercules de *D. dumetorum*. La relation entre la difficulté-à-cuire et la teneur en phytate a également été rapportée avec des coefficients de corrélations significatifs par plusieurs auteurs dans diverses espèces et variétés de végétaux (Mattson, 1946 ; Mattson *et al.*, 1950 ; Kumar, Venkataraman, Jaya & Krishnamurth, 1978 ; Longe, 1983 ; Moscoso, Bourne & Hood, 1984 ; Hincks & Stanley, 1986).

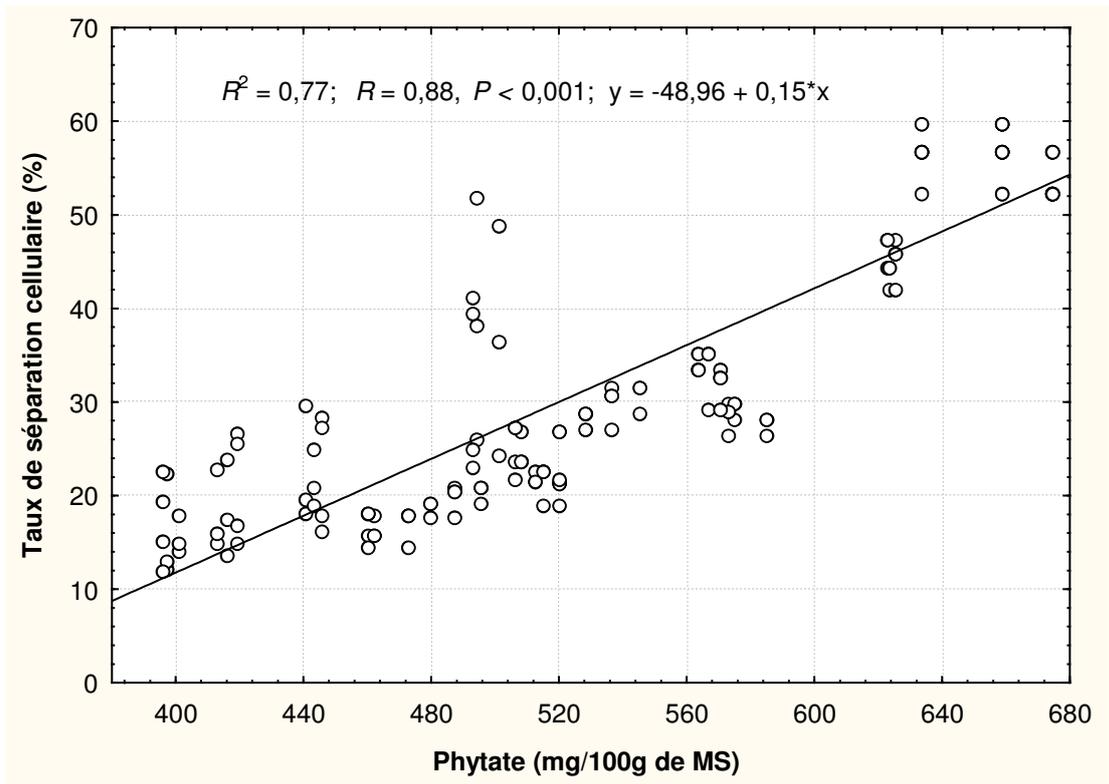


Figure 8 : Corrélation entre l'acide phytique et le taux de séparation cellulaire.

II. 3.4. Variation des teneurs en polyphénols totaux et en lignine

Le tableau 5 présente les données expérimentales des polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*. Les résultats de l'analyse de variance ont montré un effet significatif du temps et des conditions de stockage sur la teneur en polyphénols totaux. On note une diminution de la teneur en polyphénols totaux avec l'augmentation du temps de stockage. D'autres études ont également rapporté une diminution de la teneur en polyphénols au cours du stockage des végétaux qui subissent un phénomène de durcissement post-récolte (Deshpande & Cheyan, 1985 ; Hincks & Stanley, 1986).

La Figure 9 montre que la diminution de la teneur en polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum* suit une cinétique d'ordre 1, pour toutes les conditions de stockage utilisées.

Le Tableau 6 présente les constantes de vitesse et les temps de demi-vie des polyphénols totaux pendant le stockage des tubercules. On note une augmentation de la vitesse de diminution des polyphénols totaux, des conditions de température et d'humidité relative faibles vers les conditions de température et d'humidité relative élevées. L'allure linéaire de la courbe d'Arrhenius (Figure 10) indique que la diminution de la teneur en polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules est sous la dépendance de la température de stockage. L'énergie d'activation trouvée est de 4,95 kcal mole⁻¹.

Tableau 5 : Variation de la teneur en polyphénols totaux (mg/100g de MS) au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

Jour de stockage	Conditions de stockage		
	15°C, 59% HR	30°C, 75% HR	45°C, 86% HR
0	311,9 ± 0,2 ^a	311,9 ± 0,2 ^a	311,9 ± 0,2 ^a
2	304,1 ± 1,5 ^b	287,6 ± 1,6 ^b	273,7 ± 2,9 ^b
4	292,5 ± 4,0 ^c	275,4 ± 1,7 ^c	252,4 ± 1,6 ^c
7	277,8 ± 1,6 ^d	261,7 ± 1,6 ^d	235,9 ± 1,6 ^d
14	265,8 ± 1,6 ^e	243,7 ± 1,6 ^e	209,3 ± 0,4 ^e

Moyenne ± écart type ; n = 3

Les moyennes de la même colonne ayant les exposants différents sont significativement différentes à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

Tableau 6 : Constante de vitesse et demi-vie de diminution des polyphénols totaux dans les tubercules de *D. dumetorum*.

	Conditions de stockage		
	15°C, 59% HR	30°C, 75% HR	45°C, 86% HR
k (jour ⁻¹)	0,012	0,016	0,026
$t_{1/2}$ (jour)	57,8	43,3	26,7
R^2	0,94	0,92	0,91

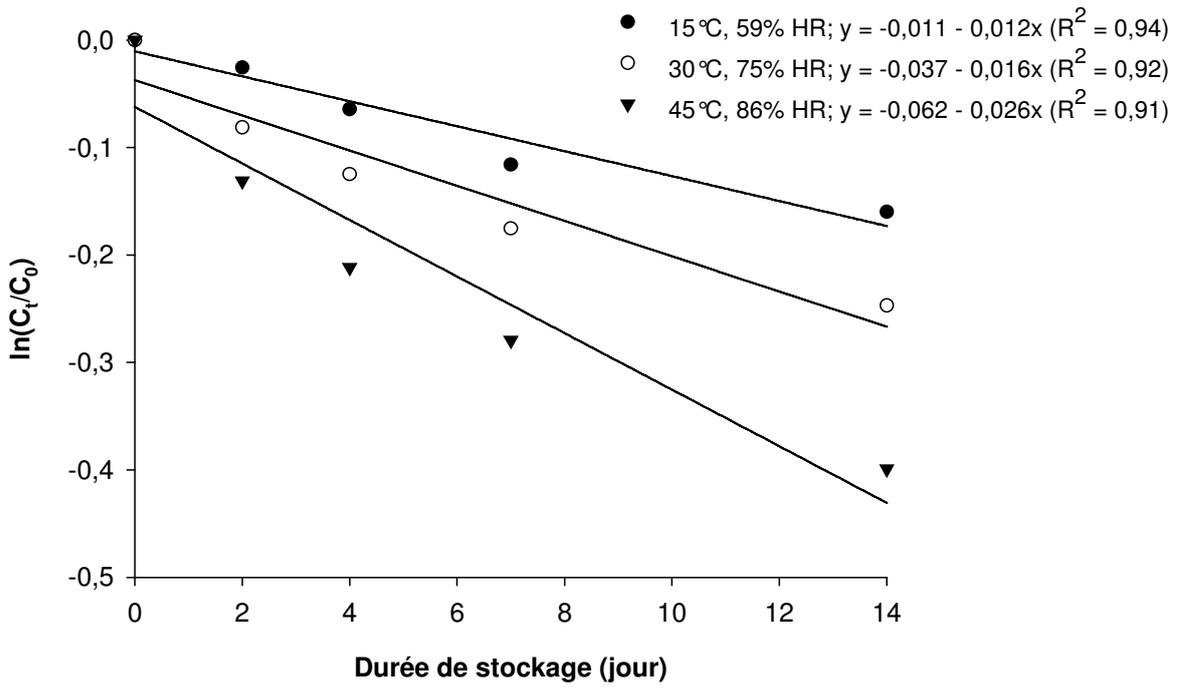


Figure 9 : Cinétique d'ordre 1 de diminution des polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

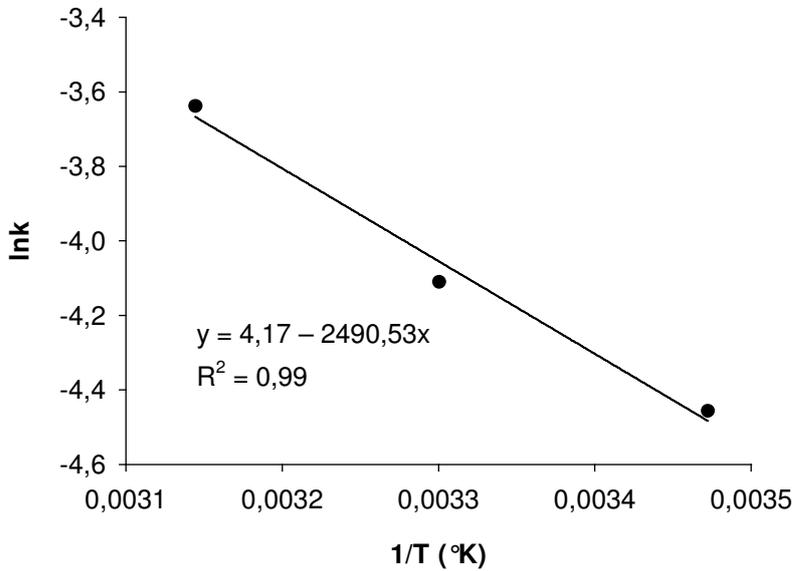


Figure 10 : Courbe d'Arrhenius pour la diminution des polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

La diminution de la teneur en polyphénols totaux au cours du stockage observée dans cette étude est attribuée au phénomène de durcissement post-récolte des tubercules. Une tendance générale a été observée entre la teneur en polyphénols totaux et la difficulté-à-cuire des tubercules (Figure 11). Le coefficient de corrélation observé entre ces deux paramètres est significatif ($r = 0,808$; $P < 0,01$), ce qui indique que les composés phénoliques joueraient un rôle dans le développement de la difficulté-à-cuire des tubercules de *D. dumetorum* au cours du stockage. De nombreux travaux ont également corrélé les composés phénoliques au durcissement observé dans le haricot. C'est le cas des travaux de Hincks & Stanley (1986) qui ont observé une baisse de la teneur en polyphénols au cours du stockage des graines de haricot concomitamment avec l'augmentation de la difficulté-à-cuire. Il en est de même des travaux de Deshpande & Cheryan (1985) qui ont rapporté une décroissance de la teneur en tannins dans la farine de haricot au cours du stockage et qu'une humidité relative élevée accentue cette décroissance. La variation de la teneur en composés phénoliques au cours du stockage post-récolte des végétaux a été attribuée variablement aux réactions de polymérisation/condensation pour former des polymères insolubles de haut poids moléculaire (Kadam, Kute, Lawande & Salunkhe, 1982), à l'attachement à une matrice hydrocarbonée (Salunkhe, Jadhav, Kadam & Chavan, 1982), ou comme le résultat d'une liaison avec les protéines (Bresani, Elias, Wolzak, Hagerman, & Butler, 1983).

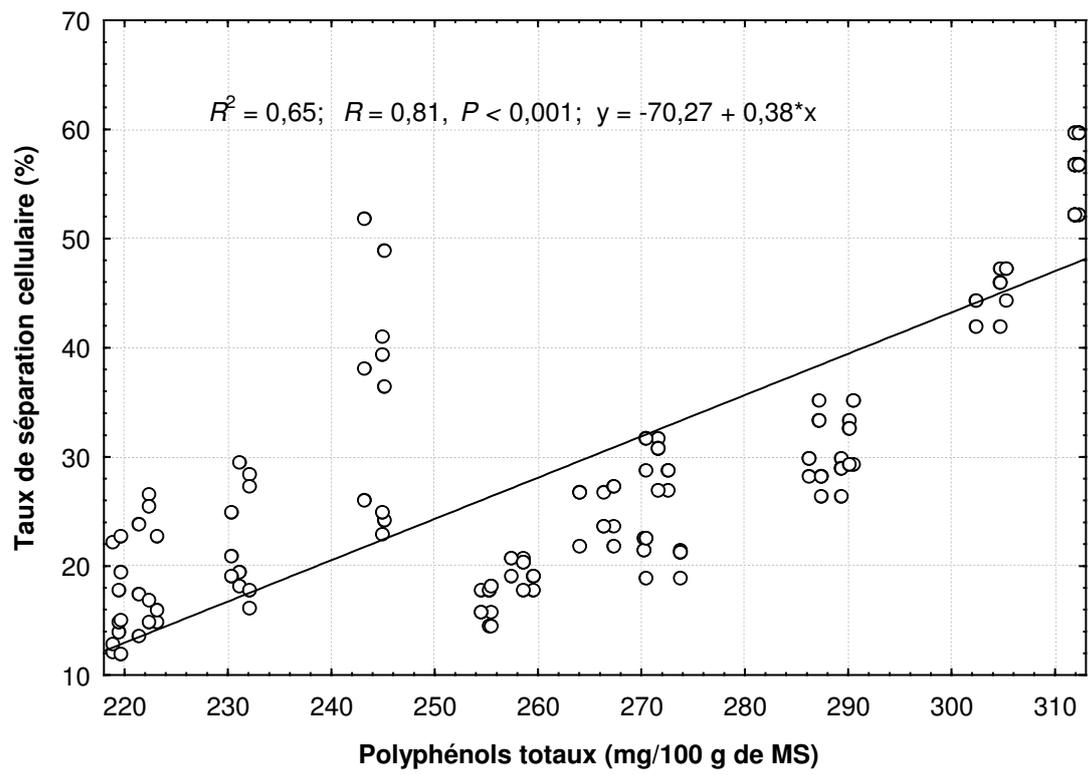


Figure 11 : Polyphénols totaux comparés au taux de séparation cellulaire.

Les résultats obtenus pour la lignine indiquent une augmentation significative de la teneur en lignine avec la durée du stockage (Figure 12). Utilisant les régressions non-linéaires, l'analyse des données de la lignine au cours du stockage a montré que son augmentation suit une cinétique d'ordre 1, d'après l'Equation

$$C = C_0 + a(1 - e^{-kt}),$$

où C est la teneur en lignine, C_0 la teneur en lignine à $t = 0$, k la constante de vitesse, a une constante pré-exponentielle et t le temps de stockage.

Le Tableau 7 présente les constantes de vitesse de la lignine pendant le stockage des tubercules de *D. dumetorum*. On note une augmentation de la vitesse d'augmentation de la lignine, des conditions de température et humidité relative faibles vers les conditions de température et d'humidité relative élevées. La nature linéaire de la courbe d'Arrhenius (Figure 13) indique que l'augmentation de la lignine au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum* est sous la dépendance de la température de stockage. L'énergie d'activation trouvée est de 2,55 kcal mole⁻¹.

Tableau 7 : Constantes de vitesse d'augmentation de la lignine dans les tubercules de *D. dumetorum*.

	Conditions de stockage		
	15°C, 59% HR	30°C, 75% HR	45°C, 86% HR
k (jour ⁻¹)	0,282	0,358	0,430
R^2	0,98	0,97	0,99

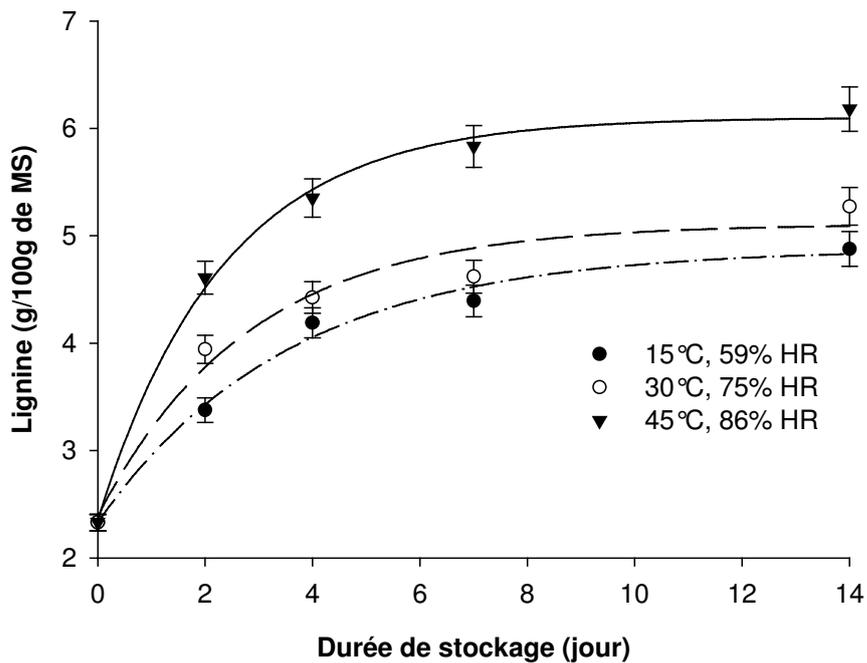


Figure 12 : Modification de la teneur en lignine au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum* à 15°C, 59% HR, 30°C, 74% HR et 45°C, 86% HR.

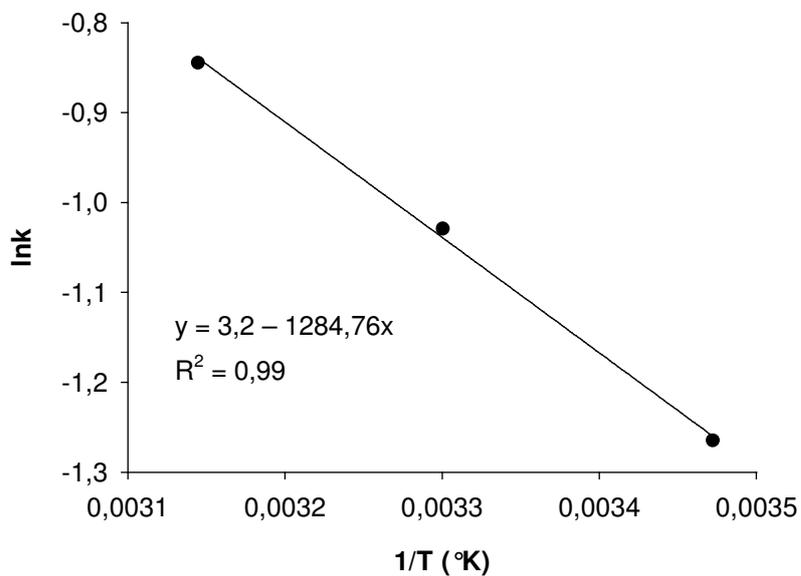


Figure 13 : Courbe d'Arrhenius pour l'augmentation de la lignine au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

Une augmentation de la teneur en lignine au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*, similaire à celle notée dans cette étude a été observée dans les études antérieures (Trèche, 1989 ; Afoakwa & Sefa-Dedeh, 2002b) qui l'ont également attribuée au phénomène de durcissement. Toutefois, ces études antérieures n'ont pas pu indiquer le mécanisme causant cette augmentation de la lignine au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

Dans la présente étude, une corrélation significative ($r = -0,905$; $P < 0,01$) a été trouvée entre les teneurs en polyphénols totaux et celles en lignine au cours du stockage (Figure 14), indiquant que les composés phénoliques jouent un rôle significatif dans le développement de la difficulté-à-cuire des tubercules. Il est suggéré ici que la variation de la teneur en polyphénols totaux est en partie due à l'augmentation de leur polymérisation pendant le stockage des tubercules et qu'un mécanisme semblable à la lignification fonctionne pour limiter la séparation des cellules pendant la cuisson. La lignine est un produit de l'oxydation des composés polyphénoliques (Brett & Waldron, 1996). Le procédé de lignification peut avoir lieu aussi bien par voie enzymatique (sous l'action de la peroxydase et de la laccase polyphenol oxydase) que par voie non-enzymatique (Blouin, Zarins & Cherry, 1982 ; Mayer & Staples, 2002).

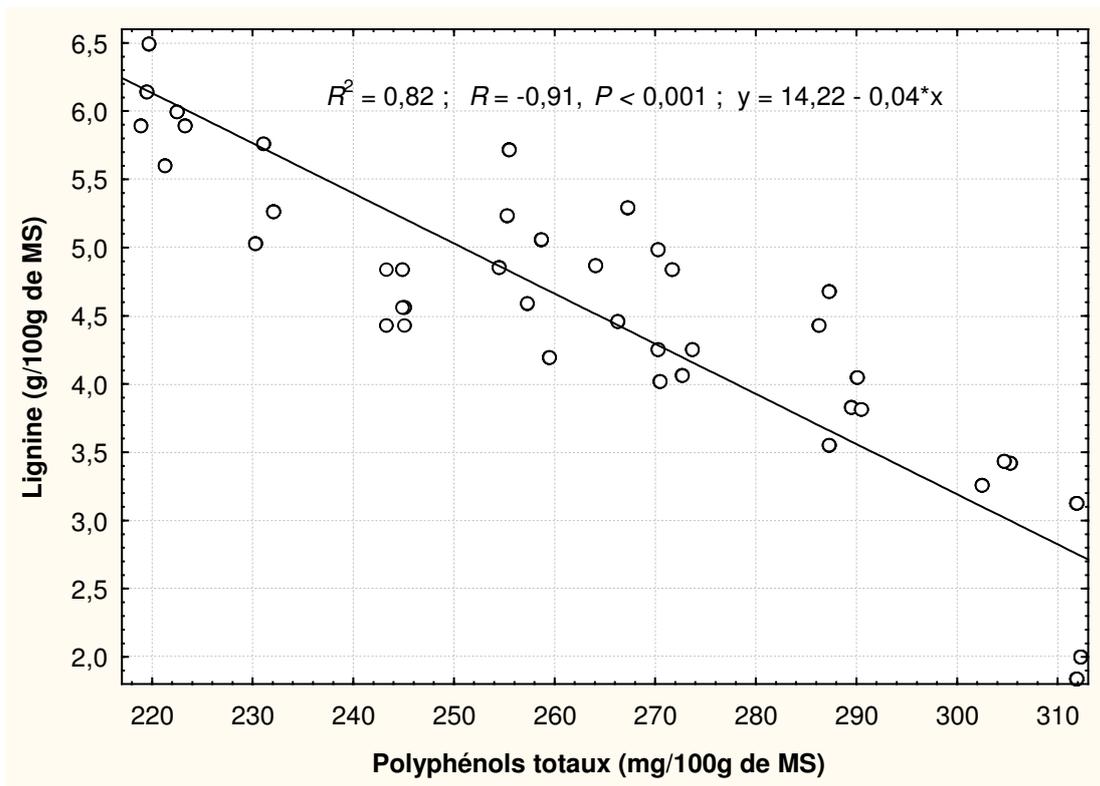


Figure 14 : Corrélation entre les teneurs en lignine et en polyphénols au cours du stockage.

II. 3.5. Interrelation entre le phytate et les polyphénols totaux dans le développement de la difficulté-à-cuire

Deux paramètres, le phytate et les polyphénols totaux ont été examinés dans leur rapport avec le phénomène de durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum*. Chacun a été examiné séparément et a exhibé un coefficient de corrélation significativement négatif avec la difficulté-à-cuire. Dans le but d'avoir plus d'informations sur le rôle de chacun et leur interrelation, une analyse de la régression multiple a été effectuée pour relier ces deux paramètres à l'échec des tubercules à ramollir pendant la cuisson à différents temps de stockage. La Figure 15 présente les variations de R^2 et le Tableau 8 montre les coefficients de l'équation de régression multiple reliant la difficulté-à-cuire, les polyphénols totaux et le phytate. Il en ressort que lorsque les deux variables sont incluses, 94 à 100% du taux de variation totale sont obtenus pour chaque période de stockage. Pendant les premiers jours de stockage, la moindre variation de texture est principalement due au phytate tandis que les polyphénols totaux deviennent le contributeur principal au cours des derniers jours de stockage. La Figure 15 indique que la transition a lieu le 4^{ème} jour de stockage et se situe dans la zone où le phénomène de durcissement s'accélère et tend vers le maximum observé.

Les résultats obtenus suggèrent que le phytate induit seulement des variations minimales de la difficulté-à-cuire des tubercules, peut-être même pas au niveau de différenciation du consommateur. Ceci expliquerait pourquoi alors même que la teneur en phytate continue de décroître dans les tubercules stockés dans les conditions de température et d'humidité relative faibles (15°C, 59% HR) au-delà de 14 jours, seulement une variation minimale du taux de séparation cellulaire est notée. Avec le temps, au fur et à mesure que les composés phénoliques se polymérisent ou se lient, suivant le procédé qui a été associé au mécanisme de lignification, il en résulte une variation majeure du taux de séparation cellulaire qui vient masquer complètement l'effet mineur du phytate.

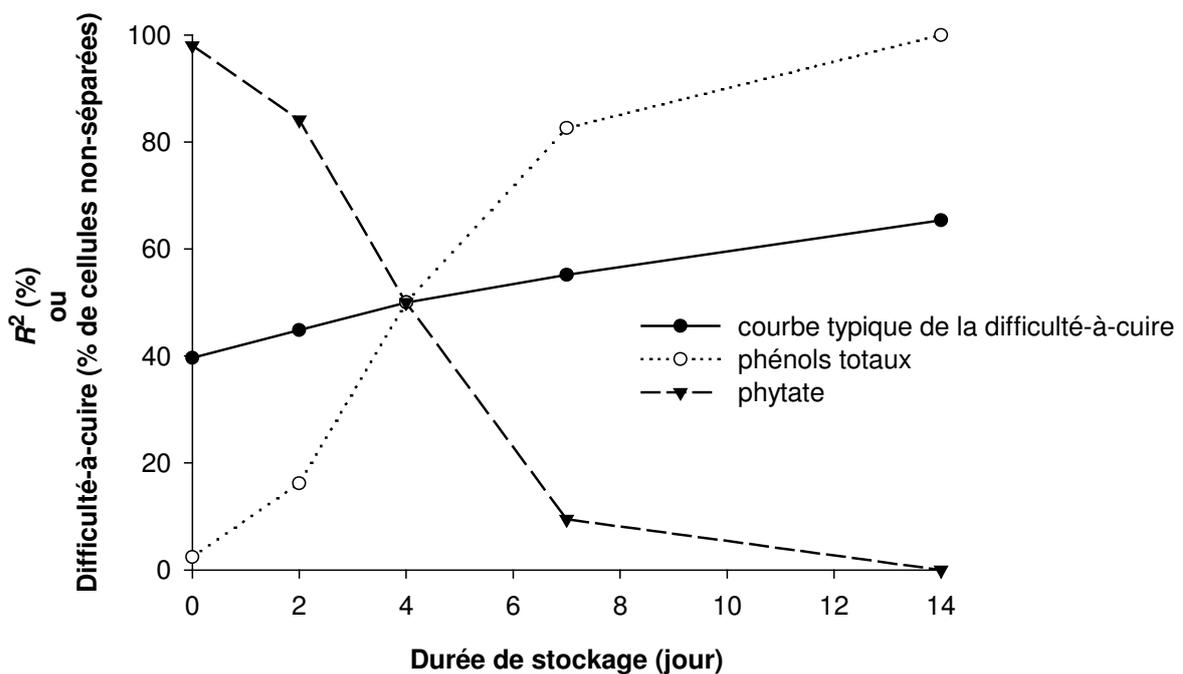


Figure 15 : Variations dans la contribution de R^2 à la difficulté-à-cuire avec le temps de stockage pour deux variables indépendantes, le phytate et les polyphénols totaux.

Tableau 8 : Coefficients de l'équation de régression multiple reliant la difficulté-à-cuire, les polyphénols totaux et le phytate.

	Difficulté-à-cuire
Interception	118,83
Phytate	-0,30
Polyhénols totaux	0,41
R^2 (ajusté)	0,85
F -stat ^a	406,70
P	0,0001

^a F -stat est pour le test de la différence significative entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales.

II. 3.6. Effet de l'EDTA sur le durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum*

Le trempage des tubercules de *D. dumetorum* dans la solution aqueuse d'EDTA entraîne une augmentation significative ($P \leq 0,05$) du taux de séparation cellulaire des tubercules à la cuisson en comparaison aux tubercules témoins trempés dans l'eau distillée (Figure 16). Ainsi, tout comme défini par Aguilera & Rivera (1992) dans le cas du durcissement du haricot, trois formes de durcissement peuvent être définies de manière opérationnelle dans cette étude comme suit :

- le durcissement total qui est le taux de cellules non séparées pendant la cuisson des tubercules trempés dans l'eau distillée,
- le durcissement irréversible qui est le taux de cellules non séparées pendant la cuisson des tubercules trempés dans la solution aqueuse d'EDTA,
- et le durcissement réversible qui est la différence entre ces deux valeurs, c'est-à-dire :

$$\text{Durcissement réversible} = \text{Durcissement total} - \text{Durcissement irréversible.}$$

L'examen de la Figure 16 montre que le développement de la difficulté-à-cuire des tubercules de *D. dumetorum* suit une cinétique d'ordre 1 suivant une relation empirique de type $y = a(1 - e^{-kt})$ où k est la constante de vitesse, t le temps de stockage et a un paramètre empirique. Les paramètres de cette équation sont présentés au Tableau 9 et les valeurs de R^2 obtenues montrent une convergence parfaite avec le modèle cinétique d'ordre 1.

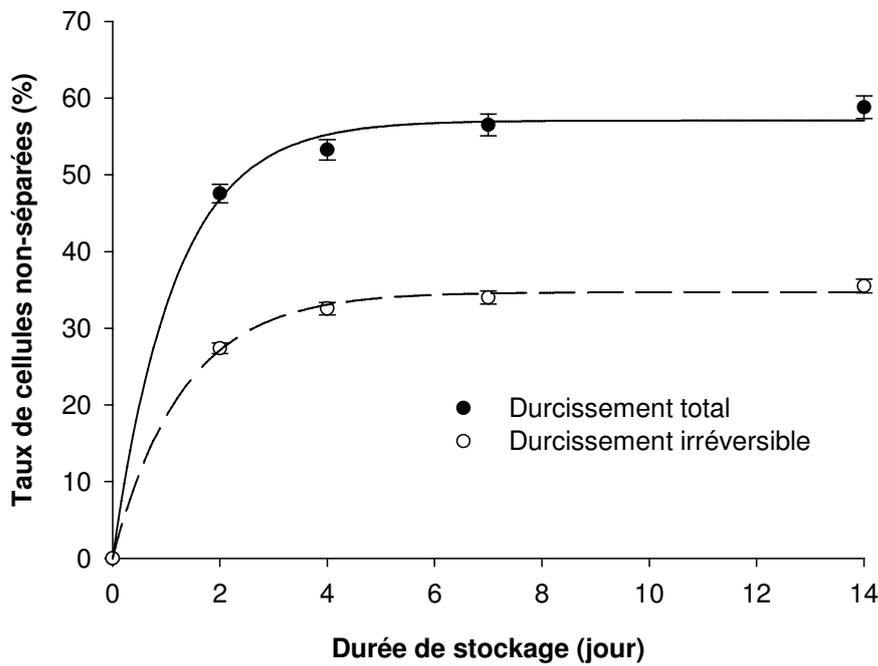


Figure 16 : Développement de la difficulté-à-cuire des tubercules de *D. dumetorum* stockage à 30°C, 75% HR.

Tableau 9 : Constantes de vitesse du développement de la difficulté-à-cuire des tubercules *D. dumetorum* stockés à 30°C, 75% HR.

Variables	Durcissement total	Durcissement irréversible
k (jour ⁻¹)	0,86	0,76
a	57,07	34,70
R ²	0,99	0,99
P	< 0,001	< 0,001

Les coefficients des équations de régression multiple reliant le durcissement réversible et irréversible aux variables indépendantes étudiées sont présentés au Tableau 10. Dans les deux cas, les coefficients R^2 significatifs enregistrés sont indicatifs du fait que les variables indépendantes utilisées dans cette étude sont adéquates pour caractériser le développement du durcissement réversible et irréversible des tubercules de *D. dumetorum*. Un examen de ces relations empiriques permettrait de dire d'une manière générale, que les durcissements réversible et irréversible augmentent avec le temps de stockage des tubercules, et que le durcissement irréversible augmente avec l'augmentation de l'humidité relative ou de la température de stockage telle qu'indiqué par la Figure 17, alors que le durcissement réversible ne dépend pas de l'humidité relative, mais augmente de manière significative avec la température de stockage (Figure 18).

Tableau 10 : Coefficients des équations de régression multiple pour la prédiction du durcissement réversible et irréversible des tubercules de *D. dumetorum* comme fonction du temps et des conditions de stockage.

Variables ^a	Durcissement réversible	Durcissement irréversible
Intercept	-3,5088*	-11,7604*
t	2,6128	3,9312
T	0,3421	0,9791
HR	-0,0286*	-0,1667*
t × t	-0,1579	-0,2312
t × T	0,0064	0,0006*
t × HR	0,0022*	0,0111
T × T	-0,0027*	-0,0137
HR × HR	0,0008*	0,0017*
T × HR	-0,0017*	0,0011*
R ² (ajusté)	77,619	86,307
F-stat ^b	69,976	126,360
P	0,0001	0,0001

^a Les variables sont : t = temps de stockage en jour, T = température de stockage en °C et HR = humidité relative en %.

* Coefficients non significatifs.

^b F-stat est pour le test de la différence significative entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales.

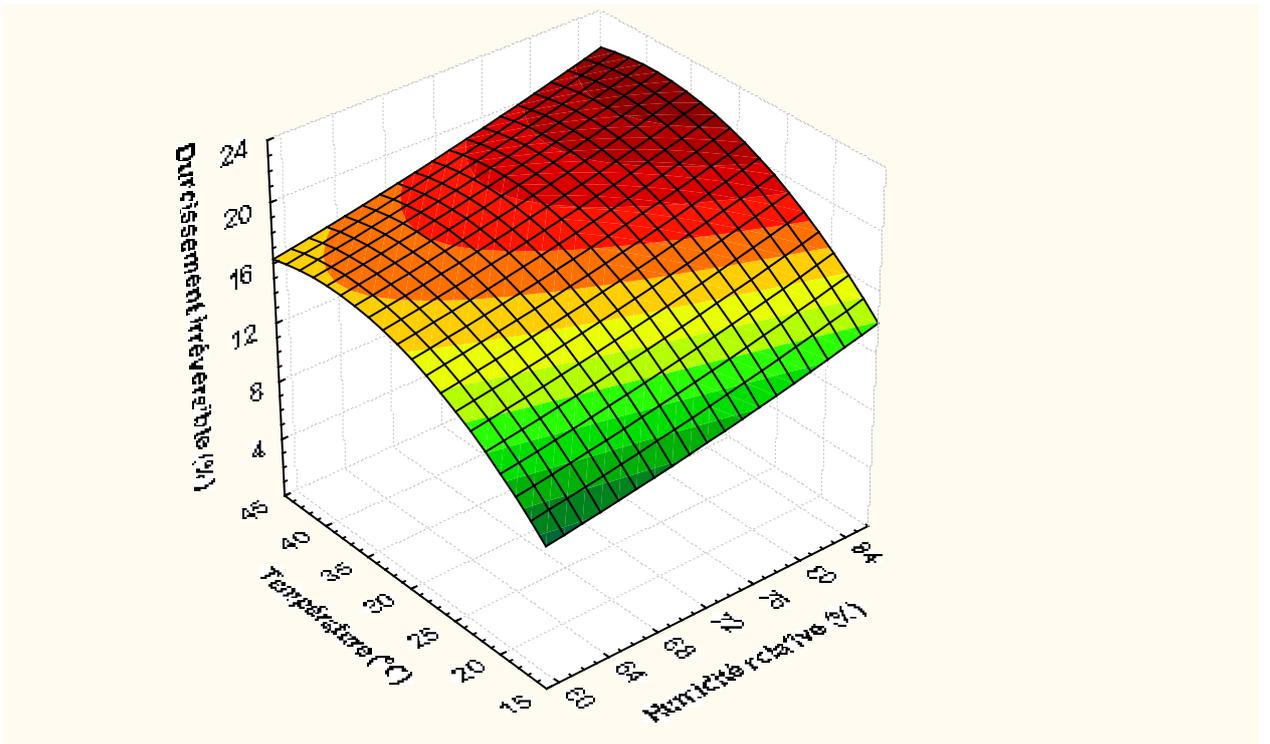


Figure 17 : Effet de la température et de l'humidité sur le durcissement irréversible des tubercules de *D. dumetorum*.

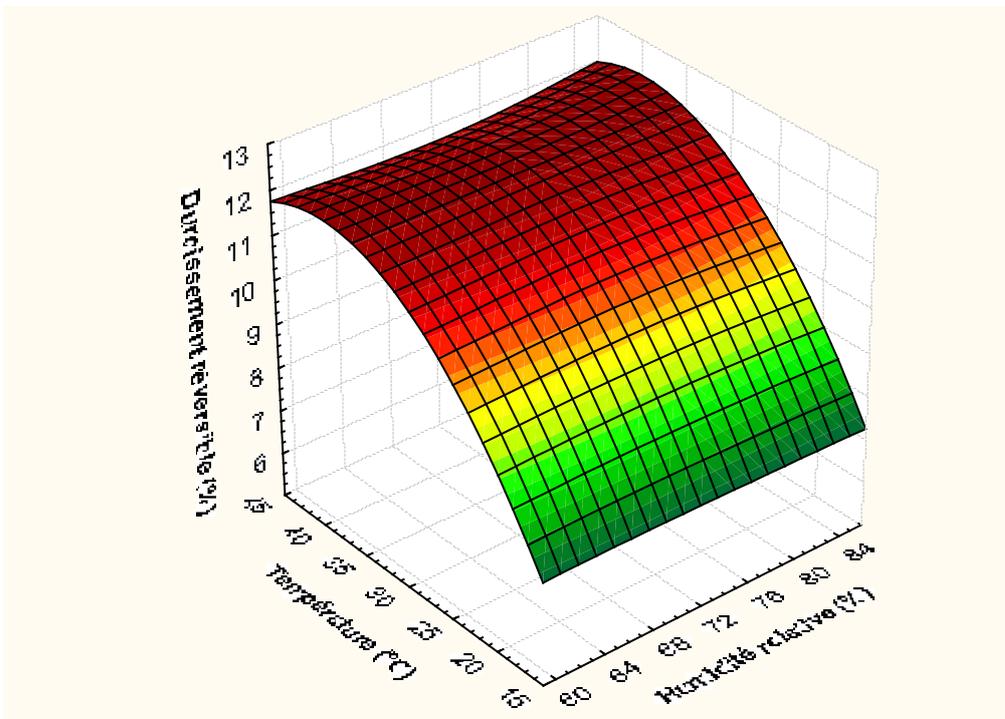


Figure 18 : Effet de la température et de l'humidité sur le durcissement réversible des tubercules de *D. dumetorum*.

Les paramètres du modèle pour la prédiction des durcissements réversible et irréversible des tubercules de *D. dumetorum* comme une fonction du temps de stockage et des conditions de stockage sont présentés dans le Tableau 11. Les valeurs de R^2 obtenues montrent une convergence parfaite avec le modèle. Dans le modèle testé (Equation 4, page 33), k_0 et $F_{\infty,0}$ sont proportionnels à la vitesse et l'étendue, respectivement, de la réaction de durcissement réversible ou irréversible des tubercules stockés à 15°C, 59% HR. Les vitesses du durcissement réversible et irréversible augmentent avec l'humidité relative et la température de stockage proportionnellement avec α et l'énergie d'activation (E_a) respectivement. Les valeurs d'équilibre des durcissements réversible et irréversible augmentent avec l'humidité relative et la température de stockage proportionnellement avec β et la constante d'équilibre (K), respectivement.

La vitesse du durcissement réversible augmente de manière générale, au fur et à mesure que l'humidité relative ou la température de stockage augmente (Tableau 11). De même, la vitesse du durcissement irréversible augmente avec l'humidité relative et la température de stockage. α étant plus élevé pour le durcissement irréversible que pour le durcissement réversible indique que le développement du durcissement irréversible est beaucoup plus rapide. L'énergie d'activation du durcissement irréversible est plus élevée que celle du durcissement réversible, ce qui est indicatif d'un effet plus prononcé de la température de stockage pour le durcissement irréversible.

L'étendu des deux composantes de la difficulté-à-cuire dépendent de la température de stockage ($K \neq 0$) et augmente avec l'humidité relative ($\beta \geq 3$). β étant plus élevé pour le durcissement irréversible que pour le durcissement réversible, un effet plus prononcé de l'humidité relative lors de la poursuite de la réaction est attendue.

Tableau 11 : Paramètres du modèle pour la prédiction du durcissement réversible et irréversible des tubercules de *D. dumetorum* comme une fonction du temps et des conditions de stockage.

Paramètre du modèle	Durcissement réversible	Durcissement irréversible
k_0 (jour ⁻¹)	0,77	0,19
α (jour ⁻¹)	6,94	2409,49
E_a (cal mole ⁻¹)	1409,34	5339,85
F_0 (% cellules non-séparées)	0,00	0,00
$F_{\infty,0}$ (% cellules non-séparées)	9,83	19,16
β (% cellules non-séparées)	107,29	112,84
K (cal mole ⁻¹)	1518,87	1199,37
n	45	45
R^2 (%)	95,8	97,1
σ (% cellules non-séparées)	5,37	9,85

Les figures 19 présentent les valeurs expérimentales et prédites des durcissements réversible et irréversible des tubercules de *D. dumetorum* stockés à 15, 30 et 45°C. D'une manière générale, les valeurs du durcissement irréversible sont plus élevées que celle du durcissement réversible. Toutefois, les valeurs pour le durcissement réversible apparaissent plus proches des conditions d'équilibre que celles du durcissement irréversible au cours du stockage à 15°C. Le Tableau 12 présente les données relatives exprimant le pourcentage des durcissements irréversible et réversible après 2 et 14 jours de stockage pour les deux conditions extrêmes. Il en ressort de manière générale que le durcissement irréversible est le durcissement principal à la fin du stockage pour toutes les conditions de stockage des tubercules.

Tableau 12 : Durcissements irréversible et réversible par rapport au durcissement total.

Conditions de stockage	Durcissement irréversible (%)		Durcissement réversible (%)	
	2 ^{ème} jour	14 ^{ème} jour	2 ^{ème} jour	14 ^{ème} jour
15°C, 59% HR	40,6	64,1	59,4	35,9
45°C, 86% HR	62,8	65,7	37,2	34,3

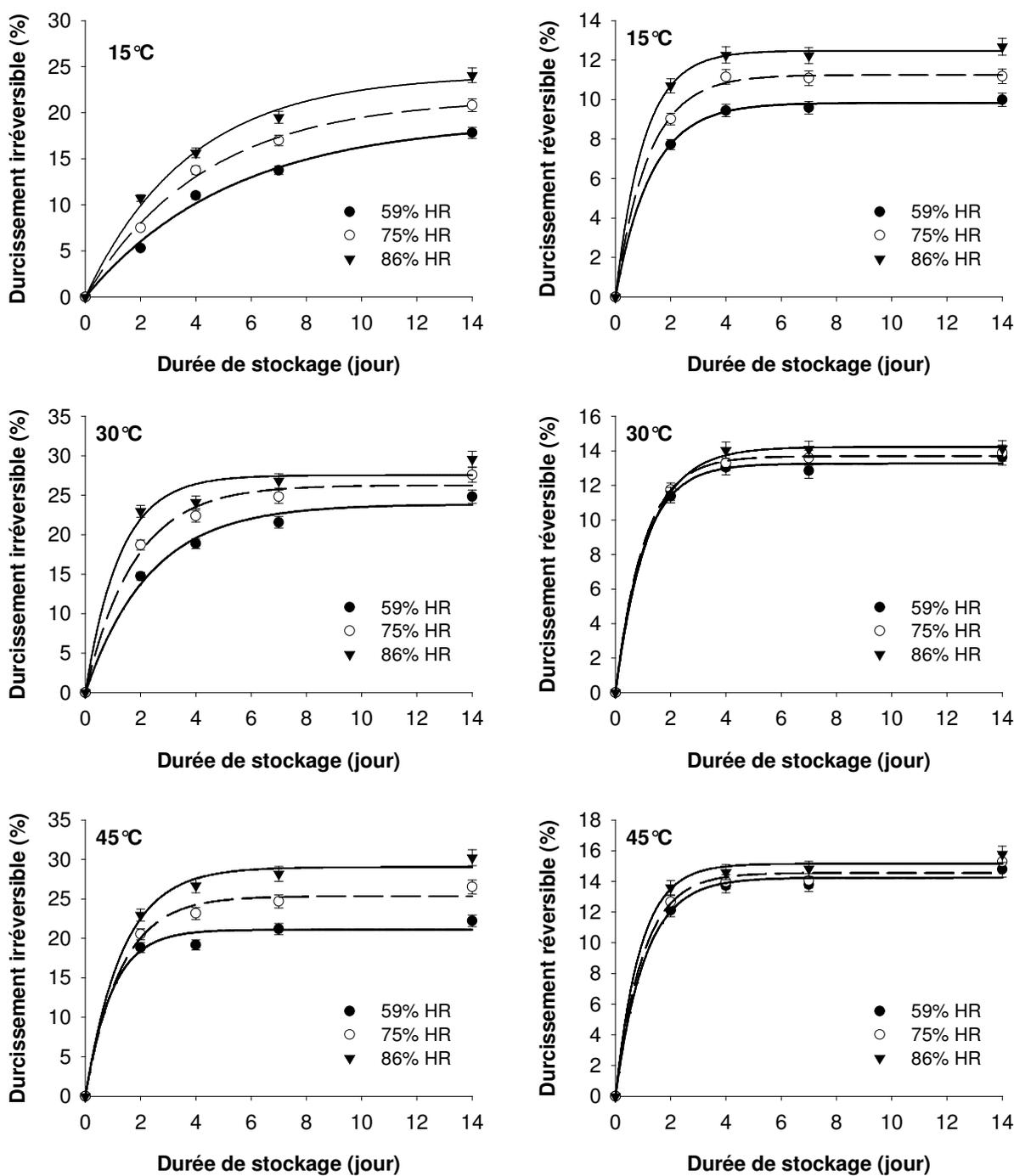


Figure 19 : Développement de la difficulté-à-cuire pendant le stockage contrôlé des tubercules de *D. dumetorum* à 15, 30 et 45°C pour une humidité relative de 59, 75 et 86%.

Les symboles représentent les points expérimentaux et les lignes indiquent les prédictions du modèle cinétique d'ordre 1.

