



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

UNIVERSITE DE NGAOUNDERE
Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles
Unité de recherche Réactions Extractions Sucrerie et Huiles végétales
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques
Laboratoire de Thermodynamique et des Milieux Polyphasés

THESE

Présentée devant l'Université de Ngaoundéré
Pour obtenir le grade de
Docteur/Ph.D de l'Université de Ngaoundéré et Docteur de l'INPL
Spécialité : Génie des Procédés

Par

Gilles Bernard NKOUAM

**Conservation des fruits du karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) et de l'aïéle
(*Canarium schweinfurthii* Engl.) : isothermes de sorption d'eau et extraction
des matières grasses des fruits stockés**

Thèse soutenue à l'Université de Ngaoundéré le 27 septembre 2007

Président

Joseph NOAH NGAMVENG Professeur, LPB, Faculté des Sciences-Université de Yaoundé I

Rapporteur

César KAPSEU Professeur, DGPI, ENSAI-Université de Ngaoundéré (Directeur de thèse)

Membres

Michel ROQUES Professeur Emérite, LaTEP, ENSGTI-Université de Pau et des Pays de l'Adour

Jean NGANHOU Professeur, DGIM, ENSP-Université de Yaoundé I

DZUDIE TENIN Professeur, DGPI, ENSAI-Université de Ngaoundéré

Robert NDJOUENKEU Professeur, DSAN, ENSAI-Université de Ngaoundéré

Michel DIRAND Professeur, LTMP, ENSIC-INPL de Nancy (Directeur de thèse)

Danielle BARTH Professeur, LSGC, ENSIC-INPL de Nancy

TABLE DES MATIERES

PAGE DE SIGNATURE	Pages i
CERTIFICATION	ii
DEDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES ILLUSTRATIONS	vii
RESUME	xvi
ABSTRACT	xviii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	8
I.1 LES DONNEES BOTANIQUE, ETHNOBOTANIQUE ET COMMERCIALE	9
I.1.1 LE KARITE	9
I.1.1.1 L'arbre et le fruit	9
<i>I.1.1.1.1 L'aire de distribution du karité</i>	13
<i>I.1.1.1.2 Les utilisations du karité</i>	14
<i>I.1.1.1.3 La commercialisation des fruits et des produits du karité</i>	15
I.1.2 L'AIELE	16
I.1.2.1 L'arbre et le fruit	16
<i>I.1.2.1.1 L'aire de distribution de l'aiélé</i>	20
<i>I.1.2.1.2 Les utilisations de l'aiélé</i>	22
<i>I.1.2.1.3 La commercialisation des fruits et des produits de l'aiélé</i>	23
I.2 LA CONSERVATION DES FRUITS DU KARITE ET DE L'AIELE	25
I.2.1 LE KARITE	25
I.2.1.1 Le stockage en tas et en fosses	26
I.2.1.2 Le conditionnement des graines et des amandes	26

I.2.1.3 Les autres méthodes de conservation	27
I.2.2 L'AIELE	28
I.2.3 ISOTHERMES DE SORPTION	29
I.2.3.1 L'état et l'activité de l'eau dans les aliments	29
I.2.3.2 Les méthodes de mesure de l'activité de l'eau	31
<i>I.2.3.2.1 Le principe</i>	31
<i>I.2.3.2.2 Les méthodes d'obtention</i>	31
I.2.3.2.2.1 Les méthodes manométriques	31
I.2.3.2.2.2 Les méthodes hygrométriques	32
I.2.3.2.2.3 Les méthodes gravimétriques	33
I.2.3.3 L'importance des isothermes	34
I.2.3.4 L'hystérésis des isothermes	35
I.2.3.5 Le calcul de l'enthalpie de sorption	38
I.2.3.6 Les travaux sur les isothermes des amandes de karité et des fruits de l'aiélé	39
I.2.3.7 Les exemples de modèles d'isothermes	39
I.2.4 LA TEXTURE DES FRUITS DU KARITE ET DE L'AIELE	46
I.2.4.1 Les généralités sur la texture des aliments	46
<i>I.2.4.1.1 La définition</i>	46
<i>I.2.4.1.2 L'importance de la texture en alimentation</i>	48
I.2.4.2 Les travaux sur la texture des fruits du karité et de l'aiélé	49
I.3 LA TRANSFORMATION DES FRUITS DU KARITE ET DE L'AIELE	50
I.3.1 LE BEURRE DE KARITE	50
I.3.1.1 L'extraction du beurre de karité	50
<i>I.3.1.1.1 Les procédés traditionnels d'extraction</i>	50

<i>I.3.1.1.2 Les procédés améliorés d'extraction</i>	59
I.3.1.2 Les caractéristiques du beurre de karité	64
<i>I.3.1.2.1 Les caractéristiques organoleptiques</i>	64
<i>I.3.1.2.2 Les caractéristiques physiques</i>	66
<i>I.3.1.2.3 Les caractéristiques chimiques</i>	67
I.3.1.3 Les propriétés du beurre de karité	69
I.3.1.4 Le marché et l'avenir du beurre de karité	71
I.3.2 L'HUILE DE L'AIELE	73
I.3.2.1 L'extraction de l'huile de l'aiélé	73
I.3.2.2 Les caractéristiques de l'huile de l'aiélé	74
<i>I.3.2.2.1 Les caractéristiques organoleptiques</i>	74
<i>I.3.2.2.2 Les caractéristiques physiques</i>	75
<i>I.3.2.2.3 Les caractéristiques chimiques</i>	75
I.3.2.3 Les propriétés de l'huile de l'aiélé	77
I.3.2.4 Le marché et l'avenir de l'huile de l'aiélé	77
I.4 L'EXTRACTION DE MATIERE GRASSE DE KARITE ET D'AIELE PAR	
 LE CO₂ SUPERCRITIQUE	78
I.4.1 LES GENERALITES SUR LES FLUIDES SUPERCRITIQUES	78
I.4.1.1 Les définitions	79
I.4.1.2 L'importance des fluides supercritiques	79
I.4.2 LE CAS DU DIOXYDE DE CARBONE	81
I.4.2.1 Les avantages d'utilisation	81
I.4.2.2 Les contraintes d'utilisation	81
I.4.2.3 L'extraction des huiles	82

CHAPITRE II : ISOTHERMES DE SORPTION D'EAU DE L'AMANDE DE	
KARITE ET DE LA PULPE DE L'AIELE	84
I. INTRODUCTION	85
II. MATERIELS ET METHODES	86
II.1 Matériels	86
II.1.1 Matériel végétal	86
II.1.2 Matériel de préparation et de manipulation	86
II.2 Méthodes	87
II.2.1 Caractérisation des fruits	88
II.2.1.1 Préparation des échantillons	88
II.2.1.2 Caractéristiques physiques	88
II.2.1.3 Caractéristiques chimiques	88
II.2.1.3.1 Détermination de la teneur en eau	88
II.2.1.3.2 Détermination des lipides totaux	89
II.2.1.3.3 Détermination des cendres totales	89
II.2.1.3.4 Détermination des protéines totales	90
II.2.1.3.5 Détermination des sucres totaux	92
II.2.2 Isothermes de sorption	94
II.2.2.1 Description du dispositif expérimental	94
II.2.2.2 Obtention des isothermes	98
II.2.2.2.1 Calculs du nombre de sites d'adsorption (n) et des constantes (K et B)	99
II.2.2.2.2 Calcul de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q)	99
II.2.2.2.3 Prédiction des isothermes	100

II.2.2.3	<i>Modélisation des isothermes</i>	100
II.2.2.4	<i>Analyses statistiques</i>	102
III.	RESULTATS ET DISCUSSION	102
III.1	Caractérisation des fruits	102
III.1.1	Caractéristiques physiques	102
III.1.1.1	<i>Karité</i>	102
III.1.1.2	<i>Aiélé</i>	103
III.1.2	Caractéristiques chimiques	104
III.1.2.1	<i>Détermination de la teneur en eau</i>	105
III.1.2.1.1	Karité	105
III.1.2.1.2	Aiélé	105
III.1.2.2	<i>Détermination des lipides totaux</i>	105
III.1.2.2.1	Karité	105
III.1.2.2.2	Aiélé	106
III.1.2.3	<i>Détermination des cendres totales</i>	106
III.1.2.3.1	Karité	106
III.1.2.3.2	Aiélé	106
III.1.2.4	<i>Détermination des protéines totales</i>	106
III.1.2.4.1	Karité	106
III.1.2.4.2	Aiélé	107
III.1.2.5	<i>Détermination des sucres totaux</i>	107
III.1.2.5.1	Karité	107
III.1.2.5.2	Aiélé	107
III.2	Isothermes de sorption	108
III.2.1	Influence de la température	108

III.2.2 Influence de la nature de l'échantillon	111
III.2.3 Modélisation des isothermes	115
III.2.4 Chaleurs nettes de sorption	122
III.2.5 Phénomène d'hystérésis	124
III.2.6 Conditions de conservation	131
IV. CONCLUSION PARTIELLE	136
CHAPITRE III : EXTRACTION DES MATIERES GRASSES PAR DEUX	
SOLVANTS : HEXANE ET CO₂ SUPERCRITIQUE	137
I. INTRODUCTION	138
II. MATERIEL ET METHODES	140
II.1 Matériel végétal et dispositif expérimental	140
II.2 Méthodes	140
II.2.1 Extraction des matières grasses	140
<i>II.2.1.1 Extraction à l'hexane</i>	141
<i>II.2.1.2 Extraction au CO₂ supercritique</i>	141
II.2.1.2.1 Description de l'installation au CO ₂ supercritique	141
II.2.1.2.2 Principe d'extraction	141
II.2.1.2.3 Caractéristiques et remplissage de l'extracteur	143
II.2.1.2.4 Détermination du rendement d'extraction	143
II.2.2 Caractérisation des huiles extraites	146
<i>II.2.2.1 Indice d'acide</i>	146
<i>II.2.2.2 Indice d'iode</i>	147
<i>II.2.2.3 Composition en acides gras</i>	148
<i>II.2.2.4 Différentes classes de lipides</i>	149
II.2.3 Détermination des paramètres texturaux	151

II.2.4 Observations microscopiques de la surface des échantillons	154
II.2.5 Analyses statistiques	155
III. RESULTATS ET DISCUSSION	155
III.1 Extraction des matières grasses	155
III.1.1 Répartition granulométrique des fruits broyés	155
III.1.2 Rendements d'extraction	156
III.1.3 Indice d'acide	161
<i>III.1.3.1 Amande de karité</i>	161
<i>III.1.3.2 Pulpe de l'aiélé</i>	164
III.1.4 Indice d'iode	166
<i>III.1.4.1 Amande de karité</i>	166
<i>III.1.4.2 Pulpe de l'aiélé</i>	168
III.1.5 Composition en acides gras	170
<i>III.1.5.1 Amande de karité</i>	170
<i>III.1.5.2 Pulpe de l'aiélé</i>	173
III.1.6 Différentes classes de lipides	176
<i>III.1.6.1 Amande de karité</i>	176
<i>III.1.6.2 Pulpe de l'aiélé</i>	179
III.2 Paramètres texturaux	182
III.2.1 Amande de karité	182
<i>III.2.1.1 Dureté</i>	182
III.2.2 Pulpe de l'aiélé	185
<i>III.2.2.1 Dureté</i>	185
<i>III.2.2.2 Masticabilité</i>	187
IV. CONCLUSION PARTIELLE	188

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	189
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	193
ANNEXES	208

PAGE DE SIGNATURE

Nous acceptons que la thèse intitulée « **Conservation des fruits du karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) et de l'aiéle (*Canarium schweinfurthii* Engl.) : isothermes de sorption d'eau et extraction des matières grasses des fruits stockés** » soit soutenue par NKOUAM Gilles Bernard à l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles pour l'obtention du diplôme de Doctorat/Ph.D en Génie des Procédés de l'Université de Ngaoundéré.

Le Responsable de la Formation Doctorale

Le Chef de Département de Génie des Procédés et d'Ingénierie

Le Directeur de l'ENSAI

CERTIFICATION

Nous soussignés, Professeur César KAPSEU et Professeur Michel DIRAND, attestons que la présente thèse intitulée **Conservation des fruits du karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) et de l'aiéle (*Canarium schweinfurthii* Engl.) : isothermes de sorption d'eau et extraction des matières grasses des fruits stockés**, est le fruit des travaux effectués dans les laboratoires spécialisés de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles de l'Université de Ngaoundéré et de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques de l'Institut National Polytechnique de Lorraine par Monsieur **NKOUAM Gilles Bernard** (matricule 00D023EN) en vue de l'obtention du titre de Docteur/Ph.D en Génie des Procédés de l'Université de Ngaoundéré.

César KAPSEU

Professeur

Michel DIRAND

Professeur

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse

A DIEU TOUT-PUISSANT,

A mon fils Gilles Jérémie TCHAKOUNTE KOUA,

A Ma bien-aimée Siporah Sylvie NGO MAYACK,

A mes parents, Monsieur Pierre TCHAKOUNTE et Madame Marie Noëlle TCHAKOUNTE,

A ma famille,

Je dédie cette thèse.

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été effectué au sein de l'équipe de Recherche Réactions – Extractions – Sucrerie – Huiles végétales (RESH) du Département de Génie des Procédés et d'Ingénierie de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles (ENSAI) de l'Université de Ngaoundéré au Cameroun et du Laboratoire de Thermodynamique et des Milieux Polyphasés (LTMP) de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques (ENSIC) de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) à Nancy (France). Ceci dans le cadre du projet sur la valorisation des oléagineux soutenu par l'Agence pour l'Investissement dans la Recherche à l'Etranger (AIRE-Développement), mis en œuvre par l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD) et grâce au soutien financier de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) obtenu dans le cadre d'une bourse de formation à la recherche.

J'exprime mes remerciements au Professeur César KAPSEU qui n'a ménagé aucun effort pour la direction de ce travail. Malgré ses multiples responsabilités, il a toujours été disponible et patient dans mon initiation scientifique. Ce travail n'aurait jamais pu se réaliser sans son soutien multiforme. Je lui reconnais l'idée d'avoir initié ce thème sur la conservation des fruits du karité et de l'aiélé depuis le Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA).

Je tiens à remercier aussi le Professeur Michel DIRAND pour m'avoir accueilli au sein du LTMP et pour avoir accepté de diriger cette thèse. Il a toujours été disponible et attentif à mes difficultés malgré ses lourdes fonctions administratives.

Mes remerciements s'adressent également au Professeur Danielle BARTH, qui m'a accepté au sein de l'équipe supercritique du LTMP qu'elle dirige. Elle s'est toujours assurée que je ne manque de rien dans la réalisation de ce travail. Je lui suis reconnaissant pour l'excellente ambiance de travail qu'elle a su installer au laboratoire, et pour la confiance qu'elle m'a toujours accordée. Je n'oublie pas les corrections minutieuses apportées à ce

travail, qui m'ont beaucoup enrichies, et sa disponibilité malgré ses multiples tâches d'enseignement, de recherche et d'encadrement des mémoires et thèses des étudiants.

Je remercie particulièrement Monsieur Laurent PERRIN, Maître de Conférences au Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC) de l'ENSIC pour avoir permis la réalisation des mesures de sorption de ce travail et pour son aide scientifique.

Je n'oublie pas Monsieur Jean François REMY, Ingénieur de recherche au LSGC, pour sa disponibilité et sa collaboration dans la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également :

- à Monsieur Robert CLEMENT du Laboratoire de Chimie-Physique et Moléculaire (LCPM) et Monsieur Cornélius SCHRAUWEN du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC), Maîtres de conférences à l'ENSIC pour la confiance qu'ils m'ont toujours accordée et, pour l'aide matérielle et scientifique apportées à ce travail.

- à tous les enseignants et personnel du LTMP, particulièrement aux Maîtres de Conférences Jean-Bernard BOURDET, Mohammed BOUROUKBA et Jean-Noël JAUBERT ; et à Madame Marie Blanchet HARDOUIN, Secrétaire du LTMP.

- au Professeur Michel LINDER du Laboratoire de Science et Génie alimentaires (LSGA) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) de l'INPL pour avoir répondu à mes préoccupations et l'aide apportée à la réalisation de ce travail.

- au Professeur Michel PARMENTIER du LSGA pour sa collaboration dans la réalisation de ce travail.

- à Madame Véronique FALK Maître de Conférences au LSGC et Mademoiselle Mariette BEAURAIN Technicienne à la salle des travaux pratiques de Chimie Minérale, Mesdames Marie Noëlle MAUCOURT et Carole JEANDEL du LSGA pour la patience, la disponibilité et la collaboration dans la réalisation de ce travail.

- au Professeur Clergé TCHIEGANG du Laboratoire de Biochimie et Technologie Alimentaire (LBTA) de l'ENSAI pour avoir toujours répondu à mes questions et pour toute l'aide apportée à la réalisation de ce travail.

- au Professeur Carl MBOFUNG, Directeur de l'ENSAI, pour ses conseils.

- à tous les Enseignants de l'ENSAI et particulièrement aux Professeurs Dzudie TENIN, Joseph KAYEM, Richard KAMGA, Robert NDJOUENKEU et aux Docteurs Emmanuel NSO, Jean Bosco TCHATCHUENG pour leur collaboration et leur sollicitude.

- aux Docteurs Jules KOUAM, Alexis KUITCHE, Nicolas NJINTANG YANOU, Léopold TATSADJIEU, Guy Bertrand NOUMI, Hilaire WOMENI, Aboubakar DANDJOUMA, Virginie KAPCHIE NOUTCHOUGOUE.

- à mes camarades de l'Université de Ngaoundéré (Divine Nde BUP, Guillaume Patrice KOFA, Gaston ZOMEGNI, Bouba MAGARA, Steve DESOBGO, Joseph SILIECHI, Ludovic FEZEU, Carine TCHANKOU LEUDEU, Lili TCHATCHOUANG), à mes camarades du LTMP et du LSGC de Nancy (Mamadou TRAORE, Valérie LAINE et Rijalalaina RAKOTOSAONA).

- à la Famille MAHAMAT ABAKAKA de Ngaoundéré pour son soutien moral et matériel.

- à mes frères et sœurs Victorine MPONGO, feuë Gisèle BAKUI, Pierre Ebénézer TCHAKOUNTE, Paul Dubois Marie MBELLE TCHAKOUNTE, Elvis BAKGA et Christelle NDONGO KEGOUM ; ma cousine Elise NDONGO NDOKO pour tout l'amour qu'ils ont pour moi.

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

LISTE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 : La composition chimique des amandes de karité	13
Tableau 2 : Les noms vernaculaires de <i>C. schweinfurthii</i> Engl. (Njoukam, 1998a, 1998b)	18
Tableau 3 : La composition chimique de la pulpe de l'aiélé	20
Tableau 4 : Les définitions des paramètres mécaniques de la texture (Szczeniak, 2002)	48
Tableau 5 : Le beurre de karité en fonction du mode d'extraction (Kassamba, 1997)	66
Tableau 6 : Les caractéristiques physiques du beurre de karité	67
Tableau 7 : Les caractéristiques chimiques du beurre de karité	68
Tableau 8 : La composition en acides gras (%) du beurre de karité	69
Tableau 9 : Les indices de qualité du beurre de karité en cosmétique et du beurre de karité trouvé en général sur les marchés (Kassamba, 1997)	72
Tableau 10 : Les caractéristiques chimiques de l'huile de la pulpe de l'aiélé	76
Tableau 11 : La composition en acides gras (%) de l'huile de la pulpe de l'aiélé	76
Tableau 12 : Les constantes de solubilité dans le dioxyde de carbone (Chrastil, 1982)	82
Tableau 13 : L'étalonnage avec la solution d'azote	91
Tableau 14 : L'étalonnage de la solution de glucose	93
Tableau 15 : Les caractéristiques de la microbalance	96
Tableau 16 : Les équations décrivant les isothermes de sorption d'eau	100
Tableau 17 : Les caractéristiques physiques des fruits de l'aiélé et des amandes des fruits du karité	104
Tableau 18 : Les caractéristiques chimiques de la pulpe des fruits frais de l'aiélé et des amandes des fruits du karité	104
Tableau 19 : Les paramètres calculés et la valeur de P (%) des équations de Halsey et de Chung et Pfoest pour le karité	116
Tableau 20 : Les paramètres calculés et la valeur de P (%) des équations d'Oswin, de Smith et de GAB pour le karité	117
Tableau 21 : Les paramètres calculés et la valeur de P (%) des équations de Halsey et de Chung et Pfoest pour l'aiélé	119
Tableau 22 : Les paramètres calculés et la valeur de P (%) des équations d'Oswin, de Smith et de GAB pour l'aiélé	120
Tableau 23 : La variation des valeurs calculées des énergies de la boucle d'hystérésis	131

Tableau 24 : Les conditions de croissance des microorganismes et insectes	132
Tableau 25 : Les paramètres des équations et valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) et des constantes (K et B) pour l'amande de karité	133
Tableau 26 : Les paramètres des équations et valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) et des constantes (K et B) pour la pulpe de l'aiélé	134
Tableau 27 : Les paramètres d'extraction des différentes expérimentations	142
Tableau 28 : Les caractéristiques de l'extracteur	143
Tableau 29 : La composition en acides gras des beurres de karité extraits à l'hexane après différents temps de stockage à 18°C	171
Tableau 30 : La composition en acides gras des beurres de karité extraits à l'hexane après différents temps de stockage à -33°C	171
Tableau 31 : La composition en acides gras des beurres de karité extraits au CO ₂ supercritique après différents temps de stockage	172
Tableau 32 : La composition en acides gras des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane après différents temps de stockage à 18°C	174
Tableau 33 : La composition en acides gras des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane après différents temps de stockage à -33°C	174
Tableau 34 : La composition en acides gras des huiles de l'aiélé extraites au CO ₂ supercritique après différents temps de stockage	175
Tableau 35 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des beurres de karité extraits à l'hexane au cours du stockage à 18°C	177
Tableau 36 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des beurres de karité extraits à l'hexane au cours du stockage à -33°C	177
Tableau 37 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des beurres de karité extraits au CO ₂ supercritique au cours du stockage	178
Tableau 38 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane au cours du stockage à 18°C	180
Tableau 39 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane au cours du stockage à -33°C	180
Tableau 40 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des huiles de l'aiélé extraites au CO ₂ supercritique au cours du stockage	181

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 : L'aire de distribution du karité en Afrique (Chevalier, 1946)	14
Figure 2 : L'aire de distribution du <i>Canarium</i> (Mensier, 1946)	21
Figure 3 : L'aire de distribution du <i>Canarium schweinfurthii</i> Engl. au Cameroun (Njoukam, 1998b)	22
Figure 4 : L'influence de l'activité de l'eau sur les diverses réactions de dégradation des produits alimentaires lors de la conservation (Cheftel & Cheftel, 1984)	29
Figure 5 : Les états de l'eau dans un matériau humide (Nadeau & Puiggali, 1995)	30
Figure 6 : Le schéma d'une boucle d'hystérésis, de l'isobare BA, de l'isostere AC et des isothermes par Caurie (2006)	36
Figure 7 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité de Tchabal et Bambi	56
Figure 8 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité de Garoua (Djamboutou), Cameroun	56
Figure 9 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité par barattage au Burkina Faso (Kassamba, 1997)	57
Figure 10 : Le procédé d'extraction du beurre de karité appliqué au Mali (N'Gouro Sanogo, 1997)	57
Figure 11 : Le procédé d'extraction du beurre de karité par chauffage de la pâte au Burkina Faso (Kassamba, 1997)	58
Figure 12 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité de Bangoua au Cameroun (Womeni, 2004)	58
Figure 13 : Le procédé d'extraction du beurre de karité par presse manuelle au Burkina Faso (Kassamba, 1997)	63
Figure 14 : Le procédé d'extraction du beurre de karité par presse motorisée au Burkina Faso (Kassamba, 1997)	63
Figure 15 : Le procédé traditionnel d'extraction d'huile de l'aiélé à Kalaldi (Cameroun)	74
Figure 16 : Le diagramme (P, T) du corps pur CO ₂ (Royer, 1999)	78
Figure 17 : Le diagramme (P, ρ) du dioxyde de carbone (Sandler, 1999 cité par Mendes Camelo, 2002)	80
Figure 18 : Le schéma général de caractérisation des fruits	87
Figure 19 : L'équation de la réaction de Hantzsch (Devani <i>et al.</i> , 1989)	90

Figure 20 : L'équation de la réaction des oses avec le phénol en milieu acide et à chaud	92
Figure 21 : Le schéma général de détermination des isothermes de sorption	95
Figure 22 : Le schéma de description de la microbalance à suspension magnétique	95
Figure 23 : Les isothermes de désorption de l'amande de karité à différentes températures	108
Figure 24 : Les isothermes de désorption de la pulpe de l'aiélé à différentes températures	109
Figure 25 : Les isothermes d'adsorption de l'amande de karité à différentes températures	110
Figure 26 : Les isothermes d'adsorption de la pulpe de l'aiélé à différentes températures	111
Figure 27 : Les isothermes de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé à différentes températures	113
Figure 28 : Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 25°C	118
Figure 29 : Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 25°C	118
Figure 30 : Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 25°C	121
Figure 31 : Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 25°C	121
Figure 32 : La chaleur nette de sorption d'eau de l'amande de karité entre 25°C et 55°C	123
Figure 33 : La chaleur nette de sorption d'eau de la pulpe de l'aiélé entre 25°C et 55°C	124
Figure 34 : Les isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité à différentes températures	127
Figure 35 : Les isothermes d'adsorption et de désorption de la pulpe de l'aiélé à différentes températures	130
Figure 36 : Les prédictions des isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé à 18°C	134
Figure 37 : Les prédictions des isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé à -33°C	135
Figure 38 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité et de l'huile de l'aiélé	144
Figure 39 : L'installation d'extraction dynamique supercritique	145

Figure 40 : Le schéma de procédé d'extraction dynamique supercritique	145
Figure 41 : Le schéma du Iatroscan	150
Figure 42 : Le schéma général de caractérisation texturale des échantillons de karité et d'aiélé	151
Figure 43 : La courbe type de l'analyse du profil textural de l'amande de karité	153
Figure 44 : La courbe type de l'analyse du profil textural de la pulpe de l'aiélé	153
Figure 45 : La répartition granulométrique des fruits broyés	156
Figure 46 : Le rendement d'extraction à l'hexane du beurre des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C	158
Figure 47 : Le rendement d'extraction à l'hexane de l'huile des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C	158
Figure 48 : Le rendement d'extraction au CO ₂ supercritique du beurre des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C	160
Figure 49 : Le rendement d'extraction au CO ₂ supercritique de l'huile des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C	161
Figure 50 : Les indices d'acide des beurres extraits à l'hexane des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C	163
Figure 51 : Les indices d'acide des beurres extraits au CO ₂ supercritique des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C	163
Figure 52 : Les indices d'acide des huiles extraites à l'hexane des fruits stockés à 18°C et à -33°C	165
Figure 53 : Les indices d'acide des huiles extraites au CO ₂ supercritique des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C	165
Figure 54 : Les indices d'iode des beurres extraits à l'hexane des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C	167
Figure 55 : Les indices d'iode des beurres extraits au CO ₂ supercritique des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C	167
Figure 56 : Les indices d'iode des huiles extraites à l'hexane des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C	169
Figure 57 : Les indices d'iode des huiles extraites au CO ₂ supercritique des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C	169
Figure 58 : L'évolution de la dureté de l'amande de karité en fonction de la durée et du mode de stockage	183

Figure 59 : L'observation microscopique de l'amande de karité après 1 mois de stockage à -33°C	183
Figure 60 : L'observation microscopique de l'amande de karité après 1 mois de stockage à 18°C	184
Figure 61 : L'observation microscopique de l'amande de karité après 24 mois de stockage à -33°C	184
Figure 62 : L'observation microscopique de l'amande de karité après 24 mois de stockage à 18°C	185
Figure 63 : L'évolution de la dureté de la pulpe de l'aiélé en fonction de la durée et du mode de stockage	186
Figure 64 : L'évolution de la masticabilité de la pulpe de l'aiélé en fonction de la durée et du mode de stockage	187

LISTE DES PLANCHES

	Page
Planche 1 : L'arbre du karité	10
Planche 2 : Les fruits du karité	11
Planche 3 : Les graines de karité	12
Planche 4 : Les amandes de karité	12
Planche 5 : L'arbre de l'aiélé	17
Planche 6 : Les fruits de l'aiélé	19
Planche 7 : La pulpe des fruits de l'aiélé	19
Planche 8 : Les noyaux des fruits de l'aiélé	19
Planche 9 : Le beurre de karité	65
Planche 10 : L'huile de l'aiélé	75
Planche 11 : La photographie de la microbalance	97

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES

Symbole	Signification	Unité
P	Pression partielle de vapeur d'eau dans le produit	Pa
P^0	Pression partielle de vapeur de l'eau pure	Pa
A_w	Activité de l'eau	-
Hr	Humidité relative de l'environnement	%
M	Teneur en eau en base sèche	%g.g ⁻¹
M_0	Teneur en eau de la monocouche en base sèche	%g.g ⁻¹
$C_1, C_2, C_3, K, B, k,$ k_1, b, b_1, a, b, r	Constante	-
Q	Energie d'attraction intermoléculaire de la monocouche	cal/mol
R	Constante des gaz parfaits	J/mole K
T	Température absolue	°K
λ	Chaleur latente de vaporisation	J/kg
Q_s	Chaleur nette de sorption	kJ/mol
C, K	Paramètres empiriques du modèle de GAB	-
ι	Paramètre tenant compte de la structure de l'eau sorbée	-
c	Constante de solubilité	g/l
ρ	Masse volumique du CO ₂	kg/m ³
P(%)	Valeur moyenne relative du pourcentage de déviation	-
M_{ei}	Valeur expérimentale de la teneur en eau	%g.g ⁻¹
M_{pi}	Valeur théorique de la teneur en eau	%g.g ⁻¹
N	Nombre de données expérimentales	-
R^2	Coefficient de détermination	-
AGS	Acides gras saturés	-
AGM	Acides gras monoinsaturés	-
AGP	Acides gras polyinsaturés	-

RESUME

Dans cette thèse, la conservation des fruits du karité et de l'aiélé a été étudiée à travers l'établissement des isothermes de sorption d'eau de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé, et l'extraction des matières grasses des fruits stockés, dans le but de connaître l'état de l'eau dans les produits, les modifications physico-chimiques au cours de la conservation et de les stabiliser. La méthode microgravimétrique statique utilisant une microbalance *Sartorius 4201* à suspension magnétique a permis d'obtenir les isothermes de sorption des amandes de karité et de la pulpe des fruits de l'aiélé. La teneur en eau à l'équilibre augmente avec la diminution de la température de mesure. La pulpe de l'aiélé est plus hygroscopique que l'amande de karité à 25°C. A l'inverse, l'amande de karité est plus hygroscopique que la pulpe de l'aiélé entre 35 et 55°C. Parmi les modèles testés, le modèle d'Oswin décrit le mieux les données de sorption des deux produits sur toute la gamme d'activité de l'eau. Les isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé présentent le phénomène d'hystérésis entre 25 et 55°C. La conservation de ces oléagineux doit s'effectuer dans une atmosphère d'humidité relative comprise entre 40 et 60% (activités de l'eau de 0,4 et 0,6) afin d'obtenir des teneurs en eau recommandées (de 6,50 à 1,25% entre 25 et 55°C). Un modèle adapté de prédiction des isothermes de sorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé en deçà de 25°C et au delà de 55°C a été obtenu.

L'extraction de la matière grasse au CO₂ supercritique donne des rendements inférieurs à ceux obtenus de l'extraction à l'hexane. Les rendements d'extraction des beurres à l'hexane sont supérieurs à 40%, tandis que seul le stockage des fruits de l'aiélé à -33°C donne un rendement similaire. L'indice d'acide des matières grasses extraites au CO₂ est supérieur à celui des lipides extraits à l'hexane. Ces indices, pour les lipides extraits des produits stockés à 18°C, sont les plus élevés, soient 11,46 à 18,80 et 66,21 à 120,81 respectivement pour les beurres de karité et les huiles de l'aiélé. A -33°C, cet indice est

similaire à celui des fruits frais jusqu'au 5^{ème} mois (6,43 et 5,25 respectivement pour le beurre de karité et l'huile de l'aiélé). Quelque soient le mode de stockage et le solvant d'extraction, l'indice d'iode baisse avec le stockage. Les indices d'iode des lipides extraits à l'hexane sont supérieurs à ceux obtenus de l'extraction par le CO₂. L'extraction au CO₂ donne des beurres comprenant exclusivement les acides palmitique, stéarique, oléique et linoléique. A -33°C, les proportions des principaux acides gras (acides palmitique, oléique et linoléique) des huiles extraites à l'hexane et au CO₂ sont similaires. Le CO₂ présente une sélectivité vis-à-vis de l'acide linoléique. Les beurres extraits au CO₂ présentent les plus faibles taux de triglycérides, mais des taux d'acides gras libres et de diglycérides les plus élevés. Les huiles extraites à l'hexane et au CO₂ ont des proportions de triglycérides similaires à -33°C. Par contre, les huiles extraites au CO₂ donnent des taux d'acides gras libres et de monoglycérides les plus élevés. De façon générale, les triglycérides des beurres extraits à l'hexane des amandes stockées et de l'amande fraîche ont des proportions similaires, tandis que les taux de monoglycérides et de diglycérides sont supérieurs lors du stockage à 18°C. Il ressort des résultats que le stockage -33°C est le meilleur. Toutefois, il ne doit pas dépasser 5 mois. L'extraction des lipides au CO₂ supercritique doit utiliser les fruits frais ou stockés à -33°C. Ces résultats encouragent une plus grande investigation de ce type d'extraction, compte tenu de sa sélectivité. Les produits stockés à 18°C sont les plus durs. La dureté des produits est corrélée négativement à leur teneur en eau, mais positivement à l'indice d'acide des matières grasses y extraites.

Mots clés : *Vitellaria paradoxa* Gaertn. ; *Canarium schweinfurthii* Engl. ; isothermes ; modifications texturales ; conservation ; extraction ; matières grasses ; CO₂ supercritique.