La relation entre le durcissement réversible et la teneur en phytate est illustrée par la Figure 20. Le coefficient de corrélation global entre le durcissement réversible et le phytate est significatif ($r = -0,90$; $P < 0,01$) mais relativement faible comparé à celui obtenu entre le durcissement irréversible et la teneur en phytate ($r = -0,96$; $P < 0,01$). Ceci n'implique pas nécessairement que le phytate soit un meilleur prédicteur du durcissement irréversible ou du durcissement réversible. Etant donné que le durcissement réversible a été obtenu par soustraction des données du durcissement total et celles du durcissement irréversible, il incorporerait de ce fait les erreurs expérimentales des deux procédures utilisées pour obtenir le durcissement total et le durcissement irréversible. L'augmentation de la pente des courbes de régression linéaire avec l'augmentation de la température suggère que la plus grande fraction de la composante réversible de la difficulté-à-cuire s'explique par l'hydrolyse du phytate à faible température et ceci ne dépend pas de l'humidité relative au stockage.

Les valeurs du durcissement réversible sont plus faibles à la fin de la période de stockage comparées à celles du durcissement irréversible. Ceci explique pourquoi les pertes en phytate et la difficulté-à-cuire des tubercules de *D. dumetorum* corrélèrent beaucoup plus au début du stockage des tubercules (Figure 15). Ceci suggère que l'hydrolyse des phytates et les pertes en d'autres agents chélateurs d'ions dans les tubercules sont seulement la première étape, et pas nécessairement l'événement qui contrôle la vitesse dans le renforcement de la liaison cellule-cellule dans la lamelle moyenne.

Le durcissement irréversible ayant été associé au mécanisme de lignification, la Figure 21 illustre la relation entre la lignine et le durcissement irréversible. Le coefficient de corrélation entre la teneur en lignine et le durcissement irréversible des tubercules est significatif ($r = 0,91$; $P < 0,01$) et plus élevé que la valeur équivalente pour la relation entre le durcissement réversible et la lignine.

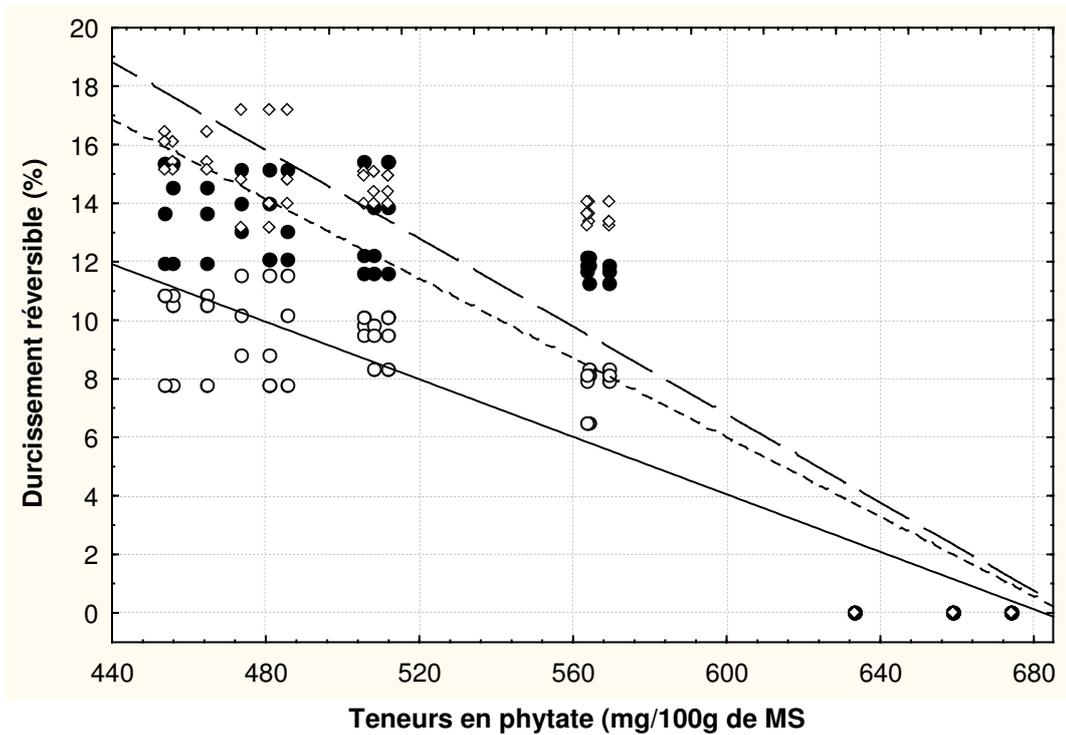


Figure 20 : Corrélation entre le durcissement réversible et la teneur en phytate des tubercules stockés à ○-○ = 15°C ; ●-● = 30°C et ◇-◇ = 45°C.

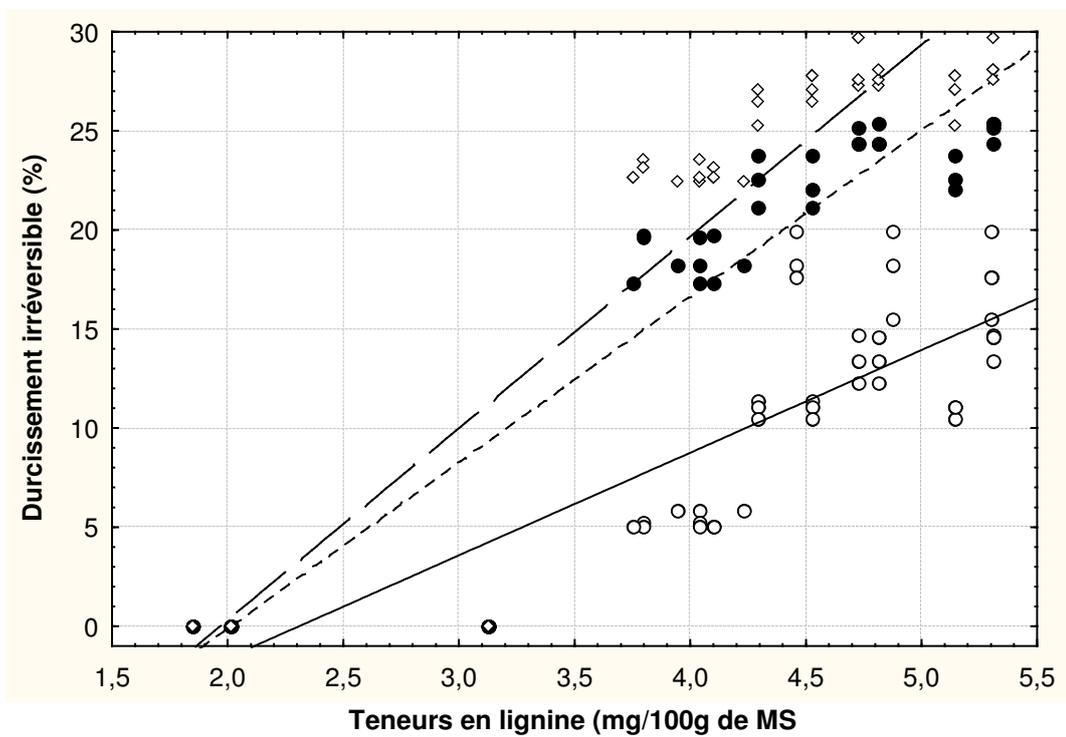


Figure 21 : Corrélation entre le durcissement irréversible et la teneur en lignine des tubercules stockés à ○-○ = 15°C ; ●-● = 30°C et ◇-◇ = 45°C.

II. 4. Conclusion

La perméabilité des membranes cellulaires des tubercules de *D. dumetorum* diminue de manière significative au cours du stockage telle que reflétée par la décroissance du taux d'absorption d'eau et de la perte en solides-solubles. Les modifications texturales des tubercules de *D. dumetorum* au cours du stockage ont été associées à l'hydrolyse du phytate et à la diminution des polyphénols totaux dans ce qui est admis être associé au mécanisme de lignification. Si le phytate ne cause que des modifications minimales de la difficulté-à-cuire des tubercules de *D. dumetorum*, les composés phénoliques causent des modifications majeures qui masquent complètement l'effet minimal du phytate.

Le durcissement des tubercules de *D. dumetorum* a été dissocié en deux composantes, réversible et irréversible. Le durcissement réversible est associé au phytate et survient dès les premiers jours de stockage, tandis que le durcissement irréversible est associé aux composés phénoliques et à la lignine. Le rapport durcissement irréversible sur durcissement réversible est supérieur à 1 pendant l'ensemble de la durée de stockage indifféremment des conditions de stockage, preuve que le mécanisme dominant dans le durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum* est le mécanisme de lignification.

La modélisation du phénomène de durcissement indique que la vitesse de la réaction du durcissement irréversible est plus dépendante de la température et de l'humidité relative que celle du durcissement réversible. Les données obtenues dans cette étude montrent que le durcissement des tubercules de *D. dumetorum* se fait suivant un mécanisme multiple à savoir le mécanisme phytate-dépendant et le mécanisme polyphénols-dépendant.

Chapitre III. Modifications biochimiques et fonctionnelles au cours du stockage des tubercules de *Dioscorea dumetorum*

III. 1. Introduction

La haute périssabilité des tubercules de *D. dumetorum* se manifeste quelques jours après la récolte par une perte de qualité liée à l'apparition du durcissement qui se caractérise par une résistance à la cuisson et à la mastication (Trèche & Delpuch, 1982 ; Sefa-Dedeh & Afoakwa, 2002a). Hormis cette dépréciation de la qualité texturale du tubercule, aucune autre modification au cours du stockage pouvant justifier le rejet de ce tubercule n'a été rapportée. Trèche & Agbor-Egbe (1996) ont montré, sur la base des modifications quantitative et qualitative de nutriments survenus dans les tubercules de *D. dumetorum* au cours du stockage, qu'en dépit des pertes relativement faibles observées, ces tubercules pourraient permettre de couvrir les apports en nutriments recommandés pour la nutrition humaine. Toutefois, aucune étude ne fait mention du comportement des facteurs antinutritionnels au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum* malgré leur association à la réduction de la digestibilité des aliments et de la biodisponibilité des nutriments.

Dans le but d'apporter une plus-value aux tubercules de *D. dumetorum* comme importante source d'aliment et d'énergie, Trèche *et al.* (1984) ont développé une méthode de transformation de ces tubercules frais en farine instantanée avec de bonnes qualités organoleptique et nutritionnelle. Toutefois, le problème d'utilisation des tubercules durcis reste crucial. Mbome Lape (1991) a initié un essai de transformation des tubercules durcis en bouillie de faible viscosité et de haute densité énergétique pour les nourrissons par fermentation lactique et élimination des fibres. A notre connaissance, tous les procédés de transformation des tubercules durcis en farine mis au point à ce jour, donnent des produits aux qualités organoleptiques médiocres.

La portée de l'utilisation de la plupart des farines comme ingrédient alimentaire dépend largement de leur interaction avec l'eau ou avec l'huile qui confère au système alimentaire des propriétés fonctionnelles désirées pendant le procédé de réhydratation, de friture ou de préparation des émulsions. Dans cet ordre d'idée, les capacités d'absorption d'eau et de l'huile ainsi que l'indice de solubilité à l'eau jouent un rôle majeur dans les procédés de préparation des aliments. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'analyse de ces paramètres dans les farines de *D. dumetorum*.

L'objectif de ce Chapitre est d'étudier l'influence du stockage des tubercules de *D. dumetorum* sur leur teneur en facteurs antinutritionnels et sur certaines propriétés fonctionnelles des farines produites à partir de ces tubercules.

III. 2. Matériel et Méthodes

Les tubercules de la variété jaune de *D. dumetorum*, ont été récoltés à maturité dans un champ à Esse dans la Province du Centre. Ils ont immédiatement été transportés au laboratoire et stockés dans les conditions ambiantes (19-28 °C, 60-85 % HR) pendant 56 jours avec des prélèvements aux jours 0, 2, 5, 7, 14, 21, 28, 42 et 56. Aucun développement de moisissure n'a été observé pendant la durée de stockage. La germination de la plupart des tubercules a été observée le 28^{ème} jour.

Après stockage au temps indiqué, les tubercules ont été soigneusement lavés à l'eau du robinet, pelés, découpés en tranches de 0,5 cm d'épaisseur, séchés à 40°C dans une étuve ventilée pendant 24 h et gardés à -21°C dans des sacs étanches. Juste avant l'utilisation, les échantillons séchés ont été broyés dans un broyeur à marteau (Campas 82370, Labastide St-Pierre, France) et passés dans un tamis de 500 µm.

III. 2.1. Matière sèche

La matière sèche a été déterminée suivant la méthode 925.10 (AOAC, 1990). Elle consiste en un étuvage sous pression atmosphérique à la température de 105°C jusqu'à poids constant.

III. 2.2. Cendres totales

Les cendres totales ont été déterminées suivant la méthode 920.87 (AOAC, 1990), qui consiste à calciner environ 10 g d'échantillon sec dans un four à moufle à une température de 550 °C en atmosphère oxydante, jusqu'à obtention d'un résidu blanchâtre.

III. 2.3. Facteurs antinutritionnels

III. 2.3.1. Polyphénols totaux

Les polyphénols totaux ont été évalués suivant la méthode spectrophotométrique utilisant le réactif Folin-Ciocalteu (Swain & Hillis, 1959) telle que décrite au Chapitre 2 (Page 30).

III. 2.3.1.1. Tannins

Les tannins ont été déterminés suivant la méthode spectrophotométrique utilisant la vanilline acidifiée et le (+) catéchine comme standard (Bainbridge, Tomlins, Wellings & Westby, 1996). Environ 2 g d'échantillon sec et broyé ont été introduits dans un Erlen de 50 ml et 30 ml d'acétone:10% acide acétique (80 ml d'acétone dans 20 ml d'acide acétique 2%) y ont été ajoutés. Le mélange a été agité à l'aide d'un barreau aimanté pendant 15 min, puis filtré sous vide à travers un verre fritté à l'aide d'un Buchner. Le résidu a été rincé deux fois avec 10 ml de solvant et l'acétone du filtrat a été enlevé à l'aide d'un Rotavapor à 40°C.

Les extraits obtenus ont été dilués 20 fois avec de l'eau distillée avant le dosage. Des tubes à essai de 15 ml ont été recouverts de papier aluminium pour exclure la lumière. 1 ml d'extrait dilué a été introduit dans chaque tube à essai suivi de 3 ml d'une solution fraîchement préparée de vanilline 4% dans l'éthanol (p/v). Après agitation, 1 ml de HCl concentré a été ajouté dans chaque tube à essai qui par la suite a été laissé au repos à température ambiante pendant 15 min et l'absorbance a été lue à 500 nm contre un blanc.

0,2 g de (+) catéchine a parallèlement été traité comme l'échantillon pour servir de référence et l'étalonnage a été réalisé à l'aide d'une solution de (+) catéchine 5,16 mg/ml.

III. 2.3.2. Acide phytique

L'acide phytique a été déterminé par la méthode au chromophore de Mohammed *et al.* (1986) décrite au Chapitre 2 (Page 30).

III. 2.3.3. Oxalates totaux

La teneur en oxalates totaux a été déterminée par titration à chaud d'une quantité aliquote d'extrait d'échantillon avec une solution de KMnO_4 0,01 M (AOAC, 1970). Environ 0,75 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 heure, 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 introduites dans 2 bechers 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 s'est fait au moyen d'une solution d'acide oxalique 0,2 M.

III. 2.3.4. Inhibiteurs de trypsine

Les inhibiteurs de trypsine ont été déterminés suivant la méthode de Kakade, Rackis, MacGhee & Puski (1974) utilisant le BAPNA (benzoyl-DL-arginine *p*-nitroanilide hydrochloride) comme substrat. L'extraction des inhibiteurs de trypsine s'est faite suivant la procédure décrite par Khor, Tan & Wong (1982). Environ 1 g d'échantillon broyé a été extrait avec 10 ml d'une solution de NaCl 0,1 M (préparée avec du tampon borate pH 8,5) pendant 5 h d'agitation. A la fin de la période d'extraction, le mélange a été centrifugé à 1500 trs/min pendant 20 min. Le culot a de nouveau été extrait avec 10 ml de la solution de NaCl pendant 20 min, puis centrifugé à 1500 trs/min pendant 20 min. Les deux surnageants ont été mélangés et utilisés pour l'analyse des inhibiteurs de trypsine.

1 ml de l'extrait a été mélangé avec 2 ml d'une solution de trypsine (2,5 mg de trypsine d'origine bovine cristallisée (3,5 U/mg), dissout dans 25 ml de HCl 0,001 M) et incubé à 37°C pendant 10 min. 5 ml de BAPNA (30 mg dans 1 ml de diméthylsulphoxyde (DMSO), puis dilué à 100 ml avec du tampon Tris-HCl pH 8,2 contenant du CaCl_2 0,02

M) ont ensuite été ajoutés dans le milieu et la réaction a été conduite pendant 10 min à 37°C. La réaction a été stoppée avec 1 ml d'acide acétique 30 % et l'absorbance a été lue à 410 nm. Un essai blanc sans inhibiteur de trypsine a été effectué simultanément et la variation nette de la densité optique a été utilisée pour calculer l'activité des inhibiteurs de trypsine. Une unité d'inhibiteur a été définie comme la quantité d'inhibiteurs de trypsine qui inhibe l'activité de 1 µg de trypsine pure.

III. 2.3.5. Inhibiteurs de l'α-amylase

Les inhibiteurs de l'α-amylase ont été déterminés suivant la méthode de Piergiovanni (1992) utilisant l'iode et l'amidon. L'extraction des inhibiteurs d'α-amylase s'est faite suivant les directives de Lonstaff & McNab (1991). 400 mg d'échantillon broyé ont été incubés avec 8 ml de solution physiologique (9 g de NaCl/l) à 5°C pendant 1 h, puis le mélange obtenu a été centrifugé à 1500 trs/min pendant 10 min et le surnageant récupéré pour les essais. 2 ml de l'extrait ont été mélangés avec 50 µl d'amylase pancréatique (30 µg/ml dans 0,05 M de tampon Tris-HCl pH 6,9 contenant 0,01 M de CaCl₂) et incubés à 30°C pendant 60 min. 2 ml de tampon tris 0,05 M (pH 6,9 contenant 0,01 M de CaCl₂) et 2 ml d'amidon (10 mg/ml) ont ensuite été ajoutés dans le milieu et la réaction s'est déroulée à 30°C pendant 20 min. La réaction a été stoppée par refroidissement dans un bain de glace. 120 µl du milieu réactionnel ont été additionnés à 4 ml d'iode (50 mg d'iode et 500 mg d'iodure de potassium dans 1 litre de HCl 0,05 M) et l'absorbance lue à 565 nm pour l'évaluation de l'amidon résiduel. Un mélange de tampon et d'amidon (2 ml chacun) a été incubé avec et sans l'enzyme pour servir comme 0% et 100% d'inhibition respectivement. Une unité d'inhibiteur a été définie comme la quantité d'inhibiteurs d'amylase qui inhibe l'activité de 1 µg d'amylase pure.

III. 2.4. Les propriétés fonctionnelles

III. 2.4.1. Capacité d'absorption d'eau et indice de solubilité à l'eau

La capacité d'absorption d'eau (CAE) et l'indice de solubilité à l'eau (ISE) ont été déterminés suivant la méthode de Philips, Chinnan, Brach, Miller & McWatters (1988) et Anderson, Conway, Pfeifer & Griffin (1969). 1 g (M_0) de farine d'igname a été dispersé dans 10 ml d'eau distillée. Après agitation pendant 30 min à l'aide d'un agitateur KS10, le mélange a été centrifugé à 4500 trs/min pendant 10 min et le culot humide (M_2) a été pesé puis séché à 105°C jusqu'à poids constant (M_1). La capacité d'absorption d'eau a été calculée par la formule :

$$CAE = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100,$$

tandis que l'indice de solubilité à l'eau a été calculé par la formule :

$$ISE = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$$

III. 2.4.2. Capacité d'absorption d'huile

La capacité d'absorption d'huile a été déterminée suivant la méthode de Sosulski (1962). 1 g (M_0) de farine d'igname a été dispersé dans 7 ml d'huile de coton. Après agitation pendant 30 min à l'aide d'un agitateur KS10, le mélange a été centrifugé à 4500 trs/min pendant 10 min et le culot a été récupéré puis pesé (M_1). La capacité d'absorption d'huile (CAH) a été calculée par la formule :

$$CAH = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100.$$

III. 2.4.3. Rapport hydrophile-lipophile

Le rapport hydrophile-lipophile tel que défini par Njintang, Mbofung & Waldron (2001), a été calculé en faisant le rapport de la capacité d'absorption d'eau sur la capacité

d'absorption d'huile. C'est un rapport qui permet d'évaluer l'affinité comparée des farines pour l'eau et pour l'huile.

III. 2.4.4. Densité et capacité de gonflement de la pâte

La densité et la capacité de gonflement de la pâte ont été déterminées suivant la méthode de Okezie & Bello (1988) basée sur la détermination d'une masse de pâte prise dans un volume connu. 100 g de farine d'igname ont été mélangés avec de l'eau pour obtenir une teneur en eau de 50% (p/v) et la densité de la pâte a été déterminée en mesurant la quantité de pâte dans un cylindre de volume et de masse connus. La capacité de gonflement (CG) a été calculée par la formule :

$$CG = \frac{d_o - d_i}{d_o \times d_i} \times 100$$

Où d_o est la densité initiale et d_i la densité après t minutes de pétrissage de la pâte.

III. 2.4.5. Plus petite concentration gélifiante

La plus petite concentration gélifiante a été déterminée suivant la méthode de Coffman & Garcia (1977). Des dispersions de farine de 4 à 14 % (p/v) ont été préparées avec de l'eau distillée dans des tubes à essais et mélangées à l'aide d'un vortex pendant 2 min, suivies d'une ébullition pendant 1 h et un refroidissement à l'eau du robinet. La plus petite concentration gélifiante a été la plus petite concentration qui a donné un gel stable lorsque le tube est retourné.

III. 2.5. Analyses statistiques

Toutes les mesures ont été effectuées en triple et les données ont été sujettes à une analyse de variance pour tester les effets des différents facteurs expérimentaux sur les propriétés mesurées. Le test de Duncan a été utilisé pour classer les traitements au cas où il existerait une différence significative et les corrélations bivariées de Pearson ont été

utilisées pour établir des relations entre différents paramètres. Toutes ces analyses ont été effectuées à l'aide des logiciels SPSS 10.1 et SigmaPlot 8.02.

III. 3. Résultats et discussion

III. 3.1. Modifications biochimiques au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*

III. 3.1.1. Teneurs en eau et en cendres

La teneur en eau des tubercules de la variété jaune de *D. dumetorum* diminue de 77,6 à 71,8% en 56 jours de stockage, soit une perte en eau d'environ 5,8% (Figure 22), ce qui montre que les tubercules subissent une déshydratation post-récolte. Cette déshydratation est relativement faible comparée à celle enregistrée par Sefa-Dedeh & Afoakwa (2002) qui ont observé une perte en eau d'environ 8% dans les tubercules de la variété jaune de *D. dumetorum* stockés dans les conditions qui prévalent en milieu tropical (28°C, 62-100% HR) après 72 h de stockage. Les résultats obtenus dans cette étude sont comparables à ceux obtenus par Trèche & Agbor-Egbe (1996) qui ont rapporté une perte en eau d'environ 8,6 % après 110 jours de stockage des tubercules de la variété Jakiri de *D. dumetorum*. La faible déshydratation observée pourrait être en phase avec l'hypothèse de Trèche & Delpeuch (1982), selon laquelle le durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum* serait associé à un épaissement de la membrane cellulaire qui constitue une protection naturelle contre la déshydratation.

La teneur en cendres des tubercules de *D. dumetorum* augmente de manière significative après 56 jours de stockage (Figure 23). Ce résultat est en conformité avec les premières études (Trèche, 1989, Trèche & Agbor-Egbe, 1996) qui ont montré que, malgré l'absence de variations significatives de la teneur en minéraux individuels au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*, on note une variation significative de la teneur en cendres. Cette augmentation de la teneur en cendres pourrait être le résultat de la diminution de la teneur en eau des tubercules observée au cours du stockage.

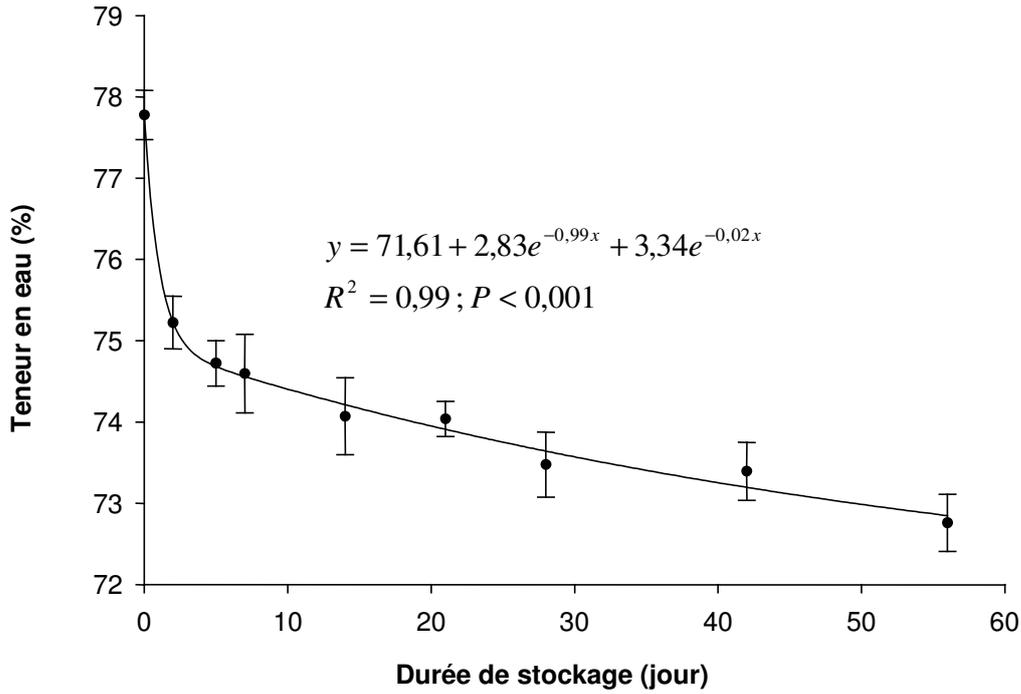


Figure 22 : Evolution de la teneur en eau au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

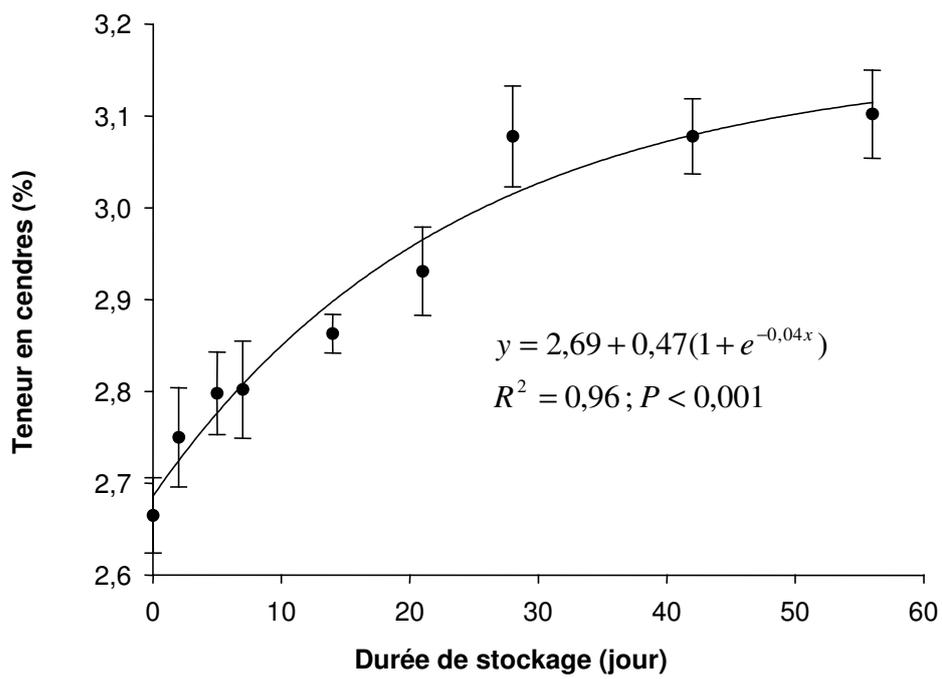


Figure 23 : Evolution de la teneur en cendres au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

III. 3.1.2. Les facteurs antinutritionnels

III. 3.1.2.1. Les composés phénoliques

La teneur en composés phénoliques des tubercules de *D. dumetorum* présente des variations significatives ($P \leq 0,05$) au cours du stockage. Les teneurs en polyphénols totaux et en tannins diminuent respectivement de 318,9 à 248,4 mg/100g de MS et de 21,8 à 15,7 mg équivalent (+) catéchine/100g de MS en 56 jours de stockage (Figures 24 et 25). Ceci signifie qu'après 56 jours de stockage, dans les conditions qui prévalent en milieu tropical, il y a environ 22-28% de diminution en composés phénoliques dans les tubercules de *D. dumetorum*. Ce résultat indique que le durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum* soit en relation avec la diminution des composés phénoliques. Par ailleurs, la relation existante entre la perte en composés phénoliques pendant le stockage et le durcissement des tubercules de *D. dumetorum* a été étudiée au cours de ce travail dans le mécanisme de lignification (Cf. Chapitre 2).

La diminution de la teneur en composés phénoliques au cours du stockage peut être scindée en deux étapes : la première du début au 21^{ème} jour de stockage avec des taux de diminution variant de 14,9% à 21,7% pour les polyphénols totaux et les tannins respectivement et la seconde étape du 28^{ème} au 56^{ème} jour de stockage avec un taux de diminution d'environ 8%. La germination des tubercules ayant été observée après 28 jours de stockage, ces résultats indiquent que la germination des tubercules de *D. dumetorum* entraîne une diminution des teneurs en composés phénoliques. Les résultats de l'analyse de variance ont par ailleurs montré un effet significatif ($P \leq 0,05$) de la germination sur la teneur en composés des tubercules.

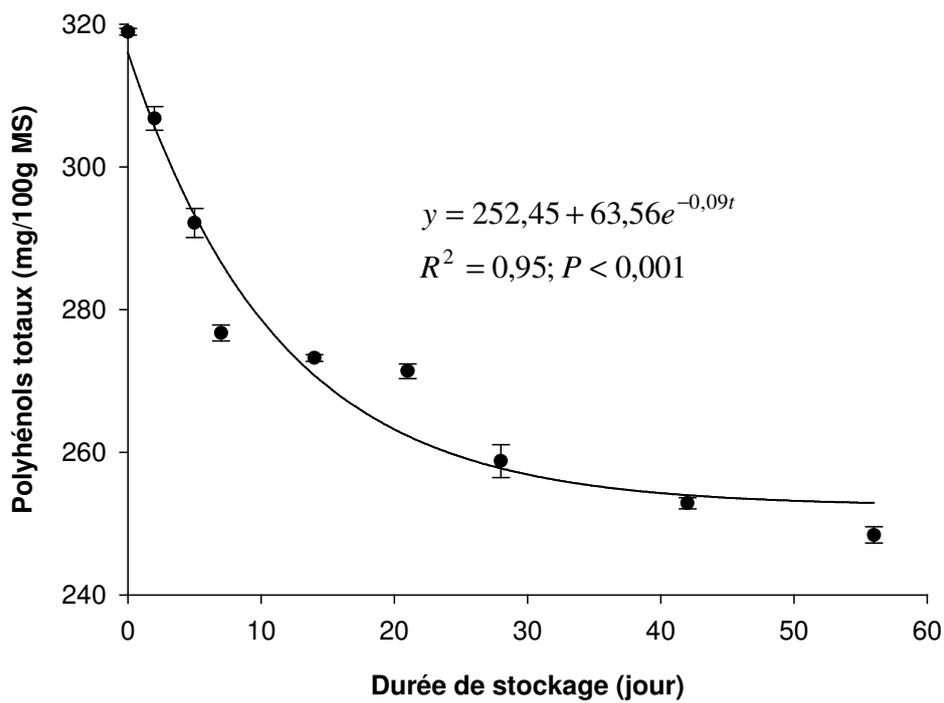


Figure 24 : Variation de la teneur en polyphénols totaux au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*

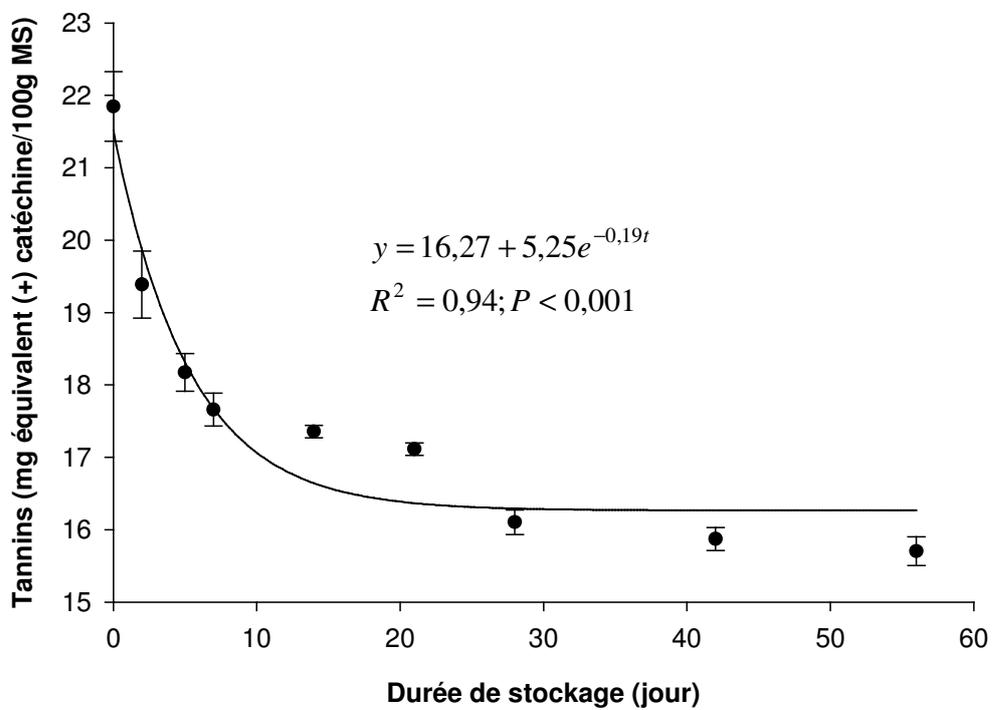


Figure 25 : Variation de la teneur en tannins au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*

III. 3.1.2.2. L'acide phytique

Avec $689,8 \pm 6,8$ mg de phytate/100g de MS, les tubercules de l'igname *D. dumetorum* présentent une teneur en acide phytique non-négligeable. Toutefois, cette teneur est relativement faible comparée à celle généralement observée dans les céréales et estimée à environ 2% du poids (Erdman, 1979).

L'analyse de la variance indique que les temps de stockage et de germination affectent de manière significative la teneur en phytate des tubercules de *D. dumetorum*. De la même manière qu'avec les composés phénoliques, on note une diminution de la teneur en phytate avec l'augmentation du temps de stockage (Figure 26). La diminution de la teneur en phytate au cours du stockage peut être scindée en 2 étapes : la première du début au 21^{ème} jour de stockage avec une variation de la teneur en phytate de 689,8 à 478,2 mg/100g de MS, soit une diminution d'environ 30,7% du fait du phénomène de durcissement, et la seconde du 21^{ème} au 56^{ème} jour de stockage avec une variation de la teneur en phytate de 478,2 à 416,1 mg/100g de MS, soit une diminution d'environ 13%. Au cours de ce travail, la diminution de la teneur en phytate au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum* a été reliée au phénomène de durcissement dans le mécanisme pectine-phytate (Cf Chapitre 2). Par ailleurs, la germination est connue pour son rôle dans la dégradation des phytates des végétaux par l'activation des phytases (Chavan & Kadam, 1989).

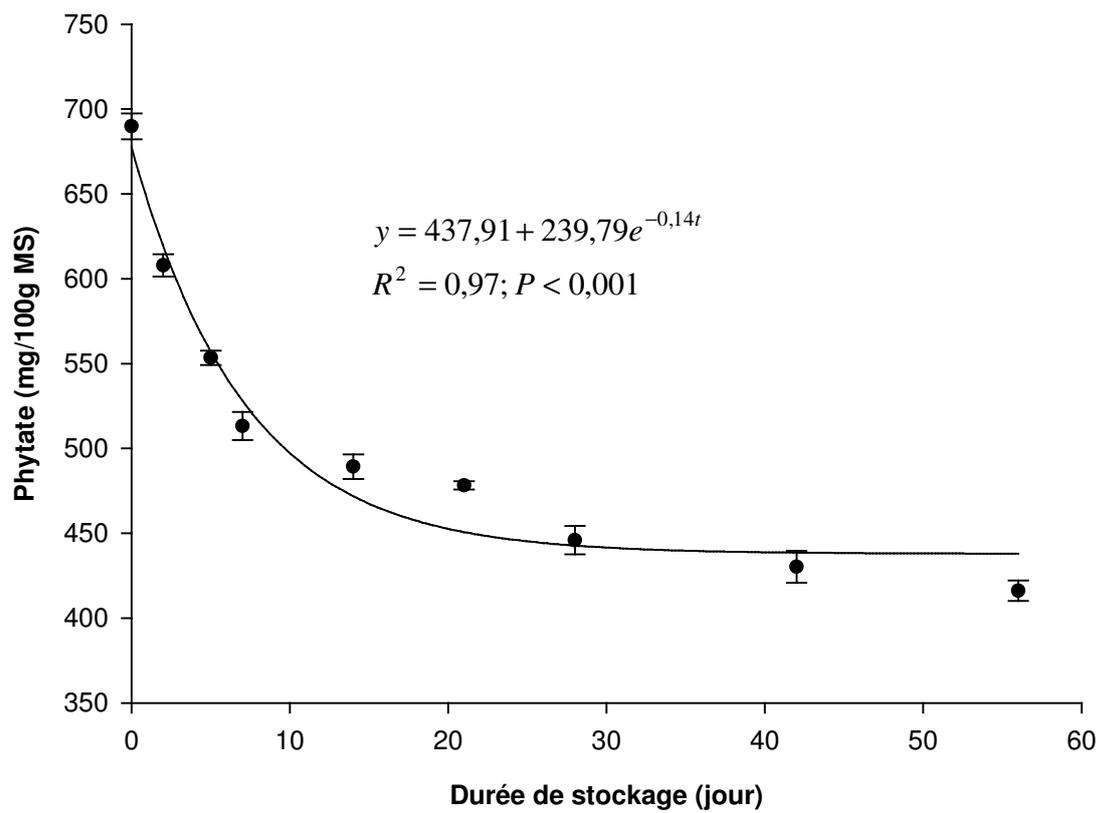


Figure 26 : Variation de la teneur en phytate au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*

III. 3.1.2.3. Les inhibiteurs de l' α -amylase

Les tubercules frais de *D. dumetorum* présentent des quantités non-négligeables d'inhibiteurs α -amylase ($1012,9 \pm 17,8$ AUI/g de MS). Le taux d'inhibition de l'activité α -amylasique diminue de manière exponentielle vers un minimum avec le temps de stockage des ignames (Figure 27). Cette évolution est similaire à celle observée avec les composés phénoliques et le phytate, malgré de légères différences (environ 35% de diminution en 56 jours de stockage). Les composés phénoliques et l'acide phytique étant connus pour leur rôle d'inhibiteur de l'activité de l' α -amylase (Deshpandes, Salhe, Salunkhe & Cornforth, 1982 ; Weselake, McGregor, Hill & Duckworth, 1983), ils pourraient être responsables de l'inhibition de l' α -amylase exhibée par les tubercules de *D. dumetorum* tout au long du stockage. Une corrélation significativement positive a par ailleurs été trouvée dans cette étude entre l'activité α -amylasique et la teneur en composés phénoliques ($r = 0,98$; $P < 0,01$) d'une part et la teneur en phytate ($r = 0,99$; $P < 0,01$) d'autre part.

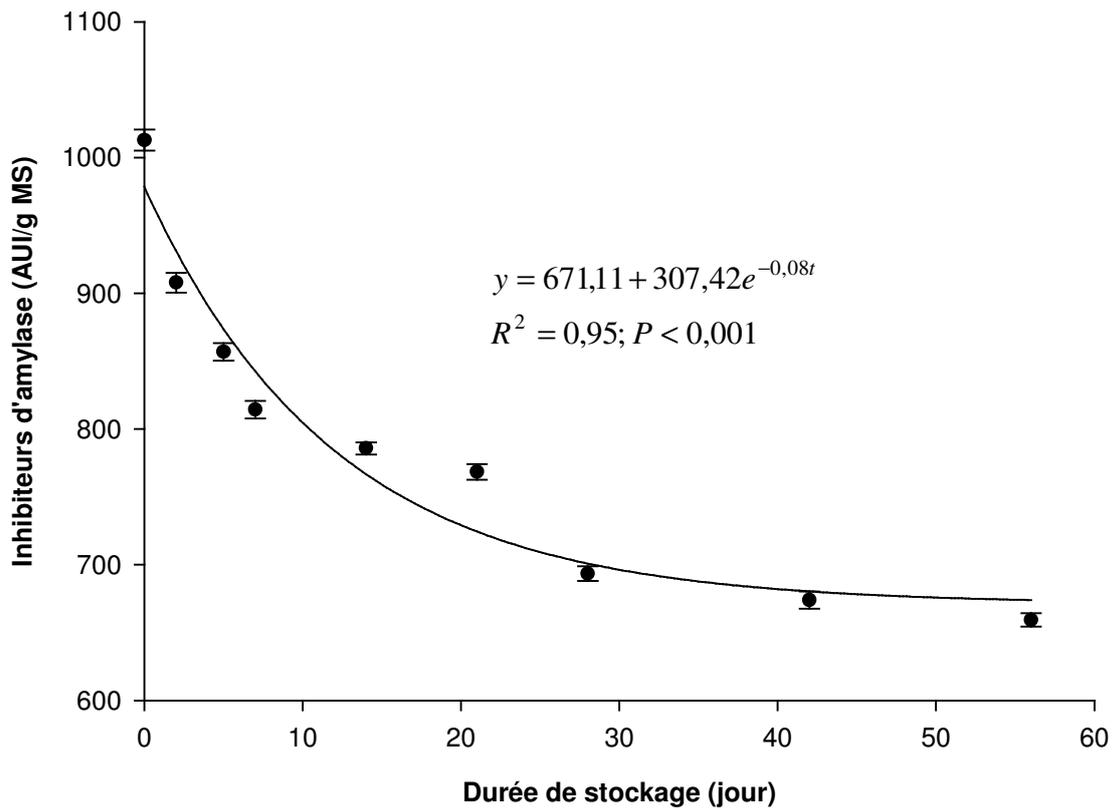


Figure 27 : Variation de la teneur en inhibiteurs d'amylase au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*

III. 3.1.2.4. Les oxalates

Les teneurs en oxalates de tubercules frais (501,7 à 510,9 mg/100g de MS) sont considérablement élevées comparées à celles trouvées dans la plupart des tubercules alimentaires. Seuls les tubercules de taro (*Colocasia esculenta*), avec environ 780 mg/100g de MS, ont des teneurs aussi élevées en oxalates (Holloway, Argall, Jealous, Lee & Bradbury, 1989).

Les teneurs en oxalates des végétaux étant influencées par des facteurs environnementaux tels que la fertilisation azotée, il pourrait se poser la question sur les conditions de culture des tubercules de *D. dumetorum* utilisés dans cette étude. Les teneurs en oxalates élevées observées posent cependant le problème de l'inocuité de ces tubercules dont la consommation par l'homme pourrait par ce fait poser des risques de santé élevés. Il faut toutefois noter que les tubercules de *D. dumetorum* sont généralement bouillis ou transformés en farine dans un procédé qui comprend une étape de cuisson avant consommation (Trèche, Agbor Egbe, Mbome Lape & Mba Mezoui, 1983), procédures qui réduisent de manière significative la teneur en oxalate dans les aliments (Ross, Savaga, Martin & Vanhanen, 1999). Ainsi les problèmes que poserait la forte teneur en oxalates des tubercules seraient réduits au cours de leur transformation.

Les résultats de l'analyse de variance ont montré que la teneur en oxalates totaux des tubercules de *D. dumetorum* est significativement affectée par le stockage des tubercules. On observe une augmentation de l'ordre de 12,7% de la teneur en oxalates après 21 jours de stockage puis une diminution rapide de l'ordre de 43,4% entre le 21^{ème} et le 56^{ème} jour de stockage (Figure 28). L'augmentation de la teneur en oxalate observée dans cette étude pourrait également être le résultat de la diminution de la teneur en eau au cours du stockage des tubercules. La germination de la plupart des tubercules ayant été observée après 28 jours de stockage, la diminution de la teneur en oxalates observée entre le 21^{ème} et le 56^{ème} jour de stockage pourrait être le résultat de l'activité métabolique du tubercules du fait de la germination.

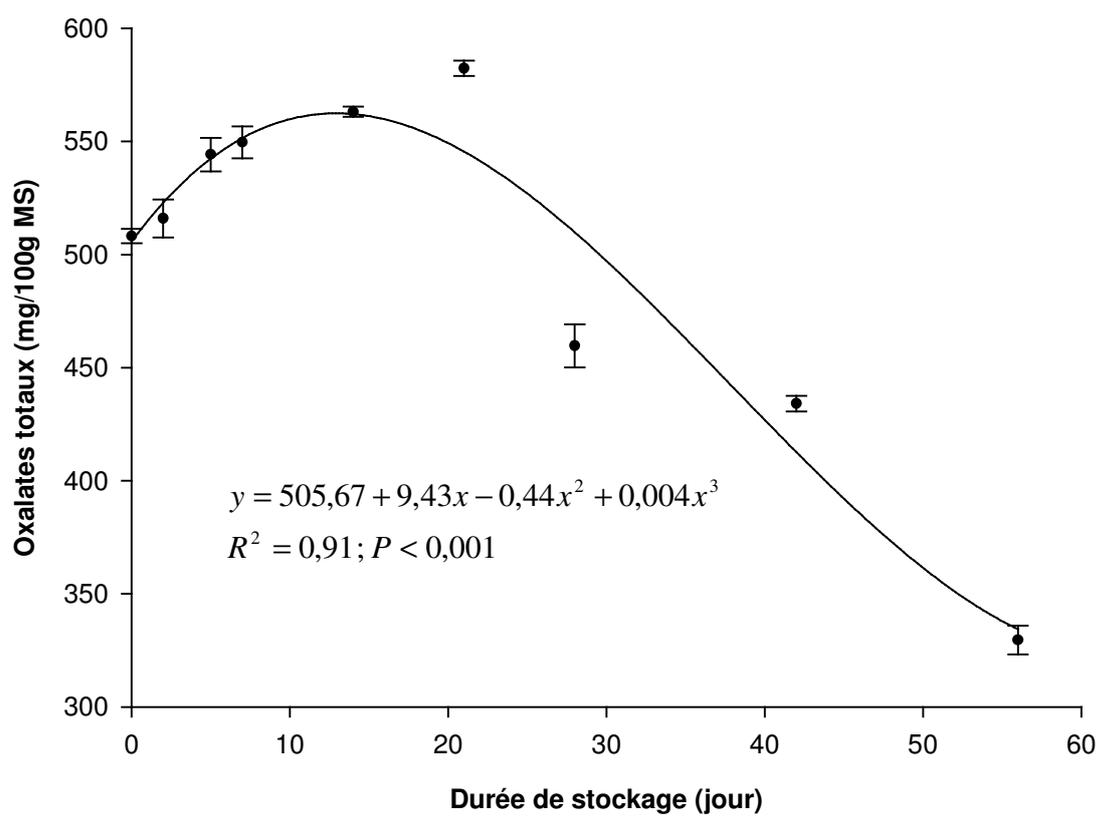


Figure 28 : Variation de la teneur en oxalates au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*

III. 3.1.2.5. Les inhibiteurs de trypsine

Avec 630,7 TUI/g de MS, les tubercules frais de *D. dumetorum* présentent une activité antitrypsique non-négligeable. Cette inhibition de l'activité trypsique exhibée par les tubercules de *D. dumetorum* pourrait s'expliquer par la présence dans ces tubercules de facteurs antinutritionnels tels que les tannins qui sont connus pour être des inhibiteurs de trypsine (Mitjavila, 1986, Horigome, Kumar & Okamoto, 1988).

L'analyse de variance montre que le taux d'inhibition de la trypsine est significativement influencé par la durée de stockage des tubercules. On observe une augmentation de l'inhibition au cours de la première semaine de stockage suivie d'une diminution progressive (Figure 29). Bien que l'inhibition de la trypsine ait été attribuée aux tannins par plusieurs auteurs, une corrélation non significative ($r = 0,126$; $P \leq 0,05$) a été trouvée dans cette étude entre la teneur en tannins et le taux d'inhibition de la trypsine au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*, ce qui suggère que l'inhibition de la trypsine dans ce cas n'est pas essentiellement due aux tannins. Toutefois, Mole et Waterman (1985) ont montré que les tannins pouvaient à la fois activer et inhiber l'hydrolyse par la trypsine *in vitro*, son activité dépendant du rapport tannins/substrat. A de faibles concentrations de tannins pour un excès de substrat, l'hydrolyse par la trypsine est activée. Une corrélation significative ($r = 0,84$; $P < 0,05$) a par contre été observée entre la teneur en oxalates et le taux d'inhibition de la trypsine, ce qui indique que les oxalates jouent un rôle dans l'inhibition de trypsine, probablement en réduisant la disponibilité du calcium qui est un effecteur de la trypsine.

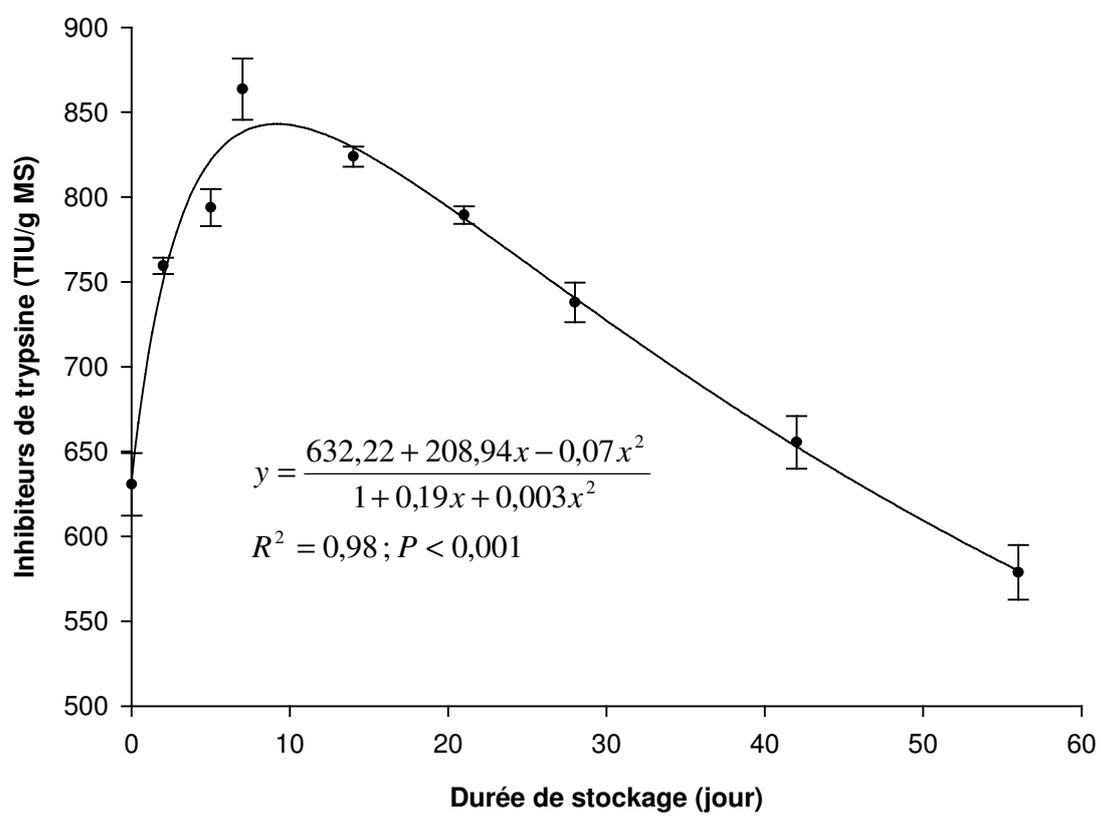


Figure 29 : Variation des inhibiteurs de trypsine au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*

III. 3.2. Modifications de quelques propriétés fonctionnelles au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*

L'utilisation des farines dans la préparation des bouillies dépend largement de leur interaction avec l'eau dans le procédé de réhydratation. Dans cette étude, il a été observé que la capacité d'absorption d'eau (CAE) et l'indice de solubilité à l'eau (ISE) des farines produites à partir des tubercules de *D. dumetorum* sont significativement influencés par le temps de stockage des tubercules (Tableau 13). Toutefois, ces deux paramètres n'ont pas la même évolution avec le temps de stockage.

La capacité d'absorption d'eau augmente avec la durée de stockage des tubercules avec 3 phases distinctes ; du jour 0 au 2^{ème} jour, du 5^{ème} au 21^{ème} et du 28^{ème} au 56^{ème} jour de stockage, suggérant que le stockage des tubercules de *D. dumetorum* augmente l'affinité des farines à l'eau. D'un autre côté, l'indice de solubilité à l'eau décroît du 2^{ème} au 21^{ème} jour et se met à augmenter à partir du 28^{ème} jour pour atteindre une valeur comparable à celle des tubercules frais le 42^{ème} jour, suggérant de ce fait que le durcissement post-récolte et la germination (observée dans la plupart des tubercules au 28^{ème} jour) ont une influence sur l'indice de solubilité des farines produites à partir des tubercules de *D. dumetorum*. Ceci pourrait être dû à une mobilisation des substances solubles au début du processus de durcissement et à la libération d'autres pendant la germination. Des observations similaires ont été effectuées par Njintang *et al.* (2001) qui ont observé une augmentation significative de l'indice de solubilité à l'eau de la farine de niébé (*Phaseolus vulgaris*) après germination.

L'analyse de la variance indique que la durée de stockage des tubercules affecte significativement la capacité d'absorption d'huile de la farine de *D. dumetorum* qui augmente avec le temps de stockage des tubercules en 2 phases, du 2^{ème} au 21^{ème} jour puis

du 28^{ème} au 56^{ème} jour (Tableau 13), suggérant de ce fait que le durcissement post-récolte mais également la germination affecte l'aptitude des farines à absorber l'huile.

De manière similaire, les modifications de l'indice hydrophile-lipophile des farines sont significativement influencées par le temps de stockage et la germination (Tableau 13). On observe une augmentation générale de l'indice hydrophile-lipophile. Les valeurs obtenues dans cette étude sont largement supérieures à celles rapportées par Njintang *et al.*, (2001) pour le niébé (de l'ordre de 1,12) utilisé comme ingrédient du koki (gâteau traditionnel fait d'une émulsion d'huile de palme, d'eau et de la pâte de niébé), indiquant que les farines de *D. dumetorum* ont plus d'affinité avec l'eau qu'avec l'huile.

Tableau 13 : Influence du stockage des tubercules de *D. dumetorum* sur quelques propriétés fonctionnelles des farines obtenues à partir de ces tubercules.

	Jour de stockage								
	0	2	5	7	14	21	28	42	56
CAE (%)	182,3 ± 4,1 ^a	231,2 ± 8,9 ^b	290,9 ± 13,0 ^c	290,4 ± 22,8 ^c	290,7 ± 26,2 ^c	325,6 ± 39,3 ^c	363,5 ± 9,0 ^d	385,7 ± 13,2 ^d	390,7 ± 4,4 ^d
ISE (%)	15,0 ± 0,1 ^c	12,0 ± 0,4 ^a	12,7 ± 1,3 ^{ab}	12,8 ± 0,6 ^{ab}	13,0 ± 0,5 ^{ab}	13,1 ± 0,2 ^{ab}	13,2 ± 0,5 ^b	14,6 ± 0,1 ^c	14,8 ± 0,4 ^c
CAH (%)	72,3 ± 2,0 ^a	85,9 ± 0,1 ^b	85,3 ± 0,6 ^b	85,5 ± 3,0 ^b	87,9 ± 3,9 ^{bc}	88,63 ± 0,63 ^{bc}	90,4 ± 3,3 ^c	90,5 ± 1,7 ^c	94,8 ± 2,4 ^d
IHL (%)	2,5 ± 0,1 ^a	2,7 ± 0,1 ^a	3,4 ± 0,1 ^b	3,4 ± 0,2 ^b	3,3 ± 0,5 ^b	3,67 ± 0,53 ^b	4,1 ± 0,1 ^c	4,3 ± 0,2 ^c	4,1 ± 0,1 ^c
Densité de la pâte (g/ml)	1,0 ± 0,1 ^a	0,9 ± 0,1 ^a	0,9 ± 0,1 ^a	0,9 ± 0,1 ^a	0,9 ± 0,1 ^a	0,95 ± 0,1 ^a	0,9 ± 0,1 ^a	0,9 ± 0,1 ^a	1,0 ± 0,1 ^a

Moyenne ± écart type, n = 3

Les moyennes de la même ligne ayant les exposants différents sont significativement différentes à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

CAE = capacité d'absorption d'eau

ISE = indice de solubilité à l'eau

CAH = capacité d'absorption d'huile

IHL = indice hydrophile-lipophile

Le stockage des tubercules provoque une augmentation exponentielle de la capacité de gonflement de la pâte obtenue à partir des tubercules de *D. dumetorum* (Figure 30). Le gonflement étant associé à une incorporation d'air dans la pâte (Halling, 1981), ce résultat indique que le durcissement et/ou la germination des tubercules de *D. dumetorum* augmente l'aptitude de la pâte à incorporer et à retenir l'air.

En contraste avec la tendance observée pour la capacité de gonflement de la pâte au cours du stockage des tubercules, la densité de la pâte obtenue à partir des farines de *D. dumetorum* n'est pas significativement influencée par la durée de stockage des tubercules. Elle varie faiblement de 1,0 à 0,9 g/ml (Tableau 13).

La plus petite concentration gélifiante des farines de *D. dumetorum* augmente avec le temps de stockage des tubercules (Figure 31). Cette concentration est de 8% pour les tubercules frais et stockés de 2 jours, 9% après 5 jours de stockage, 10% après 7 à 28 jours de stockage et 14% du 42^{ème} au 56^{ème} jour de stockage. Les résultats de l'analyse de variance indiquent que le temps de stockage et la germination ont un effet significatif sur la plus petite concentration gélifiante. Ce résultat indique que la force du gel formé après cuisson des farines de *D. dumetorum* décroît avec le temps de stockage des tubercules. Un résultat similaire a été obtenu par Mbome Lape (1991) qui a observé une diminution de la viscosité des bouillies préparées avec les tubercules durcis comparées à celles préparées avec les tubercules frais. Cet auteur a suggéré que cette réduction de la viscosité serait due à une augmentation des activités des α et β amylases dans les tubercules de *D. dumetorum* avec le temps de stockage ; hypothèse qui a été confirmée par Afoakwa & Sefa-Dedeh (2002c)

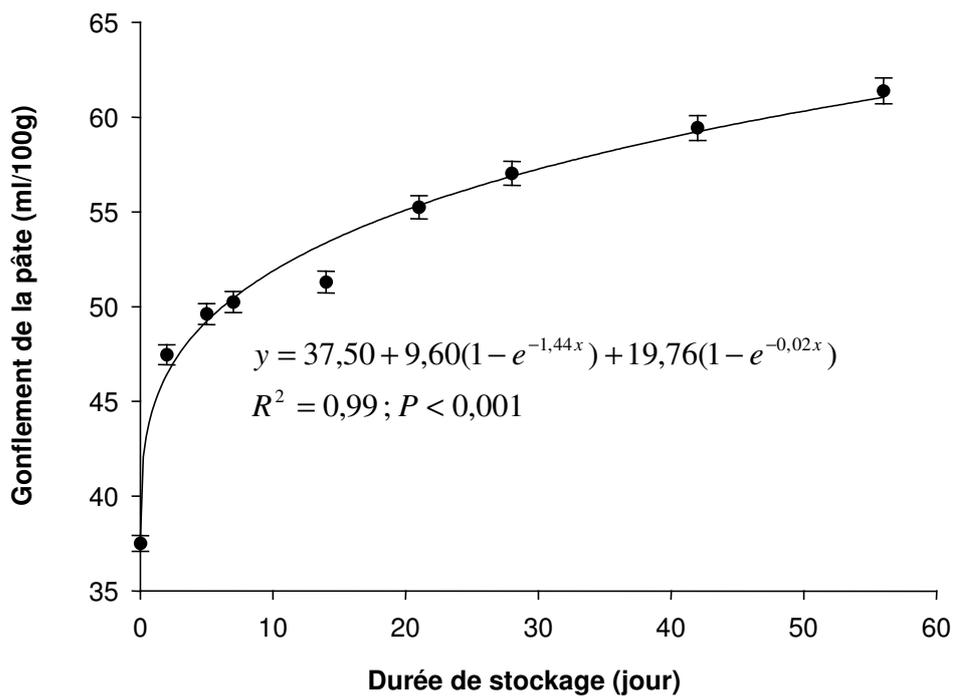


Figure 30 : Variations de la capacité de gonflement de la pâte au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

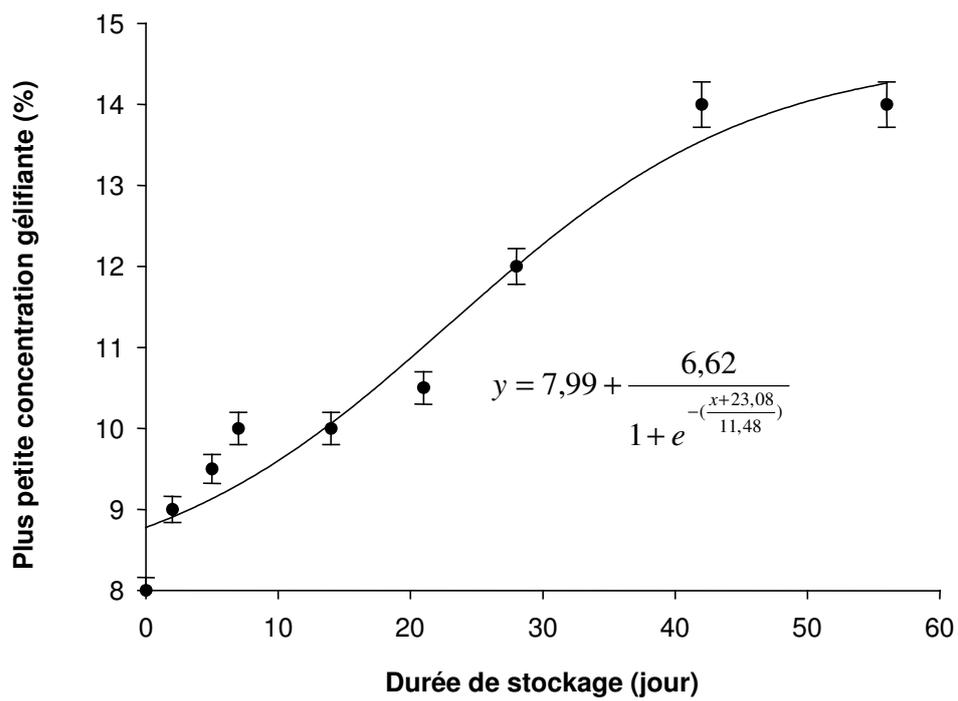


Figure 31 : Variations de la plus petite concentration gélifiante au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

III. 4. Conclusion

Le stockage des tubercules de *D. dumetorum* pendant 56 jours dans les conditions qui prévalent en milieu tropical a entraîné une réduction significative des teneurs en tannins, en phytate, en polyphénols totaux, en oxalates, en inhibiteurs de trypsine et en inhibiteurs d' α -amylase.

Le stockage des tubercules de *D. dumetorum* influence de manière significative les propriétés fonctionnelles des farines produites à partir de ces tubercules. D'une manière générale, on a noté une évolution en 2 phases, entre le 2^{ème} et le 21^{ème} jour puis à partir du 28^{ème} jour. La germination des tubercules ayant été notée après 28 jours de stockage, les résultats de cette étude ont montré que le durcissement et la germination des tubercules ont une influence sur les propriétés fonctionnelles des farines de *D. dumetorum*.

Chapitre IV. Effets du pH, de la force ionique et du *kanwa* sur les propriétés texturales et fonctionnelles des tubercules durcis de l'igname *Dioscorea dumetorum*

IV. 1. Introduction

Que ce soit pour l'auto-consommation ou pour la vente, les producteurs et les commerçants parviennent souvent à jouer sur le calendrier de récolte de *D. dumetorum* pour étaler la disponibilité de cette igname. Cette pratique s'avère cependant insuffisante pour réguler l'offre, non seulement à cause de la croissance de l'urbanisation dans la plupart des pays producteurs, mais surtout à cause du phénomène de durcissement post-récolte. Au stade actuel des connaissances, il n'existe pas d'utilisation des tubercules durcis. Les résultats du chapitre précédent ont montré que le stockage des tubercules de *D. dumetorum* entraîne une diminution des facteurs antinutritionnels et les farines conservent des propriétés fonctionnelles exploitables dans la formulation des produits alimentaire. Ainsi, l'unique problème rencontré au cours du stockage des tubercules de *D. dumetorum* est le durcissement qui empêche le ramollissement du tubercule pendant la cuisson. La découverte de méthodes de pré-traitement permettant de surmonter le durcissement des tubercules pourrait faciliter l'utilisation des tubercules durcis dans des formulations alimentaires.

Liu *et al.* (1992) ont rapporté que le trempage des graines de haricot durcis dans des solutions contenant des cations divalents (Mg^{++} et Ca^{++}) augmente le durcissement. D'autre part, les travaux de Mattson (1946) et Varriano-Marston & De Omana (1979) ont rapporté que le trempage dans des solutions contenant des cations monovalents a un effet ramollissant avec un ordre d'efficacité de : $Li^+ > Na^+ > K^+$. L'échange d'ions entre Na^+ dans la solution de trempage et Mg^{++} et Ca^{++} dans la lamelle moyenne a été indiqué par analyse aux rayons X. De même, il a été rapporté chez certains végétaux où un phénomène de

durcissement post-récolte a été observé, que l'utilisation de sels à la cuisson permet de réduire de manière significative le temps de cuisson (De León *et al.*, 1992 ; Uzogara, Morton & Daniel, 1998). En Afrique Centrale et de l'Ouest, un sel rocheux alcalin naturel connu sous les noms de *kanwa*, *natron*, *lima* et *trona* (Na_2CO_3 , NaHCO_3 , $x\text{H}_2\text{O}$), est très couramment utilisé comme agent de ramollissement des végétaux pendant la cuisson (Makanynola & Beetlestone, 1975).

La présente étude a été menée dans le but de déterminer l'effet du pH, du NaCl et du *kanwa* sur le ramollissement des tubercules de *D. dumetorum* durcis et les propriétés fonctionnelles des farines qui en résultent.

IV. 2. Matériel et Méthodes

IV. 2.1. Les tubercules

Les tubercules de *D. dumetorum* stockés pendant 14 jours dans les conditions définies au Chapitre III (Page 72) ont été utilisés pour cette étude.

IV. 2.2. Effet du pH et de la force ionique

Après stockage au temps indiqué, les tubercules ont été soigneusement lavés à l'eau du robinet, pelés, découpés en tranches de 1 cm d'épaisseur. Les tranches d'ignames ont par la suite été trempées pendant 16 heures à température ambiante dans différentes solutions de pH et force ionique, tel qu'indiqué au Tableau 14.

Tableau 14 : Plan de matrice et combinaisons des variables des échantillons.

N°	Valeurs codées		Valeurs réelles	
	pH	NaCl (%)	pH	NaCl (%)
1	-1	-1	4,9	0,9
2	1	-1	9,1	0,9
3	-1	1	4,9	5
4	1	1	9,1	5
5	0	0	7	3
6	0	0	7	3
7	-1,41	0	4	3
8	1,41	0	10	3
9	0	-1,41	7	0
10	0	1,41	7	6
11	0	0	7	3
12	0	0	7	3

IV. 2.2.1. Plan d'expérience et analyses statistiques

Le plan composite centré par rotation pour $K = 2$ a été utilisé. Les variables indépendantes sont le pH et la concentration en NaCl. Le dispositif utilisé est résumé dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Variables utilisées dans le plan composite centré par rotation pour $K = 2$.

Variables indépendantes	Niveau des variables				
	-1,41	-1	0	1	1,41
pH	4	4,9	7	9,1	10
Concentration en NaCl (%)	0	0,9	3	5	6

Douze combinaisons d'échantillons ont été générées (Tableau 14). L'effet du pH et de la force ionique sur le ramollissement des tubercules de *D. dumetorum* pendant la cuisson a été étudié en utilisant la méthode des surfaces de réponse. Les données obtenues

ont été analysées à l'aide des régressions multiples. Un modèle a été développé pour relier le pH et la concentration en NaCl aux caractéristiques des tubercules de *D. dumetorum*.

Le test du *lack-of-fit* et la valeur du coefficient de corrélation R^2 ont été utilisés pour juger de l'adéquation du modèle. R^2 du modèle indique la proportion de variation dans la réponse attribuée au modèle. Pour une bonne corrélation du modèle, une valeur de R^2 d'au moins 60% a été utilisée. En effet Malcolmson, Matsuo & Balshaw (1993) ont indiqué qu'une valeur de R^2 de 80% apparaît excessive pour une étude préliminaire et ont recommandé une valeur de R^2 de 60%. Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du système Statsoft, Inc (2001).

IV. 2.3. Effet du *kanwa*

Les tubercules frais et durcis ont respectivement été soigneusement lavés à l'eau du robinet, pelés et découpés en tranches de 1 cm d'épaisseur. Les tranches d'ignames ont par la suite été trempées pendant 16 h à température ambiante dans 6 concentrations de *kanwa* (0, 0,2, 0,5, 0,8, 1 et 1,5%) de pH $11,3 \pm 0,2$ puis bouillies dans de l'eau distillée pendant 30 min. Après refroidissement, le taux de séparation cellulaire a été mesuré. L'absorption d'eau par les tranches de tubercules après le trempage a également été déterminée.

IV. 2.3.1. Analyses statistiques

Toutes les mesures ont été effectuées en triple et les données ont été sujettes à une analyse de variance pour tester l'effet des différents facteurs expérimentaux sur les paramètres mesurés. Le test *t* de Student a été utilisé pour comparer la différence entre les tubercules frais cuits à l'eau distillée et les tubercules durcis traités avec les différentes solutions de *kanwa* ; le test de Duncan a été utilisé pour comparer les différentes variables dépendantes. Les corrélations multiples de Pearson ont été effectuées pour déterminer les

relations entre les différentes variables dépendantes. Ces analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel SPSS 10.1.

IV. 2.4. Absorption d'eau

Après trempage des tranches d'ignames au temps approprié, elles ont été rincées deux fois avec de l'eau distillée pour enlever l'excès de *kanwa* et l'eau a été enlevée de la surface des tranches par imbibition d'un papier absorbant. La teneur en eau a été calculée à partir du poids des échantillons par la méthode 44-15A (AACC, 2000).

IV. 2.5. Taux de séparation cellulaire

Le taux de séparation cellulaire qui permet d'évaluer le degré de cuisson ou de ramollissement à la cuisson des tubercules a été mesuré suivant la procédure décrite au Chapitre II (Page 28).

IV. 2.6. Les propriétés fonctionnelles

Les échantillons d'igname trempés ont été séchés dans une étuve ventilée à 40°C pendant 24 h, broyés dans un broyeur à marteau (Campsas 82370, Labastide St-Pierre, France) et passés dans un tamis de 500 µm pour l'évaluation des propriétés fonctionnelles. L'ensemble des propriétés fonctionnelles déterminées au Chapitre III ont été mesurées suivant les mêmes méthodes.

IV. 3. Résultats et discussion

IV. 3.1. Effet du pH et de la force ionique

Les Tableaux 16 et 17 présentent les coefficients des variables dans le modèle et leur contribution à la variation du modèle. Le taux de séparation cellulaire des tubercules

de *D. dumetorum* stockés pendant 14 jours dans les conditions qui prévalent en milieu tropical (19-28°C, 60-85% HR) est de 16,7%. Après trempage dans des solutions de pH et de force ionique définis, ce taux varie de 23,3% à 56,9%. Le coefficient de corrélation R^2 égale à 0,97 et la valeur de F non-significative pour le test du *lack-of-fit* (Tableau 16 et 17) montrent une convergence optimale du modèle aux données expérimentales.

La concentration en NaCl s'est révélée être la variable la plus importante de l'opération qui influence le taux de ramollissement des tubercules durcis de *D. dumetorum* après cuisson ($P = 0,00239$) et ses termes quadratiques ($P = 0,00922$).

Tableau 16 : Coefficients des variables dans le modèle et son R^2 correspondant.

Variable	Taux de séparation cellulaire
Constante	41,17
X_1	-3,86
X_2	9,73
X_1^2	0,23
X_2^2	-0,64
X_1X_2	-0,12
R^2	0,97

$X_1 = \text{pH}$; $X_2 = \text{Concentration du NaCl}$.

Tableau 17 : Analyse de variance pour la régression complète du modèle.

Source de variation	Taux de séparation cellulaire
Modèle	55,19*
<i>Lack-of-Fit</i>	2,81

* Significatif à 95% de taux de confiance

La courbe de surface (Figure 32) montre que le taux de ramollissement des tubercules durcis de *D. dumetorum* augmente avec la concentration du NaCl, quelle que soit la valeur du pH. Ces résultats montrent que le taux de ramollissement des tubercules est dépendant de la concentration de sel utilisée. Des résultats similaires ont été rapportés par Berrios, Swanson & Cheong (1999) qui ont observé une réduction significative du temps de cuisson les graines de haricot difficiles-à-cuire après trempage dans une solution de NaCl. Ainsi, l'augmentation du taux de ramollissement des tubercules durcis après trempage dans des solutions de NaCl serait attribuée à l'effet ramollissant sur le tubercule exercé par les ions monovalents Na^+ présents dans la solution de NaCl. L'effet bénéfique des cations monovalents Na^+ dans le ramollissement des végétaux au cours de la cuisson a été rapporté par plusieurs études (De León, Elias & Bressani, 1992 ; Varriano-Marston & De Omana, 1979) qui ont montré qu'il se passait suivant le mécanisme d'échange d'ions entre Na^+ dans l'eau de trempage et les cations divalents (Mg^{++} et Ca^{++}) dans la lamelle moyenne du végétal. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que ce mécanisme n'est pas influencé par le pH de la solution de trempage pour les tubercules durcis de *D. dumetorum*.

Modèle : $Y = 41,17 + 9,73 X_2 - 3,86 X_1 - 0,64 X_2^2 - 0,12 X_1 X_2 + 0,23 X_1^2$

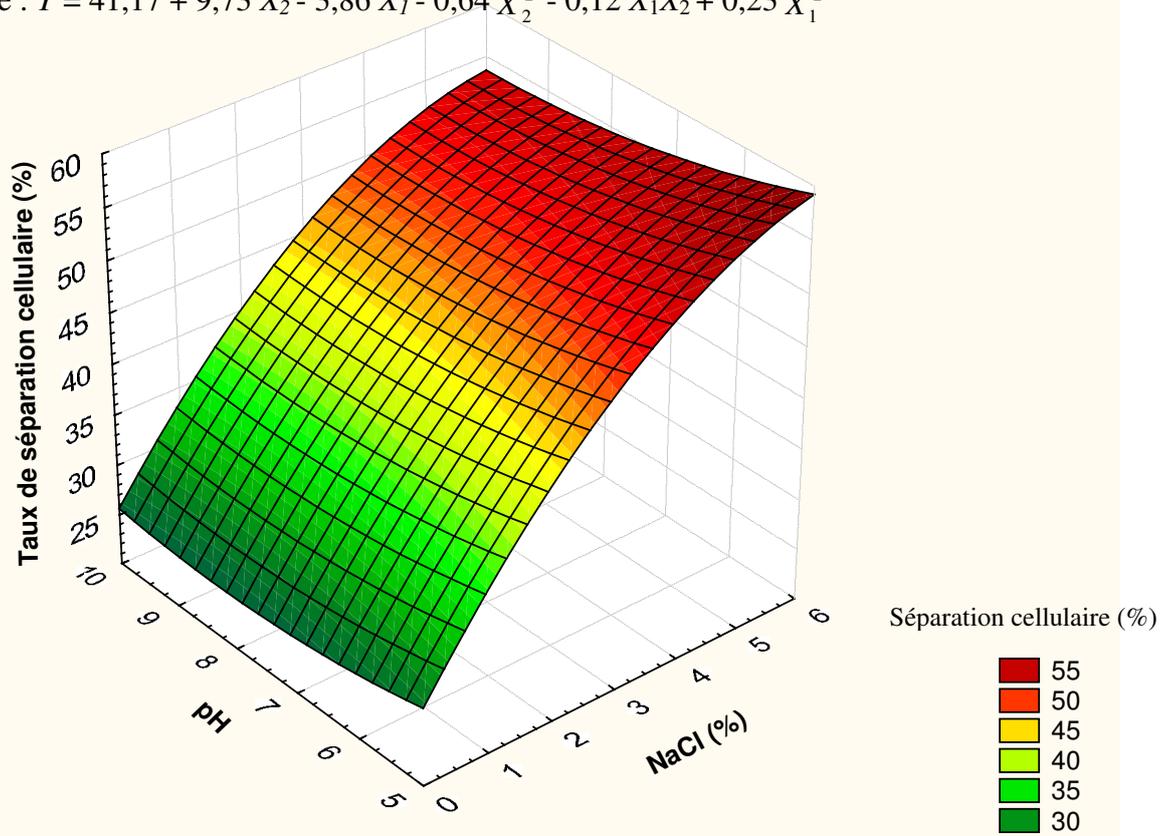


Figure 32 : Surface de réponse de la variation du taux de ramollissement des tubercules durcis de *D. dumetorum* avec le pH et la concentration de NaCl.

IV. 3.2. Effet du *kanwa*

IV. 3.2.1. Ramollissement à la cuisson

L'effet du traitement au *kanwa* sur le ramollissement des tubercules durcis de l'igname *D. dumetorum* est présenté dans la Figure 33. Le taux de ramollissement des tubercules augmente de manière exponentielle vers un maximum avec la concentration de *kanwa* suivant une relation empirique du type $y = a(1 - e^{-bx})$. Un effet similaire a été observé avec les grains de niébé (Uzogara *et al.*, 1988). L'augmentation du taux de ramollissement observée dans cette étude pourrait être attribuée à l'effet ramollissant exercé par les cations monovalents Na^+ présents dans la solution de *kanwa* tel que mis en évidence par d'autres études (De Leon *et al.*, 1992 ; Rockland & Metzler, 1967 ; Varriano-Marston & De Omana, 1979).

Bien que le trempage dans les solutions de *kanwa* ait un effet significatif sur le ramollissement des tubercules durcis de *D. dumetorum*, une comparaison avec les tubercules non-durcis traités dans les mêmes conditions a permis de constater que le traitement au *kanwa* ne permet pas de surmonter totalement le phénomène de durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum*. Ceci pourrait se justifier par le fait que le durcissement par voie de Ca^{2+} dépendant n'est pas la seule voie de durcissement des tubercules de *D. dumetorum*. Toutefois, une comparaison entre le taux de ramollissement des tubercules durcis traités au *kanwa* avec celui des tubercules frais non-traités (Tableau 18), ne montre aucune différence significative ($P \leq 0,05$) pour les concentrations de *kanwa* allant de 0,8 à 1,5%. Ce qui laisse suggérer que les tubercules durcis de *D. dumetorum* traités avec ces concentrations de *kanwa* ont une vitesse de ramollissement semblable à celle des tubercules non-durcis.

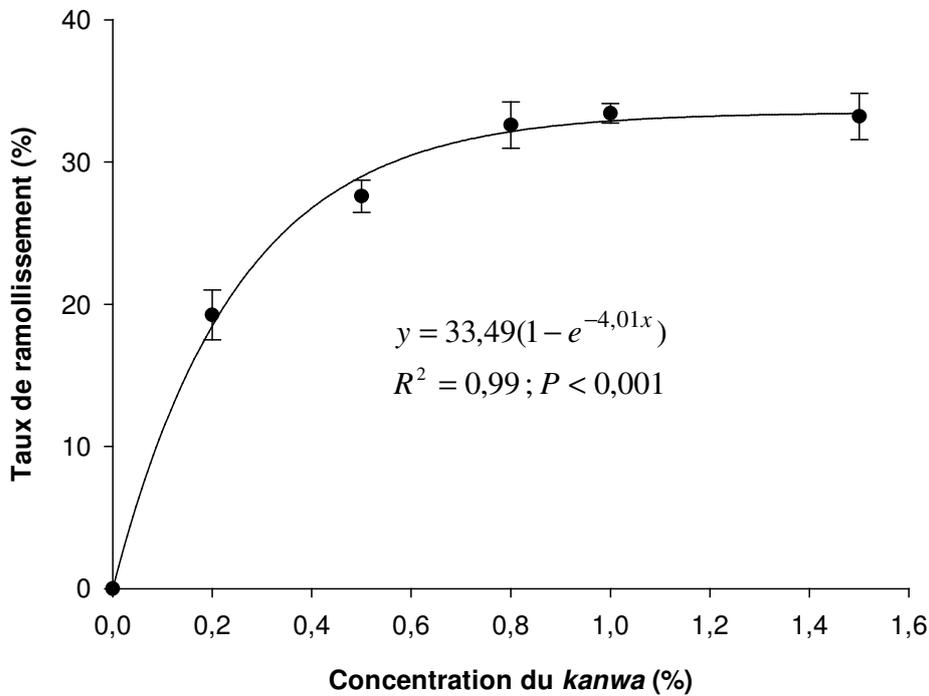


Figure 33 : Effet du *kanwa* sur le ramollissement des tubercules durcis de *Dioscorea dumetorum*.

Tableau 18 : Comparaison du taux de séparation cellulaire des tubercules durcis traités aux *kanwa* avec celui des tubercules non-durcis.

	<i>Kanwa</i> (%)					
	0	0,2	0,5	0,8	1	1,5
Valeur de t lors de la comparaison avec les tubercules frais	-21,41*	-12,54*	-4,64*	-0,13	-0,07	0,02

* Significatif à $P \leq 0,05$

IV. 3.2.2. Absorption d'eau

L'effet du *kanwa* sur la capacité d'absorption d'eau des tubercules durcis de *D. dumetorum* est illustré dans la Figure 34. On note une augmentation exponentielle de la capacité d'absorption d'eau des tubercules avec l'augmentation de la concentration de *kanwa*. Des résultats similaires ont été rapportés par divers auteurs au cours du trempage des végétaux dans des solutions alcalines (Uzogara *et al.*, 1988 ; Rooney & Serna-Saldivar, 1991 ; Laria, Meza, Mondragón, Silva & Peña, 2005). Cet effet serait dû à une fragilisation de la membrane cellulaire résultante des réactions entre la solution alcaline et les protéines et les hydrates de carbone de structure (Trejo-González, Faria-Morales & Wild-Altamirano, 1982 ; Stanley, 1987). L'augmentation de la capacité d'absorption d'eau des tubercules traités au *kanwa* pourrait également justifier l'augmentation du taux de ramollissement des tubercules à la cuisson (Singh, Erskine, Robertson, Nakkoul & Williams, 1988). Ainsi, une meilleure hydratation du tubercule entraînerait un meilleur transfert de chaleur à travers le tubercule et par conséquent un ramollissement plus rapide.

Des corrélations significativement positives (Tableau 19) ont par ailleurs été trouvées entre l'absorption d'eau et le taux de ramollissement des tubercules trempés dans les solutions de *kanwa*, ce qui laisse supposer que la quantité d'eau absorbée par les tubercules au cours de leur trempage dans les solutions de *kanwa* est un facteur déterminant dans le ramollissement des tubercules.

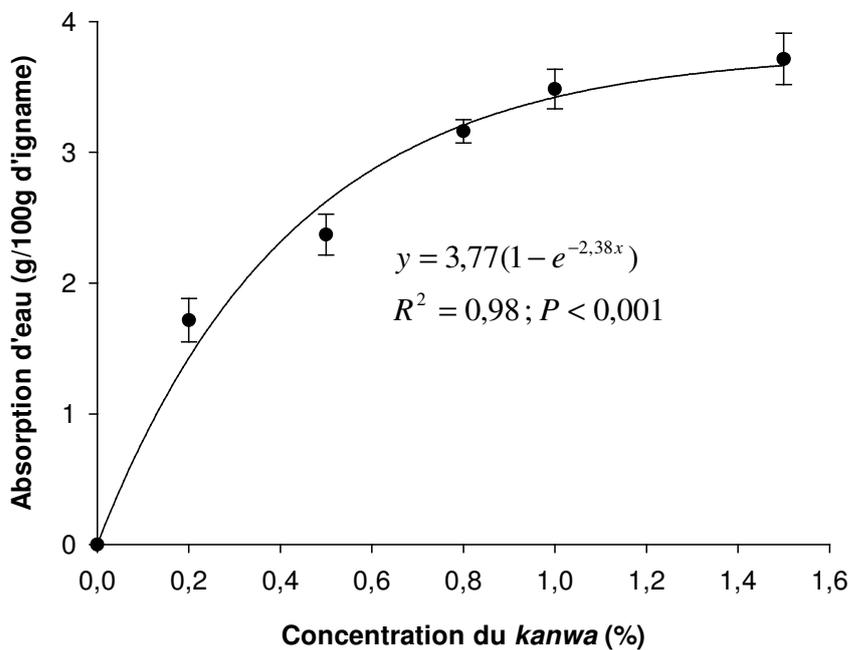


Figure 34 : Effet du *kanwa* sur la capacité d'absorption d'eau des tubercules de *D. dumetorum*.

Tableau 19 : Corrélations entre les différentes variables dépendantes et indépendantes.

	Taux de séparation cellulaire	Concentration du <i>kanwa</i>
Concentration du <i>Kanwa</i>	0,812*	
Absorption d'eau	0,859*	0,990*

* Significatif à $P \leq 0,05$

IV. 3.3. Propriétés fonctionnelles des farines

Dans cette étude, il a été observé que le pré-traitement des tubercules durcis de *D. dumetorum* avec les solutions de *kanwa* augmente significativement ($P \leq 0,05$) la capacité d'absorption d'eau (CAE) des farines des tubercules durcis jusqu'à un taux maximal de 454% (Tableau 20). Dans les précédentes études, des CAE de 265 et 380% ont respectivement été rapporté pour les farines des graines de *Phaseolus lunatus* et *Canavalis ensiformis* (Chel-Guerrero, Perez-Flores, Bentacur-Ancona & Davila-Ortiz, 2002) et 275% pour la farine de niébé (Okezie & Bello, 1988). Différentes protéines de structures et la présence de divers hydrates de carbone hydrophile seraient responsables des variations des capacités d'absorption d'eau des farines. Il est suggéré de cette étude que l'augmentation de la concentration de *kanwa* augmente la disponibilité des groupements fonctionnels des protéines dans les farines, qui augmentent la capacité d'absorption d'eau. Wolf (1970) a montré que la capacité d'absorption d'eau est une importante propriétés des farines utilisées en pâtisserie, puisque cette propriété permet aux pâtisseries d'ajouter beaucoup d'eau à la pâte tout en améliorant sa manipulation et de maintenir la fraîcheur dans le pain. Ainsi, les résultats de cette étude suggèrent que les farines produites à partir des tubercules durcis de *D. dumetorum* traités au *kanwa* pourrait être utilisées comme ingrédient dans la préparation des produits de boulangerie.

La capacité d'absorption d'huile des farines des tubercules durcis de *D. dumetorum* traités au *kanwa* est présentée au Tableau 20. L'analyse de variance (ANOVA) n'a indiqué aucun effet significatif de la concentration de *kanwa* sur la capacité d'absorption d'huile des farines. Les valeurs obtenues dans cette étude sont relativement faibles comparées à celles rapportées précédemment pour les farines de *P. angularis* (147%), *P. calcaratus* (129%), *D. labalab* (199%) et de soja (194%) (Chau & Cheung, 1998). La variation de la capacité d'absorption d'huile dans les farines ayant été associée à la présence de chaînes

non-polaires, les résultats de cette étude indiquent que le traitement au *kanwa* n'a aucun effet significatif sur la configuration de ces sites de fixation de l'huile dans les farines de *D. dumetorum*. Toutefois, les farines des tubercules durcis de *D. dumetorum* traités au *kanwa* serait potentiellement utile dans l'interaction structurale des aliments, spécialement pour la rétention de la flaveur et l'amélioration du goût des produits où un minimum d'absorption d'huile est désiré.

Le trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans les solutions de *kanwa* a une influence significative ($P \leq 0,05$) sur l'indice hydrophile-lipophile des farines produites à partir de ces tubercules. On observe une augmentation progressive de l'indice hydrophile-lipophile avec la concentration de *kanwa* (Tableau 20). Les valeurs obtenues dans cette étude montrent que les farines des tubercules durcis de *D. dumetorum* traités au *kanwa* ont une plus grande affinité avec l'eau qu'avec l'huile et suggèrent que les farines des tubercules durcis de *D. dumetorum* traités au *kanwa* devrait être préférentiellement destinées à la formulation des produits nécessitant une forte capacité d'absorption d'eau.

La densité de la farine est significativement affectée ($P \leq 0,05$) par le pré-traitement des tubercules durcis de *D. dumetorum* avec des solutions de *Kanwa*. On observe une diminution progressive de la densité de la farine avec l'augmentation de la concentration de *Kanwa*, toutefois, le test de classification de Duncan a permis de regrouper ces concentrations en 2 groupes qui montrent qu'un trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans des solutions de *kanwa* n'affecte significativement la densité des farines issues de ces tubercules qu'à partir d'une concentration de *kanwa* de 0,8% (Tableau 20).

Tableau 20 : Influence du trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans des solutions de *kanwa* sur quelques propriétés fonctionnelles des farines issues de ces tubercules.

	Concentration du <i>kanwa</i> (%)					
	0	0,2	0,5	0,8	1	1,5
CAE (%)	347,1±1,2 ^a	360,4±12,4 ^a	368,5±11,6 ^a	415,1±5,6 ^b	434,4±13,7 ^{bc}	454,3±34,7 ^c
ISE (%)	14,7±0,1 ^c	14,6±0,3 ^{bc}	14,4±0,1 ^{ab}	14,3±0,1 ^{ab}	14,3±0,1 ^a	14,2±0,1 ^a
CAH (%)	54,7±0,1 ^a	54,5±0,5 ^a	54,0±0,1 ^a	53,7±1,5 ^a	53,5±0,1 ^a	53,3±0,2 ^a
IHL (%)	6,4±0,1 ^a	6,6 ± 0,2 ^a	6,8 ± 0,2 ^a	7,7±0,1 ^b	8,1±0,3 ^{bc}	8,5±0,6 ^c
Densité de la farine (g/ml)	0,83±0,02 ^b	0,83±0,05 ^b	0,82 ± 0,07 ^b	0,781±0,01 ^a	0,77±0,01 ^a	0,77±0,01 ^a

Moyenne ± écart type, n = 3

Les moyennes de la même ligne ayant les exposants différents sont significativement différentes à P ≤ 0,05 selon le test de Duncan

CAE = capacité d'absorption d'eau

ISE = indice de solubilité à l'eau

CAH = capacité d'absorption d'huile

IHL = indice hydrophile-lipophile

L'analyse de variance a montré que le trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans les solutions de *kanwa* influence de manière significative ($P \leq 0,05$) la plus petite concentration gélifiante des farines produites à partir de ces tubercules. On observe une diminution exponentielle vers un minimum avec l'augmentation de la concentration de *kanwa* (Figure 35). Ces résultats indiquent que le traitement au *kanwa* augmente le pouvoir gélifiant des farines des tubercules durcis. Des résultats similaires ont été rapportés par divers auteurs au cours du trempage des végétaux dans des agents alcalinisant (Bryant & Hamaker, 1997 ; Lai, Abd Karim, Norziah & Seow, 2002) qui l'ont attribué à la stabilisation des granules d'amidon, à travers des interactions électrostatiques entre les ions Na^+ ou Ca^{2+} et les groupements hydroxyle de l'amidon. Les résultats de cette étude suggère que les farines des tubercules durcis de *D. dumetorum* traités au *kanwa* seraient inadéquates pour la formulation des bouillies infantiles où les produits de faible viscosité sont recherchés, par contre, elles pourraient efficacement être utilisées comme gélifiant.

La capacité de gonflement de la pâte des farines produites à partir des tubercules durcis de *D. dumetorum* est significativement influencée ($P \leq 0,05$) par le trempage préalable de ces ignames dans des solution de *kanwa*. On observe une diminution de la capacité de gonflement avec l'augmentation de la concentration de *kanwa* (Figure 36). Le gonflement étant associé à une incorporation d'air dans la pâte (Halling, 1981), ce résultat indique que le trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans des solutions de *kanwa* diminue la capacité de la pâte à incorporer et retenir de l'air.