ABSTRACT

In this thesis, the preservation of shea (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) and *Canarium* fruits was studied through the moisture sorption isotherms of sheanut kernels and *Canarium* pulp, and through the extraction of lipids from fruits stored under different conditions, in order to understand the state of water in these products, as well as the physico-chemical modifications of these products during storage. The static microgravimetric method using a *Sartorius 4201* microbalance of magnetic suspension was employed to determine the sorption isotherms of sheanut kernels and the pulp of the *Canarium* fruits. The equilibrium moisture content increased with decrease in temperature. The *Canarium* pulp was found to be more hygroscopic at 25°C than the sheanut kernels. On the other hand, sheanut kernel was more hygroscopic in the temperature range 35°C-55°C. Among the tested models, the Oswin model best described the sorption data of the two products in the whole water activity range. Hysteresis was observed in the entire temperature range 25-55°C for sheanut kernel and *Canarium* pulp. It is suggested that these products should be stored in an environment with a relative humidity of 40-60% (water activities of 0.4 - 0.6), in order to attain the recommended moisture content (6.50 to 1.25 between 25 and 55°C) for storage. A model was adapted to predict the sorption isotherms of shea and *Canarium* below 25°C and above 55°C.

The oil yields obtained with supercritical CO₂ were lower than those obtained with hexane. Shea butter yields obtained with hexane were greater than 40%. *Canarium* fruits stored at -33°C gave a similar extraction yield. The acid values of butter and oil extracted with carbon dioxide were greater than those of lipids extracted using hexane. The acid values of samples stored at 18°C were the largest (11.46 to 18.80 and 66.21 to 120.81 for shea butter and *Canarium* oil, respectively). At -33°C these acid values were similar to those of fresh fruits up to the fifth month (6.43 and 5.25 respectively for shea butter and *Canarium* oil). The iodine value of the oils decreased with an increase of the storage period, irrespective of the

storage temperature and the solvent used for extraction. The iodine values of lipids extracted with hexane were greater than those extracted with carbon dioxide. Extractions with carbon dioxide produced butter exclusively made up of palmitic, stearic, oleic and linoleic acids. *Canarium* oils extracted with hexane were principally made up of palmitic, oleic and linoleic acids. At -33°C the proportions of the principal fatty acids of oils extracted with hexane and carbon dioxide were quite similar. The extraction with CO₂ showed some selectivity and did not extract linolenic acid. The proportion of triglycerides of the butter decreased while the free fatty acids and diglycerides increased when carbon dioxide was used for extraction. The proportions of triglycerides of *Canarium* oils extracted with hexane and carbon dioxide were quite similar at -33°C, meanwhile the proportions of free fatty acids and monoglycerides extracted with carbon dioxide were higher compared to that extracted with hexane. In general, the proportions of triglycerides of butter extracted with hexane from the fresh and stored samples were similar, while those of the monoglycerides and diglycerides were higher in the fruits stored at 18°C. From the foregoing, it is suggested that storage at -33°C for up to 5 months presents the best means of preserving these products. Only fresh or fruits stored at -33°C should be used for the extraction of lipids using carbon dioxide. These results encourage greater investigations on the supercritical CO₂ extraction of these fatty materials because of its selectivity. The products stored at 18°C were the most hard. The hardness of these products was negatively correlated to their water content, but positively correlated to the acid value of fatty material extracted.

Key words: *Vitellaria paradoxa* Gaertn. ; *Canarium schweinfurthii* Engl. ; isotherms ; textural changes ; preservation ; extraction ; fatty materials ; supercritical carbon dioxide.

INTRODUCTION GENERALE

Le karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) et l'aiélé (*Canarium schweinfurthii* Engl.) sont deux oléagineux non conventionnels appartenant respectivement aux familles des Sapotaceae et des Burseraceae. Ils sont d'une grande importance à plus d'un titre. En effet, plusieurs travaux montrent que le karité et l'aiélé sont des sources potentielles de lipides. Ainsi, le karité produit des fruits dont l'amande interne est constituée d'environ 50% de beurre (Sopade & Koku, 1989 ; Tano Debrah & Ohta, 1994), et les fruits de l'aiélé comprennent une pulpe externe formée d'environ 40% de matière grasse (Agbo N'zi, Chatigre Kouamé & Simard, 1992 ; Jiokap Nono & Kapseu, 1999). Par ailleurs, sur le plan socioculturel et économique, les fruits du karité font l'objet d'un commerce intense (UNIFEM, 1997) et, les sous-produits et produits dérivés jouent un rôle important dans la vie (pharmacopée, us et coutumes) traditionnelle (Asubiojo, Guinn & Okunuga, 1982 ; Booth & Wickens, 1988). UNIFEM (1997) signale d'ailleurs que le karité représentait en 1985, avec un 1,96% du PIB (Produit Intérieur Brut), le troisième produit d'exportation dans l'économie Burkinabé. Il en est de même de l'aiélé dont les fruits sont source de revenus (Tchouamo, Tchoumboue, Simonet & Pinta, 2000) et les sous-produits et produits dérivés sont de grande utilité culturelle (Mbida Mindzie, 1999 ; Tchandjou Djoumbi, 1999). Leurs aires écologiques sont également très étendues. On retrouve le karité de l'Afrique de l'Ouest à l'Afrique de l'Est (Chevalier, 1946) avec des présences dans les zones septentrionale et méridionale du Cameroun. L'espèce *Canarium* se trouve en Afrique et en Asie (Mensier, 1946) tandis que *Canarium schweinfurthii* Engl. couvre les zones de forêt et de savane humide (Vivien & Faure, 1996) avec des présences signalées dans les provinces de l'Adamaoua et du Nord du Cameroun (Njoukam, 1998a). Il faut préciser que les périodes de production sont complémentaires (mai à août pour le karité et septembre à mars pour l'aiélé).

Au vu de l'importance et du rôle que jouent ces oléagineux, de nombreuses études y sont consacrées. Toutefois, les travaux menés jusqu'ici se sont essentiellement intéressés à

l'exploitation de ces oléagineux comme sources de beurre (karité) (Sopade & Koku, 1989 ; Tano-Debrah & Ohta, 1994 ; Womeni, Kamga, Tchiégang & Kapseu, 2002) ou d'huile (aiélé) (Agbo N'zi & Chatigre Kouamé, 1996 ; Ajiwe, Okeke, Ogbuagu, Ojukwu & Onwukeme, 1998 ; Kapseu, Jiokap.Nono & Parmentier, 1999 ; Tchiégang, Tchankou Leudeu, Kapseu, Fomethé & Parmentier, 2004). Cependant, l'exploitation des résultats jusqu'ici obtenus impose la connaissance de ces produits en conservation. Très peu de travaux sont consacrés à la conservation de ces deux produits. Nous pouvons citer, à notre connaissance, les études de SNV (1991) qui portent sur la conservation anaérobie des fruits du karité en tas (1 à 4 semaines) et en fosses (3 à 4 mois), et ceux de UNIFEM (1997) sur le conditionnement des amandes de karité. En ce qui concerne les fruits de l'aiélé, aucune étude n'est effectuée, l'entreposage ne servant ici que de relais avant écoulement des fruits vers les marchés. La durée d'entreposage est courte et les pertes post-récoltes avoisinent les 40% comme la plupart des produits agricoles tropicaux (Tchiégang, Kamga & Kapseu, 1998 ; Maldangoï, Woin & Cathala, 2003). Ces pertes sont dues à la faiblesse du développement des moyens de traitement et de conservation de ces produits. Ceci laisse sous-entendre l'influence de la teneur en eau des produits dont le rôle dans la stabilité des aliments est primordial (Cheftel & Cheftel, 1984). Or, la première étape dans la compréhension scientifique de l'état de l'eau dans les aliments, et donc leur conservation, est la détermination des isothermes de sorption. En effet, elles permettent, entre autres, de prévoir les changements de teneur en eau d'un produit pendant sa manipulation et son stockage (Martinez-Navarette & Chiralt, 1996). Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'est encore effectuée sur les isothermes de sorption des amandes de karité. Dans le cas de la pulpe de l'aiélé, seuls les travaux de Noumi, Ngameni, Kapseu et Broto (2003) portent sur les isothermes de désorption qui sont plutôt utiles en énergétique (séchage) et non sur celles d'adsorption qui sont exploitées en conservation. Ensuite, ces isothermes sont déterminées à des températures (50, 60 et 70°C)

éloignées des températures de stockage villageois et industriel, domaines non encore explorés actuellement. Il est, effectivement, souhaitable de faciliter le stockage villageois et industriel de ces oléagineux.

En outre, la richesse des matières grasses de ces oléagineux en acides gras insaturés (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.: 52,9%; *Canarium schweinfurthii* Engl. : 62,9% contre 50,1% pour l'huile de palme) (Kapseu, Jiokap Nono, Parmentier, Dirand & Dellacherie, 2001) les rend susceptibles à la dégradation (MSDA, 2005). D'autant plus que la période de production du karité (mai à août) coïncide avec la saison des pluies et, après la récolte, les fruits de l'aiélé (septembre à mars) sont entreposés dans des magasins en attendant écoulement vers les marchés. Ceci favorise l'activité physiologique des fruits, la germination des graines (SNV, 1991; UNIFEM, 1997). La conséquence est par exemple la variabilité de la qualité des beurres de karité (Karo, Baïdi & Dramane, 1988). Pour éviter les pertes pendant les périodes de production, il est indispensable d'en extraire les lipides. Traditionnellement, les populations locales extraient les huiles en utilisant l'eau comme solvant (Kassamba, 1997 ; N'Gouro Sanogo, 1997). De nombreuses autres études utilisent essentiellement les solvants organiques qui ne sont pas inertes et requièrent une opération ultérieure de séparation avec l'extrait. Nous pouvons citer le méthanol (Maranz, Wiesman & Garti, 2003), le chloroforme (Womeni *et al.*, 2002 ; Kapchie Noutchougoué, Tchiegang, Kapseu, Linder & Parmentier, 2004), l'éther de pétrole (Ajiwe *et al.*, 1998) et l'hexane (Agbo N'zi & Chatigre Kouamé, 1996 ; Kapseu *et al.*, 1999 ; Tchiégang, Tchankou Leudeu & Kapseu, 2003; Tchiégang *et al.*, 2004 ; Womeni, 2004). A l'inverse, le CO₂ supercritique est connu pour avoir plusieurs avantages dont son inertie vis-à-vis de l'extrait. Or à notre connaissance, aucune extraction des matières grasses de ces fruits n'a été effectuée au CO₂ supercritique.

Par ailleurs, en période de production, les fruits du karité non exploités sont stockés. Les études portant sur le stockage des graines de karité sont essentiellement ceux de Womeni

(2004) dans les conditions ambiantes (24,5°C), de réfrigération (chambres réfrigérées 12, 4 et 0°C) et de congélation (-18°C). Ces travaux sont limités à 2 mois et les résultats présentent d'importantes fluctuations qui ne permettent pas de prédire leur évolution après un stockage prolongé. Quant aux fruits de l'aiélé, les travaux sont ceux de Tchiégang, Kapchie Noutchogoué, Kapseu & Parmentier (2001) sur le stockage de ces fruits dans les conditions ambiantes (25°C), de réfrigération (2,3°C) et de congélation (-4°C). Toutefois, ils sont limités à 3 mois, à l'influence des conditions de stockage sur le ramollissement des fruits et ne font pas état de l'extraction des huiles au cours de ce stockage.

Sur un autre plan, la connaissance des paramètres texturaux des fruits contribuerait à prédire les indices de qualité des matières grasses. D'autant plus que les pertes proviennent essentiellement de l'attaque par les insectes et de la germination des graines de karité, ainsi que du durcissement des fruits de l'aiélé (Jiokap Nono & Kapseu, 1999). En effet, Kapchie Noutchogoué (2005) a trouvé qu'après 7 jours de stockage à $22 \pm 1^\circ\text{C}$, les fruits de l'aiélé présentent les pulpes les plus dures et l'huile à l'indice d'acide le plus élevé comparativement aux fruits soumis au ramollissement humide à $45 \pm 1^\circ\text{C}$ et à $70 \pm 1^\circ\text{C}$. La littérature en notre possession ne donne que l'influence de la teneur en eau, de la température et de la position de compression sur la dureté des amandes de karité prétraitées pendant 48 heures (Olaniyan & Oje, 2002) et les changements texturaux et biochimiques des pulpes des fruits d'aiélé frais conservés en solution et traités à la chaleur pendant 7 jours (Kapchie Noutchogoué, Tchiegang, Kapseu, Piffaut & Parmentier, 2005). Or ces travaux sont limités dans le temps et sur les fruits frais. Aucune étude, à notre connaissance, ne caractérise la texture de ces fruits en stockage et ne donne la relation entre cette texture et les caractéristiques chimiques des matières grasses.

Plusieurs autres raisons ont guidé notre étude sur les fruits du karité et de l'aiélé. Nous pourrions en citer quatre : géographique ; physiologique ; période de récolte et personnelle. Il

fallait trouver des produits qui couvrent si possible tout le Cameroun pour que les résultats de notre étude puissent bénéficier à la plus grande masse paysanne. D'une part, même si certains auteurs signalent la présence des fruits de l'aiélé dans la région soudano-sahélienne (Tchouamo & Simonet, 1999), ils poussent en régions de forêt équatoriale humide. Précisément, ils poussent dans le « grand Sud » du Cameroun, particulièrement à l'Ouest du pays. D'autre part, si l'on retrouve des cultures de karité dans la province de l'Ouest du Cameroun, c'est une espèce du « grand Nord ». Par ailleurs, si ces fruits sont des drupes, ils diffèrent de par leur physiologie. La pulpe de l'aiélé, partie externe du fruit, est exploitée pour l'obtention d'huile alors que dans le cas du karité c'est l'amande, interne au fruit, qui est utilisée. Cette étude pourrait permettre de comparer deux sources interne et externe (au fruit) d'huile pour les populations paysannes. Ces deux fruits ont des périodes de récolte complémentaires. Il n'y aura donc pas de rupture de stocks dans la mise en exploitation de ces fruits toute l'année. Enfin, c'est une motivation personnelle de travailler sur des fruits qui abondent dans ma région d'étude (Province de l'Adamaoua) pour le karité et dans ma région d'origine (Province de l'Ouest) pour l'aiélé.

En dehors des motivations géographique, physiologique, de récolte et personnelle, il ressort qu'aucune étude ne traite pas simultanément des isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé, de l'extraction au CO₂ supercritique des matières grasses de ces oléagineux, ne caractérisent pas ou peu leurs lipides sur une longue période. Enfin, les paramètres texturaux de ces deux produits au cours d'un stockage prolongé et, la relation entre ces paramètres et les caractéristiques chimiques des matières grasses n'ont pas été étudiés. Ces motivations nous ont conduit à viser à travers ce travail certains objectifs.

OBJECTIFS DU TRAVAIL

L'objectif général est d'étudier l'état de l'eau dans l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé, et les modifications physico-chimiques au cours de la conservation.

De manière spécifique, ce travail vise la détermination :

- des isothermes de sorption de l'eau qui permettront de connaître, à travers l'état d'équilibre entre la teneur en eau et l'activité de l'eau, les conditions de température et d'humidité relative de conservation de ces oléagineux ;
- de l'influence des conditions de stockage sur les rendements d'extraction, les caractéristiques chimiques des matières grasses extraites, les paramètres texturaux des fruits qui nous permettra de connaître la durée et la température qui accordent un rendement d'extraction (supérieur à 40%), des indices de qualité des lipides et les paramètres texturaux intéressants.

Ce travail a également pour objectif la comparaison des oléagineux à amande et à pulpe afin d'étendre l'étude à des produits similaires, et deux solvants (hexane et CO₂ supercritique) pour déterminer l'applicabilité de chacun vis-à-vis de ces oléagineux.

Pour atteindre ces objectifs, ce travail se fonde sur quelques hypothèses à vérifier.

HYPOTHESES

- Pour une teneur en eau à l'équilibre de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé, l'activité de l'eau dépend du type de produit et de la température
- Le CO₂ supercritique est plus sélectif que l'hexane lors de l'extraction des lipides du karité et de l'aiélé, et conduit à un rendement faible
- Les indices de qualité des lipides varient avec le temps et les conditions de stockage et sont linéairement corrélés aux paramètres texturaux

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 LES DONNEES BOTANIQUE, ETHNOBOTANIQUE ET COMMERCIALE

I.1.1 LE KARITE

I.1.1.1 L'arbre et le fruit

Le karité pousse à l'état sauvage et appartient à la famille des Sapotacées. Il est caractérisé par la présence du latex dans les organes. C'est un arbre de 15 à 20 m de hauteur (UNIFEM, 1997), avec un diamètre de 1 m (planche 1). Le karité présente des feuilles vert-sombre et caduques. La floraison a lieu entre décembre et mars, suivie directement par l'apparition des premières feuilles (Pehaut, 1976 ; Von Maydel, 1983). Selon une classification de Chevalier en 1946, on distingue plusieurs variétés de karité :

- *Mongolifolia* dont les feuilles sont semblables à celles du manguier et est subdivisée en plusieurs autres variétés :
 - *Cuneata* à feuilles cunéiformes à la base
 - *Serotina* à fruits à maturité tardive
 - *Paviflora*
- *Poissonni* à fruits pubescents dans leur âge ; on y distingue les sous variétés
 - *Ferriginea*
 - *Flocassa* dont les fruits sont gros
- *Nilaca* dont les pétioles sont pubescents et les fruits ellipsoïdaux.