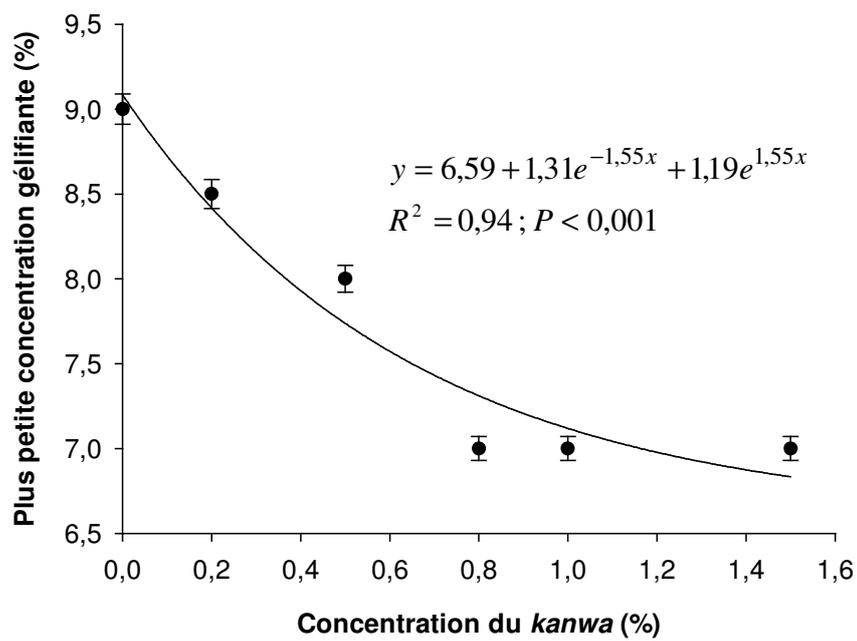


Figure 35 : Effet du trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* sur la plus petite concentration gélifiante des farines produites à partir de ces tubercules.

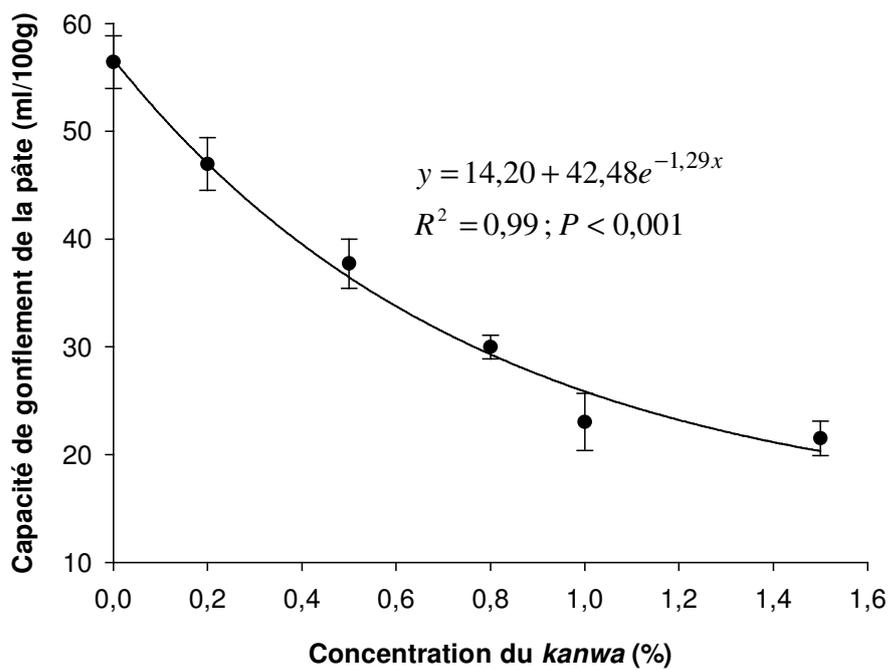


Figure 36 : Effet du trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* sur la capacité de gonflement de la pâte des farines produites à partir de ces tubercules.

IV. 4. Conclusion

Le trempage des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans des solutions de NaCl et de *kanwa* permet d'augmenter de manière significative le taux de ramollissement pendant la cuisson. Le ramollissement n'est pas influencé par le pH de la solution de trempage. Toutefois, le trempage aussi bien dans les solutions de NaCl que dans les solutions de *kanwa* n'a pas permis de surmonter totalement le phénomène de durcissement, preuve que le durcissement Ca^{2+} dépendant n'est pas la seule voie du durcissement des tubercules de *D. dumetorum*.

A l'exception de la capacité d'absorption d'huile, le trempage préalable des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans des solutions de *kanwa* influence significativement les propriétés fonctionnelles des farines obtenues à partir de ces tubercules. La capacité d'absorption d'eau augmente avec la concentration de *kanwa* tandis que les autres paramètres évalués dans cette étude (indice de solubilité à l'eau, indice hydrophile-lipophile, densité et capacité de gonflement de la pâte, plus petite concentration gélifiante) diminuent avec l'augmentation de la concentration de *kanwa*.

Chapitre V. Modifications physico-chimiques et texturales au cours du rouissage des tubercules durcis de l'igname *Dioscorea dumetorum*

V. 1. Introduction

Dans la plupart des pays producteurs, l'igname *D. dumetorum* est utilisée sous forme de tubercules frais cuisinés essentiellement par cuisson à l'eau suivie ou non d'un pilage. Sa transformation est donc surtout culinaire et ce procédé est inopérant avec les tubercules durcis qui ont perdu l'habilité à ramollir pendant la cuisson. Les études précédentes ont montré qu'un pré-traitement des ignames durcis avec des solutions de NaCl ou de *kanwa* ne permet pas de surmonter totalement le durcissement des tubercules de *D. dumetorum*. Il devient par conséquent important de rechercher d'autres modes de transformation des tubercules durcis de *D. dumetorum*, et à ce titre, la fermentation pourrait être une de ces voies.

La fermentation est largement utilisée comme méthode de transformation des aliments ayant pour avantage de diminuer leur teneur en facteurs antinutritionnels et d'améliorer leur digestibilité et leurs qualités organoleptiques (Reddy & Pierson, 1994 ; Obiri-Danso, 1994). Le trempage de végétaux dans un excès d'eau permet la sélection de micro-organismes désirables tels que les bactéries lactiques, les levures et les champignons (Sefa-Dedeh, Sakyi-Dawson & Sanni, 1999 ; Sefa-Dedeh & Cornelius, 2000) et l'activité de ces micro-organismes réduit le pH et augmente l'acidité titrable du substrat (Plahar & Leung, 1982).

Mbome Lape (1991) a initié un essai de production d'une farine fermentée à partir des tubercules de *D. dumetorum* durcis dans le but de produire des bouillies infantiles à faible viscosité. Cependant, il existe très peu de données sur les modifications physico-chimiques au cours de la fermentation des tubercules de *D. dumetorum*, de plus au cours de

la fermentation de ses tubercules se pose le problème du brunissement des tubercules qui prennent une teinte violacée (Mbome Lape, non publié).

La présente étude a été menée dans le but de :

- standardiser le rouissage des tubercules de *D. dumetorum* avec l'hypothèse selon laquelle la fermentation en milieu ouvert (présence d'oxygène) est responsable du brunissement observé au cours de la fermentation,
- déterminer l'effet de la fermentation sur le ramollissement des tubercules durcis,
- déterminer l'effet de la fermentation des tubercules durcis de *D. dumetorum* sur leur teneur en facteurs antinutritionnels et les propriétés fonctionnelles de leurs farines.

V. 2. Matériel et méthodes

V. 2.1. Les tubercules

Les tubercules de *D. dumetorum* stockés pendant 14 jours dans les conditions ambiantes (19-28 °C, 60-85 % HR) ont été utilisés.

V. 2.2. Protocole expérimental

V. 2.2.1. Influence du système de fermentation sur le brunissement des tubercules d'ignames

100 g de tranches d'igname durcie de 1 cm d'épaisseur ont été trempés dans 1 litre d'eau de robinet à température ambiante (23 ± 5 °C) pendant 0 et 7 jours. La fermentation a été effectuée dans des bocaux en verre et 2 systèmes ont été testés : un système ouvert avec renouvellement d'air qui a consisté à laisser le bocal ouvert pendant la durée du rouissage et un système fermé sans renouvellement d'air où l'ouverture du bocal a été hermétiquement fermée. A la fin de la période de fermentation, les différents échantillons ont été séchés à 40°C, broyé à 400 μ m, puis soumis à l'analyse de la couleur.

V. 2.2.2. *Effet de la fermentation sur les propriétés physico-chimiques et texturales des tubercules durcis*

Environ 800 g de tranches d'igname durcie de 1 cm d'épaisseur ont été trempés dans 4 litres d'eau de robinet à température ambiante pendant 0, 2, 4, 7 et 14 jours. La fermentation a été effectuée dans des récipients en plastique qui étaient hermétiquement fermés avec leur couvercle tout au long de la durée du rouissage.

Dans le but de mieux cerner l'effet de la fermentation naturelle, un rouissage stérile a concomitamment été réalisé suivant la méthode de Okafor, Ijioma & Oyolu (1984). Pour ce faire, des tranches d'igname ont été stérilisées pendant 15 min avec du chlorure de mercure à 1%, dans l'éthanol à 70%, puis rincées et immergées dans de l'eau distillée stérile.

V. 2.3. **Préparation des échantillons et analyses physico-chimiques**

Après fermentation au temps indiqué, les échantillons ont été séchés dans une étuve à 40°C. Les échantillons secs ont été broyés dans un broyeur à marteau (Campsas 82370, Labastide St-Pierre, France) et passés dans un tamis de 400 µm. Les paramètres suivants ont été analysés dans les échantillons : matière sèche, pH, acidité titrable, phytate, phénols totaux, oxalates, inhibiteurs d' α -amylase, inhibiteurs de trypsine, lignine, taux de ramollissement et propriétés fonctionnelles.

Les méthodes ont été décrites dans les précédents Chapitres.

V. 2.3.1. *pH et acidité titrable*

10 g de broyat sec ont été mélangés avec 100 ml d'eau distillée. Le mélange a été agité pendant 15 min et centrifugé à 3000 tr/min pendant 15 min dans une centrifugeuse de paillasse (Bioblock scientific MLWT.62.1). Le surnageant a été récupéré et son pH déterminé à l'aide d'un pH mètre (Model H1 8424 microcomputer). 10 ml d'aliquote ont

été titrés contre le NaOH 0,1 N en utilisant la phénolphthaléine 1% comme indicateur. L'acidité a été calculée en g d'acide lactique/100 g d'échantillon.

V. 2.3.2. Analyse de la couleur

La couleur est un attribut perceptif subjectif élaboré par le système visuel à partir de la lumière renvoyée par les objets et par leur environnement. La colorimétrie consiste en un ensemble de données et de méthodes permettant de quantifier la couleur de manière objective. L'espace chromatique CIE $L^*a^*b^*$, défini par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE, 1976), est un espace à trois dimensions uniforme du point de vue des éclats chromatiques. Les 3 coordonnées de CIE $L^*a^*b^*$ sont des correspondants de la luminance (L^*), de la balance rouge-vert (a^*) et de la balance jaune-bleu (b^*) (Figure 37).

La couleur a été mesurée à l'aide d'un colorimètre (Lovibond RT Colour Measurement Kit V2.28) avec une fenêtre d'observation de 10° et une source de lumière D65. L'instrument a été calibré avec un standard blanc ($L^* = 93,87$, $a^* = 0,18$, $b^* = 2,71$) et les coordonnées CIE $L^*a^*b^*$ de chaque échantillon ont été déterminées sur la base de 3 déterminations provenant de 3 différents essais.

Les fonctions couleur dérivées de C^* [chroma = $(a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$] et H^* = [angle hue = $\tan^{-1}(b^*/a^*)$] ont également été calculées.

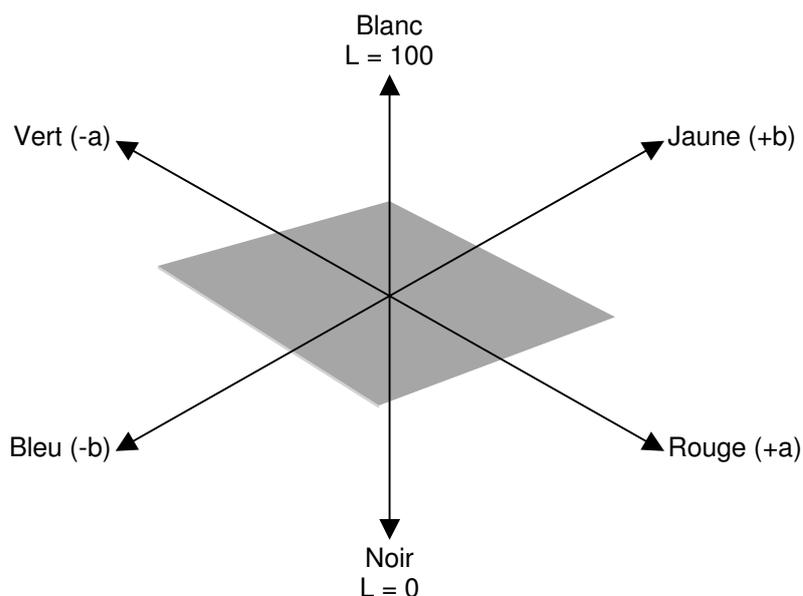


Figure 37 : Espace chromatique CIE $L^*a^*b^*$

V. 2.4. Analyses statistiques

Toutes les mesures ont été effectuées en triple. Les analyses statistiques des données ont été effectuées à l'aide du logiciel SPSS 10.1. Les comparaisons entre les variables dépendantes ont été déterminées à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA), du test de Duncan et de l'analyse de corrélation. La signification statistique a été définie à $P \leq 0,05$.

V. 3. Résultats et discussion

V. 3.1. Influence du système de fermentation sur le brunissement des tubercules d'ignames

La couleur des ignames durcies-fermentées peut être un paramètre de qualité important pouvant directement influencer l'acceptabilité du produit développé. Les paramètres CIE $L^*a^*b^*$ des tubercules d'igname durcies non-fermentés et fermentés sont présentés dans le Tableau 21. De manière générale, la fermentation augmente les paramètres a^* et b^* (rouge et jaune, respectivement) des tubercules durcis, tandis que le

paramètre L^* (luminance) diminue. Ceci est causé par le brunissement des tubercules au cours de la fermentation. Les tubercules fermentés dans des bocaux ouverts sont significativement plus bruns ($a^* > 0$) que ceux fermentés dans des bocaux fermés ($a^* < 0$), ce qui indique que le brunissement au cours de la fermentation des tubercules-durcis de *D. dumetorum* serait dû à l'oxydation de certains composés organiques tels que les composés phénoliques des tubercules. Ainsi, les résultats obtenus dans cette étude montrent qu'une fermentation des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans un système fermé sans renouvellement d'air permet de prévenir le phénomène de brunissement.

Tableau 21 : Paramètres CIE $L^*a^*b^*$ de la couleur des ignames durcies fermentées.

	L^*	a^*	b^*	C^*	H^*
IDNF	$99,96 \pm 0,01^c$	$-0,55 \pm 0,01^a$	$10,27 \pm 0,01^a$	$10,28 \pm 0,01^a$	$93,05 \pm 0,02^c$
IDFc	$96,21 \pm 0,01^b$	$-0,02 \pm 0,01^b$	$12,65 \pm 0,01^c$	$12,65 \pm 0,01^c$	$90,11 \pm 0,01^b$
IDFnc	$91,51 \pm 0,02^a$	$1,95 \pm 0,01^c$	$12,08 \pm 0,01^b$	$12,23 \pm 0,01^b$	$80,84 \pm 0,01^a$

Moyenne \pm écart type, $n = 3$

Les moyennes de la même colonne ayant les exposants différents sont significativement différentes à $P \leq 0,05$

IDNF : igname durcie non-fermentée,

IDFc : igname durcie fermentée dans un système fermé

IDFnc : igname durcie fermentée dans un système ouvert

V. 3.2. Effet de la fermentation sur les propriétés physico-chimiques et texturales des tubercules durcis

V. 3.2.1. Matière sèche

La matière sèche des tubercules durcis de *D. dumetorum* a montré des variations significatives ($P \leq 0,05$) pendant la période de trempage. La matière sèche des tubercules a diminué de 25,9 à 19,4% pendant les 14 jours de rouissage naturel (Figure 38), ce qui indique que les tubercules subissent un phénomène de dégradation ou de perte des

constituants pendant le rouissage. Des pertes en matière sèche d'environ 9,6% ayant été observées après 14 jours de rouissage stérile (Figure 38), indique que la diminution notée au cours de la fermentation naturelle soit en partie due à un lessivage de certains constituants du tubercule.

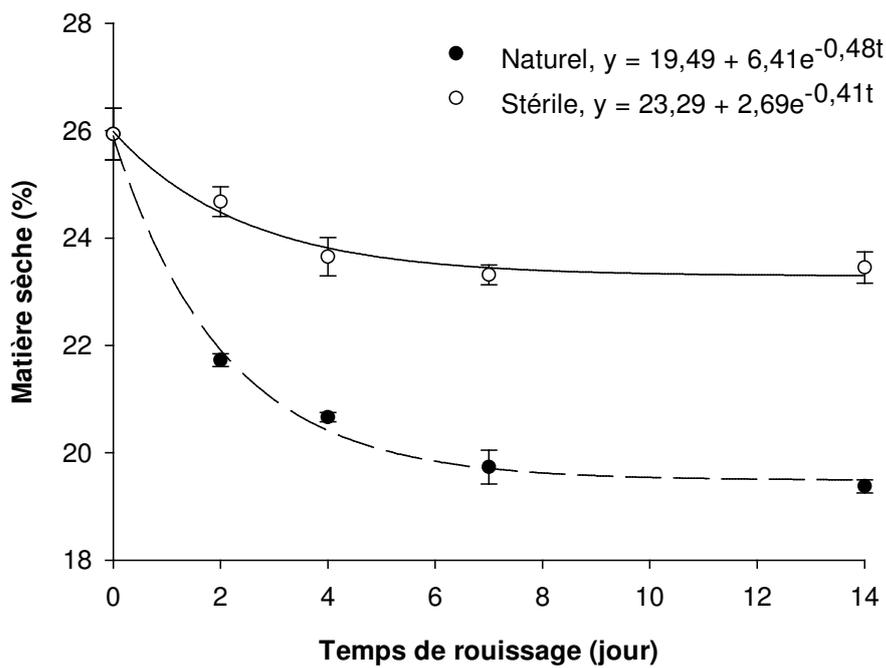


Figure 38 : Variation de la teneur en matière sèche au cours du rouissage naturel et stérile des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

V. 3.2.2. pH et acidité titrable

Le rouissage stérile et naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* a un effet significatif ($P \leq 0,05$) sur le pH des tubercules. On note une augmentation exponentiel du pH vers un état stationnaire au cours du rouissage stérile (Figure 39). Cette augmentation pourrait s'expliquer par la perte de certaines substances acides du tubercule dans l'eau de trempage. L'on observe par contre une nette diminution du pH des tubercules au cours du rouissage naturel (Figure 39), qui résulterait de l'activité des micro-organismes. Pendant les 2 premiers jours de fermentation naturelle, le pH diminue de 5,5 à 4,8 et passe à 3,9 après 14 jours de fermentation. La diminution de pH obtenue dans cette étude est relativement lente comparée à celle observée dans d'autres systèmes de fermentation. Pendant la fermentation du maïs, Sefa-Dedeh, Kluitse & Afoakwa (2001) ont observé une diminution de pH de 6,3 à 4,0 juste après 24 h de fermentation, dans le même ordre d'idée, O'Brien, Mbome, Taylor & Poulter (1992) ont noté une baisse de 6,8 à 4,5 après 48 h de fermentation du manioc. La diminution relativement lente du pH observée ici pourrait être due à la forte teneur en protéines des tubercules de *D. dumetorum* qui joueraient un rôle tampon. Des résultats similaires ont été obtenus par Sefa-Dedeh *et al.* (2001) qui ont observé que les protéines du haricot contribuaient à ralentir la baisse de pH pendant la fermentation des farines composées haricot-maïs.

L'acidité titrable des tubercules durcis de *D. dumetorum* augmente avec le temps de fermentation (Figure 40). L'analyse de variance a montré que le temps de fermentation a un effet significatif sur l'acidité titrable ($P \leq 0,05$). Nout, Roabouts & Havelaar (1989) ont rapporté que les propriétés antimicrobiennes des aliments fermentés sont dues aux acides produits pendant la fermentation. Il a été rapporté que ces acides réduisent l'incidence des diarrhées chez les nourrissons consommant les aliments fermentés (Lorri & Svanberg, 1994). De ce fait, les tubercules durcis de *D. dumetorum* fermentés auraient d'importants attributs, telles que les propriétés antimicrobiennes et une teneur élevée en protéines. Ceci pourrait les rendre utiles dans la formulation d'aliments infantiles.

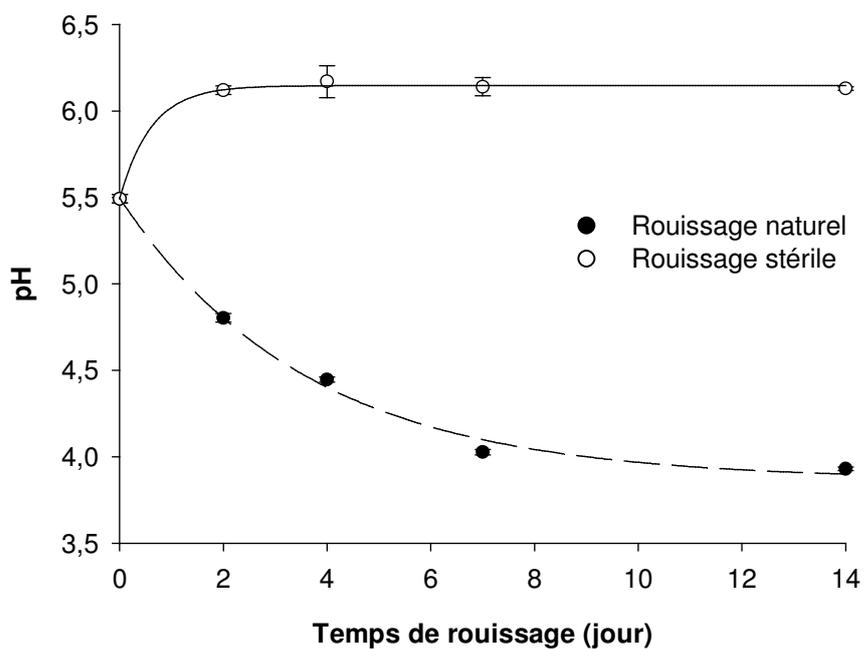


Figure 39 : Variations du pH au cours du rouissage naturel et stérile des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

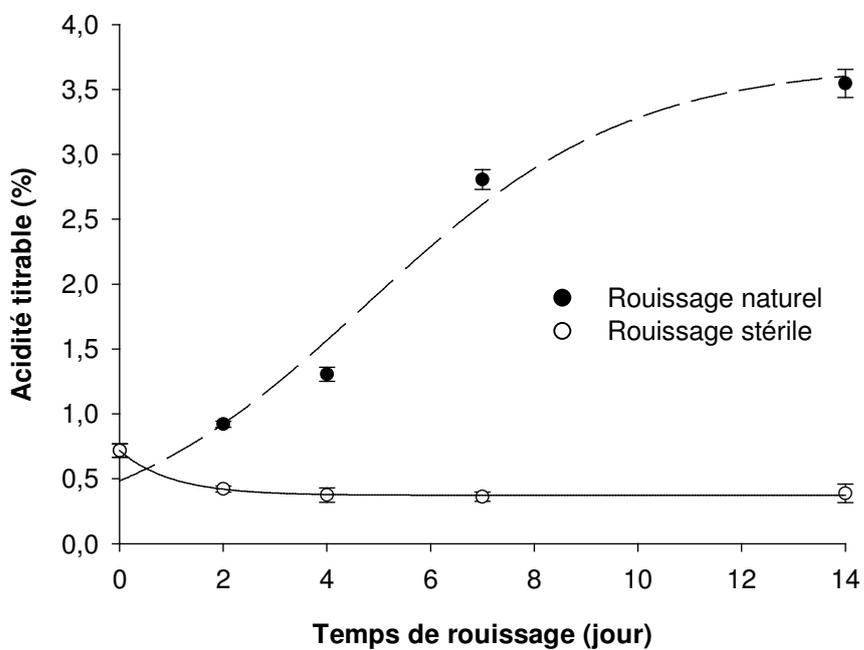


Figure 40 : Variations de l'acidité titrable au cours du rouissage naturel et stérile des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

V. 3.2.3. Ramollissement des tubercules pendant le rouissage

L'effet du rouissage sur le ramollissement des tubercules durcis de *D. dumetorum* est présenté dans la Figure 41. L'analyse de variance des données a montré un effet significatif du temps de fermentation sur le degré de ramollissement des tubercules au cours du rouissage naturel et un effet non significatif au cours du rouissage stérile. Au cours du rouissage naturel, on note une légère augmentation du taux de ramollissement entre les jours 0 et 4, suivie d'une augmentation rapide et à partir du 7^{ème} jour, on obtient des tubercules complètement ramollis. La texture des végétaux étant attribuée à la cohésion de la liaison cellule-cellule au niveau de la lamelle moyenne par l'intermédiaire des polymères pectiques (Waldron *et al.*, 1997).

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que les microorganismes de fermentation ont hydrolysé les polymères pectiques dans les tubercules de *D. dumetorum*, permettant ainsi à ces derniers de ramollir malgré la stabilité conférée par le phénomène de durcissement à la liaison cellule-cellule.

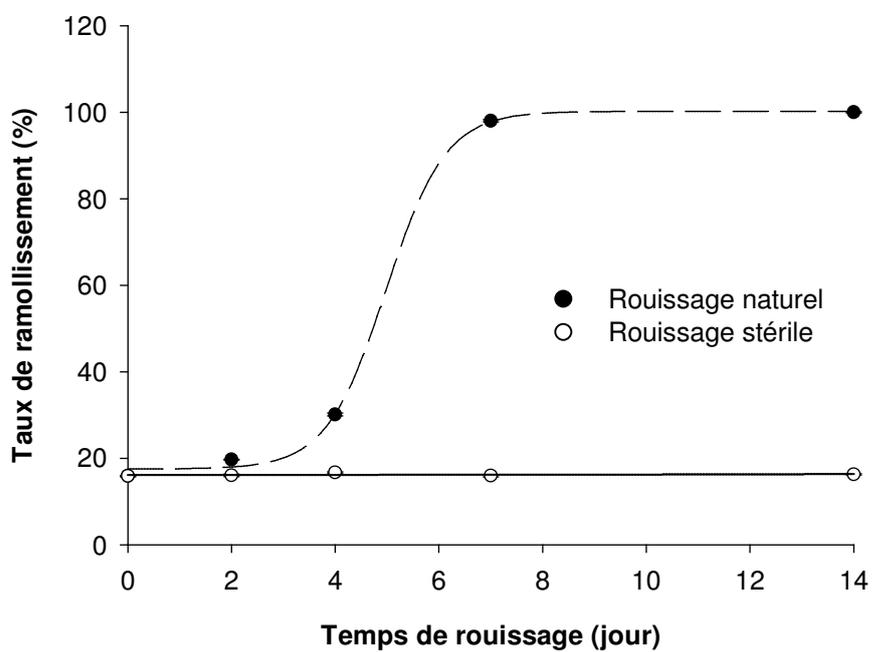


Figure 41 : Variations du degré de ramollissement des tubercules durcis de *D. dumetorum* au cours du rouissage naturel et stérile.

V. 3.2.4. Phytate

Le temps de fermentation affecte significativement la teneur en phytate des tubercules durcis, laquelle diminue de 489,3 à 144,7 mg/100g MS au cours de la période de rouissage de manière exponentielle (Figure 42). Cela représente une perte en phytate d'environ 70%. Marfo, Simpson, Idowu et Oke (1990) ont rapporté des diminutions de phytate de 88%, 98% et 68% respectivement après 96 h de fermentation du manioc, du taro et de l'igname ; cette perte de phytate au cours de la fermentation a été attribuée à la phytase, naturellement présente dans les tubercules ou secrétée par les microorganismes de fermentation. La vitesse de diminution du phytate dans les tubercules de *D. dumetorum* durcis suit au cours du rouissage naturel, une cinétique d'ordre 1, la constante de vitesse étant égale à $0,097 \text{ jour}^{-1}$ et la période de demi-vie $t_{1/2} = 7$ jours.

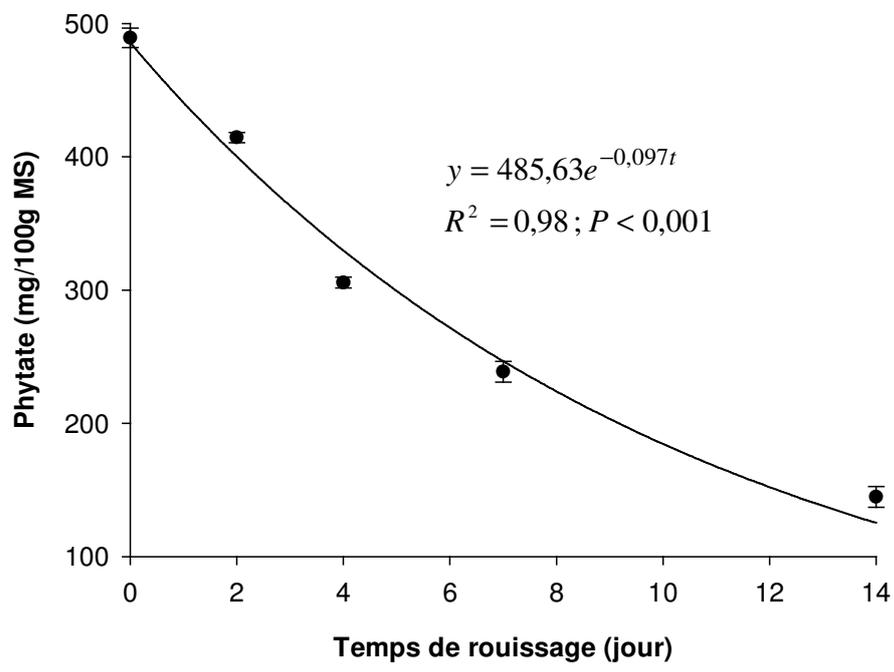


Figure 42 : Variations de la teneur en phytate au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

V. 3.2.5. Polyphénols totaux

Les tubercules durcis de *D. dumetorum* possèdent des quantités non-négligeables de polyphénols totaux comprises entre 272,7 et 273,6 mg équivalent galate/100 de MS. Pendant le rouissage des tubercules, on observe une diminution exponentielle de la teneur en polyphénols totaux (Figure 43). Après 14 jours de fermentation, on note une perte d'environ 48,4% de phénols totaux dans les tubercules étudiés. L'analyse statistique des données a montré que le temps de fermentation affecte significativement la teneur en phénols totaux des tubercules durcis. Un effet similaire de la fermentation a été rapporté dans d'autres systèmes de fermentation, par exemple, une réduction de 10% de la teneur en composés phénoliques a été rapportée après 9 heures de fermentation du rabadi (Reddy & Pierson, 1994). La vitesse de diminution des phénols totaux dans les tubercules de *D. dumetorum* durcis suit au cours du rouissage naturel une cinétique d'ordre 1, la constante de vitesse étant égale à $0,055 \text{ jour}^{-1}$ et la période de demi-vie $t_{1/2} = 12,6$ jours.

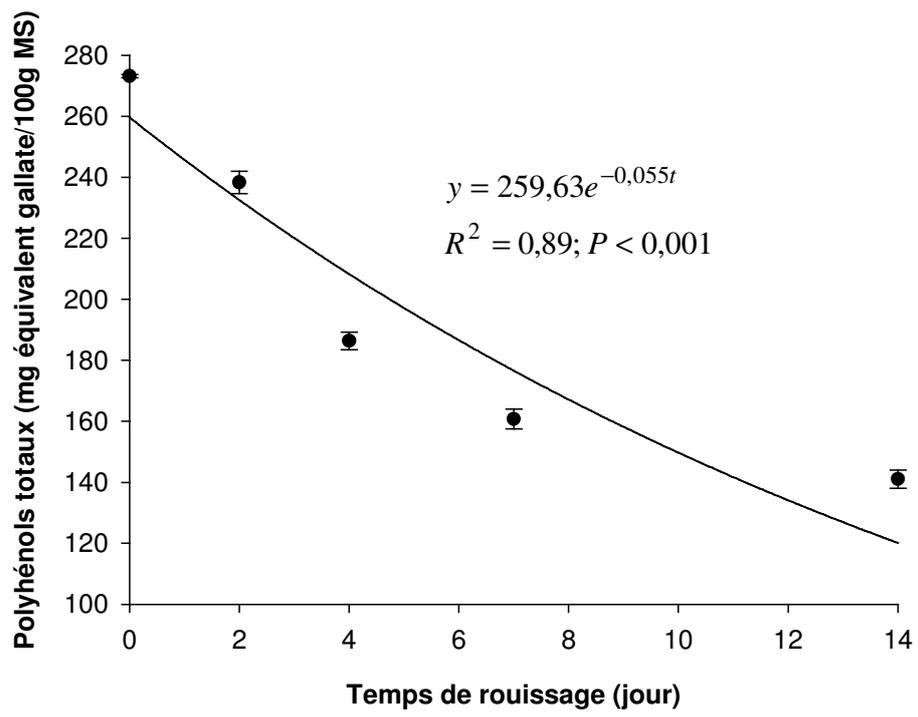


Figure 43 : Variation de la teneur en polyphénols totaux au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

V. 3.2.6. Oxalates totaux

Les oxalates apparaissent comme des produits de fin de métabolisme dans de nombreux tissus végétaux. Lorsqu'ils sont consommés, ces oxalates peuvent lier le calcium et d'autres minéraux (Noonan & Savage, 1999). Les tubercules durcis de *D. dumetorum* contiennent des quantités élevées d'oxalates (225,9 mg/100 de MS). L'analyse de variance des données obtenues dans cette étude a montré que le temps de fermentation a un effet significatif sur la teneur en oxalates des tubercules au cours du rouissage naturel. On note une diminution exponentielle de la teneur en oxalates avec le temps de rouissage (Figure 44). Après 14 jours de fermentation, des pertes d'oxalates d'environ 22,4% sont observées dans les tubercules étudiés. Un des mécanismes possibles pouvant expliquer cette diminution de la teneur en oxalates pourrait être attribué aux pertes dues à la solubilité dans l'eau de trempage. En effet il est connu que le trempage réduit la teneur en oxalates des aliments par lessivage (Noonan & Savage, 1999 ; Ross *et al.*, 1999). En outre, dans cette étude, il a été observé une diminution d'environ 46% de l'acidité titrable des tubercules durcis de *D. dumetorum* après 14 jours de rouissage stérile, ce qui laisse à suggérer que certaines substances acides des tubercules soient perdues dans l'eau de trempage.

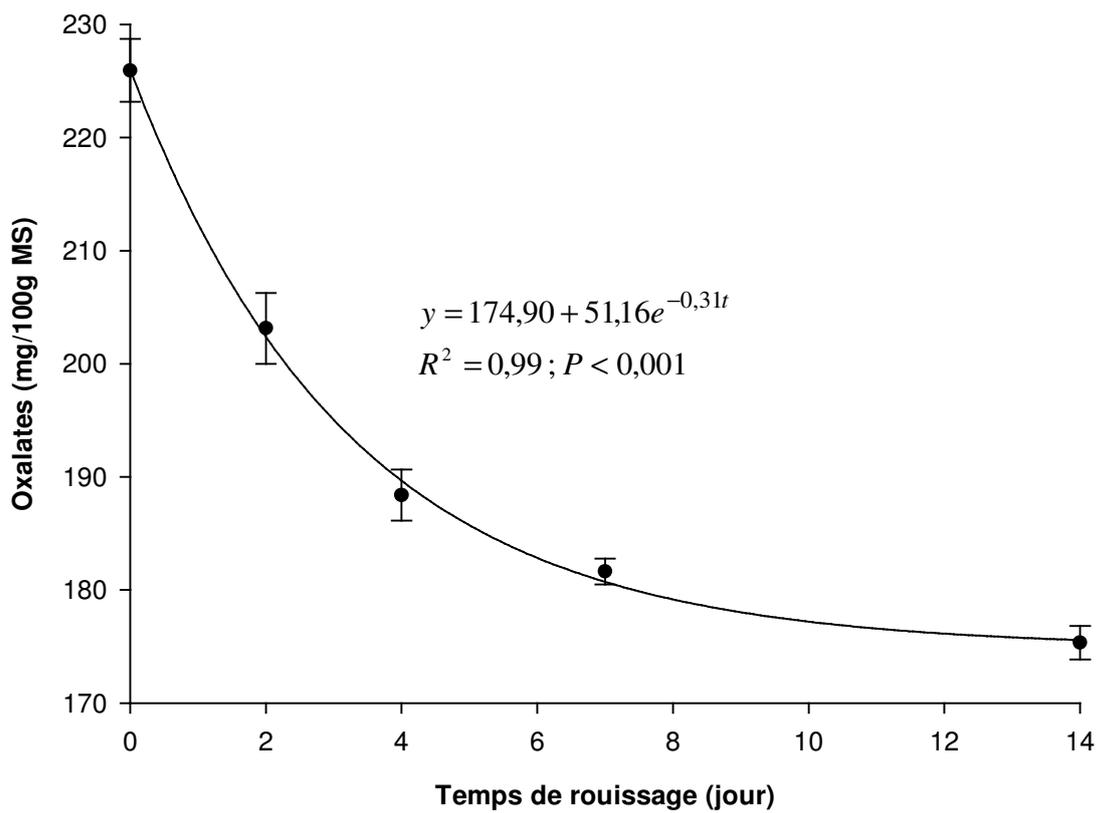


Figure 44 : Variation de la teneur en oxalates totaux au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

V. 3.2.7. Inhibiteurs d' α -amylase

Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que les tubercules de *D. dumetorum* durcis contiennent des quantités non-négligeables d'anti-amylase (environ 790 AUI/g MS). L'analyse de variance (ANOVA) des données a montré un effet significatif du temps de rouissage sur la teneur en inhibiteurs d' α -amylase. La teneur en inhibiteurs d' α -amylase des tubercules diminue de 790 à 411 AUI/g MS pendant les 14 jours de rouissage (Figure 45). Ceci signifie qu'après 14 jours de rouissage naturel, il y a eu une perte en inhibiteurs d' α -amylase d'environ 48% dans les échantillons étudiés, indiquant que lors de la fermentation, les tubercules subissent un phénomène de dégradation des inhibiteurs de l' α -amylase. Les composés phénoliques et les phytates sont des inhibiteurs d' α -amylase (Deshpandes *et al.*, 1982 ; Weslake *et al.*, 1983) et pourraient être à l'origine de l'inhibition observée dans cette étude. Une corrélation significative ($r = 0,987$ à $0,991$; $P < 0,001$) a par ailleurs été trouvée dans cette étude entre ces deux composés et les inhibiteurs d' α -amylase pendant le rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum*. Tout comme les phytates, la vitesse de diminution des inhibiteurs d' α -amylase dans les tubercules de *D. dumetorum* durcis suit au cours du rouissage naturel une cinétique d'ordre 1, la constante de vitesse étant égale à $0,053 \text{ jour}^{-1}$ et la période de demi-vie $t_{1/2} = 13$ jours.

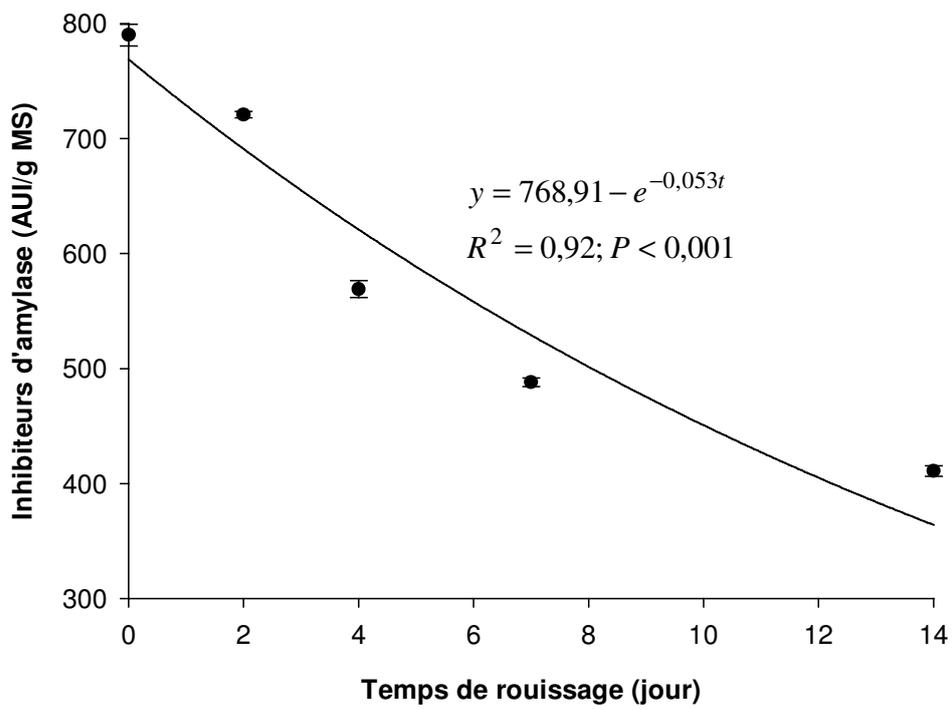


Figure 45 : Variation de la teneur en inhibiteurs d'amylase au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

V. 3.2.8. Inhibiteurs de trypsine

Les tubercules durcis de *D. dumetorum* contiennent des quantités non-négligeables d'inhibiteurs de trypsine (823,9 TUI/g MS). Le temps de rouissage a eu un effet significatif ($P \leq 0,05$) sur la teneur en inhibiteurs de trypsine des tubercules étudiés. Au cours du rouissage naturel, on a noté une diminution exponentielle de la teneur en inhibiteurs tryptiques des tubercules (Figure 46). Après 14 jours de rouissage, on note une perte d'environ 53,7% de la teneur en trypsine dans les échantillons étudiés. Diverses diminutions en inhibiteurs de trypsine ont été rapportées au cours de la fermentation des aliments, réductions attribuées à l'hydrolyse par les microorganismes de fermentation. Reddy & Pierson (1994) ont rapporté des réductions de l'ordre de 47% en inhibiteurs de trypsine pendant la fermentation des végétaux. La vitesse de diminution des inhibiteurs de trypsine dans les tubercules de *D. dumetorum* durcis suit au cours du rouissage naturel, une cinétique d'ordre 1, la constante de vitesse étant égale à $0,068 \text{ jour}^{-1}$ et la période de demi-vie $t_{1/2} = 10$ jours.

V. 3.2.9. Lignine

Les tubercules durcis de *D. dumetorum* ont montré des teneurs élevées en lignine comprises entre 5,2 et 5,9 g/100g de MS. Le rouissage n'affecte pas significativement ($P \leq 0,05$) la teneur en lignine des tubercules. Après 14 jours de rouissage naturel, les tubercules présentent une teneur en lignine de $5,5 \pm 0,2$ g/100g de MS, ce qui indique que les microorganismes de la fermentation des tubercules de *D. dumetorum* ne dégrade pas la lignine.

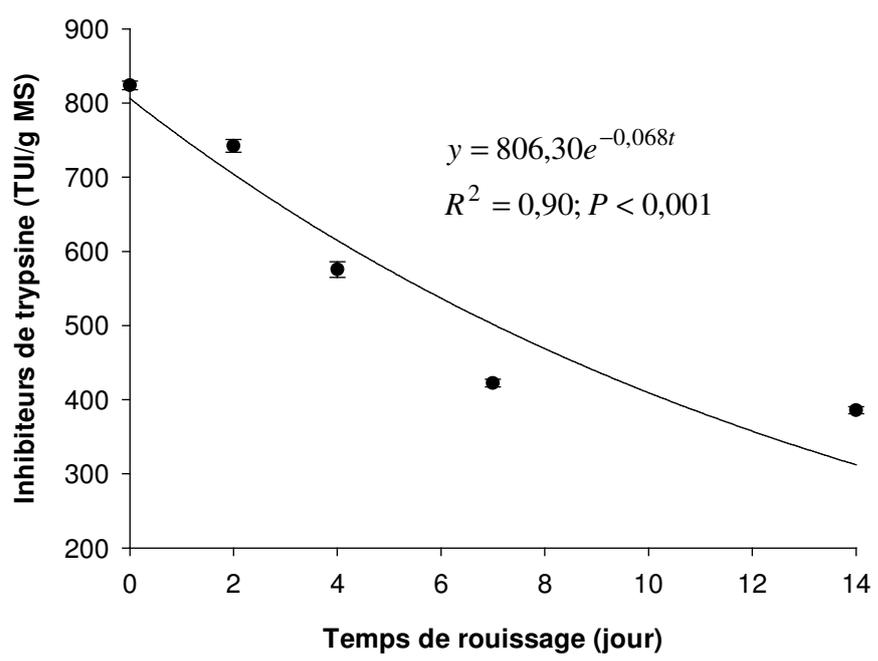


Figure 46 : Variation de la teneur en inhibiteurs de trypsine au cours du rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

V. 3.2.10. *Corrélations entre l'acidité et les facteurs antinutritionnels des tubercules durcis de D. dumetorum pendant la fermentation*

Il existe des relations linéaires très significatives entre l'acidité (pH et acidité titrable) et tous les facteurs antinutritionnels analysés, à l'exception de la lignine (Tableau 22). Le développement de l'acidité étant attribué à l'activité des microorganismes, les résultats obtenus dans cette étude suggère que l'activité des microorganismes pendant la fermentation des tubercules durcis de *D. dumetorum* induit la dégradation des facteurs antinutritionnels présents dans ces tubercules.

Tableau 22 : Corrélations entre l'acidité et les facteurs antinutritionnels des tubercules durcis de *D. dumetorum* pendant le rouissage naturel.

	pH	Acidité titrable
Lignine	0,20	-0,14
Phénols totaux	0,98*	-0,87*
Phytate	0,96*	-0,92*
Inhibiteurs de trypsine	0,97*	-0,90*
Inhibiteurs d' α -amylase	0,96*	-0,90*
Oxalates	0,95*	-0,77*

* Significatif à $P \leq 0,05$

V. 3.2.11. Les propriétés fonctionnelles des farines

Dans cette étude, il a été observé que le rouissage des tubercules durcis de *D. dumetorum* affecte significativement ($P \leq 0,05$) la capacité d'absorption d'eau (CAE) et l'indice de solubilité à l'eau (ISE) des farines qui en résultent (Tableau 23). On observe une diminution de ces deux paramètres avec l'augmentation du temps de rouissage. Ces résultats montrent que le rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* diminue l'hydrophilie de la farine ainsi que les éléments solubles dans l'eau. Ceci pourrait s'expliquer par le lessivage des composés hydrophiles des tubercules dans l'eau de rouissage et/ou par leur dégradation par les microorganismes de fermentation.

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) des données obtenues sur la capacité d'absorption d'huile indiquent que le rouissage des tubercules durcis de *D. dumetorum* a un effet significatif sur la capacité d'absorption d'huile des farines. On observe une diminution progressive de la capacité d'absorption d'huile des farines avec l'augmentation du temps de rouissage des tubercules (Tableau 23).

Le rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* affecte significativement ($P \leq 0,05$) l'indice hydrophile-lipophile (IHL) des farines produites à partir de ces tubercules. On observe une diminution d'environ 22,5% de l'indice hydrophile-lipophile en 4 jours de rouissage des tubercules après lesquels une période de rouissage supplémentaire n'induit aucune variation significative de ce paramètre (Tableau 23). Dans tous les cas, les valeurs de IHL obtenues dans cette étude sont très élevées, ce qui indique que les farines obtenues ont une plus grande affinité avec l'eau qu'avec l'huile.