Le karité possède plusieurs appellations qui diffèrent selon la région où l'on se trouve. On distingue ainsi :

Nom scientifique : - *Vitellaria paradoxa* Gaertn.

Autres noms scientifiques : - *Butyrospermum parkii* (G. Don) Kotschy

- *Butyrospermum paradoxum* subsp. *Parkii* (G. Don) Hepper

Noms pilotes et commerciaux : - Karité, arbre à beurre (Français)

- Shea (Anglais et Allemand)

Noms vernaculaires: - Karehi (Ffuldéd)

- Souaré (Tupuri)

- Quiré (Mudang)

Noms vulgaires du beurre : - Beurre de karité ou de cé ou de shée (Français)

- Shea butter (Anglais)

- Sheabutter (Allemand)



Planche 1 : L'arbre du karité

L'âge de production de l'arbre du karité est de 15 à 20 ans, avec des récoltes importantes entre 50 et 100 ans. Cette production, irrégulière, est en moyenne de 20 kg de fruits par arbre, soient 6 kg d'amandes, 4 kg d'amandes sèches et 1,5 kg de beurre.

La période de production des fruits de karité s'étend de mai à août. Elle est fortement influencée par la pluviométrie. La cueillette proprement dite commence à partir du mois de mai. Elle se fait par ramassage des fruits tombés ou par secouement des branches de l'arbre (Adoum, 1996). Activité essentiellement féminine, elle a généralement lieu tôt le matin vers 4 heures, en marge des autres travaux champêtres. Les fruits obtenus en secouant les branches donnent des beurres recherchés par les industries

cosmétiques (taux d'acidité plus faible), et ceux ramassés au pied de l'arbre sont riches en beurre (UNIFEM, 1997). Toutefois, les fruits restés longtemps au sol germent et donnent des beurres de mauvaise qualité (Karo *et al.*, 1988).

Les fruits mûrs sont comestibles, de couleur verte et de forme arrondie. Le fruit du karité (planche 2) est constitué de l'extérieur vers l'intérieur d'une péricarpe sucrée et comestible, d'une (parfois deux ou trois) graine (planche 3) comprenant une fine coque et d'une amande (planche 4) qui comprend deux cotylédons et contient environ 50% de matière grasse (Kapseu *et al.*, 1999). Il a une masse moyenne de 4,5 g pour une longueur moyenne de 4 cm et un diamètre moyen de 4,5 cm. La masse de la graine représente environ 50% de celle du fruit frais.



Planche 2 : Les fruits du karité



Planche 3 : Les graines de karité



Planche 4 : Les amandes de karité

Aviara et Haque (2001) travaillant sur la dépendance des propriétés thermiques (5 températures) des amandes de karité par rapport à la teneur en humidité (4 teneurs en eau), trouvent que la chaleur spécifique des amandes augmente linéairement avec la teneur en humidité. Il en est de même de la conductibilité thermique des amandes broyées. La masse volumique des amandes broyées est inversement proportionnelle à la teneur en eau. Cependant, celle de l'amande entière en est le contraire dans l'intervalle 3,32 et 20,70%. La diffusivité thermique des « poudres » est linéairement liée à la teneur en humidité.

Le tableau 1 donne la composition chimique de l'amande des fruits du karité. Il montre l'importance quantitative des lipides et des glucides. En effet, Kapseu *et al.* (2001) indiquent une teneur en beurre comprise entre 45 et 50%. Par contre, la teneur en minéraux est la plus faible, suivie de la teneur en protéines. Les travaux de Manranz *et al.* (2003) sur l'amande de karité du Burkina Faso, du Cameroun, du Tchad, d'Ethiopie, de Guinée, de Gambie, du Mali, du Nigeria, du Sénégal et de l'Ouganda indiquent une richesse en constituants phénoliques (composés de catéchine et d'acide gallique).

Tableau 1: La composition chimique des amandes de karité

Caractéristiques (% MS)	Duke & Atchley (1986)	Tano Debrah & Ohta (1994)
Lipides totaux	52,60	59,04
Graisse brute		54,85
Azote total		1,37
Protéines brutes	7,30	7,81
Cendres totales	1,80	2,57
Hydrates de carbone (par différence)	38,20	34,77
Sucres solubles dans l'alcool		5,45
Amidon		7,59
Substances pectiques		2,93
Hemicellulase		10,84
Cellulose		5,95
Fibres totales	5,60	20,35

1.1.1.1.1 L'aire de distribution du karité

D'après Kassamba (1997), le karité est un arbre qui pousse exclusivement en Afrique et dont l'aire écologique correspond au climat soudano-sahélien avec une pluviométrie jusqu'à 1000 mm et deux saisons bien distinctes et une longue période sèche. Les sols de latérite doivent être bien drainés. Sa zone de production s'étend de l'Afrique de l'Ouest à l'Afrique Centrale, avec une présence signalée dans certaines régions d'Afrique de l'Est. Sa limite méridionale s'étend de la Côte d'Ivoire au Nigeria en passant par le Niger, le Mali, le Burkina Faso, le Togo, le Ghana et le Nord du Bénin. Son aire de distribution traverse aussi le Nord du Cameroun et va jusqu'au Lac Tchad, et au Nord de

l'Ouganda. Cette aire correspond à un domaine entre le huitième et le douzième degré de latitude Nord, et de l'Ouest en Est (Pehaut, 1976) comme le montre la figure 1. Au Cameroun, le Karité se retrouve dans la zone septentrionale (Provinces de l'Adamaoua, du Nord et de l'Extrême Nord). Toutefois, sa présence est signalée dans certaines zones de la forêt équatoriale, notamment dans les provinces de l'Ouest et du Nord-Ouest.

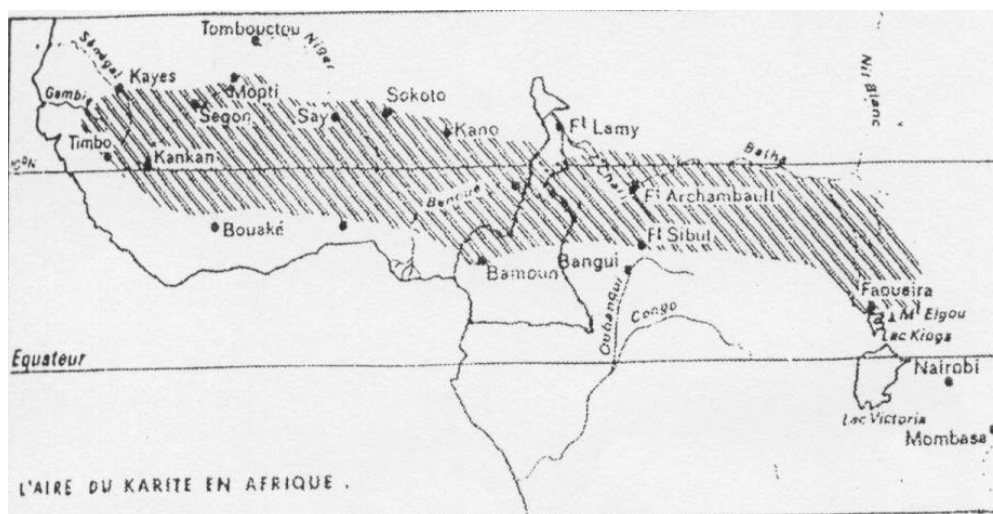


Figure 1 : L'aire de distribution du karité en Afrique (Chevalier, 1946)

1.1.1.1.2 Les utilisations du karité

Les utilisations des fruits du karité sont nombreuses et diverses selon les localités et les cultures. Initialement dépendantes des besoins locaux, elles sont aussi aujourd'hui industrielles.

a. Les utilisations locales

La pulpe du fruit est consommée par les hommes et les animaux. Elle possède une légère action laxative. Les feuilles sont utilisées pour augmenter le rendement d'extraction du beurre. La décoction des jeunes feuilles est utilisée, en bain de vapeur, contre les céphalées. Les feuilles sont particulièrement recherchées par les abeilles. Ce qui favorise l'installation des ruches à proximité de ces arbres et facilite l'apiculture traditionnelle.

Au Nigeria, les méthodes traditionnelles d'hygiène entraînent l'utilisation des racines de karité pour brosser les dents avec une remarquable efficacité (Asubiojo *et al.*, 1982). Avec l'écorce grise-brunâtre on traite les plaies, et les diarrhées vertes.

Le bois rougeâtre et dur est utilisé en charpenterie, menuiserie et en ébénisterie (Booth & Wickens, 1988 ; Adoum, 1996). Le tourteau est employé comme combustible, engrais et aliment pour animaux.

Le latex, quant à lui, entre dans la confection des pièges à glue et d'isolant. Il entre également dans la fabrication de gomme à mâcher. Les chenilles du karité sont consommées par les populations compte tenu de leur grande richesse en protéines.

Le produit principal du karité est son beurre. Il joue un important rôle économique tant localement que national et international. Le beurre de karité est utilisé dans la confection des sauces et des fritures. Il sert dans les produits cosmétiques.

b. Les utilisations industrielles

Il est utilisé dans les industries agro-alimentaires. En effet, il est employé en confiserie, biscuiterie, pâtisserie et principalement en chocolaterie. On l'utilise comme substitut du beurre de cacao en raison de son point de fusion élevé (UNIFEM, 1997 ; PAF, 1999). En cosmétique et pharmacologie, le beurre de karité entre dans la fabrication des crèmes des laits de corps, des produits capillaires, des lotions et des savons. Ceci s'explique par ses propriétés hydratante, revitalisante et protectrice, de même que par sa teneur en insaponifiables et en glycérine. Il est employé en pharmacie pour fabriquer des revitalisants et des cicatrisants.

1.1.1.1.3 La commercialisation des fruits et des produits du karité

Il est difficile de donner avec exactitude la production de karité, car une partie considérable est vendue en Afrique au niveau régional ou est utilisée pour les besoins domestiques. Toutefois, la commercialisation se fait également au niveau mondial. La

vente des produits du karité se fait sous forme d'amandes séchées, de pâte d'amande et de beurre.

La production de graines en Afrique de l'Ouest était estimée en 1913 entre 200.000 et 300.000 t, et à 500.000 t en 1975 dont 4% seulement parvenait sur le marché mondial. Les principaux pays exportateurs du karité et de ses produits sont le Nigeria, le Ghana, la Côte d'Ivoire, le Mali et le Bénin. Cependant, les principaux producteurs sont le Burkina Faso, le Mali, le Nigeria, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo et le Bénin (PAF, 1999). En 1980, la production annuelle moyenne d'amandes est de 60000 t au Burkina Faso et de 45000 t au Mali pour des exportations respectives de 12000 t et de 9000 t (UNIFEM, 1997).

Les principaux importateurs de karité sont la Communauté Economique Européenne (CEE), le Japon et les pays de l'Europe de l'Est. UNIFEM (1997) signale qu'en 1990 les importations de karité de la CEE étaient de 4000 t et 9200 t pour le Japon. Le même auteur mentionne qu'en 1992 les importations étaient de 11900 t pour la CEE et pour le Japon 5076t.

I.1.2 L'AIELE

I.1.2.1 L'arbre et le fruit

L'aiélé (*Canarium schweinfurthii* Engl.) est un grand arbre très répandu en Afrique subsaharienne (Aubreville, 1959). De la famille des Burséracées, il a une hauteur qui peut atteindre 25 à 40 m et un tronc d'environ 1,50 m de diamètre (Njoukam & Peltier, 2002) (planche 5). Il est recouvert d'une écorce claire d'environ 1 cm d'épaisseur, fissurée longitudinalement de tranches roses, et qui laisse exsuder une résine odorante qui devient opaque à l'air (Raponda-Walker & Sillans, 1961 ; CTFT, 1989 ; Njoukam, 1998a).

Selon Mensier (1946), les autres espèces de *Canarium* sont : *Canarium luzonicum*, *Canarium ovatum*, *Canarium pachyphyllus*, *Canarium oleosum*, *Canarium commum* et *Canarium polyphyllum*.



Planche 5 : L'arbre de l'aiélé

L'aiélé possède plusieurs appellations, dont :

Nom scientifique : - *Canarium schweinfurthii* Engl.

Autres noms scientifiques : - *Canarium occidentale* A. Chev.

- *Canarium velutinum* Guillaum

- *Canarium khiala* A. Chev

Noms pilotes et commerciaux : - Aiélé (Français)

- *Canarium* (Anglais et Allemand)

Au Cameroun, dans le département du Mbam et Kim, la tribu Sanaga l'appelle *mbembèrèquè*. En fufuldé, l'aiélé est appelé *darman*. Le tableau 2 présente d'autres appellations de l'aiélé selon le pays ou l'ethnie considérée.

Tableau 2 : Les noms vernaculaires de *C. schweinfurthii* Engl. (Njoukam, 1998a, 1998b)

Pays	Ethnies	Noms vernaculaires
Cameroun	<i>boulou et ewondo</i>	<i>abel</i>
	<i>bamoun</i>	<i>mbure</i>
	<i>bamiléké</i>	<i>bé, mbeu, mbi, mbuhé</i>
	<i>ngouba</i>	<i>bel</i>
	<i>pygmée</i>	<i>béle, sene</i>
	<i>gbaya</i>	<i>bili, gbéri</i>
	<i>bassa</i>	<i>héhé</i>
	<i>bakoko</i>	<i>libel</i>
	<i>douala</i>	<i>sao eyidi</i>
	<i>bakweri</i>	<i>wotwa</i>
Côte d'Ivoire	<i>fang</i>	<i>abel</i>
	<i>abé</i>	<i>aiélé</i>
Nigeria	<i>yoruba</i>	<i>ako, origbo</i>
Ghana	<i>ashanti</i>	<i>bedivuruna</i>
Centrafrique	<i>g'baya</i>	<i>gberi</i>
Gabon	<i>galao</i>	<i>owélé</i>
	<i>bakélé</i>	<i>abelé</i>
	<i>beseke</i>	<i>ubéli</i>
	<i>benga</i>	<i>ébélo</i>
	<i>mindumu</i>	<i>mibili</i>
	<i>loanga</i>	<i>mbili</i>
	<i>apindi</i>	<i>obélé</i>
	<i>ivéa</i>	<i>obée</i>
	<i>ngowé</i>	<i>mukeba</i>
	<i>mende</i>	<i>mbele</i>
Sierra Leone	<i>mende</i>	<i>mbele</i>
Libéria	<i>bayombi</i>	<i>m'bili</i>
Congo	<i>lokundu</i>	<i>mbele</i>
Zaïre		

Les feuilles sont caduques, alternes et composées. La floraison, irrégulière, a lieu après la feuillaison. L'arbre produit à partir de l'âge de 8 ans et croît de 4 cm par an (Njoukam, 1998b). La période de production s'étend de septembre à mars au Cameroun. Ses fruits (planche 6) sont des drupes ellipsoïdales violacées à maturité, proches en apparence aux fruits d'olivier (*Olea europea*). D'où le nom "olives africaines" qui leur est donné. Ils ont une longueur de 3 à 4 cm et un diamètre de 1,2 à 2 cm. La pulpe charnue (planche 7) et comestible recouvre un noyau trigone de 2,5 à 3 cm de longueur pour 1 à 1,5 cm de diamètre. Ce noyau (planche 8) comprend 3 lobes dont une seule est fertile

(Agbo N'zi & Chatigre Kouamé, 1996). Un fruit a une masse moyenne de 7 g, soit 50% pour la pulpe et 50% pour le noyau (CTFT, 1989; Agbo N'zi *et al.*, 1992).



Planche 6 : Les fruits de l'aiélé



Planche 7 : La pulpe des fruits de l'aiélé



Planche 8 : Les noyaux des fruits de l'aiélé

Quelques travaux effectués sur la composition chimique de la pulpe des fruits de l'aiélé sont présentés dans le tableau 3. Comme l'amande de karité, la pulpe est une source importante de lipides (30 à 50%). La fraction glucidique vient en second avec 18%. Par contre, les teneurs en protéines et en minéraux sont faibles.

Tableau 3: La composition chimique de la pulpe de l'aiélé

Caractéristiques (% MS)	Agbo N'zi <i>et al.</i> (1992)	Ajiwe <i>et al.</i> (1998)	Tchiégang, Kapchié Noutchougoué, Mbofung et Kapseu (2000)
Matière sèche	43,9	79,9 ± 3	45,13 - 57,19
Lipides totaux	40 ± 10	38,0 ± 5	31,70 - 42,14
Cendres totales	8,3 ± 0,25	2,52 ± 0,40	3,58 - 6,21
Protéines	5,6 ± 0,08	3,04 ± 0,50	2,59 - 3,93
Sucres totaux		32,8	21,22 - 36,95
Fibres brutes		2,5 ± 1	5,63 - 6,40
Composés phénoliques totaux			0,47 - 0,77
Amidon	8,2 ± 0,4		
Cellulose	11,8 ± 0,3		
Calcium	0,4 ± 0,04		
Phosphore	0,08 ± 0,02		
Potassium	1,2 ± 0,15		
Sodium	0,02 ± 0,002		

1.1.2.1.1 L'aire de distribution de l'aiélé

Canarium se retrouve en Asie (Philippines et Malaisie), au Sud de l'Inde tel que le présente la figure 2 (Mensier, 1946). Son aire de distribution est donc très vaste. L'aire de production de l'espèce *Canarium schweinfurthii* Engl. est très étendue en Afrique au Sud du sahara. Sa limite septentrionale s'étend de la Sierra Leone au Soudan et sa limite méridionale de l'Angola au Tanganyika (Aubreville, 1959 ; Agbo N'zi, 1986; Vivien & Faure, 1996).

L'aiélé est une espèce de forêt équatoriale humide mais sa présence est signalée dans la zone soudano-guinéenne (Tchouamo & Simonet, 1999).

Au Cameroun, l'aiélé se retrouve dans toute la zone de forêt dense humide, et celle de la savane humide et subhumide d'altitude (Vivien & Faure, 1996 ; Njoukam, 1998b ;

Tchouamo *et al.*, 2000). Toutefois, sa densité est plus élevée dans la zone de savane humide des hauts plateaux de l'Ouest. La figure 3 présente la répartition de *Canarium schweinfurthii* Engl. au Cameroun.

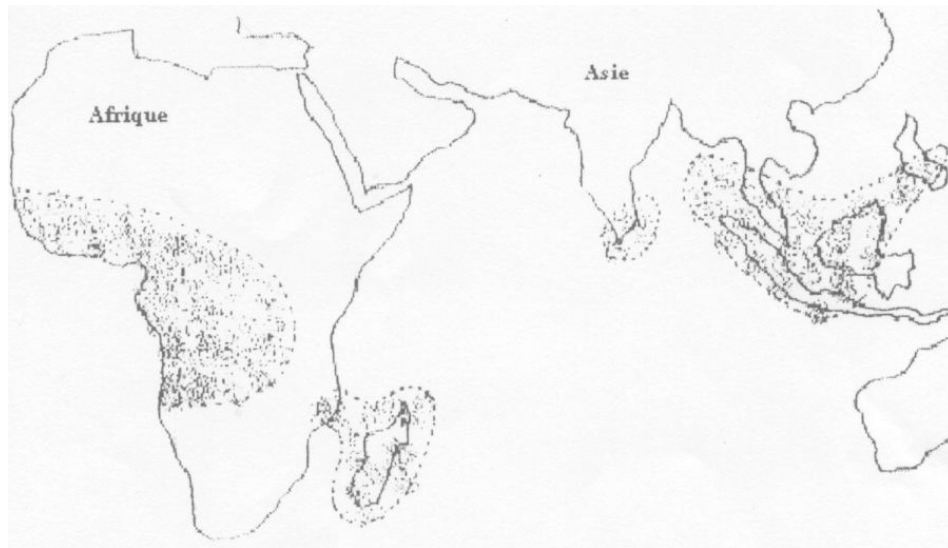


Figure 2 : L'aire de distribution du *Canarium* (Mensier, 1946)

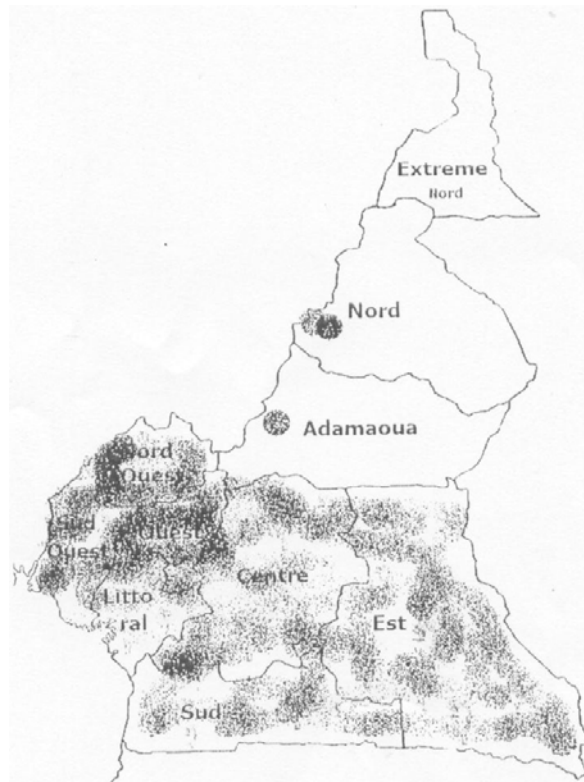


Figure 3 : L'aire de distribution du *Canarium schweinfurthii* Engl. au Cameroun (Njoukam, 1998b)

1.1.2.1.2 Les utilisations de l'aiélé

Plante à usages multiples, l'aiélé est une source d'aliment, de médicaments, de revenus et de richesse culturelle (Mbida Mindzie, 1999). Toutes les parties de l'arbre sont utilisées.

La pulpe est la partie comestible du fruit. Elle est consommée après ramollissement comme fruit de bouche ou pour accompagner les tubercules (Njoukam, 1998a). Elle peut également être transformée et utilisée pour la préparation des beignets, galettes et croquettes (Tchandjou Djoumbi, 1999). La richesse en huile des fruits de l'aiélé fait de cette plante une source potentielle de lipides.

Les noyaux servent de décoration des maisons, de jouets pour les enfants et à la fabrication d'instruments de musique (castagnettes) (Tchouamo *et al.*, 2000).

Les fruits de l'aiélé font l'objet d'un commerce intense entre les zones de production et les centres urbains. Ils constituent alors pour les populations productrices une source importante de revenus, ainsi que pour de nombreux intermédiaires qui sont employés dans cette filière.

On reconnaît également à l'aiélé des utilisations médicinales. En effet, le décocté des feuilles est un médicament contre la fièvre typhoïde (Aubreville, 1959). Les noyaux des fruits bouillis et refroidis, sont introduits dans un verre d'eau et utilisés contre l'angine. Le mélange de cendres des noyaux et de l'huile (palme ou palmiste) traitent les maladies gastro-intestinales chez les Hommes et la coccidiose chez les animaux domestiques.

La décoction de l'écorce est un médicament, dans de nombreux pays (Congo, Sierra Leone et Nigeria), contre les parasites gastro-intestinaux, les maladies respiratoires, les hémorroïdes, les intoxications alimentaires, les ictères et la blennorragie (Tchouamo *et al.*, 2000). L'écorce brûlée permet de lutter contre les charançons (Tchandjou Djoumbi, 1999). Il est un ingrédient du philtre.

La résine sert de fumigeant (insecticide) domestique en Ouganda. Elle soigne les eczéma au Congo. La résine est un combustible pour des torches traditionnelles, pour réchauffer les tamtams, et coller les canaris et les calebasses fendus. Elle sert également à la fabrication de l'encens (Njoukam, 1998a ; Tchouamo *et al.*, 2000).

1.1.2.1.3 La commercialisation des fruits et des produits de l'aiélé

Des zones de production à celles de consommation, les fruits de l'aiélé font l'objet de commerce international, notamment dans les régions de la savane subtropicale et dans les grandes métropoles du Cameroun. En effet, les principaux marchés que sont les grands

centres urbains (Douala et Yaoundé au Cameroun) et certains pays voisins (Jiokap Nono & Kapseu, 1999 ; Tchouamo *et al.*, 2000), sont éloignés des producteurs. Et entre les deux on distingue parfois des intermédiaires, notamment dans les hautes terres de l'Ouest du Cameroun. Si en amont on rencontre plus les hommes, les commerçants en aval (demi-grossistes et détaillants) se recrutent majoritairement dans la gent féminine. Dans le circuit de commercialisation de ces fruits, la marge bénéficiaire augmente du producteur au distributeur. Tchouamo *et al.* (2000) signalent pour les grimpeurs une marge bénéficiaire de 20 FCFA, pour les grossistes une marge de 55,6 FCFA, pendant qu'elle est chez les détaillants de 118,70 FCFA. Les mêmes auteurs rapportent que dans le département du Bamboutos, province de l'Ouest (Cameroun), ce commerce se chiffre par saison à 27 millions de FCFA. Les marchés des fruits de l'aiélé sont bien organisés, mais le manque de statistiques rend difficile la quantification des productions annuelles.

En définitive, la littérature sur les données botaniques, ethnobotaniques et commerciales du karité et de l'aiélé relève qu'ils appartiennent respectivement aux familles des Sapotaceae et des Burseraceae. Ils ont une aire de distribution très étendue en Afrique. Alors que le karité est une espèce des climats soudano-sahéliens, l'aiélé pousse essentiellement dans les zones de forêt équatoriale humide. Les périodes de production sont complémentaires (mai à août pour le karité et septembre à mars pour l'aiélé). Ils produisent des fruits essentiellement riches en lipides. Les parties les plus exploitées à cet effet sont, pour le karité, l'amande et, pour l'aiélé, la pulpe. La pulpe des deux fruits est comestible. Par contre, l'amande du karité ne l'est pas. Tous ces fruits font l'objet d'un commerce intense, régional et même international. Ces deux filières sont essentiellement féminines et constituent des sources de revenus pour les populations paysannes. Le karité et l'aiélé sont également d'utilisations multiples.

I.2 LA CONSERVATION DES FRUITS DU KARITE ET DE L'AIELE

Avant les diverses transformations, les produits agricoles récoltés sont généralement conservés pour étendre la période d'utilisation, les préserver des facteurs de détérioration ou leur apporter une valeur ajoutée.

D'après Le Petit Larousse (2004), la conservation désigne sur le plan agroalimentaire l'action de maintenir en bon état, de préserver de l'altération les denrées alimentaires par divers procédés.

Il est important, par exemple dans l'entreposage des graines oléagineuses d'inactiver la lipase endogène et d'empêcher toute action exogène résultant du développement des moisissures et des levures. Sur le plan technologique, une meilleure conservation améliorerait considérablement la qualité et le rendement de la matière grasse des fruits du karité et de l'aiélé sans opérations ultérieures (raffinage) qui augmente les coûts de production et d'investissement. Il facilite par là également la transformation en huile par la méthode traditionnelle et accroît la durée de stockage des fruits sans conséquences sur la qualité de l'huile obtenue (SNV, 1991).

I.2.1 LE KARITE

La période de récolte des fruits de karité coïncide avec la saison des pluies. Les femmes stockent les fruits et les graines destinés à la transformation pour plus tard. Les modes de conservation varient selon les régions. La conservation des fruits de karité se fait en tas ou dans les fosses aménagées. Elle peut consister en un conditionnement des amandes. Dans ce cas, les femmes dépulpent d'abord les fruits avant de procéder au stockage des graines en tas, dans des récipients contenant ou non de l'eau. Souvent après dépulpage des fruits, elles procèdent plutôt à la cuisson des graines, suivie de leur séchage et de leur fumage (SNV, 1991 ; UNIFEM, 1997 ; PAF, 1999).

I.2.1.1 Le stockage en tas et en fosses

L'Association Néerlandaise d'Assistance au Développement (SNV) en 1991 trouve que le stockage des fruits en conditions anaérobies (tas, en fosses fermés) limite l'action des lipases dans les amandes. Après 4 semaines de conservation des fruits, elle trouve que le beurre a une teneur en acides gras libres faible (1%). La conservation des fruits est effectuée de deux manières :

- sur et sous une feuille en plastique, recouverte par de la terre et des cailloux ;
- dans un sac en plastique fermé et mis dans un trou recouverte de terre ;

Par ailleurs, pendant 4 mois, le même auteur conserve les fruits de karité dans des trous (profondeur 1 m et diamètre 0,70 m) à fond et parois crépis pour éviter le pourrissement des fruits. Les fruits sont couverts de feuilles de bananier ou en plastique, avant d'être recouverts de mélange de couche d'argile et de sable d'au moins 30 cm. L'action des lipases endogènes est alors arrêtée. Les conditions anaérobies et la limitation de l'humidité de la fosse sont des contraintes à respecter.

I.2.1.2 Le conditionnement des graines et des amandes

Les fruits collectés sont dépulés par pourrissement dans les fosses ou manuellement. Un dépulage par enfouissement de plus d'une semaine peut provoquer la germination des graines dont une des conséquences est le goût amer du beurre. La germination favorise la croissance et l'action des enzymes lipolytiques (lipases) qui hydrolysent les triglycérides. Ceci augmente le taux d'acides gras libres (Kassamba, 1997).

Après le dépulage, les graines sont cuites pour désactiver les enzymes (lipases), sécher (au soleil ou au four) jusqu'à dégagement des amandes des coques (vérifier par émission de bruit sec). Le séchage solaire doit être mené avec minutie afin d'éviter le développement des moisissures sur les amandes (SNV, 1991). Certaines techniques

traditionnelles (Burkina Faso, Sénégal, Mali et Tchad) procèdent au fumage des graines après séchage. A ce stade, les graines sont stockées en l'état ou décortiquées et les amandes conservées. Les amandes sont disposées sur les étagères au-dessus du feu allumé en continue (Adoum, 1996) ou mélangées à de la cendre pour éviter l'entrée des insectes avant stockage dans des jarres en terre (UNIFEM, 1997) ou dans les sacs en jute (PAF, 1999). Ainsi stockées, les amandes de karité peuvent durer des mois et des années en fonction des précautions de traitement.

Ici, le taux d'humidité des amandes doit rester le plus bas possible pour éviter une germination des graines. Car, au cours du stockage en tas, la respiration des graines et l'interaction avec les microorganismes produit de la chaleur qui élève la température. Cette élévation combinée à la teneur en eau favorise la lipolyse (Bouix & Leveau, 1991 ; Moreau, 1996).

I.2.1.3 Les autres méthodes de conservation

Au Burkina Faso, les graines sont stockées à l'état cru en tas ou dans des canaris contenant de l'eau (SNV, 1991). Le séchage des graines bouillies n'est pas surveillé, et cela augmente la durée de séchage et favorise le développement des moisissures. Une visite de terrain a permis de constater qu'à Bambi, banlieue de la ville Ngaoundéré dans la province de l'Adamaoua au Cameroun, les graines de karité sont également stockées en tas : à la cuisine ; à même la terre ferme (humidité relative 71% et température 25,6°C) ; à côté des habitations (humidité relative 67% et température 23,1°C) ou sous les étagères. Certaines femmes stockent les graines de karité, en dessous des greniers à céréales familiaux (humidité relative 71% et température 23,4°C), les graines bouillies sont parfois conservées sur la terre ferme au soleil, sur la terre ferme à l'abri du soleil ou dans desalebasses. Les amandes sont soumises à l'humidité, aux charançons et aux insectes qui favorisent l'action des lipases. Des essais de stockage par le froid (réfrigération et

congélation) ont été effectués pendant 2 mois par Womeni (2004), mais ces conditions accélèrent l'oxydation des beurres obtenus.

Au regard de ce qui précède, les fruits du karité sont conservés en voie anaérobie, ou les graines et les amandes sont conditionnées de façon à être préservées de l'altération. Toutefois, la coïncidence de la période de récolte des fruits de karité et de la saison des pluies renvoie la conservation minutieuse des fruits du karité au second plan. Il en résulte une action des lipases et un développement des moisissures. Il y a également un manque d'espace de stockage. La conservation des fruits du karité n'aborde pas précisément les conditions de conservation qui les préservent des facteurs de détérioration et augmentent les capacités de stockage des paysans.

I.2.2 L'AIELE

Dans les hautes terres de l'Ouest Cameroun, après ramassage, les fruits de l'aiélé conditionnés sont gardés dans les habitations ou dans les lieux tenant lieu de magasin familial (Tchouamo *et al.*, 2000; Jiokap Nono & Kapseu, 1999). En fait, ces lieux servent plutôt d'abri en attendant l'écoulement vers les marchés. Les produits sont aussi soumis ici à l'action de l'humidité, des charançons et des insectes. D'autre part, les résultats de l'enquête effectuée auprès des femmes et hommes originaires des zones productrices des provinces de l'Ouest et de l'Adamaoua confirment cet état de choses. En effet, à Ngaoundal, chef lieu du département du Djerem, province de l'Adamaoua (Cameroun), les fruits ramassés au pied des arbres sont directement ramollis à l'eau tiède et vendus cuits. Ceux destinés à la vente sont directement amenés au marché. Cette procédure a pour objectif d'annuler les risques de pourrissement et de durcissement. Cependant, Tchiégang *et al.* (2001) ont expérimentalement effectué le stockage de ces fruits à 25°C, 2,3°C et -4°C, et le taux de ramollissement des fruits stockés en congélation était proche de celui du jour de la cueillette.

En définitive, les fruits de l'ailé, avant écoulement, sont conservés dans des conditions ambiantes non maîtrisées qui seraient favorables aux altérations. Les essais d'autres méthodes de stockage ne sont qu'au début et ne déterminent pas les conditions de conservation des fruits de l'ailé.

I.2.3 LES ISOTHERMES DE SORPTION

La conservation des produits alimentaires dépend étroitement de nombreux facteurs dont la température, le potentiel redox, le pH et l'activité de l'eau. On considère en général qu'une activité de l'eau inférieure à 0,6 préserve les produits des réactions de dégradation. En effet, le développement des microorganismes est inhibé et les enzymes sont inactivées (figure 4). Les isothermes sont intéressantes en ce sens qu'elles donnent les conditions (température, humidité relative) qui protège le mieux les produits (Labuza, Tannenbaum & Karel, 1970 ; Cheftel & Cheftel, 1984).