L'analyse de variance des données obtenues pour la plus petite concentration gélifiante ont montré que le rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* influence de manière significative la plus petite concentration gélifiante des farines produites à partir de ces tubercules. On note une augmentation de la plus petite

concentration gélifiante avec l'augmentation du temps de rouissage des tubercules suivant une relation sigmoïde (Figure 47). Ceci pourrait s'expliquer par la dégradation de l'amidon au cours de la fermentation des tubercules, sous l'action des microorganismes de la fermentation. Ainsi, l'une des propriétés recherchées dans les farines pour la formulation des bouillies infantiles étant une faible viscosité après cuisson, la fermentation des tubercules durcis de *D. dumetorum* comme moyen de pré-traitement en vue de leur transformation en farine, aiderait à atteindre cet objectif.

Les résultats obtenus sur la densité de la pâte a montré que le rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* influence significativement la densité des farines obtenues à partir de ces tubercules. On observe une diminution de l'ordre de 11,2% à partir du 7^{ème} jour de fermentation, aucune variation significative n'étant notée entre les jours 0 et 4 (Tableau 23).

L'analyse de variance a montré que le rouissage des tubercules durcis de *D. dumetorum* influence significativement la capacité de gonflement de la pâte des farines obtenues à partir de ces tubercules. Aucune variation significative n'est observée entre les jour 0 et 4, puis une diminution brusque de l'ordre de 82,5% est enregistrée le 7^{ème} jour de fermentation après laquelle on observe une diminution progressive (Figure 48). Le gonflement étant associé à une incorporation d'air dans la pâte (Halling, 1981). En tenant compte de cela, on peut suggérer que le rouissage des tubercules durcis de *D. dumetorum* diminue la capacité de la pâte (résultante de la farine de ces tubercules) à incorporer et retenir de l'air.

Tableau 23 : Effet du rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* sur quelques propriétés fonctionnelles des farines issues de ces tubercules.

	Temps de rouissage (jour)				
	0	2	4	7	14
CAE (%)	449,8±23,1 ^c	390,2±7,9 ^d	349,7±4,8 ^c	308,8±1,3 ^b	286,0±4,6 ^a
ISE (%)	14,9±0,1 ^d	13,6±0,2 ^c	13,6±0,3 ^c	12,8±0,1 ^b	10,6±0,5 ^a
CAH (%)	53,8±0,1 ^d	53,9±0,3 ^d	52,4±0,9 ^c	47,8±0,1 ^b	43,7±1,1 ^a
IHL (%)	8,4±0,4 ^c	7,5±0,1 ^b	6,5±0,1 ^a	6,8±0,1 ^a	6,5±0,1 ^a
Densité de la farine (g/ml)	0,76±0,01 ^c	0,75±0,01 ^c	0,76±0,01 ^c	0,67±0,01 ^b	0,57±0,01 ^a

Moyenne ± écart type, n = 3

Les moyennes de la même ligne ayant les exposants différents sont significativement différentes à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

CAE = capacité d'absorption d'eau

ISE = indice de solubilité à l'eau

CAH = capacité d'absorption d'huile

IHL = indice hydrophile-lipophile

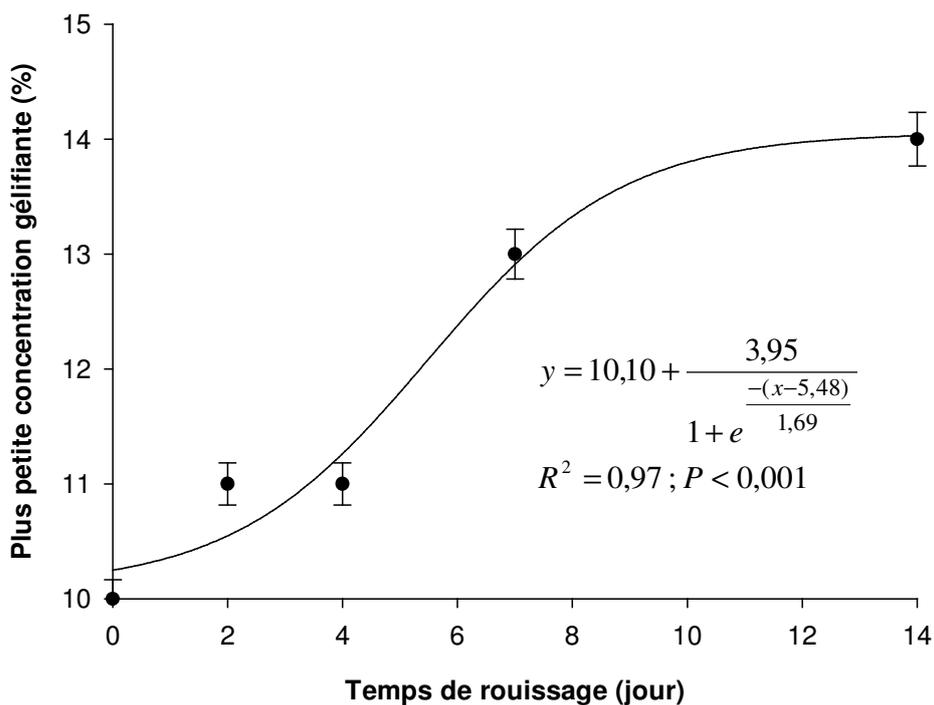


Figure 47 : Effet du rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* sur la plus petite concentration gélifiante des farines.

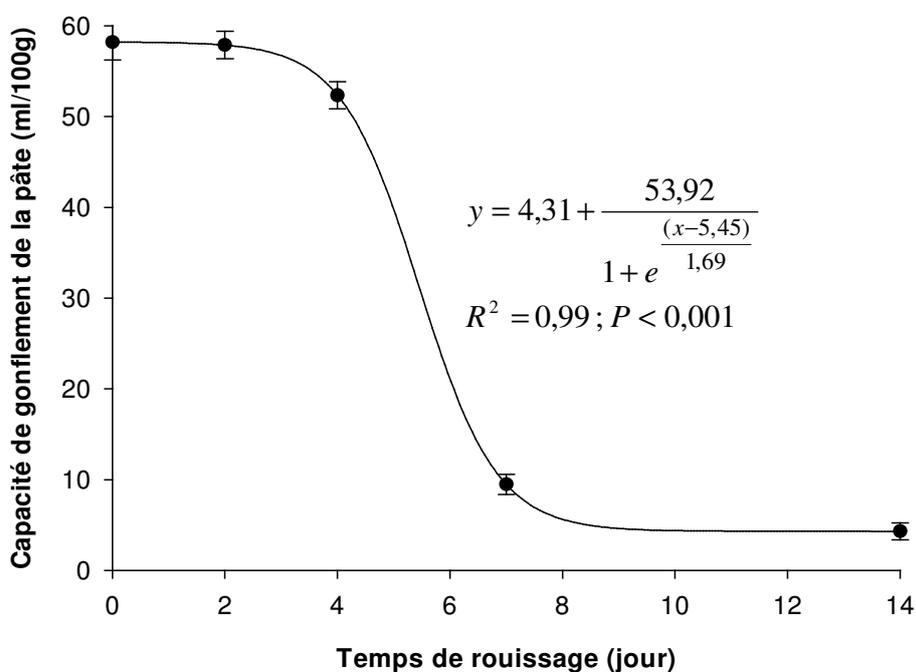


Figure 48 : Effet du rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* sur la capacité de gonflement de la pâte des farines.

V. 4. Conclusion

Le rouissage des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans un système fermé sans renouvellement d'air permet de prévenir le brunissement antérieurement noté au cours de la fermentation de ces tubercules.

Le rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* pendant 7 jours entraîne le ramollissement total de ces tubercules. En outre, à l'exception de la lignine, les teneurs des différents facteurs antinutritionnels analysés (phénols totaux, oxalates, phytate, inhibiteurs de trypsine et d' α -amylase) sont significativement affectés par la fermentation des tubercules ; elles diminuent avec le temps de fermentation. Ainsi, le rouissage améliore la qualité nutritionnelle des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

Le rouissage naturel des tubercules durcis affecte de manière significative les propriétés fonctionnelles des farines produites à partir de ces tubercules. On a noté une augmentation de la plus petite concentration gélifiante et une diminution de l'ensemble des autres paramètres mesurés (capacité d'absorption d'eau, indice de solubilité à l'eau, capacité d'absorption d'huile, indice hydrophile-lipophile, densité de la farine et gonflement de la pâte). L'augmentation de la plus petite concentration gélifiante au cours du rouissage est un avantage certain dans l'optique de produire des bouillies à faible viscosité.

Chapitre VI. Influence du stockage et des conditions de pré-traitement des tubercules de l'igname *Dioscorea dumetorum* sur leur qualité nutritionnelle

VI. 1. Introduction

Les ignames sont largement cultivées en Afrique et constituent une source importante de calories et de nutriments pour les populations (Coursey, 1983 ; Degras, 1993). *D. dumetorum* est la plus nutritive des huit espèces d'ignames couramment consommées au Cameroun. Elle contient une quantité moyenne de protéines (9,6 g/100g de matière sèche) avec une composition en acides aminés essentiels assez équilibrée, malgré une légère déficience en lysine et un indice chimique moyen de 93 lorsqu'elle est comparée à la protéine de référence de FAO/OMS (1973) (Mbome Lape & Trèche, 1994). Cette igname se caractérise également par une bonne digestibilité de l'amidon du fait de sa structure cristalline proche de celle de l'amidon des céréales (Robin, 1976).

En dépit de son importance comme source alimentaire, l'aptitude au stockage de cette igname est limitée par un sévère phénomène de durcissement qui survient dans les heures qui suivent la récolte et la rend impropre à la consommation humaine même après une cuisson prolongée. Ceci limite leur production et leur commercialisation aux seules zones de production, gênant par ce fait leur valeur économique et nutritionnelle comme aliment.

Dans l'optique d'apporter une plus-value à cette igname comme importante source alimentaire, quelques conditions de pré-traitement des tubercules durcis en vue de leur transformation en farine ont été étudiées au cours de ce travail (Chapitres 4 et 5). La fermentation et le trempage des tubercules dans des solutions de *kanwa* se sont révélés être des pré-traitements prometteurs.

L'objectif de ce Chapitre est d'étudier l'influence du stockage et des conditions de pré-traitement des tubercules de *D. dumetorum* sur leur qualité nutritionnelle.

VI. 2. Matériel et méthodes

VI. 2.1. Tubercules et préparation des échantillons

Les tubercules de *D. dumetorum* frais, frais et cuit dans de l'eau bouillante pendant 30 min, durcis (stockés pendant 14 jours à 19-28 °C, 60-85 % HR), durcis et germés (stockés pendant 28 jours à 19-28 °C, 60-85 % HR), durcis et fermentés pendant 7 jours, et durcis et traités avec le *kanwa* 1% dans les conditions définies au Chapitre IV ont été utilisés pour cette étude. Les échantillons ont été séchés dans une étuve ventilée à 40 °C et les échantillons secs ont été broyés dans un broyeur à marteau (Campsas 82370, Labastide St-Pierre, France) puis passés dans un tamis de 400 µm. Les paramètres suivants ont été analysés : protéines, digestibilité des protéines, fractions protéiques, composition en acides aminés, qualité des protéines, sucres totaux, digestibilité et biodisponibilité *in vitro* des sucres.

VI. 2.2. Analyses chimiques

VI. 2.2.1. Protéines

La teneur en protéine ($N \times 6,25$) a été déterminée suivant la méthode de Kjeldahl pour la détermination de l'azote total (AOAC, 1990). Environ 0,5 g d'échantillon sec a été introduit dans un matras et minéralisé en présence de 10 ml de H₂SO₄ concentré et de 0,5 g de catalyseur de minéralisation Dumazert. La minéralisation a été réalisée à chaud durant une heure sur une rampe de minéralisation (Tecator). Après minéralisation et refroidissement des échantillons, 50 ml d'eau distillée ont été ajoutés dans chaque matras contenant le minéralisât. Celui-ci a alors été positionné dans une unité de distillation

(Tecator, Kjelttec System 1002 Distilling Unit) et environ 50 ml de NaOH 40% ont été introduits dans le matras. La distillation a été effectuée et environ 175 ml de distillât collecté dans un erlenmeyer contenant 25 ml d'acide borique 4% et 3 gouttes de l'indicateur rouge méthyle-bleu méthyle. Le distillât obtenu ci-dessus a par la suite été titré sous agitation avec une solution de H₂SO₄ 0,1 N jusqu'à ce que la couleur vire du vert au pourpre. Un blanc contenant l'ensemble des réactifs à l'exception de l'échantillon a été réalisé parallèlement et la teneur en protéine a été calculée par la formule suivante :

$$\% \text{ Protéine} = \frac{(ml \text{ H}_2\text{SO}_4 - ml \text{ blanc}) \times 0,1 \times 14,01 \times 6,25}{\text{Echantillon (g)}} \times \frac{100}{MS (\%)}$$

où 6,25 est le facteur de conversion de l'azote en protéine, 14,01 l'azote équivalent à 0,1 N de H₂SO₄ en g/mole d'azote et MS le taux de matière sèche de l'échantillon.

VI. 2.2.2. Fractions protéiques

Les fractions protéiques ont été déterminées suivant la procédure d'extraction consécutive décrite par Skoch, Deyoe, Shoup, Bathurst & Liang (1970). Environ 3,5 g d'échantillon broyé ont été extraits deux fois avec 50 ml d'eau distillée pendant 30 min à température ambiante. L'extrait obtenu a été centrifugé à 3000 trs/min pendant 30 min et le surnageant a été utilisé pour la détermination de la fraction protéique hydrosoluble (albumines). Le culot a par la suite été extrait successivement de la même manière avec du NaCl 0,5%, de l'éthanol 80% et du NaOH 2%. Le surnageant de chaque extrait a été récupéré et utilisé pour estimer les fractions protéiques solubles dans le NaCl (globulines), dans l'alcool (prolamines) et dans le NaOH (glutelines). Le résidu restant a été utilisé pour la détermination de la fraction protéique insoluble. La teneur en protéine du surnageant de chaque fraction et du résidu insoluble a été déterminée suivant la méthode standard de détermination de l'azote total (AOAC, 1990).

VI. 2.2.3. Digestibilité *in vitro* des protéines

La digestibilité *in vitro* des protéines a été déterminée suivant la méthode au pH utilisant quatre enzymes (Satterlee, Marshall & Tennyson, 1979). Une solution de 10 ml d'échantillon contenant 6,25 mg de protéines par ml d'eau distillée a été préparée et le pH ajusté à 7,9 avec du NaOH 1 N. Le mélange obtenu a été agité pendant 1 h et le pH ajusté à 8 avec du NaOH 0,1 N. 1 ml d'une solution de 3 enzymes pH 8 contenant 1,6 mg de trypsine (Sigma type IX du pancréas de porc), 3,1 mg de chymotrypsine (Sigma type II du pancréas de bœuf) et 1,3 mg de peptidase (Sigma type III de l'intestin de porc) par ml d'eau distillée a été ajoutée au mélange et incubé à 37°C pendant 10 min. 1 ml d'une solution de protéase pH 8 contenant 7,95 mg de protéase (Sigma type VI de *Streptomyces griseus*) par ml d'eau distillée a par la suite été ajoutée au mélange, incubé à 55°C pendant 9 min puis le mélange a été transféré à 37°C, incubé pendant 1 min et le pH mesuré. La digestibilité *in vitro* a été calculée par l'équation de régression de Satterlee *et al.* (1979) :

$$\% \text{ digestibilité} = 234,84 - 22,56 \times \text{pH}$$

VI. 2.2.4. Composition en acides aminés

L'analyse des acides aminés a été effectuée au Département de Biochimie de l'Université de Pretoria par HPLC suivant la méthode Waters Pico-Tag décrite par Bidlingmeyer, Cohen & Tarvin (1984). Environ 8 mg d'échantillons ont été placés dans des ampoules de 2 ml et 0,45 ml de HCl 6 N y ont été ajoutés. Le vide à été fait dans les ampoules qui ont été scellées et placées dans une étuve à 110°C pendant 24 heures. Après hydrolyse, une quantité aliquote de 20 µl de l'hydrolysate a été séchée, hydratée avec 10 µl de solution de reséchage (éthanol:eau:triéthylamine, 2:2:1), séché à nouveau et enfin dérivatisé avec 20 µl du réactif phénylthiocyanate (éthanol:eau:triéthylamine:phénylthiocyanate, 7:1:1:1) pendant 20 min à température

ambiante (Cohen & Strydom, 1988). L'excès de réactif a été enlevé à température ambiante à l'aide d'une pompe à vide. Les échantillons dérivatisés ont par la suite été dissouts dans 0,1 ml d'acétate de sodium 0,14 M dont le pH a été ajusté à 6,4 avec de l'acide acétique dilué. Une quantité aliquote de 20 µl a été injectée dans la colonne Waters C18 (3,9 × 150 mm).

La séparation des acides aminés a été effectuée par élution avec des concentrations croissantes d'acétonitrile tel que décrit par Bidlingmeyer, Cohen & Tarvin (1984). Les temps de rétention des divers acides aminés ont été déterminés à l'aide d'un mélange d'acides aminés de calibration. La quantification des acides aminés individuels a été effectuée en enregistrant l'absorbance de l'éluat de la colonne à 254 nm et en comparant l'aire sous chaque pic avec ceux correspondant aux acides aminés du standard.

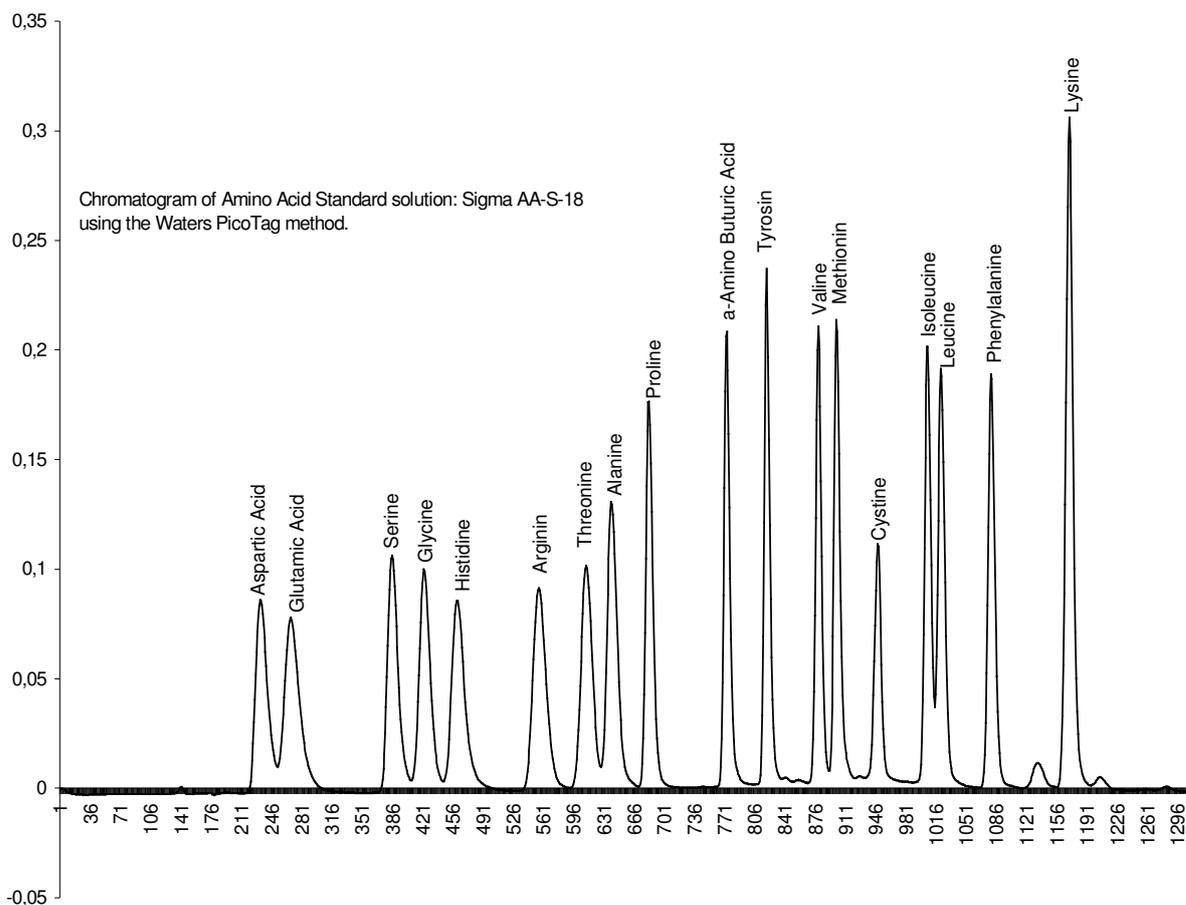


Figure 49 : Chromatogramme de la solution standard d'acide aminé Sigma AA S-18

VI. 2.2.5. *Qualité protéique*

Pour évaluer la qualité protéique, Block & Mitchell (1946) ont introduit le concept d'indice chimique ou d'acides aminés, selon lequel la quantité de l'acide aminé essentiel qui présente le plus fort déficit est exprimée en pourcentage de la quantité présente dans une protéine de référence. L'indice relatif aux acides aminés, proposé par la consultation conjointe d'experts FAO/OMS/UNU de 1981 sur les besoins énergétiques et les besoins en protéines (OMS, 1985), a été jugé dépassé par la consultation conjointe d'experts FAO/OMS de 1989 sur l'évaluation de la qualité des protéines (FAO, 1991). Cette dernière a recommandé l'utilisation à titre temporaire de l'indice de 1985 appliqué aux enfants d'âge préscolaire pour évaluer la qualité des protéines pour tous les groupes d'âge à l'exception des nourrissons, ce qui a été fait dans cette étude.

Pour déterminer la qualité d'une protéine en tenant compte de sa digestibilité et de la disponibilité de ses acides aminés, le concept de digestibilité protéique ajusté à l'indice chimique (PDCAAS) a été adopté (WHO, 2002). Il a été calculé en multipliant l'indice chimique par la digestibilité.

VI. 2.2.6. *Glucides disponibles*

Les glucides disponibles ont été déterminés par analyse des sucres réducteurs en utilisant la méthode à l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS) de Fischer & Stein (1961), après hydrolyse à chaud à l'acide sulfurique. Environ 0,5 g d'échantillon ont été introduits dans un Erlen muni d'un bouchon avec un tube de dégagement et 10 ml de H₂SO₄ 1,5 N y ont été ajoutés, puis l'Erlen a été fermé et le mélange chauffé dans un bain-marie bouillant pendant 45 min. Après refroidissement à température ambiante, 10 ml d'éthanol à 70%, 0,5 ml de sulfate de zinc (2g/100ml) et 0,5 ml de ferrocyanure de potassium (10,6g/100ml) ont été ajoutés dans le milieu puis, le mélange a été filtré avec du papier filtre dans une

fiolle de 50 ml et le volume du filtrat ajusté jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. 0,25 ml du filtrat dilué ont été ajoutés dans un tube à essai, ainsi que 0,5 ml de NaOH 1 N 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 ont été ajoutés dans le milieu. Le mélange a été agité et l'absorbance lue à 540 nm contre un blanc.

VI. 2.2.7. Digestibilité et biodisponibilité in vitro des sucres disponibles

La digestibilité et la biodisponibilité *in vitro* des sucres a été déterminée suivant la méthode de Savoie & Gautier (1986) légèrement modifiée. Un mélange constitué d'une solution de 10 ml d'échantillon contenant 10 mg de sucres par ml dans un tampon phosphate pH 6,9 et de 50 μ l d' α -amylase bactérienne (Sigma type II) a été transféré dans un sac à dialyse, puis placé dans un b cher contenant 20 ml d'eau distillée et incub e sous agitation dans un bain-marie à 37 C. La teneur en sucre dans le dialysat a été suivie pendant 120 min. Des aliquotes (0,3 ml) ont été pr lev es à intervalles réguliers (0, 5, 10, 15, 30, 60 et 120 min) et les sucres ont été dos es par la méthode au 3, 5 dinitrosalicylique (DNS) de Fischer & Stein (1961).

VI. 2.3. Analyses statistiques

Toutes les mesures ont été effectu es en triple. Les analyses statistiques des données ont été effectu es à l'aide du logiciel SPSS 10.1. Les comparaisons entre les variables dépendantes ont été d termin es à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA) et du test de Duncan. La signification statistique a été définie à $P \leq 0,05$.

VI. 3. Résultats et discussion

VI. 3.1. Qualité nutritionnelle des protéines

La teneur en protéine des tubercules frais de l'igname *D. dumetorum* est d'environ 9,5 g/100g de MS, ce résultat est comparable à celui obtenu par d'autres auteurs (Trèche, 1989 ; Agbor-Egbe & Trèche, 1995). Cette étude a montré que le durcissement et la germination des tubercules n'ont pas d'effet significatif sur la teneur en protéine des tubercules (Tableau 24), ce qui est en conformité avec les observations de Trèche & Agbor-Egbe (1996) qui ont montré que le stockage des tubercules de *D. dumetorum* n'affectent pas la qualité de ses protéines. Par contre, les résultats de cette étude (Tableau 24) montrent que la cuisson, la fermentation et le traitement au *kanwa* influence significativement ($P \leq 0,05$) la teneur en protéine des tubercules de *D. dumetorum*. On observe une diminution de 9,5 à 12,3% respectivement lors de la cuisson et du trempage dans le *kanwa*, tandis qu'on note une augmentation d'environ 2,9% après fermentation (Tableau 24). Les diminutions observées lors de la cuisson et du traitement des tubercules au *kanwa* pourraient s'expliquer par la solubilisation des fractions protéiques solubles dans l'eau de cuisson ou de trempage, tandis que l'augmentation notée au cours du rouissage pourrait être attribuée aux microorganismes de fermentation.

Les protéines des tubercules de *D. dumetorum* ont été classées en quatre grandes fractions selon leurs caractéristiques de solubilité (Tableau 24). L'analyse de variance a montré que le durcissement et la germination des tubercules de *D. dumetorum* n'ont pas d'influence significative sur les différentes fractions protéiques. Les albumines, globulines, prolamines et glutelines présentent des taux similaires variant de 14 à 18% de la protéine totale. La cuisson, la fermentation et le traitement au *kanwa* par contre affectent significativement ($P \leq 0,05$) la composition des protéines des tubercules de *D. dumetorum*. La fermentation entraîne une diminution significative ($P \leq 0,05$) des quatre

fractions protéiques, tandis que la cuisson entraîne la diminution des albumines, globulines et prolamines. Le traitement des tubercules au *kanwa* quant à lui entraîne une augmentation significative ($P \leq 0,05$) du taux de prolamines et de glutelines.

Tableau 24 : Profil protéique des tubercules de l'igname *D. dumetorum*

Echantillon d'igname	Protéines brutes (g/100g de MS)	Fractions protéiques (%)				
		Albumines	Globulines	Prolamines	Glutelines	Insoluble
Frais cru	9,5 ± 0,1 ^b	16,3 ± 1,9 ^b	17,1 ± 1,4 ^b	15,7 ± 0,8 ^c	18,5 ± 1,8 ^{ab}	32,4 ± 2,1 ^b
Durcis	9,6 ± 0,1 ^b	15,3 ± 1,7 ^b	16,9 ± 0,9 ^b	15,2 ± 1,0 ^c	17,6 ± 1,1 ^a	35,1 ± 2,9 ^b
Durcis et germé	9,6 ± 0,1 ^b	15,3 ± 1,3 ^b	15,3 ± 1,7 ^b	14,3 ± 0,3 ^c	16,2 ± 1,4 ^a	38,9 ± 1,3 ^b
Durcis et fermenté	9,9 ± 0,1 ^c	10,8 ± 0,5 ^a	11,6 ± 0,5 ^a	9,8 ± 0,3 ^b	15,8 ± 0,9 ^a	51,9 ± 0,6 ^c
Frais cuit	8,6 ± 0,1 ^a	9,3 ± 1,1 ^a	9,7 ± 0,6 ^a	6,7 ± 0,7 ^a	15,7 ± 1,7 ^a	58,6 ± 2,8 ^c
Durcie traité au <i>kanwa</i>	8,4 ± 0,1 ^a	18,2 ± 1,3 ^b	18,0 ± 2,0 ^b	19,4 ± 1,7 ^d	21,6 ± 0,5 ^b	22,7 ± 5,5 ^a

Moyenne ± écart type, n = 3

Les moyennes de la même colonne ayant les exposants différents sont significativement différents à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

Les résultats de la composition en acides aminés (Tableau 25) montrent que les acides aminés présentant les concentrations les plus élevées dans les tubercules frais de *D. dumetorum* sont l'acide glutamique, l'arginine, l'acide aspartique et la sérine. Aucune variation significative n'a été observée dans le total des acides aminés des tubercules après durcissement et fermentation. Bien que le tryptophane n'ait pas été déterminé dans cette étude, le taux global d'acides aminés essentiels est adéquat aux besoins recommandés pour la nutrition humaine, mais de légères déficiences ont été notées pour la lysine,

l'isoleucine et la leucine. La lysine s'est révélé être l'acide aminé limitant. Le plus grand déficit se trouve dans les protéines de l'igname fraîche (indice chimique 77), suivi par l'igname durcie (indice chimique 81) et l'igname durcie fermentée (indice chimique 89). Ces données sur l'indice chimique donne à penser que la capacité intrinsèque des tubercules de *D. dumetorum* n'est pas suffisante pour répondre aux besoins de croissance des jeunes enfants et que le durcissement et la fermentation améliorent la qualité de ces protéines.

Le rapport leucine/isoleucine varie de 1,6 (tubercules frais et tubercules fermentés) à 1,8 (tubercules durcis). Ceci est comparable aux protéines de l'œuf et des graines de soja. Harper, Benton & Elvehjem (1955) ont montré qu'un excès de leucine dans les aliments interfère avec l'utilisation de l'isoleucine. De même, l'excès de leucine interfère avec l'utilisation de la lysine. Deosthale, Mohan & Rao (1970) ont montré qu'un rapport leucine/lysine inférieur à 4,6 est considéré nutritionnellement correct. Dans cette étude, ce rapport varie de 1,2 (tubercules frais et tubercules durcis) à 1,3 (tubercules fermentés). Il pourrait par conséquent être conclu que les protéines des tubercules de *D. dumetorum* ont des rapports leucine/isoleucine et leucine/lysine favorables et ne poseraient aucun problème de déséquilibre des acides aminés essentiels.

Tableau 25 : Composition en acide aminé (mg/g de protéine) des tubercules de l'igname
D. dumetorum

Acides aminés	Echantillon d'igname			Référence*
	Frais	Durcis	Durcis et fermenté	
Isoleucine	33,9 ± 1,4 ^a	33,0 ± 0,0 ^a	38,7 ± 2,4 ^b	28
Leucine	54,3 ± 0,0 ^a	58,2 ± 1,2 ^b	64,0 ± 2,4 ^c	66
Lysine	44,6 ± 0,0 ^a	46,9 ± 0,0 ^b	51,3 ± 1,2 ^c	58
Méthionine + Cystéine	25,2 ± 1,1	21,1 ± 1,5	24,4 ± 3,6	25
Phénylalanine + Tyrosine	84,3 ± 1,4 ^a	92,0 ± 0,0 ^b	100,2 ± 3,6 ^c	63
Thréonine	54,3 ± 0,0 ^a	56,4 ± 1,2 ^b	53,9 ± 0,0 ^b	34
Tryptophane	n.e.	n.e.	n.e.	11
Valine	44,6 ± 0,2 ^a	44,3 ± 1,2 ^a	48,8 ± 4,8 ^a	35
Histidine	17,4 ± 0,0 ^a	20,0 ± 1,2 ^b	21,9 ± 0,0 ^c	19
Total acides aminés essentiels	357,6 ± 7,9^a	371,8 ± 6,4^b	403,2 ± 17,9^c	339
Arginine	147,3 ± 2,7 ^b	130,2 ± 0,0 ^b	97,6 ± 0,0 ^a	
Acide aspartique	88,2 ± 4,1 ^a	99,8 ± 6,1 ^b	104,4 ± 4,8 ^b	
Acide glutamique	173,4 ± 1,4 ^a	167,5 ± 6,1 ^a	159,9 ± 7,1 ^a	
Sérine	82,4 ± 1,4 ^a	83,3 ± 0,0 ^c	77,4 ± 0,0 ^b	
Proline	38,8 ± 0,0 ^a	43,4 ± 0,0 ^b	46,3 ± 1,2 ^c	
Glycine	52,3 ± 0,0 ^a	56,4 ± 1,2 ^b	59,8 ± 1,2 ^c	
Alanine	64,9 ± 1,4 ^a	60,8 ± 4,9 ^a	59,8 ± 3,6 ^a	
Total acides aminés	1004,8 ± 6,9^a	1011,3 ± 16,0^a	1008,4 ± 11,9^a	
Indice chimique	76,9 ± 0,0^a	80,8 ± 0,0^b	88,5 ± 2,1^c	

* Profil en acides aminés recommandé (mg/g de protéine) par FAO (1991) pour les enfants d'âge préscolaire (2-5 ans)

n.e. = non évalué

Moyenne ± écart type, n = 2

Les moyennes de la même ligne ayant les exposants différents sont significativement différents à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

Toutefois, mis à part le profil favorable en acides aminés essentiels, la facilité d'assimilation est une caractéristique importante d'une protéine de bonne qualité. En effet, l'indice chimique ne prend pas en compte la digestibilité de la protéine ou la disponibilité des acides aminés. Les études de digestibilité *in vitro* ont montré que les protéines des tubercules frais de *D. dumetorum* présentent une digestibilité d'environ 68%. Cette digestibilité est significativement améliorée ($P \leq 0,05$) par le stockage, la fermentation, le traitement au *kanwa* et la cuisson (Tableau 26). Cette amélioration peut s'expliquer par la réduction des facteurs antinutritionnels tels que les composés phénoliques et les inhibiteurs de trypsine au cours de ces traitements (Cf Chapitres III et IV). L'amélioration de la digestibilité des tubercules durcis traités au *kanwa* quant à elle pourrait s'expliquer par l'augmentation de la solubilité de la prolamine au cours de ce procédé. En effet, une forte corrélation a été trouvée entre la solubilité de la prolamine et la digestibilité des protéines (Hamaker, Kirleis, Mertz & Axtell, 1986 ; Sikabbuba, 1989).

Le calcul de la digestibilité protéique ajusté à l'indice chimique (PDCAAS) (Tableau 25) a révélé que seulement environ 53% des protéines des tubercules frais de l'igname *D. dumetorum* serait utilisable. Toutefois, cette proportion est significativement augmentée aussi bien par le stockage (augmentation de 7,6%) que par la fermentation (augmentation de 27%) qui améliorent la qualité protéique des tubercules de cette igname.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que l'utilisation des tubercules de l'igname *D. dumetorum* traité ou non, comme seule source protéique serait inadéquate dans l'optique de satisfaire les apports recommandés en protéine. Il faudrait cependant rappeler que les mesures de la proportion de protéine utilisable ou de l'indice chimique, sont des caractéristiques nutritionnelles des protéines alimentaires, elles ne sont pas des caractéristiques absolues, la qualité d'une protéine variant avec la quantité de protéine consommée.

Tableau 26 : Digestibilité et proportion utilisable des protéines de l'igname *D. dumetorum*

	Echantillon d'igname					
	Frais	Durcis	Durcis et germé	Durcis et fermenté	Durcie traité au <i>kanwa</i>	Frais cuit
Digestibilité (%)	68,7 ± 0,4 ^a	70,2 ± 0,3 ^b	70,9 ± 0,3 ^b	75,5 ± 0,5 ^c	76,0 ± 0,5 ^c	86,5 ± 0,6 ^d
PDCAAS (%)	52,9 ± 0,3 ^a	56,9 ± 0,3 ^b	n.e	67,2 ± 0,5 ^c	n.e	n.e

Moyenne ± écart type, n = 3

Les moyennes de la même ligne ayant les exposants différents sont significativement différents à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

PDCAAS = Digestibilité protéique ajustée à l'indice chimique

n.e. = non évalué

VI. 3.2. Qualité nutritionnelle des glucides

La teneur en glucides disponibles des tubercules frais de *D. dumetorum* a été d'environ 72,7 g/100g de MS. L'analyse de variance a montré que le durcissement, la germination et le traitement au *kanwa* des tubercules n'ont pas eu d'effets significatifs ($P \leq 0,05$) sur la teneur en glucides disponibles (Tableau 27), ce qui laisse supposer que ces paramètres n'affectent pas l'apport en sucres des tubercules de *D. dumetorum*. Par contre, la cuisson et la fermentation des tubercules affectent significativement la teneur en glucides disponibles. On observe une diminution d'environ 17,4 et 7,1% respectivement lors de la cuisson et de la fermentation (Tableau 27). La diminution observée après fermentation ou cuisson des tubercules pourrait s'expliquer par la perte des sucres solubles dans l'eau de cuisson ou de trempage, ou alors pour ce qui est de la fermentation à l'activité des microorganismes.

Tableau 27 : Teneurs (g/100g de MS) en glucides disponibles dans les tubercules de *D. dumetorum*

	Echantillon d'igname					
	Frais	Durcis	Durcis et germé	Durcis et fermenté	Durcie traité au <i>kanwa</i>	Frais cuit
Glucides disponibles	72,7 ± 0,9 ^c	71,0 ± 0,5 ^c	71,4 ± 1,2 ^c	66,0 ± 0,9 ^b	73,1 ± 0,6 ^c	60,1 ± 4,1 ^a

Moyenne ± écart type, $n = 3$

Les moyennes de la même ligne ayant les exposants différents sont significativement différents à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

La teneur en nutriments des aliments ne reflète pas les quantités réellement absorbées et utilisées par l'organisme. Le facteur le plus déterminant dans l'estimation des apports en nutriments permettant de couvrir les besoins de l'organisme est la biodisponibilité qui prend en compte la digestibilité de l'aliment et le passage des nutriments à travers les membranes biologiques. La Figure 50 présente la biodisponibilité des sucres issus de la digestion *in vitro* des tubercules de *D. dumetorum* suivant différent

traitements. De cette Figure, on observe un accroissement de la concentration en sucres réducteurs dans le dialysât avec l'augmentation du temps de diffusion. Les résultats de l'analyse de variance ont montré que le durcissement, la germination, la fermentation, la cuisson et le traitement au *kanwa* influencent de manière significative ($P \leq 0,05$) la biodisponibilité des sucres des tubercules de *D. dumetorum*. Le test de classification de Duncan a permis de distinguer 5 groupes échantillon de biodisponibilité croissante : les tubercules durcis (groupe 1), les tubercules frais (groupe 2), les tubercules germés et traités au *kanwa* (groupe 3), les tubercules fermentés (groupe 4) et les tubercules cuits (groupe 5). Ainsi donc, la germination, la fermentation, le traitement au *kanwa* et la cuisson améliorent la biodisponibilité des sucres des tubercules de *D. dumetorum*, alors que le durcissement le réduit. L'augmentation de la digestibilité dans l'échantillon cuit pourrait s'expliquer par la gélatinisation de l'amidon qui conditionne largement sa susceptibilité vis-à-vis des amylases car au cours de la gélatinisation, l'amidon perd sa cristallinité et devient plus aisément hydrolysable par les enzymes (Bornet, 1992). L'augmentation de la digestibilité dans les échantillons germés et fermentés pourrait s'expliquer par la diminution dans ces échantillons de facteurs antinutritionnels tels que les inhibiteurs d' α -amylase (Cf Chapitres III et IV).

Les différences de biodisponibilité observées pourraient aussi s'expliquer par des différences de diffusion à travers la membrane de dialyse. Le passage des substances à travers les membranes biologiques peut s'effectuer par transport actif, par transport facilité ou par diffusion simple. Toutefois, l'absorption des monomères issus de la digestion se fait généralement par diffusion simple (McKan, 1984 ; Salisbury & Ross, 1984), sous l'influence du gradient de concentration, de la température et de la dimension des particules (McKean, 1984).

D'après la théorie de la diffusion à l'état quasi-stationnaire (Spiro & Selwood, 1984),

$$\text{Ln}\left(\frac{C_{\infty}}{C_{\infty} - C}\right) = k_{obs} \times t + a$$

où C_{∞} est la concentration à l'équilibre ; K_{obs} la constante de vitesse de diffusion et a un paramètre semi-empirique.

Sur la base de cette théorie, $\text{Ln}(C_{\infty} / C_{\infty} - C) = f(t)$ a été tracé pour chaque traitement des tubercules. A partir des droites obtenues, les constantes de vitesse de diffusion des sucres à travers la membrane de dialyse ont été calculées. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 28. De ces résultats, il ressort que la nature des traitements subit par les tubercules n'a aucun effet significatif ($P \leq 0,05$) sur la constante de vitesse de diffusion (K_{obs}), ce qui suggère que les variations de la biodisponibilité *in vitro* observées soient essentiellement dues aux variations de la digestibilité des sucres dans les différents échantillons d'igname.

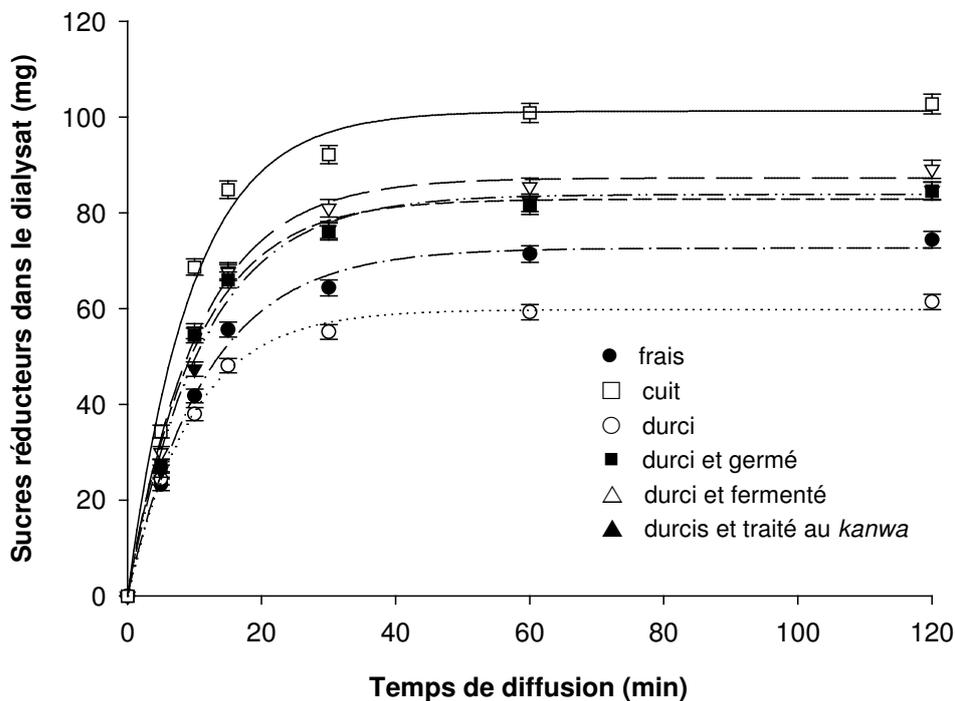


Figure 50 : Biodisponibilité *in vitro* des sucres dans les tubercules de *D. dumetorum* frais, cuits, durcis, durcis et germés, durcis et fermentés, durcis et traité au *kanwa*.

Tableau 28 : Constantes de vitesse pour la diffusion des sucres provenant de la digestion *in vitro* de l'amidon, à travers la membrane de dialyse.

Echantillon	C_{∞} (mg de glucose/ml de dialysât)	k_{obs} (min^{-1})	a	R^2
Frais	$3,73 \pm 0,02^b$	$0,043 \pm 0,002^a$	0,38	0,98
Durcis	$3,08 \pm 0,02^a$	$0,041 \pm 0,001^a$	0,54	0,96
Durcis et germé	$4,24 \pm 0,02^c$	$0,044 \pm 0,003^a$	0,48	0,96
Durcis et fermenté	$4,47 \pm 0,01^d$	$0,044 \pm 0,002^a$	0,47	0,96
Durcie traité au <i>kanwa</i>	$4,24 \pm 0,02^c$	$0,043 \pm 0,001^a$	0,50	0,96
Frais cuit	$5,15 \pm 0,02^e$	$0,046 \pm 0,005^a$	0,58	0,95

Moyenne \pm écart type, $n = 3$

Les moyennes de la même colonne ayant les exposants différents sont significativement différents à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

K_{obs} : constante de vitesse de diffusion

C_{∞} : concentration à l'équilibre

a : paramètre semi-empirique

R^2 : coefficient de régression linéaire

VI. 4. Conclusion

Les tubercules de *D. dumetorum* sont riches en protéines et en glucides. Le stockage, marqué par le durcissement et la germination des tubercules, n'a aucune influence significative sur leurs teneurs en protéines et en sucres, tandis que la cuisson, la fermentation et traitement au *kanwa* présentent un effet significatif. Ainsi pour ce qui est des protéines, on observe une diminution au cours de la cuisson et du traitement au *kanwa* et une augmentation au cours de la fermentation.

Les protéines des tubercules frais, durcis et durcis et fermentés diffèrent par leur profil en acides aminés. Dans tous les cas, la lysine est l'acide aminé limitant. Le durcissement et la fermentation des tubercules durcis augmentent le taux de digestibilité protéique ajustée à l'indice chimique. Toutefois, une utilisation des ces tubercules comme seule source protéique serait inadéquate dans l'optique de satisfaire les apports recommandés en protéines.

Le durcissement des tubercules réduit la biodisponibilité *in vitro* des glucides tandis que la germination, le traitement au *kanwa*, la fermentation et la cuisson l'augmente.

Chapitre VII. Cinétiques de gélatinisation pendant la cuisson des farines de l'igname *Dioscorea dumetorum*

VII. 1. Introduction

Les résultats des chapitres précédents ont indiqué que les farines de *D. dumetorum* pourraient être utilisées comme ingrédient dans la production d'aliments variés qui nécessitent une cuisson tels que les pâtisseries et les bouillies infantiles. La cuisson induit généralement la gélatinisation de l'amidon, liée au gonflement des granules d'amidon. Il a été montré que le degré de gélatinisation obtenue pendant la cuisson des ignames peut significativement influencer la qualité des farines précuites obtenues après séchage du produit (Ngoddy & Onuoha, 1985). Ainsi, la précuisson des tubercules de *D. dumetorum* pour la production de farines précuites devrait assurer que leur pouvoir gélifiant ne sera pas complètement perdu afin de garantir une bonne reconstitution dans de l'eau chaude. Ceci nécessite la connaissance des facteurs tels que le temps et la température de cuisson, qui influencent le degré de gélatinisation.

Plusieurs auteurs ont rapporté des études sur la cinétique de gélatinisation, usant des méthodes variées. Kubota, Hosokawa, Suzuki & Hosaka (1979) ont évalué la viscosité d'une solution d'amidon du riz comme une fonction du temps à l'aide d'un viscosimètre capillaire. Adoptant un pseudo modèle de premier ordre, ces auteurs ont calculé la constante de vitesse de gélatinisation à l'aide de l'équation :

$$\frac{dx}{d\theta} = k_m(1 - x),$$

où k_m est la constante de vitesse de gélatinisation (min^{-1}) et x est donné par la relation :

$$x = \frac{K - K_0}{K_e - K_0}$$

dans la quelle K_0 , K et K_e représentaient la viscosité de la solution au temps zéro, au temps θ (min) et à l'équilibre respectivement. Bakshi & Singh (1976), Cabrera, Pineda, Duran de Bazua, Segurajauregui & Vernon (1984) ainsi que Njintang & Mbofung (2003) ont respectivement étudié les cinétiques de gélatinisation du riz, du maïs et du taro en utilisant la méthode de l'indice valeur bleue amylose/iode pour déterminer le degré de gélatinisation et ont adopté un modèle de réaction du premier ordre pour la vitesse de gélatinisation. Le modèle utilisé dans chaque cas était donné par la relation :

$$\ln(1 - \alpha) = -k.t$$

où $(1-\alpha)$ est la fraction d'amidon non-gélatinisé et k la constante de vitesse de gélatinisation.

Cette étude a pour objectif d'évaluer les cinétiques de gélatinisation pendant la cuisson des tubercules de *D. dumetorum*.

VII. 2. Matériel et méthodes

VII. 2.1. Echantillons

Des tranches de 1 cm d'épaisseur des tubercules de *D. dumetorum* stockés pendant 0, 2, 7, 14, 21 et 28 jours dans les conditions ambiantes (19-28 °C, 60-85 % HR) ainsi que des tubercules durcis fermentés pendant 7 jours et durcis traités avec le *kanwa* 1% dans les conditions définies aux Chapitres précédents ont été utilisés pour cette étude.

VII. 2.2. Température de gélatinisation

Environ 0,5 g d'échantillon a été suspendu dans 10 ml d'eau distillée puis chauffés pendant 1 h à des températures variant entre 50 et 95°C. A chaque 5°C d'intervalle, les échantillons ont été centrifugés à 5000 trs/min pendant 30 min. La variation de l'indice

valeur bleue a été tracée en fonction de la température, et la température à laquelle la modification de la courbe a lieu a été enregistrée comme température de gélatinisation.

VII. 2.3. Cinétiques de gélatinisation

Les échantillons d'igname ont été cuits dans de l'eau distillée à 75, 85 et 95°C pendant 0, 5, 10, 20 et 40 min. A la fin de chaque période de cuisson, les échantillons ont été séchés dans une étuve ventilée à 40°C pendant 24 h, puis finement broyés (400 µm) et l'indice valeur bleue déterminée.

VII. 2.4. Détermination de l'indice valeur bleue

Environ 0,5 g de farine a été suspendue dans 10 ml d'eau distillée dans des tubes à centrifuger, agité pendant 1 h puis centrifugé à 5000 trs/min pendant 30 min. Le surnageant a été récupéré et son indice valeur bleu déterminé suivant la méthode amylose/iode de Birch & Prietly (1973). 1 ml de surnageant a été mélangé à 2 ml d'une solution d'iode (50 mg d'iode et 500 mg d'iodure de potassium dans 1 litre de HCl 0,05 M) et l'absorbance lue à 640 nm. Afin de quantifier le degré de gélatinisation, un étalonnage a été réalisé à l'aide des standards adéquats représentant 0% et 100% de gélatinisation préparés suivant la procédure décrite par Cabrera *et al.* (1984). Le standard non gélatinisé (0% gélatinisation) était représenté par les échantillons de farine d'igname non cuit tandis que le standard complètement gélatinisé (100% gélatinisation) a été préparé à partir de tranches d'igname cuit à la vapeur pendant 3 h et les deux standards ont été mélangés à des proportions spécifiques.

VII. 2.5. Détermination des constantes de gélatinisation

Selon Cabrera *et al.* (1984), la réaction de gélatinisation peut s'écrire :



où ANG est l'amidon non-gélatinisé et AG l'amidon gélatinisé. Elle suit une cinétique d'ordre 1 et peut de ce fait être décrite par l'équation suivante, adoptée pour les réactions irréversibles de premier ordre :

$$\ln \frac{A_0}{A_0 - X} = k_G \cdot t \quad (6)$$

où A_0 est la concentration de l'amidon non-gélatinisé à $t = 0$, X la quantité d'amidon non-gélatinisé transformé à $t \neq 0$ et k_G la constante spécifique de vitesse.

Si α est la proportion d'amidon gélatinisé à un temps t donné, c'est-à-dire

$$\alpha = \frac{x}{A_0} \quad (7),$$

la relation (5) devient :

$$\ln(1 - \alpha) = k_G \cdot t \quad (8).$$

Dans cette étude, la constante k_G a été estimée du tracé de la droite $\ln(1 - \alpha)$ en fonction du temps de cuisson t .

L'effet de la température sur la constante k_G est représenté par l'équation de type Arrhenius (Reddy & Das, 1993) :

$$k_G = A e^{-\frac{E_a}{R.T}} \quad (9)$$

où E_a est l'énergie d'activation en J.mol^{-1} , $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$, T la température de cuisson en $^{\circ}\text{K}$ et A la constante pré-exponentielle. La valeur de E_a a été obtenue du tracé de la droite $\ln k_G$ en fonction de $1/T$. L'effet de la température $\vartheta (^{\circ}\text{C}) = T - 273$ sur la constante k_G représenté par Q_{10} (le taux d'augmentation de k_G quand la température augmente de 10°C) a été déterminée à partir de la relation de Kessler (1981)

$$Q_{10} = 10^{\frac{10}{Z}} \quad (9)$$

où z est obtenu du tracé de la droite $\log(2,303/k_G)$ en fonction de ϑ avec une courbe équivalent à $-1/z$.

VII. 2.6. Analyses statistiques

Toutes les mesures ont été effectuées en triple. L'effet des variables indépendantes sur variables dépendantes a été évalué par analyse de variance (ANOVA) et la relation entre ces variables a été estimée par détermination du coefficient R^2 en utilisant les corrélations linéaires. Les logiciels SPSS 10.1 et SigmaPlot 8.02 ont été utilisés pour ces analyses.

VII. 3. Résultats et discussion

VII. 3.1. Affinité de l'amidon à l'iode et température de gélatinisation

Les valeurs des mesures de l'affinité de l'amidon à l'iode sont présentées au Tableau 29. Ces résultats montrent que les farines obtenues à partir des tubercules frais contiennent de l'amidon avec la plus forte affinité à l'iode. Le stockage, le rouissage et le traitement au *kanwa* des tubercules ont un effet significatif ($P \leq 0,05$) sur l'affinité à l'iode de l'amidon des farines de *D. dumetorum*. On note une diminution au cours de ces opérations, ce qui suggère que le stockage, le rouissage et le trempage dans du *kanwa* des tubercules de *D. dumetorum* entraînent une dégradation de l'amylose.

Les courbes de gélatinisation des farines de *D. dumetorum* sont présentées à la Figure 51. Il en ressort que la température de gélatinisation se situe entre 70 et 75°C.

Tableau 29 : Affinité de l'iode à l'amidon des faines de *D. dumetorum*

Farines de <i>D. dumetorum</i>								
	Jour 0	Jour 2	Jour 7	Jour 14	Jour 21	Jour 28	Jour 14-fermenté	Jour 14-traité au kanwa
Indice valeur bleue (%)	130,0 ± 9,5 ^a	64,8 ± 5,0 ^b	54,8 ± 5,2 ^c	35,6 ± 1,8 ^d	28,1 ± 4,1 ^e	13,4 ± 2,7 ^f	23,6 ± 3,2 ^g	31,0 ± 2,6 ^h

Moyenne ± écart-type ; n = 3 ; les moyennes ayant les exposants différents sont significativement différents à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

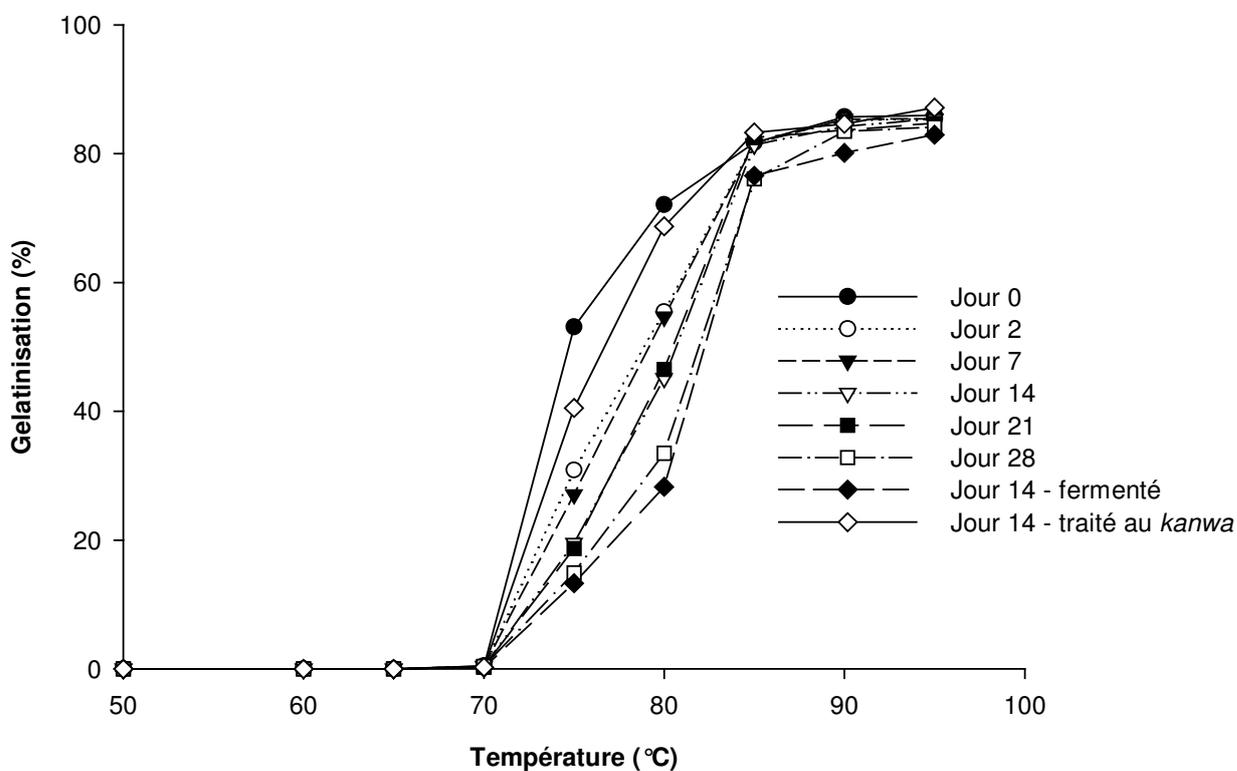


Figure 51 : Variation de la gélatinisation des échantillons de *D. dumetorum* avec la température de cuisson.

VII. 3.2. Cinétique de gélatinisation de l'amidon

La gélatinisation en fonction du temps à différentes températures de cuisson et temps de stockage des tubercules de *D. dumetorum* est représenté dans la Figure 52. On note une gélatinisation appréciable dès les premiers instants de cuisson. Ce résultat est différent de celui obtenu par Cabrera *et al.* (1984) pour le maïs. Ces auteurs ont rapporté une période de non-gélatinisation au début de la cuisson, expliqué par les différences de transfert de matière. Il a été montré que la teneur en eau de l'aliment pendant la cuisson influence la vitesse de gélatinisation, avec une faible teneur en eau, les aliments ont tendance à présenter une phase de non-gélatinisation avant que la gélatinisation commence. Les études de Cabrera *et al.* (1984) ont montré qu'une teneur en eau minimale de 35% était nécessaire pour que commence la gélatinisation, or dans cette étude, les échantillons d'igname utilisés avaient une teneur en eau d'environ 70%, ce qui explique l'absence de période de non-gélatinisation. Un résultat semblable a été obtenu par Njintang et Mbofung (2003) avec le taro.

La Figure 53 présente la variation de la constante de vitesse de gélatinisation k_G avec la température. La constante k_G et les paramètres de la réaction de gélatinisation avec leurs coefficients de détermination sont présentés dans le Tableau 30. De manière générale, la grandeur de la constante k_G est affectée par la température de cuisson et par le temps de stockage des tubercules. Il est évident que l'augmentation de température accroît la capacité de gélatinisation quel que soit le temps de stockage des ignames. En général, la constante de vitesse de gélatinisation diminue avec l'augmentation du temps de stockage des tubercules. Ceci pourrait être dû à la diminution de la teneur en eau des tubercules au cours du stockage ou alors le résultat des modifications structurales des tubercules du fait du phénomène de durcissement. Les coefficients de détermination R^2 significatifs

($P < 0,05$) obtenus de l'analyse des courbes de régression montrent que le modèle utilisé est adéquat pour décrire la cinétique de gélatinisation de l'amidon de *D. dumetorum*.

L'énergie d'activation de la gélatinisation de *D. dumetorum* varie de 32,8 à 61,34 kJ. Mole⁻¹, ce qui est relativement faible comparé aux valeurs rapportées pour d'autres aliments (Tableau 31) et est indicatif d'un effet moins prononcé de la température de cuisson pour la gélatinisation de *D. dumetorum*.

La Figure 54 présente les relations entre les différents paramètres de gélatinisation de l'amidon et le temps de stockage des tubercules. On note une augmentation de l'énergie d'activation et de la valeur Q_{10} avec le stockage des tubercules de *D. dumetorum* tandis que la valeur Z diminue. Ceci est indicatif du fait que le stockage des tubercules entraîne un plus grand besoin d'énergie, un résultat probable du phénomène de durcissement post-récolte des tubercules.

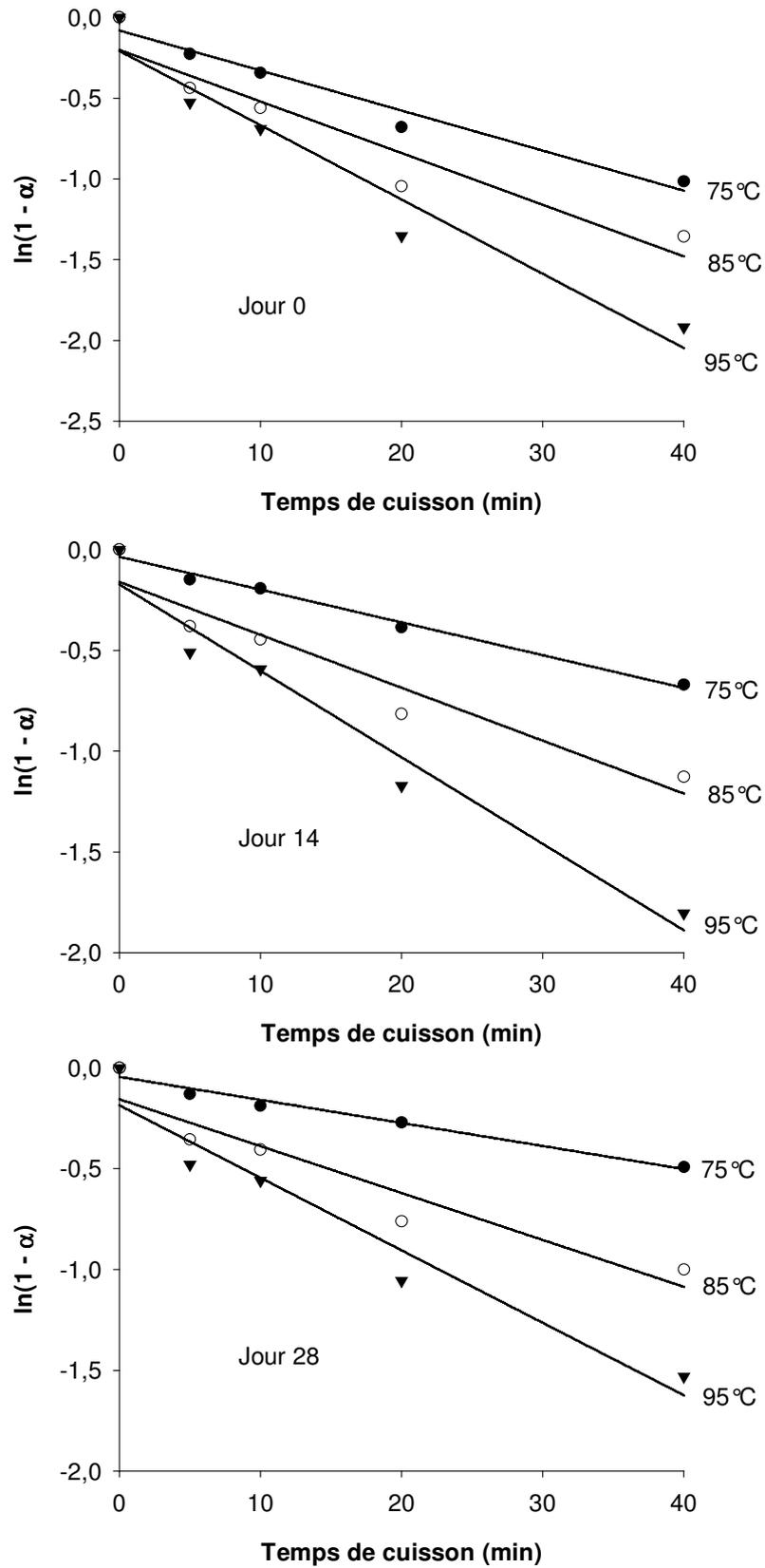


Figure 52 : Cinétique de gélatinisation de l'amidon des tubercules de *D. dumetorum* stockés.

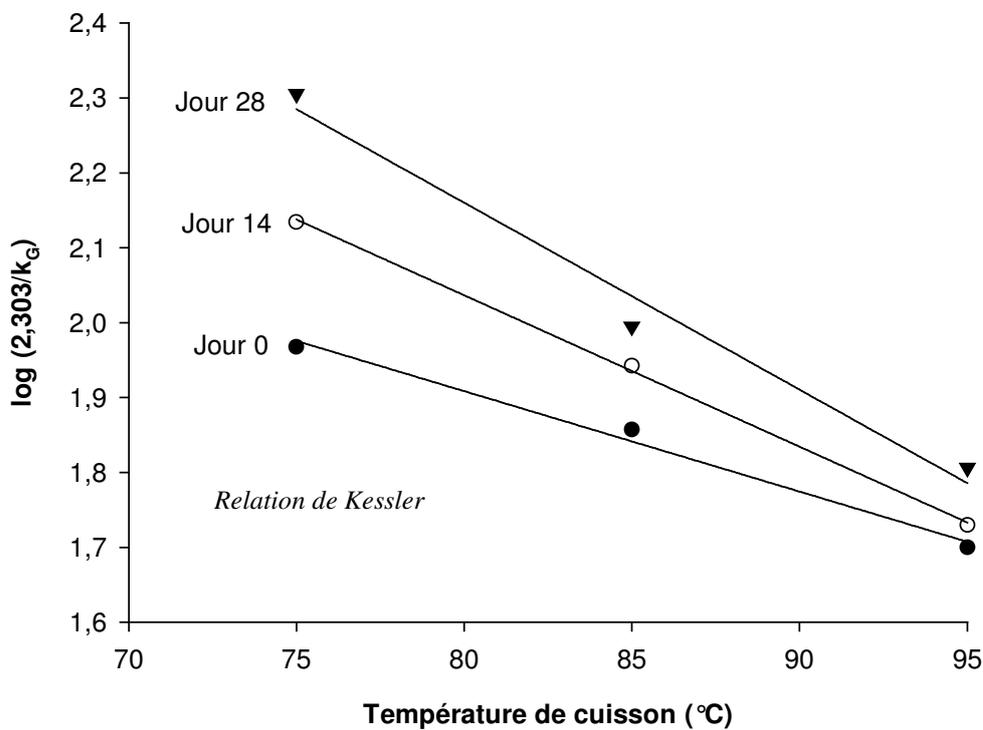
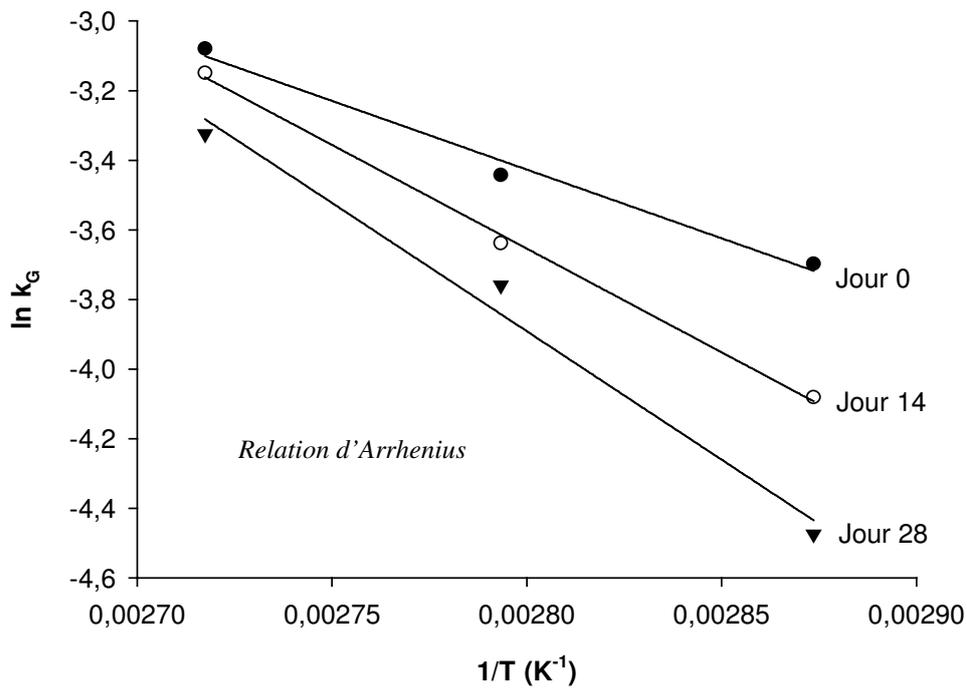


Figure 53 : Relations entre la température et la constante de vitesse de gélatinisation des tubercules stockés.

Tableau 30 : Paramètres cinétiques de la gélatinisation des tubercules de *D. dumetorum* au cours du stockage.

Paramètres cinétiques	Jour de stockage des tubercules					
	0		14		28	
	Constante	R ²	Constante	R ²	Constante	R ²
Constante de vitesse de réaction, k _G [min ⁻¹]						
75°C	0,0248	0,97	0,0163	0,99	0,0114	0,97
85°C	0,0320	0,91	0,0263	0,92	0,0233	0,90
95°C	0,0460	0,95	0,0429	0,96	0,0360	0,94
Energie d'activation, E _a [kJ.mole ⁻¹]	32,83	0,99	49,56	0,99	61,34	0,98
Z [°C]	74,63	0,99	49,51	0,99	40	0,98
Q ₁₀	1,36	0,99	1,59	0,99	1,78	0,98

Tableau 31 : Energies d'activation au cours de la gélatinisation de certains produits alimentaires.

Produit	Plage de température [°C]	Energie d'activation [kJ.mole ⁻¹]
Pâte de riz	70-85	106,4-132,6
Riz blanc	75-100	79,5
Riz blanc	110-150	36,8
Patate	60-63	962,3
Maïs blanc	70-90	75,6
Taro	70-90*	74,1-100,1*

Source : Carbrera et al. (1984), *Njintang & Mbofung (2003)

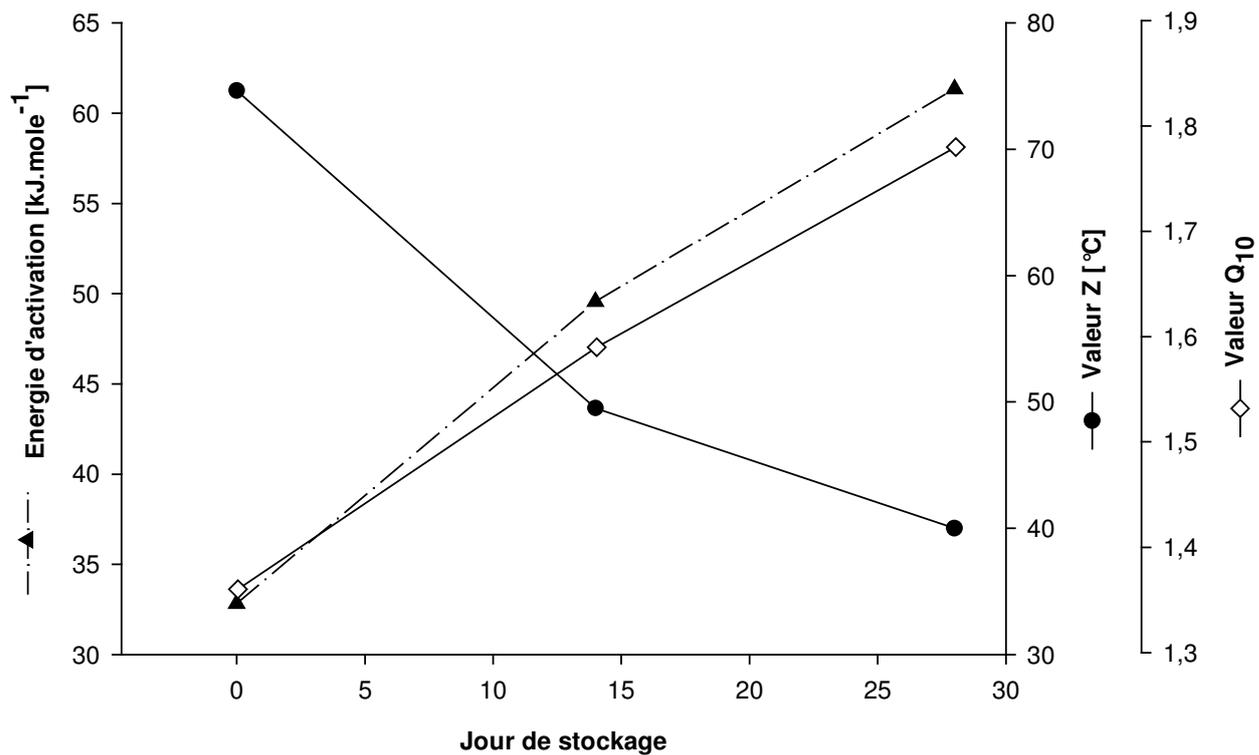


Figure 54 : Relation entre les paramètres de gélatinisation de l'amidon et le temps de stockage des tubercules de *D. dumetorum*.

Les cinétiques de gélatinisation des tubercules durcis de *D. dumetorum* fermentés ou trempés dans du *kanwa* sont présentées dans la Figure 55. La nature linéaire des courbes obtenues indique que la gélatinisation de l'amidon des tubercules durcis de *D. dumetorum* fermentés ou traités au *kanwa* suit une cinétique d'ordre 1 suivant le mécanisme réactionnel défini par Cabrera *et al.* (1984). Dans les deux cas, la vitesse de gélatinisation est sous la dépendance de la température de cuisson, telle qu'indiqué par la nature linéaire des courbes d'Arrhenius et de Kessler (Figure 56). Les différents paramètres cinétiques trouvés sont consignés dans le Tableau 32. De manière générale, la grandeur de la constante k_G est affectée par la température et le mode de traitement des tubercules durcis. Toutefois, l'augmentation de la température accroît la capacité de gélatinisation quel que soit le mode de traitement des ignames. En général, les constantes de vitesse de gélatinisation des tubercules traités au *kanwa* sont supérieures à celles des tubercules fermentés. Ceci pourrait être dû à la diminution de la teneur en amidon au cours de la fermentation. L'énergie d'activation de la gélatinisation des tubercules traités au *kanwa* est relativement faible comparée à la valeur trouvée pour les tubercules fermentés, ce qui est indicatif d'un effet plus prononcé de la température de cuisson pour les tubercules fermentés.

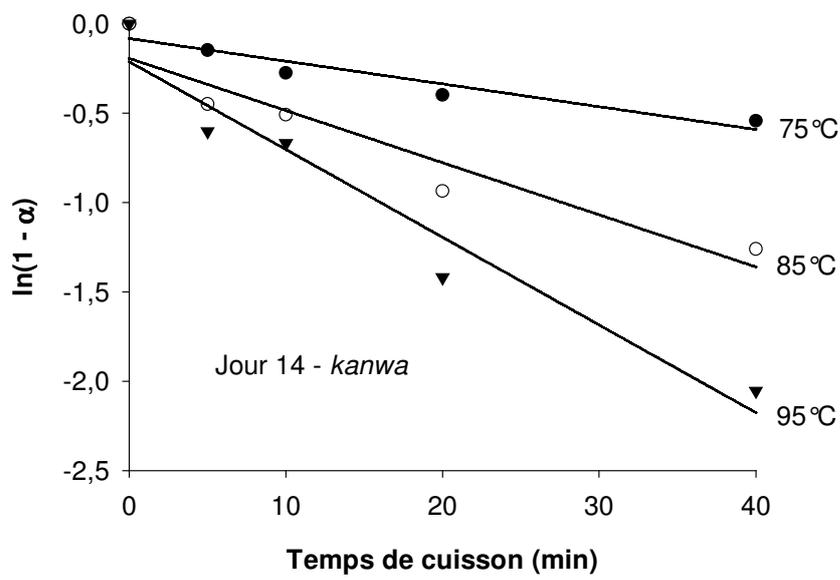
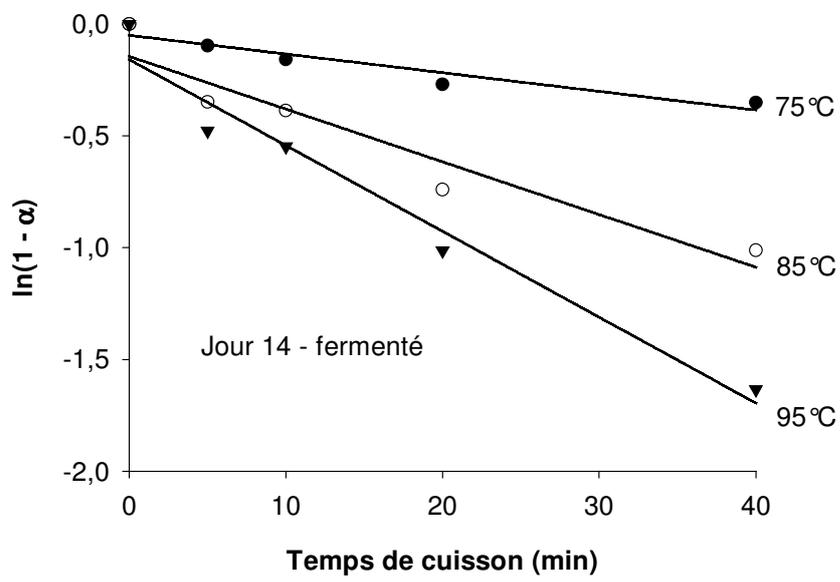


Figure 55 : Cinétiques de gélatinisation des tubercules durcis de *D. dumetorum* fermentés et traités au *kanwa*.

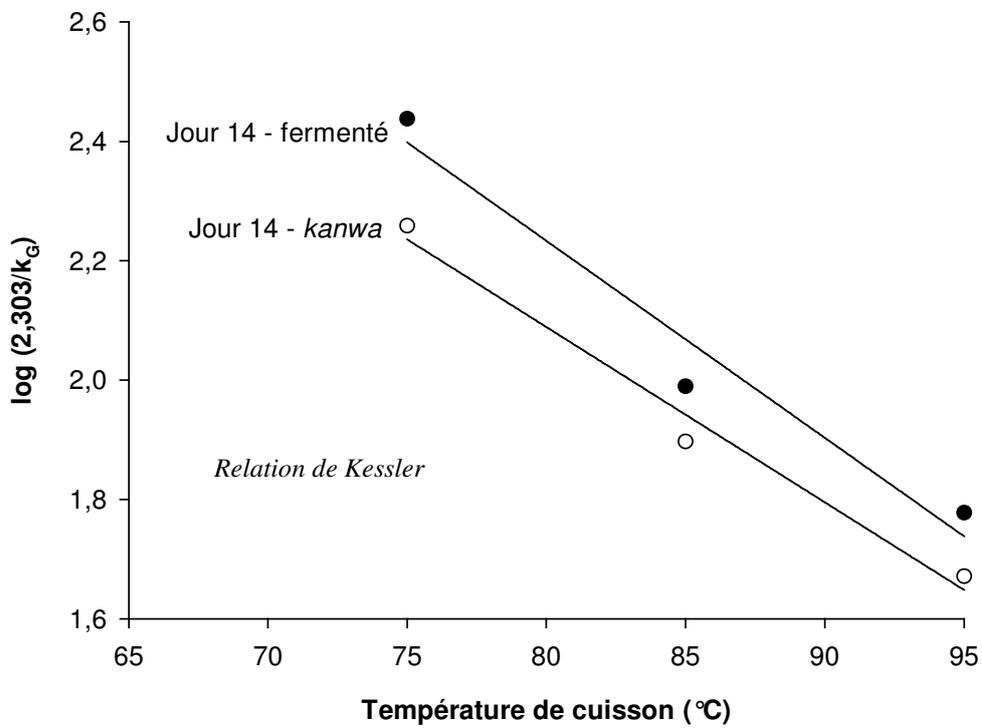
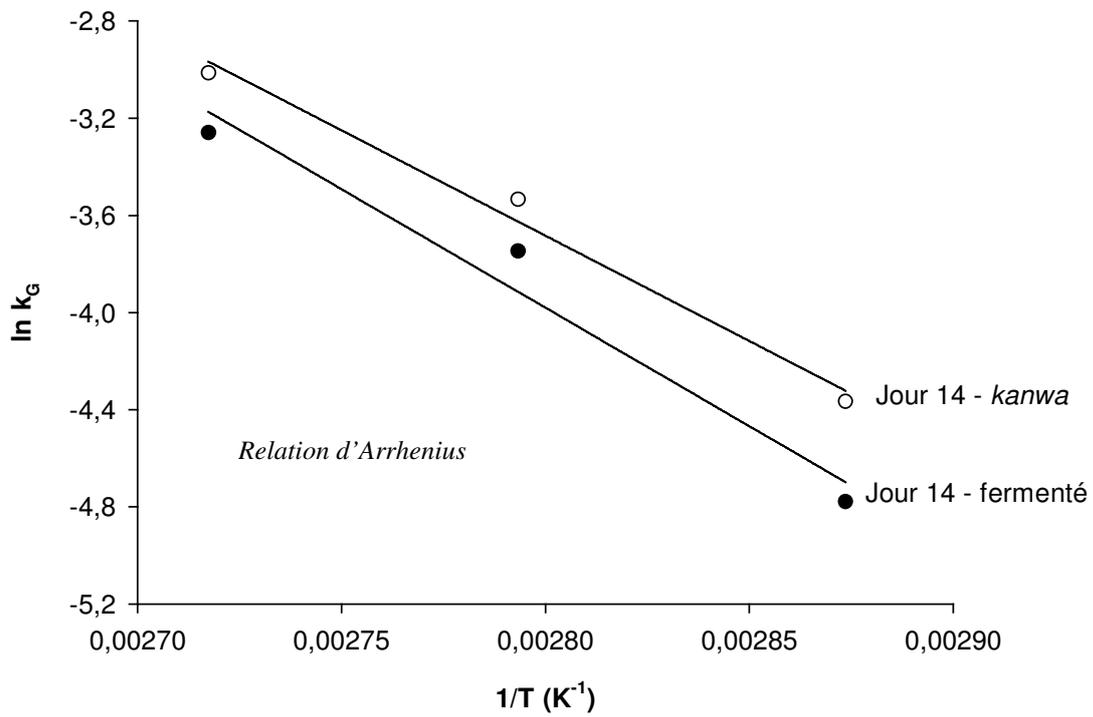


Figure 56 : Relations entre la température et la constante de vitesse de gélification des tubercules durcis fermentés et traités au *kanwa*.

Tableau 32 : Paramètres cinétiques de la gélatinisation des tubercules durcis de *D. dumetorum* fermentés et traités au *kanwa*.

Paramètres cinétiques	Traitement des tubercules			
	Jour 14 - fermenté		Jour 14 – traité au <i>kanwa</i>	
	Constante	R ²	Constante	R ²
Constante de vitesse de réaction, k _G [min ⁻¹]				
75°C	0,0084	0,91	0,0127	0,90
85°C	0,0236	0,92	0,0292	0,91
95°C	0,0384	0,97	0,0491	0,95
Energie d'activation, E _a [kJ.mole ⁻¹]	81,16	0,99	72,13	0,97
Z [°C]	30,30	0,96	34,01	0,98
Q ₁₀	2,14	0,96	1,97	0,98

VII. 4. Conclusion

Cette étude a montré que la température de gélatinisation des farines de *D. dumetorum* est comprise entre 70 et 75°C. La relation mathématique $\ln(1 - \alpha) = -k_G.t$ peut être utilisée pour décrire la réaction de gélatinisation des tubercules de *D. dumetorum*. Ainsi, la vitesse de gélatinisation a été grandement influencée par la température de cuisson, celle-ci augmente avec la durée de stockage des tubercules et diminue après fermentation des tubercules durcis. Les valeurs d'énergie d'activation obtenues dans la gamme de température étudiée (75-95°C) ont montré que la vitesse de gélatinisation est significativement affectée par le temps de stockage des tubercules, ainsi que par la fermentation et le traitement au *kanwa* des tubercules durcis. L'énergie d'activation augmente avec la durée de stockage des tubercules puis avec la fermentation et le traitement au *kanwa* des tubercules durcis, l'effet de la température de cuisson ayant un effet plus prononcé pour les tubercules fermentés que pour les tubercules traités au *kanwa*.

Chapitre VIII. Propriétés technologiques des farines composées blé-igname *Dioscorea dumetorum* durcie

VIII. 1. Introduction

Dans les chapitres précédents (4, 5 et 6), il a été suggéré que les farines produites à partir des tubercules de *D. dumetorum* durcis pouvaient être utilisées aussi bien en boulangerie que dans la formulation des bouillies. La plupart de ces produits présents sur le marché des zones urbaines de plusieurs pays africains en général et au Cameroun en particulier sont des produits à base de blé. L'importation du blé coûte cher aux pays africains et déséquilibre la balance commerciale des pays dont l'agriculture est la principale activité. Au Cameroun, les importations de blé sont chiffrées à plus de 170 000 tonnes par an, ce qui représente près de 22,5 milliards de francs CFA. Une substitution partielle de la farine de blé par les produits amylacés (tubercules et céréales) locaux peut constituer une alternative intéressante en termes de coûts-bénéfices par rapport aux grains importés, raison pour laquelle la FAO a lancé depuis 1964 un programme sur les farines composées pour substituer le blé dans divers produits alimentaires à base de farine (FAO, 1971).

Plusieurs auteurs ont travaillé sur le développement des farines composées dans lesquelles une partie de la farine de blé est remplacée par d'autres sources amylacées (Dendy, Clarke & James, 1973 ; Berthelot, 1990 ; Defloor, 1995 ; Mbofung, Njintang, Balaam, Kitissou & Waldron 2005). C'est dans cette optique que se situe le présent travail qui a pour objectif d'évaluer l'aptitude des farines produites à partir des tubercules durcis de l'igname *D. dumetorum* à substituer partiellement la farine de blé dans des formulations alimentaires.

Les farines composées sont généralement développées pour être utilisées en boulangerie et en pâtisserie, et conviennent à la fabrication de pains, biscuits, pâtes

alimentaires, gâteaux divers (René, 1995). L'évaluation de la valeur technologique d'une farine composée peut s'effectuer soit par des analyses d'appréciation directes, correspondant à la mise en œuvre d'un protocole normalisé d'un test de fabrication à échelle réduite, soit par des analyses d'appréciation indirectes, correspondant à des analyses chimiques, fonctionnelles et rhéologiques. Cette dernière option sera choisie dans la présente étude.

VIII. 2. Matériel et méthodes

VIII. 2.1. Echantillons

L'étude a été réalisée à partir des farines : des tubercules durcis de la variété jaune de l'igname *D. dumetorum* (stockés pendant 14 jours à 19-28 °C, 60-85 % HR), des tubercules durcis-fermentés pendant 7 jours et des tubercules durcis traités avec le *kanwa* 1% dans les conditions définies aux Chapitres IV et V. Une farine de blé type commercial sans additif, fournie par la Société le Grand Moulin du Cameroun (SGMC), a été utilisée pour réaliser les farines composées en substituant la farine de blé par les farines d'igname durcie à des taux de 0, 10, 20, 30, 40 et 50%. Les différentes farines obtenues et les codes utilisés sont présentés ci-dessous.

B : Farine de blé 100%

D10 : Farine composée 90% blé/10% igname-durcie

D20 : Farine composée 80% blé/20% igname-durcie

D30 : Farine composée 70% blé/30% igname-durcie

D40 : Farine composée 60% blé/40% igname-durcie

D50 : Farine composée 50% blé/50% igname-durcie

F10 : Farine composée 90% blé/10% igname-durcie-fermentée

F20 : Farine composée 80% blé/20% igname-durcie-fermentée

F30 : Farine composée 70% blé/30% igname-durcie-fermentée

F40 : Farine composée 60% blé/40% igname-durcie-fermentée

F50 : Farine composée 50% blé/50% igname-durcie-fermentée

K10 : Farine composée 90% blé/10% igname-durcie-traitée au *kanwa*

K20 : Farine composée 80% blé/20% igname-durcie-traitée au *kanwa*

K30 : Farine composée 70% blé/30% igname-durcie-traitée au *kanwa*

K40 : Farine composée 60% blé/40% igname-durcie-traitée au *kanwa*

K50 : Farine composée 50% blé/50% igname-durcie-traitée au *kanwa*

VIII. 2.2. Caractéristiques technologiques des farines

La teneur en protéines des farines a été déterminée par la méthode Kjeldahl ($N \times 5,7$ pour le blé et $N \times 6,25$ pour les farines composées) (méthode 44-15A, AACC, 1981). Les teneurs en eau et en cendres ont respectivement été évaluées selon les méthodes standards 925.10 et 920.87 (AOAC, 1990). L'indice de sédimentation de Zeleny et le nombre de chute de Hagberg ont été évalués respectivement selon les méthodes 56-60 (AACC, 1983) et 56-81B (AACC, 1982).

VIII. 2.2.1. Propriétés fonctionnelles

La capacité d'absorption d'eau, l'indice de solubilité à l'eau, la capacité d'absorption d'huile, la densité de la farine et la plus petite concentration gélifiante ont été évalués suivant les méthodes décrites au Chapitre III. L'activité émulsifiante et la stabilité des émulsion ont été déterminées suivant la méthode de Neto, Narain, Silvia & Bora (2001). Environ 1 g de farine a été mélangé à 3 ml d'eau distillée et à 3 ml d'huile de coton dans un tube gradué. L'ensemble a été agité pendant 10 min dans un agitateur KS 10 puis centrifugé à 2500 trs/min pendant 5 min. La hauteur de la couche émulsifiée et celle du

contenu total du tube a été mesurée. L'activité émulsifiante (AE) a été calculée par la relation :

$$AE (\%) = \frac{\text{Hauteur de la couche émulsifiée dans le tube}}{\text{Hauteur du contenu total du tube}} \times 100.$$

La stabilité de l'émulsion (SE) a été déterminée en chauffant l'émulsion à 80°C pendant 30 min suivi d'une centrifugation à 2500 trs/min pendant 5 min, par la formule :

$$SE (\%) = \frac{\text{Hauteur de la couche émulsifiée après chauffage}}{\text{Hauteur de la couche émulsifiée avant chauffage}} \times 100.$$

VIII. 2.2.2. Couleur

Les paramètres CIE $L^*a^*b^*$ de la couleur des farines ont été mesurés tels qu'indiqué au Chapitre VI.

VIII. 2.2.3. Propriétés rhéologiques

Les données alvéolographiques des farines, basées sur la mesure des capacités de résistance et d'extensibilité d'une pâte formée avec de la farine et de l'eau salée (2,5%) en conservant pour tous les essais un taux d'hydratation constant, ont été déterminées à l'alvéographe de Chopin suivant la méthode 54-30 (AACC, 1984). Environ 250 g de farine ont été transférés dans le pétrin dont le chronomètre enclenche automatiquement une fois le moteur mis en marche. Enrion 20 secondes après le lancement du moteur, de l'eau salée a été ajoutée à la farine par l'ouverture du couvercle et on a laissé la pâte se former durant 1 min, puis le moteur a été arrêté, le couvercle ôté et la farine qui adhère au couvercle ou aux angles décollée avec une spatule de manière à ce que la pâte soit hydratée de manière homogène. Cette opération doit se faire en 1 min, au bout de la quelle le moteur a été remis en marche et le pétrissage conduit pendant 6 min. Le moteur a alors été arrêté, puis les plaques de repos, plaque de verre et plaque d'extraction ont été huilées avec 2 gouttes

d'huile, après quoi la rotation du friseur a été inversée et le moteur remis en marche, ce qui conduit à une extraction de la pâte sous forme de ruban. Lorsque la pâte a atteint le niveau des encoches, elle a rapidement été découpée avec un couteau, puis la plaque d'extraction a été retirée et le glissement de la pâte faite sur une plaque de verre préalablement huilée. Cinq pâtons ont successivement été extraits avant l'arrêt du moteur. Les 5 pâtons ont par la suite été laminés à l'aide d'un rouleau d'acier préalablement huilé que l'on fait glisser sur ses 12 fois (6 aller-retours), puis découpé d'un mouvement net avec un emporte-pièce. Chaque plaque de repos a immédiatement été placée dans l'enceinte isotherme à 25°C de l'alvéographe. L'essai alvéographique a commencé exactement 28 min après le début du pétrissage. L'éprouvette a été calibrée entre les 2 platines en relevant la platine supérieure, en enlevant la bague et le tampon, et en faisant glisser la première éprouvette sur la platine fixe et centrer celle-ci en agissant sur son bord. Le tampon a été remplacé et l'éprouvette aplati, puis le tampon et la bague ont été enlevés pour libérer l'éprouvette. La manette du robinet a alors été abaissée en position 1 et la poire de caoutchouc franchement aplati entre le pouce et l'index. Tout en maintenant la pression de la poire, la manette du robinet a été remontée en position de manière à maintenir la pâte décollée de la platine, puis la poire a été lâchée. La mise en position 3 de la manette provoque le gonflement de la bulle de pâte et la mise en marche du tambour enregistreur. La bulle a soigneusement été observée et dès l'apparition d'une rupture, la manette a été remise en position 1, ce qui provoque l'arrêt d'air et celui du cylindre enregistreur. L'essai des 4 autres éprouvettes a successivement été effectué, ainsi 5 courbes ayant la même origine ont été obtenues.

Les courbes de déformation de la pâte ainsi que les paramètres caractéristiques ont automatiquement été générés par l'appareil :

- P est la hauteur maximale du graphique entre la base et le sommet du pic en mm. On l'appelle surpression maximale ou plus couramment pression puisque c'est la pression maximale enregistrée à l'intérieur de la bulle.