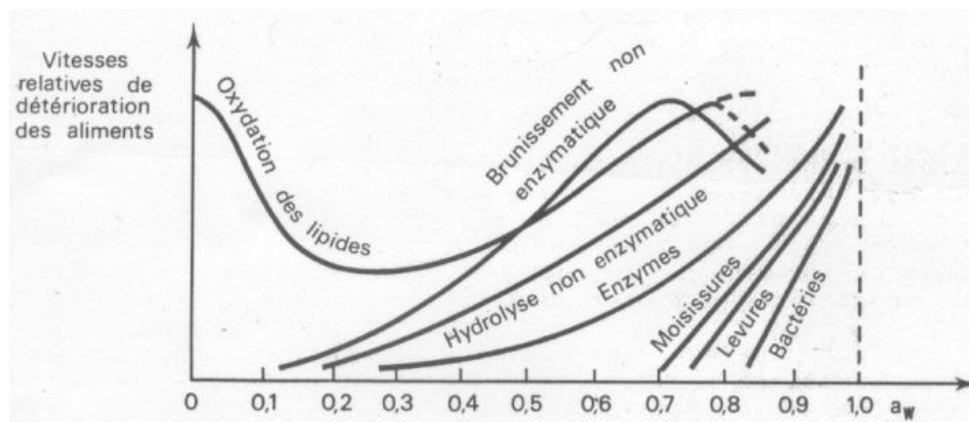


Figure 4: L'influence de l'activité de l'eau sur les diverses réactions de dégradation des produits alimentaires lors de la conservation (Cheftel & Cheftel, 1984)

I.2.3.1 L'état et l'activité de l'eau dans les aliments

Dans un matériau, l'eau titrable est sous trois formes : eau libre (eau capillaire) dans les cavités dont la quantité est limitée par la porosité ; eau liée (eau adsorbée) sur et

dans les parois du squelette solide ; et enfin la vapeur d'eau mélangée à l'air dans les espaces vides non saturés d'eau libre (Nadeau & Puiggali, 1995).

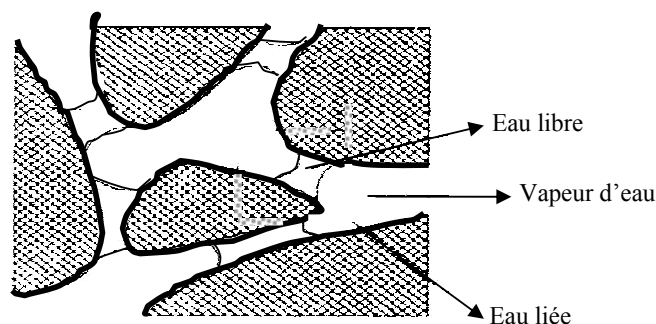


Figure 5: Les états de l'eau dans un matériau humide (Nadeau & Puiggali, 1995)

Selon le degré de disponibilité de l'eau dans les matériaux végétaux et animaux, on parlera d'eau libre ou d'eau liée. La différence entre ces deux états est caractérisée par une différence de propriétés physiques dont la pression partielle de vapeur. Maximale pour l'eau libre, elle l'est moins quand l'eau est liée. La disponibilité de l'eau dans un aliment, encore appelée activité de l'eau et notée A_w , peut donc être obtenue par la mesure du rapport des pressions partielles.

L'activité de l'eau d'un produit se définit par rapport à un état de référence qui est celui de l'eau pure dont l'activité est égale à 1. Elle est le rapport entre la pression partielle de l'eau dans le produit et la pression partielle de l'eau pure à la même température (Cheftel & Cheftel, 1984 ; Rizvi, 1986 ; Saravacos, 1986) :

$$\frac{P}{P^0} = A_w \quad (1)$$

P est la pression partielle de vapeur d'eau dans le produit, et P^0 la pression partielle de vapeur de l'eau pure.

L'activité de l'eau d'un aliment est toujours inférieure ou égale à 1. Ceci est dû à la fixation partielle des molécules d'eau par les constituants du produit. Cette fixation réduit l'aptitude de l'eau à s'évaporer et à réagir chimiquement (Cheftel & Cheftel, 1984).

A l'équilibre, il y a égalité entre la pression partielle relative de vapeur d'eau exercée par une solution (ou un aliment) dans une atmosphère close l'entourant et l'activité de l'eau de cette solution (ou de cet aliment) à une température donnée. On peut alors établir un rapport de proportionnalité entre l'activité de l'eau d'un aliment et l'humidité relative de l'air qui l'entoure. En effet, l'humidité relative de l'air (Hr en %) est liée à l'activité de l'eau d'un aliment placé dans cet air (A_w) par la relation :

$$A_w = Hr/100 \quad (2)$$

avec Hr en %.

I.2.3.2 Les méthodes de mesure de l'activité de l'eau

I.2.3.2.1 Le principe

On obtient les courbes de sorption en suivant l'adsorption ou la désorption d'eau sur un échantillon du produit exposé à une atmosphère à humidité relative d'équilibre imposée (Rizvi, 1986).

I.2.3.2.2 Les méthodes d'obtention

La détermination des courbes d'équilibre thermodynamique entre un gaz et le produit peut s'effectuer selon plusieurs méthodes (Lowell & Shields, 1984). Les principales méthodes sont manométriques, hygrométriques et gravimétriques. D'autres méthodes utilisent les humidificateurs mécaniques et des dessiccateurs (Rizvi, 1986).

I.2.3.2.2.1 Les méthodes manométriques

La mesure manométrique de l'activité de l'eau a été suggérée par Makower et Meyers en 1943, depuis lors, plusieurs études ont été menées sur ces méthodes (Rizvi, 1986). C'est une mesure basée sur les propriétés colligatives.

L'échantillon (10-50g) est placé sous vide (moins de 200 μ mHg) dans un dessiccateur pendant 1 à 2 minutes. 30 à 50 minutes après l'arrêt du vide à l'équilibre, la pression de vapeur d'eau est mesurée à l'aide d'un manomètre. La température doit être

maintenue constante. Pour plus de précision, il importe que les changements de l'activité de l'eau dus à la perte d'eau par évaporation soient très faibles (le rapport du volume de l'échantillon sur le volume de vapeur est grand), et que le fluide manométrique soit de masse volumique et de pression de vapeur faibles.

Cette méthode présente les inconvénients des gradients de températures, des changements de valeur de l' A_w par vaporisation et l'incompatibilité avec les aliments volatiles ou en processus de respiration. On peut, toutefois, y apporter des améliorations (dont le remplacement de l'huile manométrique par un manomètre capacitance) (Rizvi, 1986).

I.2.3.2.2.2 Les méthodes hygrométriques

Les mesures du point de rosée et de la dépression du bulbe humide à l'aide des hygromètres à cheveux et électriques permettent de mesurer l'activité de l'eau.

Le principe des hygromètres à résistance électrique est basé sur le fait que la résistance de certaines substances est fonction de l'humidité relative. Quant à la mesure de la température de rosée, un courant d'air (vapeur d'eau) en équilibre avec l'échantillon étudié est soumis à la condensation à la surface d'un miroir refroidi. L'apparition de la première goutte d'eau sur le miroir est détectée à l'aide d'une cellule photoélectrique et correspond au point de rosée (Cheftel, Cheftel & Besancon, 1983). A partir de la mesure du point de rosée, l'humidité relative de l'échantillon est enregistrée par l'utilisation des paramètres psychrométriques. En combinaison avec des microprocesseurs, les valeurs directes de l' A_w ou de l'humidité relative à l'équilibre pourraient être obtenues. L'exactitude de ces instruments est moindre à des niveaux d' A_w bas, à cause de l'insuffisance de vapeur dans l'espace principal pour couvrir le miroir. Toutefois, ils sont précis (Rizvi, 1986).

Quant aux hygromètres à cheveux, la mesure de la longueur d'un cheveu, après calibrage, donne une indication de l'humidité relative du milieu ambiant. Ainsi, au contraire de la température, l'humidité relative de l'air ambiant affecte beaucoup l'enroulement des molécules de kératine (hygrosenseurs enduits d'un sel hygroscopique) et la longueur d'un cheveu (Cheftel *et al.*, 1983). Cette mesure indirecte de l'Aw est peu précise, surtout à des humidités relatives élevées.

I.2.3.2.2.3 Les méthodes gravimétriques

Ce sont des méthodes quantitatives qui sont basées sur des mesures de masse d'un composé. Théoriquement, l'activité de l'eau de l'échantillon est égale à celle de l'environnement. Pratiquement ce n'est jamais atteint car cela nécessiterait un temps très long. Dans ce cas, l'équilibre est atteint lorsque la différence entre les poids successifs de l'échantillon est négligeable. Cette méthode a l'inconvénient de nécessiter un temps d'équilibre trop long. On distingue les méthodes gravimétriques statique et dynamique.

Dans la méthode gravimétrique statique, seule la diffusion gouverne les transferts entre le produit et son environnement. La régulation de l'humidité relative de l'ambiance étant assurée par des solutions salines saturées (Achour, Hamdi & Benzarti, 1999). Les solutions diluées communément utilisées sont des solutions d'acide sulfurique ou des sels tels que NaCl et KCl. Malheureusement, cette méthode nécessite un temps d'équilibre trop long. Pour palier la difficulté du temps long d'équilibre, des méthodes rapides (Lang, Mccune & Steinberg, 1981) et d'interpolation (Landrock & Proctor, 1951) ont été mises au point.

Dans les méthodes gravimétriques dynamiques, un courant gazeux est conditionné par un dispositif humidificateur avant d'atteindre l'échantillon. On rencontre également dans cette catégorie des appareils comportant une balance électronique incorporée, qui donnent en continu les mesures de la masse de l'échantillon.

I.2.3.3 L'importance des isothermes

Les isothermes de sorption (figure 6) corroborent avec les interprétations théoriques et permettent de calculer le nombre de sites actifs à la surface d'un aliment ou d'un produit (Cheftel & Cheftel, 1984). Elles donnent également la prévision de l'activité de l'eau dans les mélanges des divers ingrédients plus ou moins humides. Sur la même lancée, Ahouannou, Jannot, Nganhon, Lips et Lallemand (1999) et Nganhon (2000) pensent qu'elles permettent la prévision du comportement d'un aliment lors d'un traitement ou de l'entreposage dans des conditions autres que celles de l'expérience. Ceci permet de prévoir l'influence des variations d'humidité relative de l'ambiance sur la teneur en eau du produit, non protégé. Cette opinion est confirmée par les résultats des travaux de Achour *et al.* (1999) sur la détermination des isothermes de sorption des dattes entreposées en Tunisie. Ces courbes permettent de prévoir la réhydratation d'un produit préalablement déshydraté.

Par ailleurs, Martinez-Navarette et Chiralt (1996), travaillant sur l'influence de la torréfaction sur les isothermes de sorption (de l'arachide, des noisettes et des noix almond), affirment qu'il est possible de modéliser les changements de teneur en eau d'un produit pendant sa manipulation et son stockage au moyen des isothermes de sorption. Landrock et Proctor (1951) utilisent les données d'humidité d'équilibre pour obtenir une nouvelle méthode d'interpolation graphique. Ceci facilite l'approche sur la quantité d'eau adsorbée par les aliments en fonction du temps de stockage et donc, la prévision de la durée de conservation d'un produit emballé. Elles sont également très utilisées dans le domaine du séchage (Ahouannou *et al.*, 1999 ; Talla, 1999 ; Gabas, Menegalli & Telis-Romero, 1999 ; Gely & Giner, 2000 ; Sarsavadia, Sawhney, Pangavhane & Singh., 1999 ; Ozdemir, Seyhan, Ozdes Bodur & Onur Devres, 2000).

I.2.3.4 L'hystérésis des isothermes

L'expérience montre que les courbes d'adsorption et de désorption ne sont pas toujours superposables. Cette non-coïncidence des deux courbes est appelée hystérésis. Ce phénomène a lieu essentiellement dans les régions intermédiaires des isothermes, où l'eau serait faiblement liée (Cheftel & Cheftel, 1984). De nombreuses explications sont proposées pour le phénomène d'hystérésis (Rahman, 1995). Nous pouvons citer :

- La condensation capillaire de l'eau dans les pores des tissus, dans le cas de solides poreux. Ils présentent un orifice capillaire et un diamètre plus grand à l'intérieur. Dans ce cas, la pression de vapeur d'eau qui se vide (désorption) est moins élevée que celle nécessaire au remplissage (adsorption) ;
- La chimisorption partielle, les impuretés de surface ou le changement de phase en ce qui concerne les solides non poreux ;
- Changement de la structure résultant de la résistance à la pénétration et à la sortie de l'adsorbât dans le cas des solides non rigides.

Chung et Pfoest (1967) étudiant sur plusieurs cycles successifs la désorption et l'adsorption du blé trouvent une cause thermodynamique aux effets d'hystérésis. En effet, ils constatent pour conclure que la chaleur de désorption est supérieure à celle d'adsorption, et que ce phénomène d'hystérésis disparaît au troisième cycle où l'on observe la formation de croûte.

On observe que les théories expliquant le phénomène d'hystérésis laissent apparaître 2 approches : la condensation capillaire et l'adsorption physique. Les paramètres d'expérimentation (Hart, 1964) et la différence de conformation texturale et structurale en adsorption et en désorption (Bettelheim & Erlich, 1963 ; D'Arcy & Watt, 1981) ont été évoqués dans cette explication. Aucune théorie ne donnant à elle seule une complète explication du phénomène d'hystérésis. C'est ainsi que Caurie (2006) a

développé avec succès une équation sur tout l'intervalle d'activité de l'eau, autant dans les conditions isobare que de teneur en eau constante. Cette équation relie à la fois l'activité de l'eau, la teneur en eau, la température et l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche.

a) La boucle d'hystérésis

Selon Caurie (2006), la figure 6 représente schématiquement la boucle d'hystérésis dans laquelle OBE est la courbe d'adsorption et EAO celle de désorption de la boucle. L'allure et le type sont plus dépendants de la courbe de désorption par rapport à celle d'adsorption initialement formée (D'Arcy et Watt, 1981). Toute théorie d'hystérésis devrait expliquer pourquoi la courbe de désorption dévie de celle adsorption utilisée comme isotherme de référence. La boucle d'hystérésis pourrait être décrite à partir de la courbe d'adsorption verticalement à activité de l'eau constante selon la droite BA ou horizontalement à teneur en eau constante selon la droite CA (figure 6).

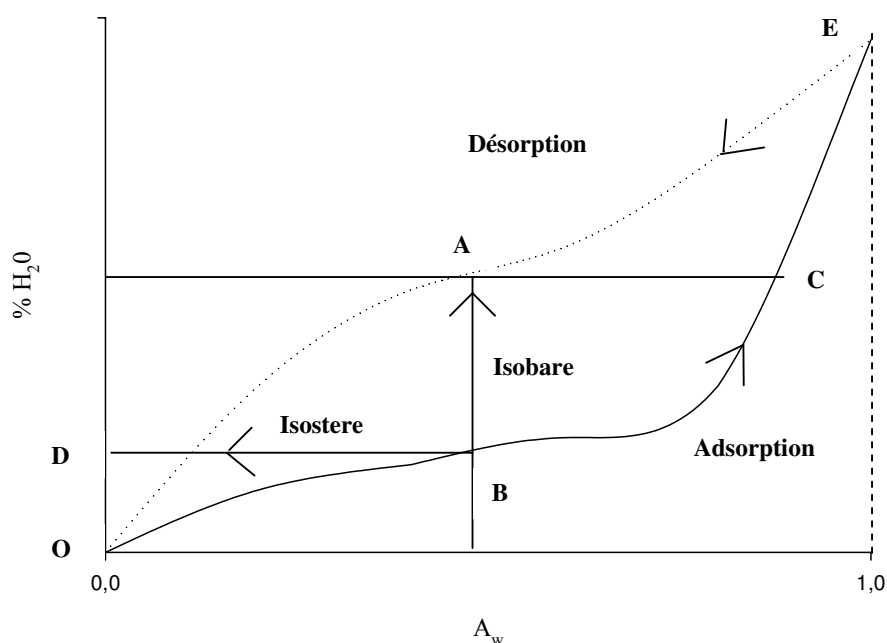


Figure 6 : Le schéma d'une boucle d'hystérésis, de l'isobare BA, de l'isostere AC et des isothermes par Caurie (2006)

b) L'équation d'hystérésis

En utilisant la courbe d'adsorption pour décrire et expliquer la boucle d'hystérésis, Caurie (2006) développe l'équation d'adsorption unimoléculaire récemment obtenue par Caurie (2005). Elle stipule que :

$$\left(\frac{M}{M_0}\right)^n = C \left(\frac{A_w}{1-A_w}\right)^2 \quad (3)$$

Dans cette équation, M = teneur en eau à l'activité de l'eau A_w , $C = e^{Q/RT}$, Q = énergie d'attraction intermoléculaire (cal gmol K^{-1}) de la monocouche M_0 , R = constante des gaz (1,9872 cal/mole K), T = température absolue ($^{\circ}K$), n = unité de volume de l'espace ou le nombre de sites d'adsorption sur la surface monomoléculaire de l'adsorbant.