- L est la longueur du graphique en mm. Il correspond au gonflement maximum de la bulle juste avant qu'elle n'éclate, donc à l'extensibilité de la pâte.
- G correspond à la même grandeur que L et y est relié par la relation :

$$G = 2,226 \times \sqrt{L}$$

- P/L est le rapport de configuration du graphique. Il s'obtient en divisant la valeur du P par la valeur du L.
- W est le travail de déformation. Il se calcule en multipliant la surface incluse dans le graphique (cm²) par le coefficient de 6,25.

VIII. 2.3. Analyse des données

Les comparaisons entre les variables dépendantes ont été déterminées à l'aide de l'analyse de variance et du test de Duncan du logiciel SPSS 10.1. La signification statistique a été définie à 0,05.

La plupart des applications physico-chimiques d'analyses de données sont par nature multivarié et les méthodes les plus appropriées pour de tels cas sont l'analyse en composantes principales (ACP) (Sharaf, Illman & Kowalski, 1986 ; Malinowski, 1991) et l'analyse en classification hiérarchique (ACH) (Hartigan, 1975 ; Sharaf *et al.*, 1986).

Le but premier de l'analyse en classification hiérarchique (ACH) est d'afficher les données de manière à mettre en exergue leurs classes naturelles et tendances dans un espace à deux dimensions. Les résultats, qualitatifs par nature, sont généralement présentés sous forme de dendogramme, permettant la visualisation des classes et des corrélations parmi les échantillons ou les variables. Dans l'ACH, les distances Euclidiennes entre les échantillons ou variables sont calculées et transformées en matrice de similarité dont les éléments sont les indices de similarité classés de 0 à 1 ; la plus petite distance signifie un grand indice et donc une grande similitude.

L'analyse en composantes principales, quant à lui est basée sur la corrélation entre les variables. Elle cartographie les échantillons à travers des scores et les variables par un

chargement dans un nouvel espace défini par des composantes principales. Les composantes principales (CP) sont de simples combinaisons linéaires des variables originales. Les courbes des scores permettent l'identification des échantillons, en contrôlant s'ils sont semblables ou dissemblables, typiques ou atypiques. Les variables les plus importantes sont identifiées à partir des chargements. Un point important ici est que la variabilité maximale dans les données positionnées peut être expliquée dans une variable réduite positionnée. La première composante principale (CP₁) est définie dans la direction de la variance maximale dans les données positionnées, et les composantes subséquentes sont orthogonales (non-corrélée) d'une à l'autre et maximisent la variance restante. Une fois que la redondance est enlevée, seules les premières composantes principales sont requises pour décrire l'information contenue dans les données originales.

L'interprétation des vecteurs chargés obtenus à travers l'ACP devient souvent aisée lorsqu'ils sont tournés pour mieux égaler les variables de direction originales. Cette procédure, appelée Rotation Varimax (Sharaf *et al.*, 1986) maximise la variance de chaque CP. L'effet final de cette rotation est de diminuer l'effet des variables avec chargement intermédiaire et augmenter l'effet de celles qui ont un grand (positif et négatif) chargement dans chaque facteur. Ces différentes analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel STATISTICA 6 (Data Analysis Software System, StatSoft, Inc., USA)

VIII. 3. Résultats et discussion

Quelques caractéristiques boulangères des farines d'ignames durcies et de blé utilisées dans cette étude sont présentées au Tableau 33. Les résultats montrent que les farines d'ignames-durcies présentent une teneur relativement faibles en protéines (9,9 à 8,4%). L'indice de sédimentation de Zeleny qui renseigne sur la capacité des protéines à former un agrégat en milieu acide (lié à sa teneur en gluténines) est très faible pour les

différentes farines d'ignames durcies, il est dans tous les cas très en deçà du minimum acceptable fixé à 15 ml (Norme ISO 5529) ce qui indique l'absence de gluten dans les farines d'ignames durcies. L'activité diastasique des farines d'ignames durcies est forte comme l'atteste les petites valeurs de l'indice de Hagberg. Cette forte activité diastasique conduit à un maximum de liquéfaction de l'amidon (surtout pour la farine d'igname-durcie et la farine d'igname-durcie-fermentée) et à une faible capacité de rétention d'eau, ce qui explique que comparée à la farine de blé, les farines d'ignames-durcies présentent une plus faible viscosité lors de la cuisson comme l'atteste les valeurs plus élevées de la plus petites concentration gélifiante. D'une manière générale, ces résultats indiquent que les farines d'ignames-durcies ne possèdent pas des propriétés boulangères adéquates.

La teneur en protéine de la farine de blé utilisée dans cette étude et la qualité du gluten (indice de Zeleny de 31) pourraient permettre de compenser le déficit protéique des différentes farines d'igname, mais l'activité amylasique déterminée par l'indice de chute de Hagberg se situant juste au niveau de la norme ne permettrait pas de redresser le niveau enzymatique des farines à constituer.

Tableau 33 : Quelques caractéristiques boulangères de farines expérimentales.

Caractéristiques boulangères	Type de farine			
	Igname durcie	Igname durcie-fermentée	Igname durcie-traitée au kanwa	Blé
Protéines (% MS)	9,6 ± 0,1	9,9 ± 0,1	8,4 ± 0,1	11,17±0,02
Nombre de chute de Hagberg (s)	104 ± 2	62 ± 1	287 ± 14	321 ± 1
Indice de Zeleny (ml)	7 ± 0,4	8 ± 0,2	4 ± 0,4	31 ± 0,6
Plus petite concentration gélifiante	10,5 ± 0,7	13,0 ± 0,0	7,5 ± 0,7	5,5 ± 0,7

Moyenne ± écart type, n = 3

Les caractéristiques boulangères et les propriétés fonctionnelles des farines composées igname-durcie/blé sont présentées dans le Tableau 34. Après incorporation de la farine de blé, une amélioration sensible des différentes caractéristiques boulangères mesurées a été notée par rapport aux farines d'ignames-durcies de base. L'indice de Zeleny reste à un niveau acceptable jusqu'à un taux de substitution de 50% pour la farine d'igname-durcie et la farine d'igname-durcie-fermentée, et à un taux de 30% pour la farine d'igname-durcie-traité au *kanwa*.

D'une manière générale, la capacité d'absorption d'eau (CAE), la capacité d'absorption d'huile (CAH), l'indice de solubilité à l'eau (ISE) et la plus petite concentration gélifiante (PPCG) augmentent avec le taux de substitution. Cette évolution est semblable à celle observée par Mbofung *et al.* (2004) au cours de la substitution de la farine de blé par la farine de taro. L'augmentation de la capacité d'absorption d'eau avec la substitution des farines d'ignames-durcies suggère que les farines composées ignames-durcies/blé pourraient être utilisées dans des systèmes alimentaires tel que la panification qui requiert beaucoup d'eau pour améliorer les caractéristiques usuelles de la pâte. La variation de la capacité d'absorption d'huile dans les farines ayant été associée à la présence de chaînes non-polaires, les résultats de cette étude suggèrent que la substitution de la farine de blé par les farines d'ignames-durcies augmente de manière significative les sites de fixation de l'huile dans les farines composées. Ainsi, les farines composées blé/ignames-durcies seraient potentiellement utiles dans l'interaction structurale des aliments, spécialement pour la rétention de la flaveur et l'amélioration du goût des produits.

L'activité émulsifiante (AE) et la stabilité des émulsions (SE) des farines composées blé/ignames-durcies diminuent de manière significative avec l'augmentation du taux de substitution des farines d'ignames-durcies. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Yatsumatsu, Sawada & Morita (1972) qui ont corrélé la baisse de l'AE avec

l'augmentation de la teneur en fibre, or les tubercules durcis de l'igname *D. dumetorum* sont riches en fibres (Trèche, 1989).

Dans cette étude, il a été observé une diminution de la densité des farines avec l'augmentation du taux de substitution des différentes farines d'ignames-durcies. Ceci est avantageux si l'on prend en compte les travaux de Giami (1993) qui ont montré qu'une réduction de la densité des farines favorise une bonne formulation des aliments infantiles, et ceux de Akubor & Badifu (2004) qui ont observé que la diminution de la densité au cours de l'incorporation de la farine de *Treculia africana* dans la farine de blé est favorable à la fabrication des biscuits.

Tableau 34 : Caractéristiques boulangère et propriétés fonctionnelles des farines composées igname-durcie/blé.

Igname	Protéines (%)	Nombre de chute de Hagberg (s)	Indice de Zeleny (ml)	ISE (%)	CAE (%)	CAH (%)	AE (%)	SE (%)	Densité (g/ml)	PPCG (%)
Durcie										
0 %	11,17±0,02 ^f	321±1 ^e	31±0,6 ^e	11,6±0,1 ^a	106,0±0,5 ^a	173,1±0,9 ^a	46,6±0,6 ^d	61,7±0,4 ^e	0,66±0,01 ^d	5,5±0,7 ^a
10 %	11,01±0,02 ^e	204±7 ^d	25±0,5 ^d	18,4±0,6 ^b	118,2±0,4 ^b	176,1±0,2 ^{ab}	46,2±0,7 ^d	46,0±1,4 ^d	0,66±0,01 ^d	6,5±0,7 ^{ab}
20 %	10,86±0,02 ^d	171±1 ^c	23±0,5 ^c	19,2±0,2 ^b	130,0±1,0 ^c	181,2±0,0 ^{bc}	44,9±0,4 ^d	42,8±1,1 ^d	0,63±0,00 ^c	7,5±0,7 ^{bc}
30 %	10,71±0,01 ^c	151±2 ^b	21±0,3 ^c	20,2±0,1 ^c	149,3±2,0 ^d	186,2±1,1 ^{cd}	41,2±0,7 ^c	38,9±2,0 ^c	0,59±0,00 ^b	8,5±0,7 ^{cd}
40 %	10,56±0,01 ^b	137±7 ^a	19±0,8 ^b	20,8±0,8 ^{cd}	166,3±7,1 ^e	188,6±0,3 ^{cd}	38,7±1,1 ^b	35,0±2,4 ^b	0,56±0,00 ^a	9,5±0,7 ^{de}
50 %	10,40±0,01 ^a	135±8 ^a	17±0,5 ^a	21,8±0,2 ^d	193,7±4,7 ^f	190,7±7,5 ^d	35,1±0,3 ^a	31,0±1,4 ^a	0,55±0,01 ^a	10,5±0,7 ^e
Durcie-kanwa										
0 %	11,17±0,02 ^f	321±1 ^a	31±0,6 ^d	11,6±0,1 ^a	106,0±0,5 ^a	173,1±0,9 ^a	46,6±0,6 ^c	61,7±0,4 ^b	0,66±0,01 ^d	5,5±0,7 ^a
10 %	10,90±0,02 ^e	307±4 ^b	21±0,5 ^c	17,7±0,3 ^b	123,2±3,5 ^b	174,2±3,5 ^a	42,6±1,0 ^d	55,2±1,7 ^a	0,67±0,00 ^d	8,0±0,0 ^b
20 %	10,63±0,02 ^d	303±3 ^b	18±1,1 ^b	18,3±0,0 ^{bc}	135,1±2,6 ^c	176,2±3,8 ^{ab}	38,9±1,6 ^c	53,9±2,7 ^a	0,64±0,01 ^c	6,5±0,7 ^{ab}
30 %	10,36±0,01 ^c	301±4 ^b	16±1,6 ^b	18,8±0,3 ^{cd}	155,0±6,2 ^d	180,7±0,9 ^{bc}	34,7±1,7 ^b	55,1±1,6 ^a	0,63±0,01 ^{bc}	5,5±0,7 ^a
40 %	10,10±0,01 ^b	302±0 ^b	14±0,5 ^a	19,3±0,5 ^e	178,9±7,0 ^e	183,3±0,6 ^{cd}	31,3±1,9 ^{ab}	55,2±0,7 ^a	0,61±0,01 ^b	5,5±0,7 ^a
50 %	9,83±0,01 ^a	308±13 ^b	13±0,5 ^a	20,1±0,4 ^f	211,0±0,0 ^f	188,3±1,7 ^d	28,4±1,3 ^a	54,8±0,2 ^a	0,59±0,00 ^a	5,5±0,7 ^a
Durcie-fermentée										
0 %	11,17±0,02 ^f	321±1 ^d	31±0,6 ^e	11,6±0,1 ^a	106,0±0,5 ^a	173,1±0,9 ^a	46,6±0,6 ^c	61,7±0,4 ^d	0,66±0,01 ^d	5,5±0,7 ^a
10 %	11,05±0,02 ^e	129±0 ^c	26±0,5 ^d	20,0±0,2 ^b	120,2±0,2 ^b	176,5±11,0 ^a	46,5±0,5 ^c	49,0±1,3 ^c	0,67±0,01 ^d	7,5±0,7 ^b
20 %	10,93±0,02 ^d	74±2 ^b	24±0,5 ^c	21,2±0,2 ^c	136,9±0,7 ^c	183,1±1,7 ^{ab}	45,4±0,6 ^c	47,0±1,5 ^c	0,64±0,01 ^c	9,5±0,7 ^c
30 %	10,81±0,01 ^c	64±1 ^a	22±0,3 ^c	22,1±0,1 ^d	165,5±1,5 ^d	192,5±0,3 ^{bc}	42,4±1,5 ^b	45,8±1,1 ^{bc}	0,61±0,00 ^b	11,5±0,7 ^d
40 %	10,69±0,01 ^b	62±0 ^a	20±0,8 ^b	23,3±0,6 ^e	211,6±4,9 ^e	200,3±0,1 ^{cd}	40,2±0,2 ^{ab}	42,8±0,2 ^{ab}	0,61±0,01 ^b	12,0±0,0 ^{de}
50 %	10,57±0,01 ^a	62±1 ^a	18±0,5 ^a	23,9±0,4 ^e	249,6±1,8 ^f	207,5±0,5 ^d	38,5±1,3 ^a	41,6±2,2 ^a	0,53±0,00 ^a	13,5±0,7 ^e

Moyenne ± écart type, n = 3

Les moyennes de la même colonne pour chaque traitement ayant les exposants différents sont significativement différents à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

Dans le but d'avoir une meilleure compréhension des relations existantes entre les paramètres de base de chaque farine basée sur leurs caractéristiques boulangères et propriétés fonctionnelles, les résultats expérimentaux ont été analysés en utilisant les méthodes ACH et ACP décrites plus haut.

Les données originales introduites pour analyse, $[X = (16, 10)]$, constituées de 10 variables mesurées dans 16 échantillons, où chaque matrice d'entrée est la valeur moyenne de trois répétitions. Les données ont été auto-évaluées avant les analyses.

Les résultats de l'ACH sont présentés dans la Figure 57. Dans ce dendrogramme, on observe quatre principaux groupes pour la similarité 0,6 (indice de similarité = $100 - (D_{link}/D_{max}) * 100$). La farine de blé forme un groupe d'échantillon similaire avec les farines composées igname-durcie-traités au *kanwa*/blé (K10, K20, K30, K40 et K50). Ceci laisse supposer que jusqu'au taux de substitution de 50%, les farines composées igname-durcie-traitée au *kanwa*/blé conservent les caractéristiques boulangères et les propriétés fonctionnelles de la farine de blé utilisée dans cette étude. Les farines composées igname-durcie/blé (D) et igname-durcie-fermentée/blé (F) sont de manière spatiale à part du groupe formé par le blé et forment un groupe unique à un indice de similarité d'environ 0,4. Ils se caractérisent par un nombre de chute de Hagberg faible (Tableau 34).

L'analyse des composantes principales varimax-rotées, a donné des tendances et caractéristiques similaires à celles obtenues dans l'ACH, mais avec l'avantage que les corrélations entre les variables et les échantillons deviennent plus claires. Les facteurs des chargements Varimax roté qui représente les corrélations entre les composantes principales (CP) et les données originales sont présentés dans le Tableau 35 avec leurs variances et leurs valeurs de Eigen. CP1 inclus 56,2% de la variance dans les données introduites et les chargements indiquent qu'il a une contribution significative des propriétés fonctionnelles. La seconde CP décrit 32,45% de la variance totale et a pour contributeurs principaux les

caractéristiques boulangères et l'activité émulsifiante (AE). Les troisièmes et quatrièmes composantes principales ne décrivent respectivement que 5,35 et 3,84% de la variance totale. Ainsi, CP1 et CP2 qui représentent 88,65% de la variance totale dans les données peuvent suffire et permettre de restituer le maximum de l'information contenu dans les données originales.

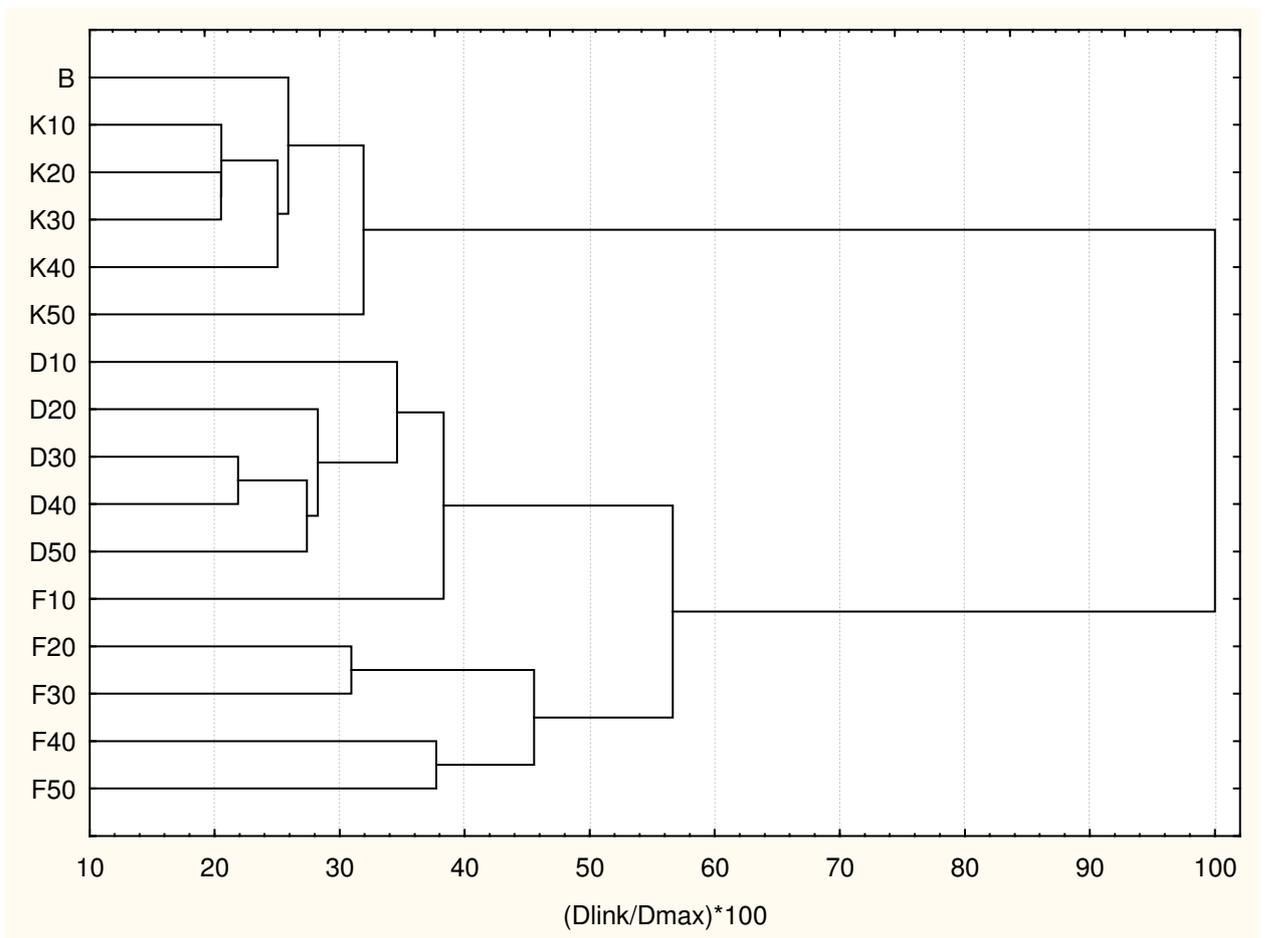


Figure 57 : ACH sur la farine de blé et les 15 farines composées blé/igname-durcies

Tableau 35 : Chargements pour les quatre premières composantes principales Varimax rotées.

Variabiles	CP1	CP2	CP3	CP4
Protéines	0,58*	-0,80*	-0,07	-0,06
ISE	-0,88*	-0,25	0,00	0,41
CAE	-0,93*	0,19	-0,27	-0,10
CAH	-0,93*	-0,19	-0,27	-0,12
AE	0,56	-0,82*	-0,03	0,01
SE	0,65*	0,50	-0,56	0,04
Densité	0,90*	-0,05	-0,18	0,36
Indice de Zeleny	0,66*	-0,70*	-0,09	-0,19
PPCG	-0,70*	-0,64*	-0,19	-0,04
Nombre de chute de Hagberg	0,55	0,80*	0,01	-0,14
Valeur de Eigen	5,62	3,25	0,54	0,38
% Variance totale	56,20	32,45	5,35	3,84
Valeur de Eigen cumulée	5,62	8,87	9,40	9,78
Variance cumulée (%)	56,20	88,65	94,01	97,84

* Les chargements ayant une valeur absolue supérieure à 0,56 représentent une contribution significative.

CAE : capacité d'absorption d'eau

CAH : capacité d'absorption d'huile

ISE : indice de solubilité à l'eau

AE : activité émulsifiante

SE : stabilité des émulsions

PPCG : plus petite concentration gélifiante

Les résultats de l'ACH pour les variables sont représentés dans la Figure 58. Dans le dendrogramme obtenu, on observe trois groupes pour un indice de similarité de 0,6. L'activité diastasique des farines représentée par le nombre de chute de Hagberg est spatialement à part du groupe principal formé par les protéines, la densité, l'indice de Zeleny, PPCG, ISE, AE et SE, et forme un groupe unique à un indice de similarité d'environ 0,1 avec CAE et CAH. Ceci suggère que les propriétés technologiques des farines composées Blé/ignames-durcies aux taux de substitution utilisés dans cette étude seront principalement influencés par l'activité diastasique et la corrélation qui existerait entre l'activité diastasique, la capacité d'absorption d'eau et la capacité d'absorption d'huile.

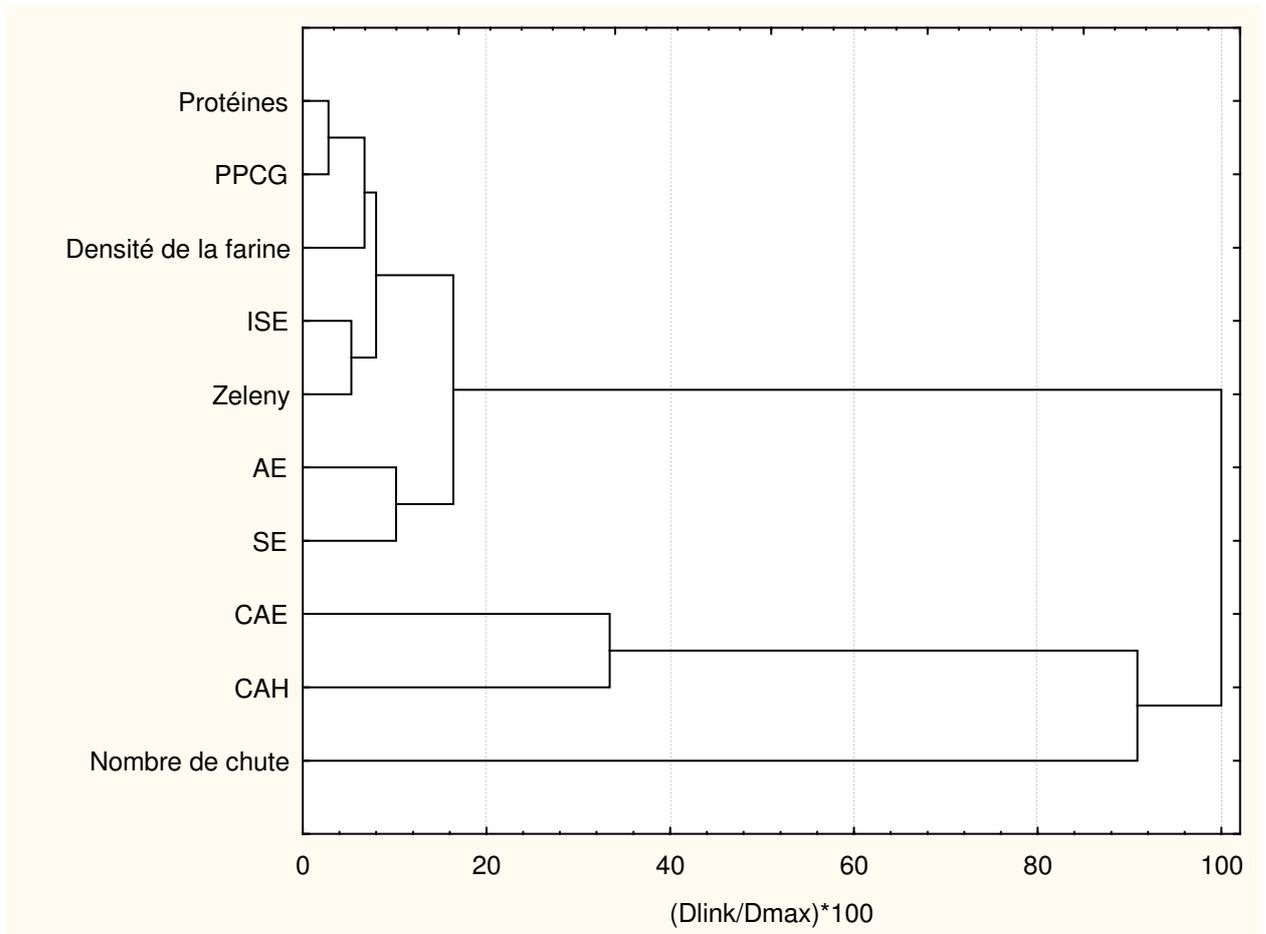


Figure 58 : Dendrogramme (ACH) pour les caractéristiques boulangères et les propriétés fonctionnelles des farines

La Figure 59 présente les scores et les chargements Varimax rotés des deux premières composantes principales. De cette figure, il est remarquable de constater que le blé (B) et les différentes farines composées blé/igname-durcie-traitée au *kanwa* (K10, K20, K30, K40 et K50) forment un groupe qui se singularise par un nombre de chute de Hagberg élevé, une faible capacité d'absorption d'huile et un faible indice de solubilité à l'eau. Le deuxième groupe formé des différentes farines composées blé/igname-durcie (D10, D20, D30, D40 et D50) et blé/igname-durcie-fermentée (F10, F20, F30, F40 et F50) se caractérise principalement par un nombre de chute de Hagberg faible, une forte capacité d'absorption d'huile et une forte solubilité à l'eau. A ce niveau de l'analyse il pourrait être suggérer que les farines composées blé/igname-durcie-traitée au *kanwa* ont des propriétés technologiques similaires à celles du blé. Toutefois, une observation plus détaillée de ce groupe peut permettre de le subdiviser en trois sous-groupes respectivement composés de : B, K10-K20-K30 et K40-K50 qui sont différenciés par les variations dans la capacité d'absorption d'eau, la teneur en protéines, l'indice de Zeleny et l'activité émulsifiante.

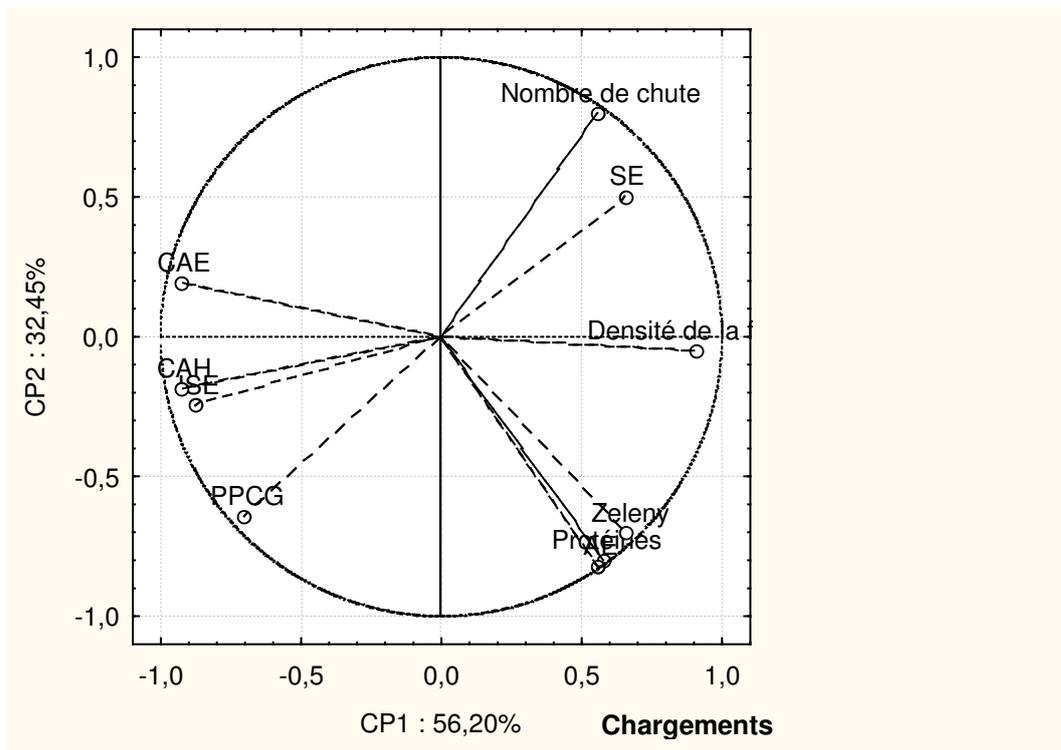
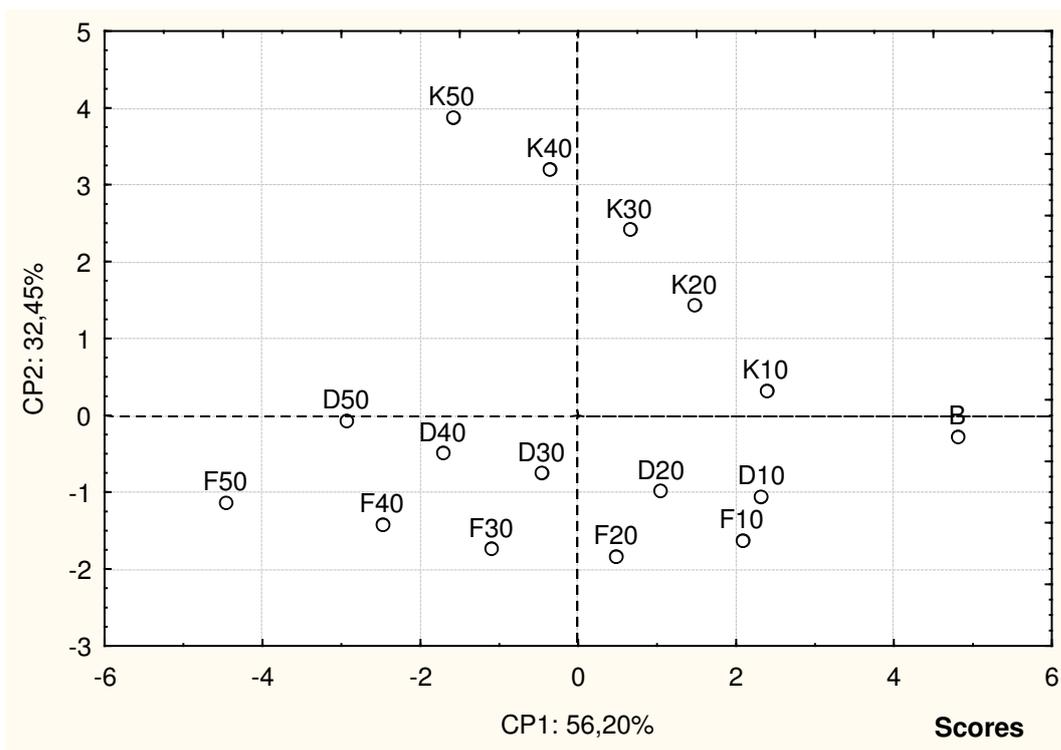


Figure 59 : Scores et chargements Varimax rotés pour les deux premières CP.

Les propriétés rhéologiques des farines composées évaluées par les essais alvéographiques sont présentées au Tableau 36. L'effet d'une substitution partielle de la farine de blé par les différentes farines d'ignames-durcies induits des modifications des caractéristiques alvéographiques. On note pour toutes les farines composées, une diminution drastique de l'ensemble des paramètres mesurés au taux de substitution 10%, puis une augmentation progressive avec l'augmentation du taux de substitution, les caractéristiques alvéographiques se situant dans tous les cas très en deça du seuil minimal pour une utilisation boulangère des farines. Cette tendance est différente de celle observée par Mbofung *et al.* (2004) sur les farines composées blé/taro et par Balla, Blecker, Oumarou, Pacquot & Deroanne (1999) sur les farines composées blé/sorgho qui ont obtenu une évolution linéaire des caractéristiques alvéographiques avec l'augmentation du taux de substitution. Les résultats de cette étude indiquent que les farines composées blé/igname-durcie ne sont pas panifiable pour tous les taux de substitution et types de traitements utilisé dans cette étude. Ces résultats sont cependant à prendre avec des réserves. En effet, il faudrait relever que par manque de farinographe, les mesures alvéographiques ont été effectuées suivant les paramètres (absorption d'eau et temps de développement de la pâte) définis pour le blé simple. Il serait par conséquent utile d'affiner cette étude par la mesure au préalable des caractéristiques farinographiques d'absorption d'eau et de temps de développement de la pâte des farines composées blé/ignames-durcies.

La tenacité de la pâte (P) déterminant le potentiel d'hydratation de la farine (Kitissou, 1995), les résultats obtenus dans cette étude pourrait tout de même s'expliquer par l'augmentation de la capacité d'absorption d'eau des farines composées. Toutefois le phénomène observé ne saurait s'expliquer par la seule augmentation de la capacité d'absorption d'eau. Si l'on tient compte du fait que la capacité des protéines des farines composées blé/ignames-durcies à former une masse viscoélastique dans la plus part des cas

se situe à un niveau acceptable (indice de Zeleny ≥ 15 , voir Tableau 34) et que l'extensibilité (L) de la pâte est principalement due à cette capacité du gluten (Kitissou, 1995), il a été surprenant de noter au cours de cette étude une perte d'extensibilité au taux de substitution de 10% même après utilisation d'une farine de blé dur canadien avec un taux de protéine de 16 g/100g MS. Il est suggéré que le phénomène observé soit dû d'une part à la forte activité diastasique exhibée par les farines composées (Tableau 34), qui rendrait la pâte molle et collante, puis d'autre part à l'augmentation de la capacité d'absorption d'eau. Ainsi, une inactivation des enzymes dans les farines d'ignames-durcies avant le mélange avec la farine de blé et la connaissance des caractéristiques farinographiques tels que l'absorption d'eau et le temps de développement de la pâte au pétrissage pourrait aidé à améliorer les caractéristiques alvéolographiques des farines composées blé/igname-durcie et rendre ces farines panifiables.

Il faudrait toutefois noter que les paramètres obtenus dans cette étude indiquent que les farines composées blé/igname-durcie seraient aptes pour la formulation des bouillies où la forte activité diastasique serait avantageuse dans la formulation de bouillies infantiles de faible viscosité.

Tableau 36 : Caractéristiques rhéologiques des farines composées blé/ignames-durcie de *D. dumetorum*.

Caractéristiques rhéologiques	Taux d'incorporation de farine d'igname-durcie				
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
P (mm d'eau)	69	9	22	31	42
L (mm)	58	9	11	10	10
P/L	1,19	1,06	2,01	3,11	4,11
W (10 ⁻⁴ J)	148	4	10	16	22
	Taux d'incorporation de farine d'igname-durcie-traitée au <i>kanwa</i>				
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
P (mm d'eau)	69	18	32	50	65
L (mm)	58	9	11	9	9
P/L	1,19	1,63	2,78	5,66	7,39
W (10 ⁻⁴ J)	148	10	17	23	30
	Taux d'incorporation de farine d'igname-durcie-fermentée				
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
P (mm d'eau)	69	6	21	26	38
L (mm)	58	8	10	8	9
P/L	1,19	0,84	2,19	3,16	4,38
W (10 ⁻⁴ J)	148	2	10	11	17

P = ténacité de la pâte ; *L* = extensibilité de la pâte ; *W* = travail de déformation de la pâte.

Le coefficient de variation est inférieur à 1 %

La couleur des farines peut être un paramètre important pouvant directement influencer l'acceptabilité du produit développé. Les paramètres CIE $L^*a^*b^*$ des farines composées blé/ignames-durcies sont présentés dans le Tableau 37. D'une manière générale, le taux de substitution modifie les paramètres CIE $L^*a^*b^*$ des farines composées. Le paramètre L^* (luminance) augmente avec la substitution de la farine d'igname-durcie et n'est pas significativement influencé par l'augmentation du taux de substitution de la farine d'igname-durcie-traité au *kanwa* et de la farine d'igname-durcie-fermentée. Le paramètre a^* (rouge) diminue avec l'augmentation du taux de substitution des différentes farines d'ignames-durcies, tandis qu'on note une augmentation du paramètre b^* (jaune). De manière générale, une substitution partielle de la farines blé par les différentes farines d'ignames-durcies utilisé dans cette étude entraîne une augmentation significative du paramètre C^* (chroma) qui mesure la saturation de la couleur, et de l'angle hue (H^*), ce qui est indicatif de l'obtention de farines composées de forte luminance et jaune.

Tableau 37 : Paramètres CIE $L^*a^*b^*$ de la couleur des farines composées blé/ignames-durcies

Paramètre CIE de la couleur	Taux d'incorporation de farine d'igname durcie					
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
L^*	93,47±0,75 ^a	96,34±0,75 ^{bc}	96,38±0,75 ^{bc}	94,62±0,75 ^{ab}	96,97±0,75 ^c	95,86±0,75 ^{bc}
a^*	0,10±0,01 ^d	-0,46±0,07 ^c	-1,00±0,14 ^b	-1,19±0,14 ^b	-1,52±0,14 ^a	-1,60±0,14 ^a
b^*	10,41±0,02 ^a	13,10±0,02 ^b	15,38±0,02 ^c	16,21±0,02 ^d	16,80±0,02 ^e	18,00±0,02 ^f
C^*	10,41±0,02 ^a	13,11±0,02 ^b	15,42±0,02 ^c	16,26±0,02 ^d	16,88±0,02 ^e	18,08±0,02 ^f
H^*	88,98±0,62 ^a	91,81±0,62 ^b	93,67±0,62 ^c	94,12±0,62 ^c	95,06±0,62 ^c	94,96±0,62 ^c
Taux d'incorporation de farine d'igname durcie-traitée au <i>kanwa</i>						
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
L^*	93,47±0,75 ^a	94,11±0,75 ^a	92,99±0,75 ^a	94,61±0,75 ^a	94,11±0,75 ^a	93,90±0,75 ^a
a^*	0,10±0,01 ^c	-0,43±0,14 ^b	-0,89±0,14 ^a	-0,91±0,14 ^a	-1,09±0,14 ^a	-1,04±0,14 ^a
b^*	10,41±0,02 ^a	13,05±0,02 ^b	13,25±0,02 ^c	14,23±0,02 ^d	13,99±0,02 ^e	14,90±0,02 ^f
C^*	10,41±0,02 ^a	13,06±0,02 ^b	13,29±0,02 ^c	14,27±0,02 ^d	14,05±0,02 ^e	14,94±0,02 ^f
H^*	88,98±0,62 ^a	91,88±0,62 ^b	93,82±0,62 ^c	93,61±0,62 ^c	94,44±0,62 ^c	93,95±0,62 ^c
Taux d'incorporation de farine d'igname durcie-fermentée						
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
L^*	93,47±0,75 ^a	92,88±0,75 ^a	92,28±0,75 ^a	92,09±0,75 ^a	93,75±0,75 ^a	93,04±0,75 ^a
a^*	0,10±0,01 ^a	0,07±0,14 ^a	-0,08±0,14 ^a	-0,05±0,14 ^a	-0,12±0,14 ^a	-0,12±0,14 ^a
b^*	10,41±0,02 ^a	12,19±0,02 ^b	13,03±0,02 ^c	13,60±0,02 ^e	13,44±0,02 ^d	13,58±0,02 ^e
C^*	10,41±0,02 ^a	12,19±0,02 ^b	13,03±0,02 ^c	13,60±0,02 ^e	13,44±0,02 ^d	13,58±0,02 ^e
H^*	88,98±0,62 ^a	89,69±0,62 ^a	90,37±0,62 ^a	90,18±0,62 ^a	90,52±0,62 ^a	90,52±0,62 ^a

Moyenne ± écart type, $n = 2$

Les moyennes de la même ligne pour chaque traitement ayant les exposants différents sont significativement différents à $P \leq 0,05$ selon le test de Duncan

VIII. 4. Conclusion

Dans les conditions standard de fabrication de pain, les farines de base d'ignames-durcies utilisées dans cette étude ne présentent aucune propriété boulangère. Une substitution partielle de la farine de blé par les farines d'ignames-durcies permet de redresser les caractéristiques boulangères des farines (à l'exception du nombre de chute de Hagberg qui est faible) et présente une influence significative sur les propriétés fonctionnelles des farines. L'analyse multivariée (ACH et ACP) des données expérimentales a permis de regrouper les différentes farines étudiées en deux groupes définies dans deux composantes principales : le premier groupe est constitué du blé et des différentes farines composées blé/igname-durcie traité au *kanwa* (K10, K20, K30, K40 et K50) et se singularise par un nombre de chute de Hagberg élevé et une CAE et un ISE faible, tandis que le second groupe qui s'oppose au premier est constitué respectivement des farines composées blé/igname-durcie (D10, D20, D30, D40 et D50) et blé/igname-durcie-fermentée (F10, F20, F30, F40 et F50) et se singularise par un nombre de chute de Hagberg faible et une CAE et un ISE élevé.

La mesure des caractéristiques alvéographiques des farines composées blé/ignames-durcies nécessite une connaissance préalable des caractéristiques farinographiques d'absorption d'eau et de temps de développement de la pâte.

Du fait de leur activité diastasique élevée, les farines composées blé/ignames-durcies pourraient être utilisées dans la formulation des bouillies infantiles de faible viscosité.

La substitution partielle de la farine de blé par les farines d'ignames-durcies permet d'obtenir des farines composées jaunes avec une très forte luminance.

Conclusion générale

1- Le durcissement post-récolte des tubercules de l'igname *D. dumetorum* survient selon deux mécanismes.

- Le mécanisme phytate dépendant : pendant le stockage, il y a hydrolyse des phytates et libération des ions Ca^{2+} qui vont stabiliser la liaison cellule-cellule en établissant des ponts entre les pectines.
- Le mécanisme polyphénols dépendant : pendant le stockage des tubercules, il y a oxydation des composés phénoliques qui sont utilisés comme précurseurs dans les réactions de lignification. Il en résulte un renforcement de la membrane cellulaire dû au dépôt de lignine.

2- Le durcissement associé aux phytates est réversible et survient les premiers jours de stockage, tandis que le durcissement irréversible est associé aux composés phénoliques et à la lignine.

3- Le rapport entre le durcissement irréversible et le durcissement réversible est à l'avantage du durcissement irréversible pendant l'ensemble de la durée de stockage indifféremment des conditions de stockage, preuve que le mécanisme dominant dans le durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum* est le mécanisme de lignification.

4- La modélisation du phénomène de durcissement indique que la vitesse de la réaction du durcissement irréversible est plus dépendante de la température et de l'humidité relative que celle du durcissement réversible.

5- Les tubercules de *D. dumetorum* possèdent des quantités non-négligeables de facteurs antinutritionnels dont la consommation pourrait présenter des risques pour la santé. Leur stockage pendant 56 jours dans les conditions qui prévalent en milieu tropical a

entraîné une diminution significative des teneurs en phytate, phénols totaux, tannins, oxalates, inhibiteurs de trypsine et inhibiteurs d' α -amylase.

6- A l'exception de la densité de la pâte, le stockage des tubercules de *D. dumetorum* influence significativement les propriétés fonctionnelles de ces farines. D'une manière générale, une évolution en 2 phases a été notée, entre le 2^{ème} et le 21^{ème} jour puis du 28^{ème} au 56^{ème} jour. La germination des tubercules ayant été obtenue après 28 jours de stockage, le durcissement et la germination influence les propriétés fonctionnelles des farines des tubercules *D. dumetorum*.

7- Un trempage préalable des tubercules de *D. dumetorum* durcis dans des solutions de NaCl ou de *kanwa* permet d'augmenter significativement le taux de ramollissement des tubercules pendant la cuisson, le pH n'ayant aucun effet significatif. Ces pré-traitements ne permettent pas de surmonter totalement le phénomène de durcissement post-récolte des tubercules de *D. dumetorum*, preuve que le durcissement impliquant les ions Ca^{2+} n'est pas la seule voie du durcissement des tubercules de *D. dumetorum*.

8- A l'exception de la capacité d'absorption d'huile, le trempage préalable des tubercules de *D. dumetorum* durcis dans des solutions de *kanwa* influence significativement les propriétés fonctionnelles des farines obtenues à partir de ces tubercules. La capacité d'absorption d'eau augmente avec la concentration de *kanwa* tandis les autres paramètres (indice de solubilité à l'eau, indice hydrophile-lipophile, densité et capacité de gonflement de la pâte, plus petite concentration gélifiante) diminuent avec l'augmentation de la concentration de *kanwa*.

9- Le rouissage des tubercules durcis de *D. dumetorum* dans un système fermé sans renouvellement d'air permet de prévenir le problème de brunissement antérieurement noté au cours de la fermentation de ces tubercules.

10- Le rouissage naturel des tubercules durcis de *D. dumetorum* pendant 7 jours entraîne le ramollissement total de ces tubercules. En outre, à l'exception de la lignine, les teneurs des différents facteurs antinutritionnels analysés (polyphénols totaux, oxalates, phytate, inhibiteurs de trypsine et d' α -amylase) sont significativement affectés par la fermentation des tubercules ; elles diminuent avec le temps de fermentation. Ainsi, le rouissage améliore la qualité nutritionnelle des tubercules durcis de *D. dumetorum*.

11- Le rouissage naturel des tubercules durcis affecte de manière significative les propriétés fonctionnelles des farines produites à partir de ces tubercules. On a noté une augmentation de la plus petite concentration gélifiante et une diminution de l'ensemble des autres paramètres mesurés (capacité d'absorption d'eau, indice de solubilité à l'eau, capacité d'absorption d'huile, indice hydrophile-lipophile, densité de la farine et gonflement de la pâte).

12- Le stockage, marqué par le durcissement et la germination des tubercules, n'a aucune influence significative sur leurs teneurs en protéines et en sucres, tandis que la cuisson, la fermentation et traitement au *kanwa* présentent un effet significatif. Ainsi pour ce qui est des protéines, on observe une diminution au cours de la cuisson et du traitement au *kanwa* et une augmentation au cours de la fermentation.