A partir de l'équation (3), on obtient les équations (4) et (5) :

$$\frac{M}{M_0} = \left(\frac{A_w}{1-A_w}\right)^{\frac{2}{n}} \exp\left(\frac{1}{nR} \cdot \frac{Q}{T}\right) \quad (4)$$

$$\frac{1-A_w}{A_w} = \left(\frac{M_0}{M}\right)^{\frac{n}{2}} \exp\left(\frac{1}{2R} \cdot \frac{Q}{T}\right) \quad (5)$$

A l'activité de l'eau constante, la teneur en eau entre A et B des deux courbes de la boucle d'hystérésis peut être décrite à partir de l'équation (4) selon l'équation isobare :

$$M = k \exp\left(b \frac{Q}{T}\right) \quad (6)$$

k et b sont des constantes.

De la même manière, à la teneur en eau constante, l'activité de l'eau entre les deux courbes de la boucle d'hystérésis peut être décrite horizontalement entre A sur l'isotherme de désorption et C sur celle d'adsorption, à partir de l'équation (5) selon l'équation isostere :

$$\frac{1}{A_w} - 1 = k_1 \exp\left(b_1 \frac{Q}{T}\right) \quad (7)$$

k_1 et b_1 sont des constantes.

En combinant les équations (6) et (7), on obtient une équation générale pour décrire le phénomène d'hystérésis :

$$M\left(\frac{1}{A_w} - A_w\right) = K \exp\left(B \cdot \frac{Q}{T}\right) \quad (8)$$

K et B sont des constantes.

Ceci signifie qu'à température constante T , le produit de la teneur en eau (base sèche) et du degré de réduction de l'activité de l'eau $\left(\frac{1}{A_w} - A_w\right)$ est proportionnel à l'exponentiel de Q .

I.2.3.5 Le calcul de l'enthalpie de sorption

Les forces de liaison de l'eau peuvent être estimées à partir des enthalpies de sorption car dépendantes de la température (Keey, 1978 ; Cheftel & Cheftel, 1984). Les calculs ont pour base l'équation de Clausius-Clapeyron qui lie la variation de la pression partielle de vapeur de l'eau pure (P^0) à la température (T) :

$$\frac{d \ln P^0}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{\lambda}{R} \quad (9)$$

R est la constante des gaz parfaits et λ la chaleur latente de vaporisation.

Pour un aliment, on doit tenir compte également de la chaleur de sorption de l'eau de l'aliment en plus de la chaleur latente de vaporisation pour exprimer la variation de la pression partielle de la vapeur d'eau. On modifie alors l'équation de Clapeyron-Clausius

et on obtient :

$$\frac{d \ln P}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{\lambda + Q_s}{R} \quad (\text{Rizvi, 1986 ; Tsami, 1991}) \quad (10)$$

Q_s est la chaleur nette de sorption.

Si on soustrait (3) de (4), soit
$$\frac{dLnP}{d\left(\frac{1}{T}\right)} - \frac{dLnP^0}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (11)$$

Avec l'activité de l'eau comme le rapport entre la pression partielle de l'eau dans l'aliment et la pression partielle de l'eau pure à la même température soit $\frac{P}{P^0} = A_w$ et, λ et

Q_s constantes, on obtient :
$$\frac{dLnA_w}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{Q_s}{R} \quad (12)$$

Ainsi, on obtient la chaleur de sorption en traçant à des teneurs constantes $-\ln A_w = f\left(\frac{1}{T}\right)$ et en déterminant la pente qui est égale à $\frac{Q_s}{R}$. Connaissant la valeur de la pente on peut déduire celle de l'enthalpie nette de sorption à une teneur en eau précise.

I.2.3.6 Les travaux sur les isothermes des amandes de karité et des fruits de l'aiélé

Dans la littérature, Noumi *et al.* (2003) se sont intéressés à la détermination et la modélisation des isothermes de désorption de la pulpe des fruits de l'aiélé à trois températures (50, 60, 70°C), températures atteintes lors du séchage. Par contre, aux températures de conservation courantes de ces fruits, aucune isotherme n'est encore obtenue à notre connaissance. Quant aux amandes de karité, la bibliographie à notre connaissance ne présente pas d'études.

I.2.3.7 Les exemples de modèles d'isothermes

En modélisation, l'eau est traitée comme un composant uniforme des produits alimentaires malgré sa configuration « libre » ou « liée » dans les aliments. Etant donné la diversité des aliments et des nouvelles formulations, la mise sur pied des modèles facilitent la prédiction des comportements des aliments au niveau des industries et de la recherche. Parmi les nombreux modèles décrivant les isothermes, nous donnerons avec Chirife et Iglesias (1978) et Rizvi (1986) ceux de Langmuir (1918), de Bradley (1936), de

Brunauer-Emmett-Tetter (BET), d'Oswin (1946), de Smith (1947), de Halsey (1948) simplifiée, de Henderson (1952), de Chung et Pfoest (1967), de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB), de Chen (1971), de Iglesias et Chirife (1976) et de Peleg (1992).

a- L'équation de Langmuir (1918)

L'isotherme de Langmuir repose sur les hypothèses ci-dessous :

- Il existe plusieurs sites d'adsorption à la surface de l'adsorbant
- Chacun de ces sites peut adsorber une seule molécule, par conséquent, une seule couche de molécule peut être adsorbée par l'adsorbant
- Chacun de ces sites a la même affinité pour les impuretés en solution
- L'activité à un site donné n'affecte pas l'activité aux sites adjacents

Sur cette base d'adsorption de type monomoléculaire, avec des sites de sorption identique et indépendant, Langmuir propose le modèle d'adsorption physique suivant :

$$A_w \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{M_0} \right) = \frac{1}{CM_0} \quad (13)$$

M_0 est la teneur d'adsorbât sur la monocouche et C est la constante de BET. La relation décrit l'isotherme de type 1.

b- l'équation de Bradley (1936)

Cette équation présente la teneur en eau (M) en fonction de l'activité de l'eau :

$$M = (\ln(\ln(A_w)/C_1)) / \ln(C_2) \quad (14)$$

C_1 et C_2 sont des constantes.

c- L'équation de Brunauer-Emmett-Teller (BET)

L'isotherme de BET, proposée en 1938, repose sur les hypothèses ci-dessous :

- plusieurs couches successives de molécules peuvent être fixées sur l'adsorbant ;
- les sites d'adsorption sont distribués uniformément à la surface de l'adsorbant ;
- chaque site est indépendant ;

- l'énergie d'adsorption retient la première couche de molécules alors que l'énergie de condensation retient les couches successives suivantes.

C'est la plus adaptée aux produits alimentaires (Cheftel & Cheftel, 1984).

$$\frac{A_w}{(1 - A_w)M} = \frac{1}{CM_0} + \frac{C-1}{CM_0} A_w \quad (15)$$

M est la teneur en eau du produit (base sèche), M_0 la teneur en eau de la couche monomoléculaire (base sèche). C est la constante de BET et $C = Ke^{Q_s/RT}$ (avec $K = 1$). A_w et M sont données par l'expérimentation. Q_s est égale à la différence entre la chaleur de sorption de la première couche E_1 et la chaleur de liquéfaction de la vapeur d'eau E_L .

L'estimation des constantes de BET, M_0 et C, s'obtient par linéarisation de l'équation modifiée de BET. En traçant $\frac{A_w}{M(1 - A_w)} = f(A_w)$ on trouve la pente $\frac{C-1}{M_0 C}$ et l'ordonnée à l'origine $\frac{1}{M_0 C}$. L'équation de BET n'est valable que pour des activités de l'eau comprises entre 0,05 et 0,45 (Rizvi, 1986).

Cette équation de BET est surtout importante en ce qu'elle permet de calculer le poids de la couche monomoléculaire d'eau et la valeur de Q_s .

Des auteurs comme Bushuk et Winkler en 1957 (Rizvi, 1986) ont appliqué avec succès l'équation modifiée de BET pour traduire les isothermes de la farine de blé jusqu'à une A_w de 0,8. Ils limitent le nombre de couches sorbées à cinq ou six. Ceci argumente la critique de certains auteurs sur ce succès.

d- L'équation de Oswin (1946)

Ce modèle est basé sur l'expansion de la série de Pearson pour les courbes en forme de sigmoïde, appliquées aux isothermes de type II par Oswin. L'équation est donnée par :

$$M = C_1 \left(\frac{A_w}{1 - A_w} \right)^n \quad (16)$$

C_1 et n sont des constantes.

Labuza *et al.* (1970) utilisent ce modèle pour relier la teneur en eau du lait écrémé déshydraté et du café lyophilisé jusqu'à une A_w égale à 0,5. Noumi *et al.* (2003) l'ont appliqué à la pulpe des fruits de l'ailé.

e- L'équation de Smith (1947)

C'est une équation à deux paramètres fréquemment utilisée pour simuler les isothermes des produits biologiques. Elle est de la forme :

$$M = a - b \ln(1 - A_w) \quad (17)$$

a et b sont des constantes ; M est la teneur en eau en base sèche.

Noumi *et al.* (2003) utilisent avec succès cette équation pour décrire les isothermes de la pulpe des fruits de l'ailé.

f- L'équation de Halsey (1948) simplifiée

L'équation de Halsey a été développée pour palier les limites de la théorie de BET (Rahman, 1995). Elle tient compte de la condensation des multicouches d'eau, en considérant que l'énergie potentielle de la molécule est inversement proportionnelle à la $r^{\text{ème}}$ puissance de sa distance à la surface du substrat sec. Cette équation a été simplifiée par Iglesias & Chirife en 1976 (Chirife & Iglesias, 1978) sous la forme :

$$A_w = \exp\left(-\frac{A}{M^r}\right) \quad (18)$$

A et r sont des constantes, M est la teneur en eau en base sèche.

L'auteur admet que la valeur de r indique le type d'interaction absorbât-absorbant. Quand r est petit, les forces de Van der Waals sont prédominantes. Dans le cas contraire, l'attraction du substrat (solide) est présumée spécifique et limitée à la surface uniquement.

L'équation simplifiée de Halsey satisfait la description des isothermes de sorption de plusieurs aliments (oléagineux, aliments amidonnés, protéines) dans une plage d'activité de l'eau allant de 0,1 à 0,8.

g- L'équation de Henderson (1952)

C'est une équation empirique développée par Henderson et qui s'écrit :

$$\ln(1 - A_w) = -C_1 T M^n \quad (19)$$

C_1 et n sont des constantes. A température constante, elle est simplifiée à $\ln(1 - A_w) = -C'_1 M^n$ avec $C'_1 = C_1 T$ est la nouvelle constante.

Une linéarisation de la courbe $\ln[-\ln(1-A_w)]$ en fonction de la teneur en eau a été appliquée à plusieurs aliments, même si elle ne donne pas une information précise sur l'état physique de l'eau. Mais comparée à l'équation de Halsey, Chirife et Iglesias (1978) trouvent son applicabilité moins intéressante.

h- L'équation de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)

Ce modèle qui vient de Guggenheim (1966), de Anderson (1946) et de de Boer

(1953) s'écrit :
$$\frac{M}{M_0} = \frac{CKA_w}{(1 - KA_w)(1 - KA_w + CK A_w)} \quad (20)$$

A_w est l'activité de l'eau ; M est la teneur en eau du produit à l'état sec ; M_0 est la teneur en eau correspondant à la saturation de tous les sites d'adsorption primaire. C'est un modèle semi théorique d'adsorption homogène multimoléculaire localisée (Rahman, 1995).

$C = c' \exp(\Delta H_c/RT)$ et $K = k' \exp(\Delta H_k/RT)$ où C et K sont des paramètres empiriques de GAB, c' et k' sont des facteurs entropiques de proportionnalité, $\Delta H_c = H_m - H_n$ et $\Delta H_k = H_1 - H_n$ les fonctions de la chaleur de sorption, H_m est la chaleur de sorption de la monocouche, H_n est la chaleur de sorption des multicouches et H_1 est la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure à la température T .

Après avoir transformé l'équation de GAB sous la forme suivante :

$$\frac{A_w}{M} = \alpha A_w^2 + \beta A_w + \gamma \quad (21)$$

avec $\alpha = \frac{k}{M_0} \left[\frac{1}{C} - 1 \right]$, $\beta = \frac{1}{M_0} \left[1 - \frac{2}{C} \right]$, $\gamma = \frac{1}{M_0 CK}$, une régression quadratique est conduite sur les valeurs expérimentales. Les paramètres de l'équation originale sont déduits après résolution du système d'équations précédent (la solution négative de l'équation de second degré n'est pas prise en compte à cause de son impossibilité physique). Les valeurs des paramètres de ce modèle peuvent également être obtenues par la résolution des régressions non linéaires à l'aide des logiciels informatiques (*Kaleidagraph, OriginLab*).

Ce modèle est considéré comme une extension du modèle de BET. Il traduit le comportement de presque tous les aliments (de 0 à 0,9 A_w au moins) et permet une bonne évaluation de la quantité d'eau fortement liée au niveau des sites d'adsorption primaires (W_m). En plus de sa base théorique fiable, ce modèle comprend des paramètres qui traduisent physiquement le processus de sorption. Il peut donc décrire quelques effets de la température sur les isothermes grâce aux équations du type d'Arrhenius (Rizvi, 1986). Gely et Giner (2000) utilisent l'équation de GAB pour calculer la chaleur de sorption lors de l'établissement des isothermes de sorption des grains de maïs. Noumi *et al.* (2003) ont aussi simulé les données de désorption de la pulpe des fruits de l'ailé à l'aide de ce modèle.

i- L'équation de Chung et Pfof (1967)

L'hypothèse émise par Chung et Pfof est qu'il existe une relation directe entre la teneur en eau d'un produit et la variation de son énergie libre de sorption. Ils proposent le modèle suivant :

$$\ln(A_w) = -\frac{C_1}{RT} \exp(-C_2 M) \quad (22)$$

C_1 et C_2 sont des constantes ; M est la teneur en eau en base sèche.

Dans l'évaluation de la version modifiée de cette équation (le terme RT éliminé, elle devient l'équation de Bradley (1936)), Young en 1976 (Rizvi, 1986) constate qu'elle décrit bien les isothermes de sorption des arachides.

j- L'équation de Chen (1971)

Cette équation à trois paramètres est basée sur la théorie de séchage en état stationnaire des systèmes où la diffusion est le principal mode de transfert de matière. Elle s'écrit :

$$A_w = \exp[C_1 - C_2 \exp(-C_3 M)] \quad (23)$$

C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes dépendantes de la température.

Chen et Clayton (1971) (Rizvi, 1986) ont appliqué avec justesse ce modèle aux données de sorption de nombreux grains de céréales et d'autres produits agricoles. Ils ont trouvé que la valeur de C_1 était proche de zéro. Ce qui réduit l'équation ci-dessus à deux paramètres, C_2 et C_3 .

k- L'équation de Iglesias et Chirife (1976)

Dans l'étude du comportement en sorption d'eau des aliments riches en sucre tels que les fruits où il y a dissolution des sucres, ces auteurs proposent l'équation empirique suivante :

$$\ln[M + (M^2 + M_{0,5})^{1/2}] = C_1 A_w + C_2 \quad (24)$$

$M_{0,5}$ est la teneur en eau à $A_w = 0,5$; C_1 et C_2 sont des constantes.

Cette équation décrit convenablement le comportement de dix-sept aliments riches en sucres (banane, pamplemousse, poire, fraise).

I- L'équation de Peleg (1992)

C'est une équation à quatre paramètres basée sur un transfert de matière et de chaleur dans le produit. Elle s'écrit :

$$M = C_1 A_w^a + C_2 A^b \quad (25)$$

C_1 , C_2 , a et b sont des constantes.

D'autres chercheurs ont également proposé des modèles plus ou moins spécifiques. C'est le cas de Chirife, Boquet, Ferro Fontan et Iglesias (1983) qui, en examinant l'applicabilité alimentaire d'une équation développée par Ferro Fontan *et al.* en 1982, trouvent qu'elle s'applique aux graines oléagineuses, aux aliments amidonnés et aux protéines. Cette équation est donnée par :

$$\ln\left(\frac{t}{A_w}\right) = \alpha(M)^{-r} \quad (26)$$

t est un paramètre qui tient compte de la structure de l'eau sorbée ; M est la teneur en eau en base sèche. Quand $t = 1$, cette équation se réduit à l'équation de Halsey.

I.2.4 LA TEXTURE DES FRUITS DU KARITE ET DE L'AIELE

Les travaux sur la texture date de la fin du début du 20^{ème} siècle (Szczesniak, 2002). La plupart des traitements effectués sur les aliments permettent de changer leurs propriétés texturales, généralement dans le sens du ramollissement afin de les rendre faciles à mastiquer (Bourne, 1982). La texture, comme les aliments, est donc une caractéristique qui dépend des conditions de traitement et de conservation.

I.2.4.1 Les généralités sur la texture des aliments

I.2.4.1.1 La définition

Il est difficile de donner une définition de la texture car elle ne signifie pas la même chose pour tous, et dépend des domaines d'étude et de la nature des produits. La définition courante (consistance d'une substance ou constitution d'un matériau solide) de

la texture ne comble pas les technologues (Bourne, 1982). Mais un accord général a permis d'établir (tableau 4) que "la texture est une manifestation sensorielle et fonctionnelle des propriétés structurales, mécaniques et de surface des aliments détectables par les sens de la vision, l'odorat, le toucher et kinésiques" (Szczesniak, 2002). Cette définition évoque des concepts importants (Vliet, 2002) :

- La texture est une propriété sensorielle perceptible et descriptible ;
- La texture est un attribut de multiples paramètres, pas seulement la tendreté ou la masticabilité ;
- Elle dérive de la structure moléculaire, microscopique et macroscopique des aliments ;
- Elle est détectée par plusieurs sens, les plus importants étant le toucher et la pression.