13- Les protéines des tubercules frais, durcis et durcis-fermentés diffèrent par leur profil en acides aminés. Dans tous les cas, la lysine est l'acide aminé limitant. Le durcissement et la fermentation des tubercules durcis augmentent le taux de digestibilité protéique ajustée à l'indice chimique. Toutefois, une utilisation des ces tubercules comme seule source protéique serait inadéquate dans l'optique de satisfaire les apports recommandés en protéines.

14- Le durcissement des tubercules réduit la biodisponibilité *in vitro* des glucides tandis que la germination, le traitement au *kanwa*, la fermentation et la cuisson l'augmente.

15- La température de gélatinisation des farines de *D. dumetorum* est comprise entre 70 et 75°C.

16- Pendant la cuisson des tranches de *D. dumetorum*, la gélatinisation de l'amidon suit la relation logarithmique $\ln(1 - \alpha) = -k_G.t$. Ainsi, la vitesse de gélatinisation est grandement influencée par la température de cuisson. De plus, la vitesse de gélatinisation est significativement affectée par le temps de stockage des tubercules, ainsi que par la fermentation et le traitement au *kanwa* des tubercules durcis.

17- Dans les conditions standards de fabrication du pain, les farines d'ignames-durcies ne présentent pas de propriétés boulangères.

18- La substitution partielle de la farine de blé par les farines d'ignames-durcies permet de redresser les caractéristiques boulangères des farines (à l'exception du nombre de chute de Hagberg qui est faible)

19- La substitution partielle de la farine de blé par les farines d'ignames-durcies à une influence significative sur les propriétés fonctionnelles de farines.

20- L'analyse multivarié (ACH et ACP) des données expérimentales a permis de regrouper les différentes farines étudiées en deux groupes définies dans deux composantes principales : le premier groupe est constitué du blé et des différentes farines composées blé/igname-durcie traité au *kanwa* (K10, K20, K30, K40 et K50) et se singularise par un nombre de chute de Hagberg élevé et une CAE et un ISE faible, tandis que le second groupe qui s'oppose au premier est constitué respectivement des farines composées blé/igname-durcie (D10, D20, D30, D40 et D50) et blé/igname-durcie-fermentée (F10, F20, F30, F40 et F50) et se singularise par un nombre de chute de Hagberg faible et une CAE et un ISE élevé

21- La mesure des caractéristiques alvéographiques des farines composées blé/ignames-durcies nécessite la connaissance préalable des caractéristiques farinographiques d'absorption d'eau et de temps de développement de la pâte.

22- Les farines composées blé/ignames-durcies pourraient être utilisées dans la formulation des bouillies infantiles de faible viscosité.

23- La substitution partielle de la farine de blé par les farines d'ignames-durcies permet d'obtenir des farines composées jaunes avec une très forte luminance.

Perspectives

Il serait nécessaire de compléter l'étude des mécanismes de durcissement par une analyse ultrastructurale de la membrane cellulaire des tubercules, dans le but de suivre les modifications au cours du stockage des constituants qui ont été impliqués dans la difficulté-à-cuire, à savoir, les substances pectiques, le calcium lié, la lignine et les composés phénoliques, et par une analyse des enzymes qui seraient impliqués dans le phénomène de durcissement à savoir la phytase, la peroxydase et la laccase.

Il serait également nécessaire de définir les conditions optimales de fermentation des tubercules durcis en y incluant un procédé d'élimination de la lignine.

Et enfin, il serait utile de reprendre l'analyse des caractéristiques alvéographiques des farines composées blé/ignames-durcies après une détermination préalable des caractéristiques farinographiques et d'expérimenter l'effet de l'inactivation des enzymes dans les farines d'ignames-durcies avant leur mélange au blé sur les propriétés boulangères.

Références bibliographiques

- AACC (1981).** Approved methods of the American association of cereal chemists. Method 44-15A approved October 1975 and revised October 1981. USA, AACC.
- AACC (1982).** Approved methods of the American association of cereal chemists. Method 56-81B approved 1982. USA, AACC.
- AACC (1983).** Approved methods of the American association of cereal chemists. Method 56-60 approved 1983. USA, AACC.
- AACC (1984).** Approved methods of the American association of cereal chemists. Method 54-30 approved October 1984. USA, AACC.
- Abe, M. O. (1973).** Adaptability of potato drying to yam processing. *Journal of Milk and Food Technology*, 36, 337-343.
- Adeniji, M. O. (1970).** Influence of moisture and temperature on yam decay organisms. *Phytopathology*, 60, 1698-1699.
- Adesuyi, S.A. (1973).** Advances in yam storage research in Nigeria. *Proc. 3rd International Symposium of Tropical Root Crops*, Ibadan, Nigeria, 428-433.
- Adisa, V. A. (1985).** Fungi associated with the spoilage of stored yam chips and flour in Nigeria. *Die Nahrung*, 29, 481-485.
- Afoakwa, E. O., & Sefa-Dedeh, S. (2001).** Chemical composition and quality changes in trifoliate yam *Dioscorea dumetorum* tubers after harvest. *Journal of Food Chemistry*, 75(1), 85-91.
- Afoakwa, E. O., & Sefa-Dedeh, S. (2002a).** Textural and microstructural changes associated with the post-harvest hardening of trifoliate yam *Dioscorea dumetorum* tubers. *Food Chemistry*, 77(3), 1-6.
- Afoakwa, E. O., & Sefa-Dedeh, S. (2002b).** Changes in cell wall constituents and mechanical properties during post-harvest hardening of trifoliate yam *Dioscorea dumetorum* (Kunth) pax tubers. *Food Research International*, 35, 429-434.
- Afoakwa, E. O., & Sefa-Dedeh, S. (2002c).** Changes in rheological properties and amylase activities of trifoliate yam, *Dioscorea dumetorum*, starch after harvest. *Food Chemistry*, 77, 285-291.

- Agbor-Egbe, T., & Rickard, J. E. (1990).** Evaluation of the chemical composition of fresh and stored edible aroids. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 53, 487-495.
- Agbor-Egbe, T., & Trèche, S. (1995).** Evaluation of the chemical composition of Cameroonian yam germplasm. *Journal of Food Composition and Analysis*, 8, 274-283.
- Aguilera, J. M., & Rivera, J. (1992).** Hard-to-cook defect in black beans: hardening rates, water imbibition and multiple mechanism hypothesis. *Food Research International*, 28(5), 455-463.
- Akubor, P. I., & Badifu, I. O. (2004).** Chemical composition, functional properties and baking potential of African breadfruit kernel and wheat flour blends. *International Journal of Science and Technology*, 39, 223 – 229.
- American Association of Cereal Chemists. (2000).** *Approved Methods of the AACC, Method 44-15A* (10th ed.), St Paul, M. N., The Association.
- Amon, B. O. E. (1973).** The problems of root crops in West Africa. *Communication présentée au 3rd International Symposium of Tropical Root Crops*, 2-9 dec. 1973, Ibadan Nigeria.
- 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.
- AOAC (1970).** *Official Methods of Analysis*. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- AOAC (1990).** *Official Methods of Analysis* (Vol. 2, 15th ed). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Asiedu, J. J. (1991).** L'igname. *In la transformation des produits agricoles en zone tropicale*, CTA – Karthala. Coll. Economie et Développement, Paris, France, pp. 315-332.
- Attaie, H., Zakhia, N., & Bricas, N. (1998).** Etat des connaissances et de la recherche sur la transformation et les utilisations alimentaires de l'igname. *In L'igname, plante séculaire et culture d'avenir*. Actes du séminaire international Cirad-Inra-Orstom-Coraf, 3-6 juin 1997, Montpellier, France (eds. Berthaud, J. : Bricas, N. : Marchand, J.-L.), pp. 275-284

- Bainbridge, Z., Tomlins, K., Wellings, K., & Westby, A. (1996).** *Methods for assessing quality characteristics of non-grains starch staples (Part 3. Laboratory methods)*. Chatham, UK: Natural Resources Institute.
- Bakshi, A. S., & Singh, R. P. (1976).** Kinetics of water diffusion and starch gelatinisation during rice parboiling. *Journal of Food Science*, 45, 1387-1396.
- Balla, A., Blecker, C., Oumarou, M., Pacquot, M., & Deroanne C. (1999).** Mise au point de pains composites à base de mélanges de farines de sorgho-blé et analyse texturale *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 3(2), 69-77.
- Barreau, J. (1956).** Les ignames alimentaires des îles du Pacifique sud. *Journal d'Agriculture Tropicale et de Botanique Appliquée*, 3(7-8), 385-401.
- Bell, A. (1981).** Influence des transformations technologiques traditionnelles sur la valeur nutritive des ignames (*Dioscorea* spp.) du Cameroun. *Thèse de 3^{ème} cycle, Université Paris VI*.
- Berrios, J. D. J., Swanson, B. G., & Cheong, W. A. (1999).** Physico-chemical characterization of stored black beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Research International*, 32, 669-676.
- Berthelot, J. (1990).** *La panification des céréales tropicales : mise au point de recettes de bros à dominance de maïs ou de mil aisément transférables en Afrique noire. Rapport de fin de programme*. Paris, Ministère de la Coopération et du Développement, 64 p.
- Bewa, H., Charlet-Lery, G., & Szylit, O. (1979).** Rôle de la microflore digestive et de la structure cristalline de l'amidon dans la digestion et l'utilisation des régimes chez le poulet. Etude des tubercules tropicaux. *Annales de Nutrition et Alimentation*, 33, 213-231.
- Bidlingmeyer, B. A., Cohen, S. A., & Tarvin, T. L. (1984).** Rapid analysis of amino acids using precolumn derivatization. *Journal of Chromatography*, 336, 93-104.
- Birch, G. G., & Prietly, R. J. (1973).** Degree of gelatinisation of cooked rice. *Starch/Stärke*, 3, 98-100.
- Block, R. J. & Mitchell, M. M. (1946).** The correlation of the amino acid composition of proteins with their nutritive value. *Nutrition Abstract Review*, 16, 249-278.

- Blouin, F. A., Zarins, Z. M., & Cherry, J. P. (1982).** Discolouration of proteins by binding with phenolic compounds. In, *Food Protein Detorioration: Mechanism and Functionality*. J. P Cherry Ed., ACS Symposium Series 206, Washington DC: American Chemical Society, pp. 68-91.
- Bornet, F. (1992).** Technologie des amidons, digestibilité et effets métaboliques. *Cahier de Nutrition et Diététique*, 27(3), 170-178.
- Bradbury, J. H. (1988).** The chemical composition of tropical root crops. *ASEAN Food Journal*, 4(1), 3-13.
- Bresani, R., Elias, L. G., Wolzak, A., Hagerman, A. E., & Butler, L. G. (1983).** Tannin in common beans: methods of analysis and effects on protein quality. *Journal of Food Science*, 48, 1000-1003.
- Brett, C. T., & Waldron, K. W. (1996).** Physiology and biochemistry of plant cell. In: *Topics in plant functional biology*. Black M. & Charlwood Eds., London, U.K., 230p.
- Bryant, C. M., & Hamaker, B. R. (1997).** Effect of lime on gelatinisation of corn flour and starch. *Cereal Chemistry*, 74, 171-175.
- Cabrera, E., Pineda, J. C., Duran de Bazua, C., Segurajauregui J. S., & Vernon E. J. (1984).** *Proceeding of Third International Congress on Engineering and Food*. (Brian M. Mckenna ed.), Dublin, pp. 117-125.
- Chau, C. F., & Cheung, P. C. K. (1998).** Functional properties of flours prepared from three Chinese indigenous legume seeds. *Food Chemistry*, 61, 429-433.
- Chavan, J. K., & Kadam, S. S. (1989).** Nutritional improvement of cereals by sprouting. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 28(5), 401-437.
- Chel-Guerrero, L., Perez-Flores, V., Bentacur-Ancona, D., & Davila-Ortiz, G. (2002).** Functional properties of flours and protein isolates from *Phaseolus lunatus* and *Canavalia ensiformis* seeds. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 50, 584-591.
- CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) (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 a protein isolate from mung bean flour. *Journal of Food Technology*, 12, 475-484.
- Cohen, S. A., & Strydom, D. J. (1988).** Amino acid analysis utilizing phenylisothiocyanate derivatives. *Analytical Biochemistry*, 174, 1-16.
- Coursey, D. G. (1967).** Yam storage – I : A review of yam storage practices and of information on storage losses. *Journal of Stored Products Research*, 2, 229-244.
- Coursey, D. G. (1972).** The civilization of the yam: interrelationships of man and yams in Africa and the indo-pacific region. *Archaeol. Phy. Anthropol. Oceania*, 7, 215-233.
- Coursey, D. G. (1976).** Some culture-historical determinants of tropical agricultural research priorities. *Tropical Root and Tuber Crops Newsletter*, (9), 4-12.
- Coursey, D. G. (1983).** Yams. In : *Handbook of tropical crops*. (H. T. Chan ed.), New York, Marcel Dekker, pp. 557-601.
- Coursey, D. G., & Ferber, C. E. M. (1979).** The processing of yams, In: *Small-scale Processing and Storage of Tropical Root Crops*. (Plucknett ed.), Westview Press, Colorado, USA, pp. 15-25.
- Coursey, D. G., & Nwankwo, F. I. (1967).** Effects of insolation and of shade on the storage behaviour of yams in West Africa. *Ghana Journal of Science*, 8, 74-81.
- Crean, D. E., & Haisman, D. R. (1963).** The interaction between phytic acid and divalent cations during cooking of dried peas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 14, 824-833.
- De León, L. F., Elias, L. G., & Bressani, R. (1992).** Effect of salt solutions on the cooking time, nutritional and sensory characteristics of common beans (*Phaseolus vulgaris*). *Food Research International*, 25, 131-136.
- Defloor, I. (1995).** *Factors governing the breadmaking potential of cassava (Manihot esculenta Crantz) flour*. Ph. D. thesis, University of K.U. Leuven, Belgium, 155 p.
- Degras, L. (1980).** Caractéristiques générales et place des ignames en biologie végétale. In : *L'igname aujourd'hui et demain*, Centre de Recherches Agronomiques des Antilles et de la Guyane, 4-6.
- Degras, L. (1986).** L'igname, plante à tubercule tropicale. *Techniques agricoles et productions tropicales*, Maisonneuve et Larose éd., Paris.

- Degras, L. (1993).** *The yam: a tropical root crop* (2nd edn.). London: Macmillan Press Ltd.
- Degras, L., Arnolin, R., Poitout, A., & Suard, C. (1977).** Quelques aspects de la biologie des ignames (*Dioscorea* spp). I. Les ignames et leur culture. *Annales de l'Amélioration des Plantes*, 27, 1-23.
- Del Valle, J. M, Aguilera, J. M., Hohlberg, A. I., Richardson, J. C., & Stanley, D. W. (1993).** Modelling of bean hardening kinetics during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 17, 119-137.
- Del Valle, J. M., & Stanley, D. W. (1995).** Reversible and irreversible components of bean hardening. *Food Research International*, 28, 455-463.
- Dela Rosa, L., & Emiola, L. (1980).** Characteristics of *Dioscorea rotundata* polyphenol oxidase. *Journal of Applied Biochemistry*, 2, 100-110.
- Delpeuch, F., & Favier, J. C. (1980).** Caractéristiques des amidons de plantes alimentaires tropicales : action de l'alpha-amylase, gonflement et solubilité. *Annales des Technologies Agricoles*, 29, 53-67.
- Delpeuch, F., Favier, J. C., & Charbonnière R. (1978).** Caractéristiques des amidons de plantes alimentaires tropicales. *Annales des Technologies Agricoles*, 27, 809-826.
- Dendy, D. A. V., Clarke, P. A., & James, A. W. (1973).** The use of blends of wheat and non wheat flours in breadmaking. *In Composite Flour Program*. Rome, FAO, p. 134.
- Deosthale, Y. G., Mohan, V. S., & Rao, K. V. (1970).** Varietal deficiencies in protein, lysine and leucine content of grain sorghum. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 18, 644-646.
- Derungs, L. (1986).** *Valorisation des produits vivriers tropicaux par cuisson-extrusion*. Rapport de DEA, Université Montpellier II.
- Deshpandes, S. S., Salhe, S. K., Salunkhe, D. K., & Cornforth, D. P. (1982).** Effects of dehulling on phytic acid, polyphenols and enzyme inhibitors of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Food Science*, 47, 1846-1850.
- Deshpandes, S. S., & Cheryan, M. (1985).** Evaluation of vanillin assay for tannin of dry beans. *Journal of Food Science*, 50, 905-910.
- Dumont R., Hamon, P., & Seignobos, C. (1994).** *Les ignames au Cameroun*. Repères, Cirad, Montpellier, France, 80 p.

- Dumont, R. (1995).** Utilisation des ignames (*Dioscorea* sp.) pour la production de cossettes ou de farine destinée au commerce. Situation actuelle et perspectives. Rapport, CIRAD/IITA, Cotonou, République du Bénin, 7 p.
- Emiola, L. O., & Delarosa, L. C. (1981).** Physicochemical characteristics of yam starches. *Journal of Food Biochemistry*, 5, 115-130.
- Erdman, J. W. J R. (1979).** Oilseed Phytates : Nutritional implication. *Journal of American Oil Chemistry*, 56, 736-741.
- Ezeike, G. O. I. (1984).** An analysis of weight loss of stored yam (*Dioscorea* spp) tubers. *Canadian Agricultural Engineering*, 26, 115-119.
- Ezeike, G. O. I. (1985).** Experimental analysis of yam (*Dioscorea* spp) tubers stability in tropical storage. *Transactions of the ASAE*, 28, 1641-1645.
- FAO (1971).** Composite flour program, documentation package, Food and Agriculture Organisation, United Nations, Rome, Italy.
- FAO (1991).** Protein quality evaluation report of a joint FAO/WHO expert consultation. Rome: FAO, FAO Food and Nutrition paper 51.
- FAO (1999).** Culture et utilisation de l'igname pour améliorer la sécurité alimentaire. Texte de référence de la FAO.
- FAO/OMS (1973).** Besoins énergétiques et besoins en protéines. Organisation Mondiale de la Santé Série, Rapport technique, n° 522.
- Fisher, E. H., & Stein, E. A. (1961).** DNS colorimetric determination of available carbohydrates in foods. *Biochemical preparations*, 8, 30-37.
- Gallant, D., Bewa, H., Buy, Q. H. Bouchet, B., Szylit, O., & Sealy, L. (1982).** On ultrastructural and nutritional aspects of some tropical tuber starches. *Starch/Stärke*, 34, 255-262.
- Gallant, D., Derrien, A., Aumaitre, A., & Guilbot, A. (1973).** Dégradation *in vitro* de l'amidon par le suc pancréatique. Etude par microscopie électronique à transmission et à balayage. *Die Stärke*, 25, 56-64.
- Garcia, E., Filisetti, T. M. C. C., Udaeta, J. E. M., Lajolo, F. M. (1998).** Hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris*): involvement of phenolic compounds and pectates. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 46, 2110-2116.

- Giami, S. Y. (1993).** Effect of processing on the proximate composition and functional properties of cowpea (*vigna unguiculata*) flour. *Food Chemistry*, 47, 153-158
- Girardin, O. (1996).** Technologie après-récolte de l'igname : étude de l'amélioration du stockage traditionnel en Côte d'Ivoire. Thèse, Ecole Polytechnique Fédérale Zurich, Suisse, n° 11710, 298 p.
- Halling, J. P. (1981).** Protein-stabilized foams and emulsions. *CRC Critical Review in Food Science and Nutrition*, 155-203.
- Hamaker, B. R., Kirleis, A. W., Mertz, E. T., & Axtell, J. D. (1986).** Effect of cooking on the protein profiles and *in vitro* digestibility of sorghum and maize. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 34, 647-649.
- Hamon P., Dumont R., Zoundjhekpou J., Tio-Touré B., & Hamon S. (1995).** *Les ignames sauvages d'Afrique de l'Ouest : Caractéristiques morphologiques.* Didactiques, Orstom (IRD), Paris, France, 94 p.
- Harper, A. E., Benton, D. A., & Elvehjem, C. A. (1955).** L-Leucine, and isoleucine antagonist in the rat. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 57, 1-12.
- Hartigan, J. A. (1975).** *Clustering algorithms.* John Wiley & Sons, New York, USA.
- Henderson, H. M., & Ankrah, S. A. (1985).** The relationship of endogenous phytase, phytic acid and moisture with cooking time in *Vicia faba cv Aladin*. *Food Chemistry*, 17, 1-11.
- Hentges, D. L., Weaver, C. M., & Nielsen, S. S. (1991).** Changes of selected physical and chemical components in the development of the hard-to-cook bean defect. *Journal of Food Science*, 56, 436-442.
- Hincks, M. J., & Stanley, D. W. (1986).** Multiple mechanisms for bean hardening. *Journal of Food Technology*, 21, 731-750.
- Hoff, J. E., & Castro, D. (1969).** Chemical composition of potato cell wall. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 17, 1328-1331.
- Holloway, W. D., Argall, M. E., Jealous, W. T., Lee, J. A., & Bradbury, J. H. (1989).** Organic acids and calcium oxalate in tropical root crops. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 37, 337-341.

- Horigome, T., Kumar, R., & Okamoto, K. (1988).** Effects of condensed tannins prepared from leaves of fodder plants on digestive enzymes *in vitro* and in the intestine of rats. *British Journal of Nutrition*, 60, 275-285.
- Igwilo, N., Ada Mbanaso, E. N., Onyia, G. O. C., & Atu, U. G. (1988).** Inhibition of sprouting by gibberellic acid in the preservation of seed and ware yam. *Beiträge zur Tropischen Landwirtschaft und Veterinärmedizin*, 26(2), 145-154.
- Ireland, C. R., & Passam, H. C. (1984).** The level and distribution of phenolic plant growth inhibitors in yam tubers during dormancy. *New Phytologist*, 97, 233-242.
- Jauregui, C. A., Regenstein, J. M., & Baker, R. C. (1981).** A simple centrifugal method for measuring expressible moisture, a water-binding property of muscle foods. *Journal of Food Science*, 46, 1271-1273.
- Kadam, S. S., Kute, L. S., Lawande, K. M., & Salunkhe, D. K. (1982).** Changes in chemical composition of winged bean (*Psophocarpus tetragonolobus* L.) during seed development. *Journal of Food Science*, 47, 2051-2057.
- Kakade, M. L., Rackis, J. J., MacGhee, J. E., & Puski, G. (1974).** Determination of trypsin inhibitor activity of soy products : a collaborative analysis of an improved procedure. *Cereal Chemistry*, 51, 376-382.
- Kessler, H. G. (1981).** *Food Engineering and dairy technology*, Verlag A Kessler, Germany.
- Khor, H. T., Tan, N. H., & Wong, K. C. (1982).** The protein, trypsin inhibitor and lipids of the winged bean (*Psophocarpus tetragonolobus*) seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 33, 996-1000.
- Kilmer, O. L., Seib, P. A., & Hosney, R. C. (1994).** Effect of minerals and apparent phytase activity in the development of the hard-to-cook state of beans. *Cereal Chemistry*, 71, 476-482.
- Kitissou, P. (1995).** Un nouveau parametre alvéographique: L'indice d'élasticité (Ie). *Industries des Céréales*, 9-13.
- Kubota, K., Hosokawa, Y., Suzuki, K., & Hosaka, H. (1979).** Studies on the gelatinisation rate of potato starches. *Journal of Food Science*, 44, 1394-1399.

- Kumar, K. G., Venkataraman, L. V., Jaya, T. V., & Krishnamurth, K. S. (1978).** Cooking characteristics of some germinated legumes: changes in phytins, Ca²⁺, Mg²⁺ and pectins. *Journal of Food Science*, 43, 85-88.
- Labuza, T. P., & Riboh, D. (1982).** Theory and application of Arrhenius kinetics to the prediction of nutrient losses in foods. *Journal of Food Science*, 36, 66-74.
- Lai, L. N., Abd Karim, A., Norziah, M. H., & Seow, C. C. (2002).** Effects of Na₂CO₃ and NaOH on DSC thermal profiles of selected native cereal starches. *Food Chemistry*, 78, 355-362.
- Lancaster, P. A., & Coursey, D. G. (1984).** Traditional post-harvest technology of perishable tropical staples. *FAO Agricultural Services Bulletin*, N° 59, Rome, Italy.
- Laria, J., Meza, E., Mondragón, M., Silva R., & Peña, J. L. (2005).** Comparison of overall water uptake by corn kernel with and without dissolved calcium hydroxide at room temperature. *Journal of Food Engineering*, 67, 451-456.
- Leach, H. W., MacCowan, L. D., & Schoch, T. J. (1959).** Structure of the starch granule. I. Swelling and solubility patterns of various starches. *Cereal Chemistry*, 36, 534-544.
- Liu, K., Philips, R. D., Hung, Y. C., Shewfelt, R. L., & McWatters, K. H. (1992).** Hard-to-cook defect in cowpeas: storage-induced and treatment-induced development. *Journal of Food Science*, 57, 1155-1160.
- Longe, O. G. (1983).** Varietal differences in chemical characteristics related to cooking quality of cowpea. *Journal of Food Processing and Preservation*, 7, 143-150.
- Lonstaff, M. A., & McNab, J. M. (1991).** The effect of concentration of tannin-rich bean hulls (*Vicia faba* L.) on activities of lipase (EC 3.1.1.3) and α -amylase (EC 3.2.1.1) in digesta and pancreas on the digestion of lipid and starch by young chicks. *British Journal of Nutrition*, 66, 139-147.
- Lorri, M., & Svanberg, U. (1994).** Lower prevalence of diarrhoea in young children fed lactic acid-fermented cereal gruels. *Food Nutrition Bulletin*, 15(1), 57-68.
- Lyonga, S. N., Fayemi, A. A., & Agboola, A. A. (1973).** Agronomic studies on edible yam in the grassland plateau region of the united republic of Cameroon. *Proc. 3rd International Symposium of Tropical Root Crops*, Ibadan, Nigeria, 340-346.

- Madec, P. (1963).** Les développements les plus récents dans le domaine de la physiologie de la pomme de terre. *CR 2nd Conférence Triennale de l'Association européenne pour la recherche sur la pomme de terre*, 36-59.
- Makanynola, A. A., & Beetlestone, J. G. (1975).** Some chemical and mineralogical notes on kaun (trona). *Nigerian Journal of Mining and Geology*, 10(1-2), 31-41.
- Malcolmson, L. J., Matsuo, P. R., & Balshaw, R. (1993).** Textural optimization of Spaghetti using response surface methodology: Effets of drying temperature and durum protein level. *Cereal Chemistry*, 70, 417-423.
- Malinowski, E. R. (1991).** *Factor analysis in chemistry* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York, USA.
- Marfo, E. K., Simpson, B. K., Idowu, J. S., & Oke, O.L. (1990).** Effect of local food processing on phytate levels in cassava, cocoyam, yam, maize, sorghum, rice, cowpea and soybean. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 38(7), 1580-1585.
- Martin, F. W. (1972).** Yam production methods. *Production Research Report* N° 147, USDA, Washington.
- Martin, F. W. (1974).** Tropical yams and their potential. Part 1. *Dioscorea esculenta*. *Agriculture Handbook* N° 457, USDA, Washington.
- Martin, F. W., & Sadik, S. (1977).** Tropical yams and their potential. Part 4. *Dioscorea rotundata* and *Dioscorea cayenensis*. *Agriculture Handbook* N° 502, USDA, Washington.
- Mattson, S. (1946).** The cookability of yellow peas: a colloid-chemical and biochemical study. *Acta Agriculture Suecana*, 2, 185-231.
- Mattson, S., Akerberg, E., Erickson, E., Koulter-Anderson, E., & Vahtras, K. (1950).** Factors determining the composition and cookability of peas. *Acta Agriculture Scandinavia*, 1, 40-61.
- Mayer, A. M., & Staples, R. C. (2002).** Laccas: new functions for old enzyme. *Phytochemistry*, 60, 551-565.
- Mbofung, C. M. F., Njintang, Y. N., Balaam, F., Kitissou, P., & Waldron, K. W. (2004).** Functional properties and rheology of wheat-taro composite flours. *International Journal of Food Science and Technology*, (In press).

- Mbome Lape, I. (1991).** Utilisation de l'igname *Dioscorea dumetorum* comme base des bouillies de sevrage. Communication présentée au séminaire-atelier sur les bouillies de sevrage en Afrique Centrale, tenu du 21 au 24 mai 1991 à Brazzaville, Congo.
- Mbome Lape, I. Agbor-Egbe T., & Trèche, S. (1995).** Digestibility and metabolism of flours from two yam species (*D. rotundata* and *D. dumetorum*) in school age children. *Ecology of Food and Nutrition*, 34, 217-225.
- Mbome Lape, I., & Trèche, S. (1994).** Nutritional quality of yams (*D. rotundata* and *D. dumetorum*) flours for growing rats. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 66, 447-455.
- McKean (1984).** *Introduction to biology*. (John Murray eds), London, pp. 103-107.
- Miege, J. (1957).** Influence de quelques caractères des tubercules semences sur la levée et le rendement des ignames cultivées. *Journal d'agriculture Tropicale et de botanique Appliquée*, 4(7-8), 315-342.
- Mitjavila, S. (1986).** Substances naturelles nocives des aliments. *In Toxicologie et Sécurité des Aliments*. Technique & Documentation, Lavoisier, Paris, 594 p.
- Mohammed, A. I., Ponnampereuma, A. J. P., & Youssef, S. H. (1986).** New chromophore method for phytic acid determination. *Cereal Chemistry*, 63(6), 475-478.
- Mole, S., & Waterman, P. G. (1985).** Stimulatory effects of tannins and cholic acid on tryptic hydrolysis of proteins : Ecological implications. *Journal of Chemical Ecology*, 11, 1323-1332.
- Moscoso, W., Bourne, M. C., & Hood, L. F. (1984).** Relationship between the hard-to-cook phenomenon in red kidney beans and water absorption, puncture force, pectin, phytic acid, and minerals. *Journal of Food Science*, 49, 1577-1583.
- Mozie, O. (1984).** Influence of ventilation and humidity during storage on weight and quality changes of white yam tubers (*Dioscorea rotundata* Poir). *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 68, 341-348.
- Mulimani, V. H., & Supriya, D. (1993).** Alpha amylase inhibitors in sorghum (*Sorghum bicolor*). *Plant Foods in Human Nutrition*, 44(3), 261-266.

- Nakase, M., Adachi, T., Vrisu, A., Miyashita, T., Alvarez, A. M., Nagasaka, S., Aoki, N., Nakamura, R., & Matsuda, T. (1996).** Rice (*Oryza sativa* L.) alpha amylase inhibitors of 14-16Kda are potential allergens and products of a multigene family. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 44(9), 2624-2628.
- Neto, V. Q., Narain, N., Silvia, J. B., & Bora, P. S. (2001).** Functional properties of raw and heat-processed cashew nut (*Anarcadium occidentale* L.) kernel protein isolate. *Nahrung*, 45, 258-262.
- Ngoddy, P. O., & Onuoha, C. C. (1985).** Selected problems in yam processing. In *Advances in Yam Research*. (Godson Osuji ed.). Biochemical Society of Nigeria, pp. 293-318.
- Ngong-Nassah, E., Lyonga, S. N., & Ayuk-Takem, J. (1980).** How to grow yams for better yields. *Technical Bulletin* N° 3, IRA, Bambui, Cameroun.
- Njintang, Y. N., & Mbofung C. M. F. (2003).** Kinetics of gelatinisation and mass transfer during cooking of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) slices. *Starch/Stärke*, 55, 170-176.
- Njintang, Y. N., Mbofung, C. M. F., & Waldron, K. W. (2001).** *In vitro* protein digestibility and physico-chemical properties of dry red bean (*Phaseolus vulgaris*) flour: effect of processing and incorporation of soybean and cowpea flour. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 49, 2465-2471.
- Noonan, S. C., & Savage, G. P. (1999).** Oxalate content of food and its effect on humans. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 64-74.
- Nout, M. J. R., Roabouts, F. M., & Havelaar, A. (1989).** Effect of accelerated natural lactic fermentation of infant ingredients on some pathogenic microorganisms. *Journal of Food Microbiology*, 8, 351-360.
- Nwankiti, A. O. (1988).** Sprout removal in storage and seed yam production in Nigeria. *Tropical Agriculture*, 65(4), 367-369.
- O'Brien, G. M., Mbome L., Taylor, A. J., & Poulter, N. H. (1992).** Variations in cyanide content of cassava during village processing in Cameroon. *Food Chemistry*, 44, 131-136.
- Obiri-Danso, K. (1994).** Microbiological studies on corn dough fermentation. *Cereal Chemistry*, 71(2), 186-188.

- Okafor, N., Ijioma, B., & Oyolu, C. (1984).** Study on the microbiology of cassava retting for foo-foo production. *Journal of Applied Bacteriology*, 56, 1-13.
- Okezie Onuma, B., & Bello, A. B. (1988).** Physicochemical and functional properties of winged bean flour and isolate compared with soy isolate. *Journal of Food Science*, 53(2), 450-454.
- Olympio, H. K. (1982).** L'igname au Togo. In : *Yams-Ignames*, Miège J. et Lyonga S. N., éd., Clarendon Press Oxford, pp. 173-184.
- OMS (1985).** Besoins énergétiques et besoins en protéines. Rapport d'une consultation conjointe d'experts FAO/OMS/UNU. Série de rapports techniques 724. Genève.
- Onayemi, O. (1986).** Some chemical factors affecting the quality of processed yam. *Journal of Food Science*, 51, 161-164.
- Onayemi, O., Ojo, A., & Adetunji, V. O. (1985).** Peeling of yams for processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 9, 171-178.
- Onwueme, I. C. (1978).** *The tropical tuber crops*. John Wiley & sons éd., Chichester, New-York, Brisbane, Toronto.
- Osagie, A. U. (1977).** Phytosterols in some tropical tubers. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 25, 1222-1223.
- Osagie, A. U. (1992).** *The yam tuber in storage*. Ph. D Thesis, University of Benin, Benin City, Nigeria, 247 p.
- Osswald, P. (1995).** *Economie des racines et tubercules. Analyse dans les pays d'Afrique de l'Ouest et du Centre*. Solagral, Paris, France.
- Panigrahi, S., & Francis, B. (1982).** Digestibility and possible toxicity of the yam *Dioscorea alata*. *Nutrition Reports International*, 26, 1007-1013.
- Parker, M. L., & Waldron, K. W. (1995).** Texture of Chinese water chestnut: involvement of cell wall phenolics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 68, 337-346.
- Passam, H. C. (1982).** Dormancy of yams in relation to storage. In: *Yams-Ignames*, Miège J & Lyonga S.N. éd., Clarendon Press Oxford, 285-293.
- Passam, H. C., & Noon, R. A. (1977).** Deterioration of yams and cassava during storage. *Annals of Applied Biology*, 85, 436-440.

- Passam, H. C., Read, S. J., & Rickard, J. E. (1978).** The respiration of yam tubers and its contribution to storage losses. *Tropical Agriculture, (Trinidad)*, 55, 207-214.
- Peers, F. G. (1953).** The phytase of wheat. *Biochemistry Journal*, 53, 102-109.
- Philips, R. D., Chinnan, M. S., Brach, A. L., Miller, J., & McWatters, K. H. (1988).** Effects of pretreatment on functional and nutritional properties of cowpea meal. *Journal of Food Science*, 53(3), 805-809.
- Picard, T. (1987).** Circuit de commercialisation de l'igname au Togo et étude de la demande pour un pilon mécanique. Montpellier, France.
- Piergiovanni, A. R. (1992).** Effects of some experimental parameters on the activity of cowpea α -amylase inhibitors. *Lebensmittel Wissenschaft Technologie*, 25(4), 321-324.
- Plahar, W. A., & Leung, H. K. (1982).** Effect of moisture content on the development of carboxylic acids in traditional maize dough fermentation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 33, 555-559.
- Ramaswami, H. S., Van De Voort, F. R., & Ghasal, S. (1989).** An analysis of TDT and Arrhenius methods for handling process and kinetic data. *Journal of Food Science*, 54, 1322-1326.
- Rasper, V. (1969).** Investigations on starches from major starch crops grown in Ghana. I. Hot paste viscosity and gel-forming power. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 20, 165-171.
- Reddy, G. V., & Das, H. (1993).** Kinetics of deep-fat-frying of potato and optimization of process variables. *Journal of Food Science and Technology*, 30(2), 105-108.
- Reddy, N. R., & Pierson, M. D. (1994).** Reduction in antinutritional and toxic components in plant foods by fermentation. *Food Research International*, 27, 281-290.
- René, T. (1995).** Panification, les farines composées : une technologie facile à maîtriser. *Bulletin du Réseau TPA*, 10.
- Rickard, J. E. et Coursey, D. G. (1981).** Cassava storage. *Tropical Science*, 23, 1-32.
- Rivera-Ortiz, J. M., & Gonzalez, M. A. (1972).** Lye peeling of fresh yam, *Dioscorea alata*. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 56, 57-63.

- Rockland, L. T., & Metzler, E. A. (1967).** Quick cooking Lima and other dry beans. *Food Technology*, 21, 26A-30A.
- Rooney, L. W., & Serna-Saldivar, S. O. (1991).** *Corn Chemistry and Technology*. (Watson and Stewart eds), pp. 411.
- Rosiario, R. R., & Malit, P. B. (1984).** Improved ubi (*Dioscorea alata* L.) flour preparation and its utilization for instant halaya. *The Philippine Agriculturist*, 67, 177-182.
- Ross, A. B., Savaga, G. P., Martin R. J., & Vanhanen, L. (1999).** Oxalates in oca (New Zealand yam) (*Oxalis tuberosa* Mol.). *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 47, 5019-5022.
- Salisbury, F. B., & Ross, C.W. (1984).** *Plant physiology*. Wadsworth publishing company. 3^{ed} ed. pp 8-130.
- Salunkhe, D. K., Jadhav, S. J., Kadam, S. S., & Chavan, J. K. (1982).** Chemical, biochemical and biological significance of polyphenols in cereals and legumes. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 17, 277-305.
- Satterlee, L. D., Marshall, H. F., & Tennyson, J. M. (1979).** Measuring protein quality. *Journal of American Oil Chemist Society*, 56, 103-109.
- Sauphanor, B., & Ratnadass, A. (1985).** Problèmes entomologiques liés à la conservation de l'igname en Côte d'Ivoire. *L'Agronomie Tropicale*, 40, 261-270.
- Sauphanor, B., Bordat, D., Delvare, G., & Ratnadass, A. (1987).** Les insectes des ignames stockées de Côte d'Ivoire. Inventaire faunistique et éléments biologiques. *L'Agronomie Tropicale*, 42, (4), 305-312.
- Saura-Calixto, F., Goñi, I., Mañas, E., & Abia, R. (1991).** Klanson lignin, condensed tannins and resistant protein as dietary fiber constituents: determination in grape pomaces. *Food Chemistry*, 39, 299-309.
- Savoie, L., & Gauthier, S. F. (1986).** Dialysis cell for the *in vitro* measurement of protein digestibility. *Journal of Food Science*, 51, 494-507.
- Sealy, L. (1982).** Etudes ultrastructurale et biochimique du phénomène de durcissement post-récolte du tubercule de l'igname *Dioscorea dumetorum* (Kunth) Pax var. ex Jakiri. *Thèse de 3^{ème} cycle*, Université de Nantes.

- Sealy, L., Renaudin S., Gallant, D. J., Bouchet, B., & Brillouet, J. M. (1985).** Ultrastructural study of yam tuber as related to postharvest hardness. *Food Microstructure*, 4, 173-181.
- Sefa-Dedeh, S., & Afoakwa, E. O. (2002).** Biochemical and textural changes in trifoliolate yam *Dioscorea dumetorum* tubers after harvest. *Food Chemistry*, 79, 27-40.
- Sefa-Dedeh, S., & Cornelius, B. (2000).** The microflora of fermented nixtamalized corn. Presented at the Annual Meeting of the Institute of Food Technologists, Dallas, Texas, 20-25 June, 2000.
- Sefa-Dedeh, S., Kluvitse, Y., & Afoakwa O. E. (2001).** Influence of fermentation and cowpea steaming on some quality characteristics of maize-cowpea blends. *African Journal of Science and Technology*, 2(2), 71-80.
- Sefa-Dedeh, S., Sakyi-Dawson, E., & Sanni, A. I. (1999).** Microbiology of cowpea-fortified fermented maize dough. Presented at the International Conference on Cowpea Research, Accra, Ghana, 25-29 January, 1999.
- Sharaf, M. A., Illman, D. L., & Kowalski, B. R. (1986).** *Chemometrics*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Sikabbubba, R.M. (1989).** *The effect of alcohol soluble proteins on the digestibility of sorghum*. Master of Science thesis, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA.
- Singh, K. B., Erskine, W., Robertson, L. D., Nakkoul, H., & Williams, P. C. (1988).** Influence of pretreatment on cooking quality parameters of dry food legumes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 44, 135-139.
- Skoch, L. V., Deyoe, C. W., Shoup, F. K., Bathurst, J., & Liang, D. (1970).** Protein fractionation of sorghum grain. *Cereal Chemistry*, 47, 472-481.
- Sosulski, F. W. (1962).** The centrifuge method for determining flour absorption in hard red spring wheat. *Cereal Chemistry*, 39, 344-350.
- Spiro, M. & Selwood, R. M. (1984).** The kinetics and mechanism of caffeine infusion from coffee : the effect of particle size. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 35, 915-924.

- Stanley, D. W. (1987).** Structure and composition. In : *Corn: Chemistry and Technology*, (D. W. Stanley ed.), St. Paul, Minnesota, USA, American Association of Cereal Chemists Inc. pp. 53-82.
- Stanley, D. W. (1992).** A possible role for condensed tannins in bean hardening. *Food Research International*, 25, 187-192.
- Stanley, D. W., & Aguilera, J. M. (1985).** A review of textural defects in cooked reconstituted legumes – the influence of structure and composition. *Journal of Food Biochemistry*, 9, 277-323.
- Statistical Package for Social Science (2001).** *Statistical package for the social sciences for Windows 10.1*. Illinois, USA, SPSS.
- StatSoft, Inc (2001).** STATISTICA (data analysis software system), version 6. www.statsoft.com
- Steele, W. J. C., & Sammy, G. M. (1976).** The processing potentials of yams (*Dioscorea* spp.). I. Laboratory studies on lye peeling of yams. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 60, 207-214.
- Swain, T., & Hillis, W. E. (1959).** The phenolic constituents of *Prunus domestica* I. The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 10, 63-68.
- Tanque, H., Shimosono, H., & Sakoda, T. (1993).** Characteristics of 3 species of yam (*Dioscorea*) for karukan making. *Journal of Japanese Society of Food Science and Technology*, 40, 627-635.
- Trèche, S., & Delpeuch, F. (1982).** Le durcissement de *Dioscorea dumetorum* au Cameroun. In, *Yams-Ignames*, (J. Miegé & S. N. Lyonga eds), Oxford: Clarendon Press, pp. 294-311.
- Trèche, S. (1989).** Potentialités nutritionnelles des ignames (*Dioscorea* spp.) cultivées au Cameroun. Vol. I : texte. Vol. II : annexes. Thèse, Editions de l'ORSTOM, Collection Etudes et Thèses, Paris, 595 p.
- Trèche, S., & Agbor-Egbe, A. (1996).** Biochemical changes occurring during growth and storage of two yam species. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 47(2), 93-102.

- Trèche, S., & Delpeuch, F. (1979).** Evidence for the development of membrane thickening in the parenchyma of tubers of *Dioscorea dumetorum* during storage. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, 288, 67-70.
- Trèche, S., & Guion, P. (1982).** Incidences nutritionnelles des différences de caractéristiques physico-chimiques des amidons de deux espèces d'ignames cultivées au Cameroun. *Revue Science et Technique (Sci. Santé)*, 1-2, 117-133.
- Trèche, S., Agbor Egbe, T., Mbome Lape, I., & Mba Mezoui, C. (1983).** Essais d'adaptation de procédés technologiques à la fabrication de produits séchés à partir d'ignames cultivées au Cameroun (*Dioscorea dumetorum* et *D. rotundata*). *Revue Science et Technique (Sci. Santé)*, 6-7, 7-32.
- Trèche, S., Mbome Lape, I., & Agbor-Egbe, T. (1984).** Variation de la valeur nutritionnelle au cours de la préparation de produits séchés à partir d'ignames cultivées au Cameroun (*Dioscorea dumetorum* et *D. rotundata*). *Revue Science et Technique (Sci. Santé)*, 1(1-2), 7-22.
- Trejo-González, A., Faria-Morales, A. & Wild-Altamirano, C. (1988).** The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. *Advances in Chemistry Series N° 198. Modification of Proteins*. American Chemical Society.
- Uzogara, S. G., Morton, I. D., & Daniel, J. W. (1998).** Quality changes and mineral content of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) seeds processed with “kanwa” alkaline salt. *Food Chemistry*, 30, 1-18.
- Van Boekel, M. A. J. S. (1996).** Statistical aspects of kinetic modeling for food science problems. *Journal of Food Science*, 61, 477-489.
- Varriano-Martson, E., & De Omana, E. (1979).** Effects of sodium salt solutions on the chemical composition and morphology of black beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Food Science*, 46, 1379-1385.
- Waitt, A. W. (1963).** Yams, *Dioscorea* species. *Field Crop Abstract*, 16, 145-157.
- Waldron, K. W., Smith, A. C., Parr, A. J., Ng, A., & Parker, M. L. (1997).** New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. *Trends in Food Science and Technology*, 8, 213-221.

- Weselake, R. J., McGregor, A. W., Hill, R. D., & Duckworth, H. W. (1983).** Purification and characteristics of an endogenous α -amylase inhibitor from barley kernels. *Plant Physiology*, 73, 1008-1012.
- WHO (2002).** *Protein and amino acids requirements in human nutrition*. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. WHO Technical Report Series. Geneva.
- Wickham, L. D. (1988).** Extension of dormancy in cush-cush yams (*Dioscorea trifida*) by treatment with gibberellic acid. *Tropical Science*, 28(1), 75-77.
- Wickham, L. D., Passam, H. C., & Wilson, L. A. (1984).** Dormancy responses to post-harvest application of growth regulators in *Dioscorea* species. 1. Responses of bulbils, tubers and tuber pieces of three *Dioscorea* species. *Journal of Agricultural Science*, 102, 427-432.
- Wolf, W. J. (1970).** Soybean proteins: their functional, chemical and physical properties. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 18, 965-969.
- Yatsumatsu, K., Sawada, K., & Morita, S. (1972).** Whipping and emulsifying properties of soy bean products. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 36 (5) : 715 – 727

Annexes

Publications relatives à la Thèse

Medoua Nama, G., Mbome Lape, I., Agbor-Egbe, T., & Mbofung, C. M. F. (2005).

Physicochemical changes occurring during post-harvest hardening of trifoliolate yam (*Dioscorea dumetorum*) tubers. *Food Chemistry*, 90, 597-601.

Medoua Nama, G., Mbome Lape, I., Agbor-Egbe, T., & Mbofung, C. M. F. (2005).

Study of the hard-to-cook property of stored yam tubers (*Dioscorea dumetorum*) and some determining biochemical factors. *Food Research International*, 38, 143-149.