Tableau 4: Les définitions des paramètres mécaniques de la texture (Szczesniak, 2002)

Physiques		Sensorielles
Propriétés primaires		
Dureté	Force nécessaire pour atteindre une déformation donnée	Force nécessaire pour compresser une substance entre les molaires (cas des solides) ou entre la langue et le palais (cas des semi-solides)
Cohésivité	Longueur à laquelle un matériau peut être déformé avant la rupture	Degré de compression d'une substance entre les dents avant broyage
Viscosité	Vitesse d'écoulement par unité de force	Force nécessaire pour écouler un liquide de la cuillère à la langue
Elasticité	Vitesse de récupération de la forme ou du volume par un matériau après cessation de l'application de la force	Degré à laquelle le produit retourne à sa forme original une fois compressé entre les dents
Force d'adhésion	Travail effectué par la force de tension nécessaire pour séparer l'aliment du plateau de compression	Force nécessaire pour retirer le matériau qui adhère à la bouche (palais) pendant la mastication
Propriétés secondaires		
Fracturabilité	Force à laquelle le matériau se fracture (produit de grande dureté et de faible cohésivité)	Force avec laquelle l'échantillon s'émiette, se fissure ou se fracasse
Masticabilité	Energie nécessaire pour mastiquer un aliment solide jusqu'à absorption (produit de la dureté, cohésivité et élasticité)	Durée (en seconde) nécessaire pour mastiquer un échantillon à une force constante afin de le rendre absorbable
Collant (poisseux)	Energie nécessaire pour désintégrer un aliment semi-solide jusqu'à l'absorption (produit de faible dureté et de grande cohésivité)	Densité persistant à la mastication

1.2.4.1.2 L'importance de la texture en alimentation

L'apparence (couleur, forme, granulométrie, brillance), la flaveur (goût et odeur) et la texture et la nutrition sont considérés comme les quatre principaux paramètres de qualité (Bourne, 1982 ; Szczesniak, 2002). Même s'il est vrai que la nutrition n'est pas perceptible par les sens. L'importance de la texture dans l'acceptabilité des aliments

dépend du type d'aliment. Sur le plan textural, on répartit alors les produits alimentaires en trois groupes:

- Critique pour lequel la texture est la caractéristique dominante (viande, chips de pomme de terre) ;
- Important pour lequel, bien que significative, la texture n'a pas la contribution dominante dans la qualité totale de l'aliment (fruits, légumes, pain et bonbon) ;
- Mineur pour lequel la texture a une contribution négligeable dans la qualité totale (boissons et les soupes légères).

Une dépréciation de la texture peut engendrer le renvoi du produit mal conservé par le consommateur. En effet, la texture influence l'acceptabilité des fruits (Konopacka & Plochanski, 2004) et permettrait même d'évaluer la qualité chimique des fruits (Harker, Marsh, Young, Murray, Gunson & Walker, 2002 ; Murayama, Katsumata, Horiuchi & Fukushima, 2002). Olaniyan et Oje (2002) ont trouvé que la détermination de la dureté des amandes de karité peut faciliter leur broyage, sans trop de pénibilité.

I.2.4.2 Les travaux sur la texture des fruits du karité et de l'aiélé

Les travaux concernant la texture des oléagineux non conventionnels ne sont pas très nombreux. Nous pouvons citer les travaux de Silou, Bitoungui et Mavah (1995) sur le safou et, ceux de Mizrach, Flitsanov, Akerman et Zauberman (2000) sur l'avocat. Les études texturales consacrées aux fruits du karité et de l'aiélé sont presque inexistantes. A notre connaissance, le seul travail sur la texture de la pulpe des fruits de l'aiélé est celui de Kapchie Noutchogoué *et al.* (2005). Ils ont étudié les changements texturaux et biochimiques des fruits d'aiélé frais, stockés en solution et traités à la chaleur dans l'objectif d'expliquer chimiquement le durcissement des fruits. Olaniyan et Oje (2002) étudient la compression des amandes prétraitées : variation de la teneur en eau dans des bains, la température d'étuvage pendant 15 minutes (30, 50, 70, 90 et 110°C) et de la

position de la charge sur quelques propriétés mécaniques des amandes (force de compression, déformation et dureté au point de rupture). Le but était également de déterminer la capacité de prétraitements (conditionnement humide et traitement à la chaleur) à réduire les brisures lors du broyage des amandes afin de faciliter la conception des broyeurs.

Il ressort que les études sur la texture des fruits du karité et de l'aiélé consistent d'une part à étudier l'influence de la force de compression et des prétraitements sur les duretés des amandes de karité en vue de faciliter la conception des broyeurs à amandes et d'autre part à expliquer chimiquement le durcissement de la pulpe de fruits de l'aiélé. La détermination de la texture de ces produits au cours de leur conservation n'a encore pas fait l'objet d'études.

I.3 LA TRANSFORMATION DES FRUITS DU KARITE ET DE L'AIELE

L'extraction de la matière grasse est un moyen courant de transformation et de valorisation des oléagineux. Et cette matière grasse fait généralement l'objet de nombreuses transactions économiques. Dans le cas du karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.), elle est dite concrète et appelée beurre, tandis que dans celui de l'aiélé (*Canarium schweinfurthii* Engl.) elle est généralement liquide.

I.3.1 LE BEURRE DE KARITE

I.3.1.1 L'extraction du beurre de karité

Pour l'extraction du beurre de karité, on distingue les procédés traditionnels et mécanisés (encore dits améliorés).

I.3.1.1.1 Les procédés traditionnels d'extraction

Les méthodes d'extraction du beurre de karité sont nombreuses et diverses. Elles varient d'un pays à un autre, d'une région à l'autre, d'une tribu à l'autre. Toutefois, nous

pouvons les résumer en deux principaux procédés : le procédé dit de barattage et celui par chauffage de la pâte (SNV, 1991; Kassamba, 1997).

Le premier procédé, qui semble plus répandu, utilise l'eau (chaude ou froide) comme vecteur d'extraction. En dépit de quelques nuances, il peut être en général résumé en les opérations suivantes : récolte, dépulpage, ébouillantage, décortilage, pilage, broyage fin, barattage et chauffage. Les figures 7 et 8 présentent quelques schémas appliqués au Cameroun, tandis que les figures 9 et 10 illustrent ceux utilisés respectivement au Burkina Faso et au Mali.

Le deuxième procédé consiste à chauffer la pâte d'amande de façon à récupérer la matière grasse surnageante. Au Burkina Faso, une première variante de ce procédé (figure 11) présente les principales opérations suivantes : la récolte, le dépulpage, le décortilage, le fumage ou le séchage, le pilage, le laminage et le chauffage de la pâte. Une deuxième variante est donnée par le procédé de Bangoua dans la province de l'Ouest du Cameroun schématisé par la figure 12.

a. Le dépulpage

Les fruits collectés sont dépulés manuellement ou par pourrissement naturel dans les fosses (fermentation). D'après UNIFEM (1997), si le pourrissement excède une semaine, il y a un risque de germination des graines et l'obtention d'un beurre rance et amer. Cette étape peut se faire soit dans les champs ou à la maison.

Par ailleurs, au Burkina Faso, SNV (1991) et Kassamba (1997) signalent une opération de nettoyage manuelle des amandes stockées avant séchage et concassage. Dans ce cas, l'amande est débarrassée des corps étrangers par léger pilage ou frottement à l'eau. Elles sont alors torréfiées dans un cuiseur avant l'opération de pilage proprement dite. Les amandes stockées avec leurs coques sont simplement décortiquées et utilisées.

b. L'ébouillantage

Les graines obtenues après dépulpage sont bouillies pendant un temps qui varie en fonction de la charge du fût et de l'intensité du feu. Ce temps peut ainsi aller de 20 à 60 minutes (N'gouro Sanogo, 1997 ; UNIFEM, 1997 ; Amti, 1998) et atteindre 12 heures. Cette étape permet de stériliser les graines, d'inactiver les enzymes lipolytiques et d'augmenter considérablement la durée de conservation pour les stocks non traités. Le décortiquage d'une graine fraîche et d'une graine bouillie permet d'arrêter l'opération. L'amande de la graine bouillie doit être brune-sombre et ne pas laisser exsuder le latex. Toutefois, les variations des conditions de cuisson (température) auraient des conséquences néfastes sur les propriétés et la variabilité de la qualité (organoleptique et sensorielle) du beurre.

c. Le décortiquage

Les graines (noix) refroidies sont débarrassées de leur coque pour donner les amandes. Cette opération s'effectue de façon manuelle à l'aide de deux pierres : la plus grande est au sol, et sert de support, la graine, placée au dessus, est concassée par une petite pierre.

Parfois, le séchage (ou fumage) précède le concassage des graines comme au Moyen-Chari (Tchad). Le décollement de l'amande de la coque marque la fin du séchage, et le décortiquage peut alors s'effectuer d'une graine à l'autre avec un morceau de bois et de la brique. Adoum (1996) rapporte que l'action d'un bâton sur le sac contenant les graines permet le décortiquage.

L'opération de décortiquage est d'autant plus efficace que la graine présente un taux d'humidité suffisamment faible. Une hydratation importante de la graine augmenterait l'adhérence de la coque à l'amande. Ce qui réduit la séparation de la coque de l'amande.

d. Le séchage

Les amandes obtenues sont par la suite séchées au soleil ou dans des fours pendant plusieurs jours. Elles sont ensuite disposées dans des greniers ou des contenants. Elles ne sont cependant pas à l'abri des rongeurs. Certaines méthodes locales au Tchad (Adoum, 1996) permettent de sécher les amandes au soleil, ensuite les soumet au fumage sur les étagères avant de procéder à leur décorticage. L'étape de fumage permet ainsi de prolonger la durée de conservation et protège contre les charançons et les rongeurs. Le taux d'humidité doit être le plus bas possible pour éviter une germination des amandes, mais également d'accroître le rendement d'extraction (Sopade & Koku, 1989). Le séchage reste un facteur primordial pour la qualité du beurre.

e. Le pilage

C'est l'étape de fragmentation des amandes dans le but de faciliter les opérations ultérieures. Les amandes sont pilées dans des mortiers et parfois à l'aide d'un petit pilon et d'une pierre plate (Kassamba, 1997). Dans les groupements, le pilage s'effectue par 2 à 4 femmes avec relais. Le produit final est relativement grossier. La granulométrie des amandes est d'autant plus faible qu'elles sont sèches.

f. Le broyage fin

Il consiste à écraser les amandes pilées sur une grande pierre afin d'obtenir une pâte plus fine. Elle facilite l'éclatement des cellules oléifères et prépare à l'extraction. A Bambi, au Cameroun, cette pierre mesure 1 m de longueur, 0,5 m de largeur et une hauteur de 20 cm. Au Burkina Faso, il s'effectue aussi à l'aide d'une meule constituée de deux pierres. Cette opération est très pénible, et requiert beaucoup de force musculaire de la part des opératrices. Des moulins permettent également de broyer finement les amandes de karité, et dans ce cas l'opération précédente de pilage est supprimée. La pâte obtenue est prête à l'opération d'extraction.

g. L'extraction proprement dite

Elle peut donc s'effectuer par barattage ou par chauffage de l'amande.

Le barattage consiste à battre la pâte manuellement à un rythme régulier et de façon continue, jusqu'à ce qu'elle blanchisse. Ainsi, les amandes finement broyées sont introduites dans un canari dans lequel on ajoute de l'eau. Il peut se faire à chaud ou à froid. A froid, on ajoute de l'eau au fur et à mesure et en remuant pour obtenir une émulsion huile-eau. On récupère à la surface la matière grasse. Le beurre recueilli est lavé afin de le séparer des matières en suspension. Cette opération est répétée jusqu'à ce qu'il soit blanchâtre. Il est ensuite chauffé. Dans le procédé à chaud, à la pâte obtenue on ajoute de l'eau dont la température est suffisante pour délayer la pâte en fluidifiant la matière grasse. La température idéale se situe entre 30 et 40°C.

L'eau à température ambiante est bonne en saison sèche pour l'opération dans les régions chaudes. La quantité d'eau est également un facteur déterminant, environ 1/3 par rapport à la pâte initiale (SNV, 1991 ; Kassamba, 1997). En effet, la pâte ne doit être ni légère ni lourde au barattage. Le barattage doit s'effectuer de manière centrifuge depuis le fond du récipient. Il a pour avantage de faire remonter le corps gras émulsionné seul en surface. Il peut alors être récupéré dans un autre récipient. Les feuilles de Barkédjé dont le nom scientifique est *Hymenocardia acida* entrent dans la préparation des eaux de cuisson dans les Provinces du Nord et de l'Extrême-Nord (Cameroun) et au Tchad afin d'améliorer le taux d'extraction.

Le chauffage de l'amande consiste à chauffer dans un cuiseur la pâte obtenue additionnée d'eau. Le dosage de l'eau est ici aussi primordial, car la pâte doit rester lourde. Le beurre est recueilli par exsudation. Le beurre devenu limpide est enlevée et laissé en décantation. A l'inverse du beurre écumée du barattage, c'est le reste de la pâte

qui est épuisé en beurre par ajout d'eau et refroidissement. La température est dans cette méthode très élevée (90 à 100°C).

h. Le chauffage du beurre

Cette opération, encore appelée purification, consiste à chauffer le corps gras dans un canari ou une marmite pour évaporer l'eau.

Par décantation (purification) les impuretés sont séparées du beurre. Le beurre est récupéré dans les récipients et prêt au conditionnement. Le conditionnement a pour but de protéger le beurre contre l'effet des dégradations extérieures parmi lesquels la température. Les modes de conditionnement sont multiples et variés. Ils dépendent également de la taille du groupement de femmes. On distingue généralement les conditionnements en feuilles, en calebasses, en bouteilles (65 centilitres), en pots et en bidons ou fûts (associations de femmes) de 20 à 200 litres.

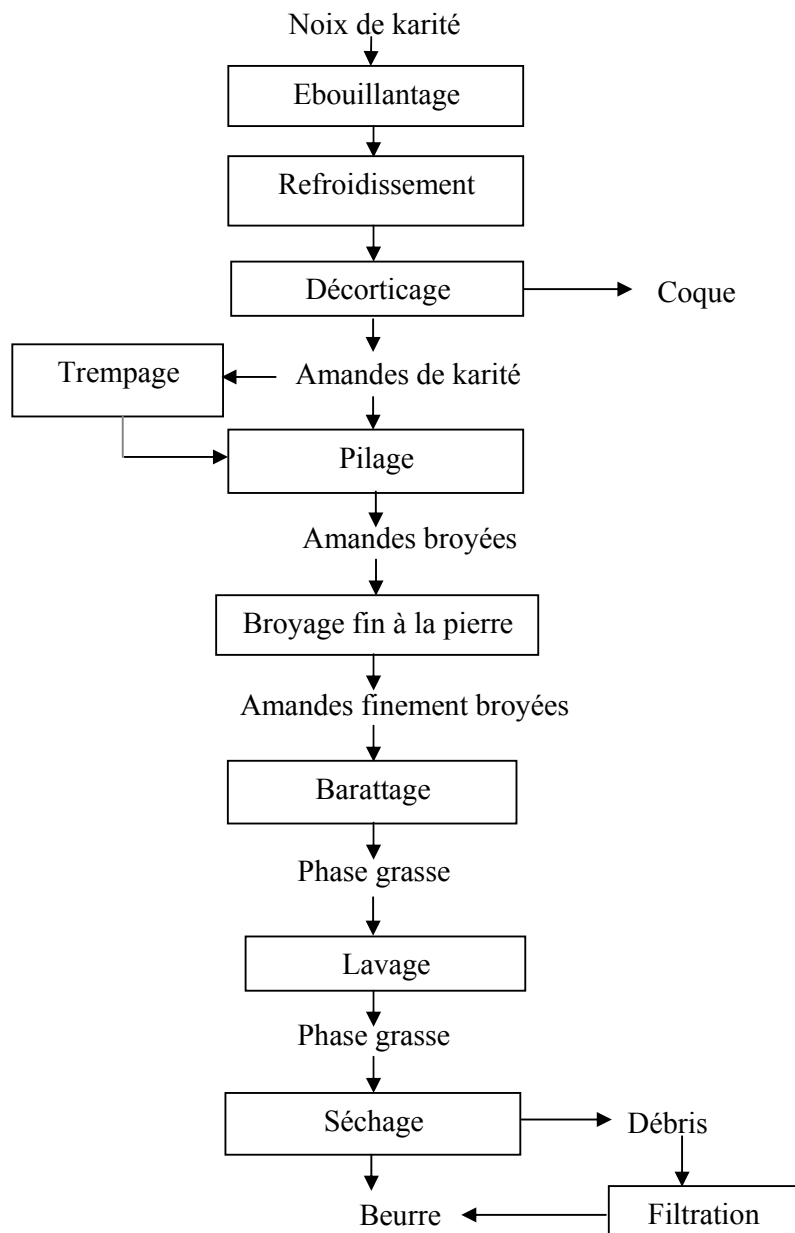


Figure 7 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité de Tchabal et Bambi, Cameroun

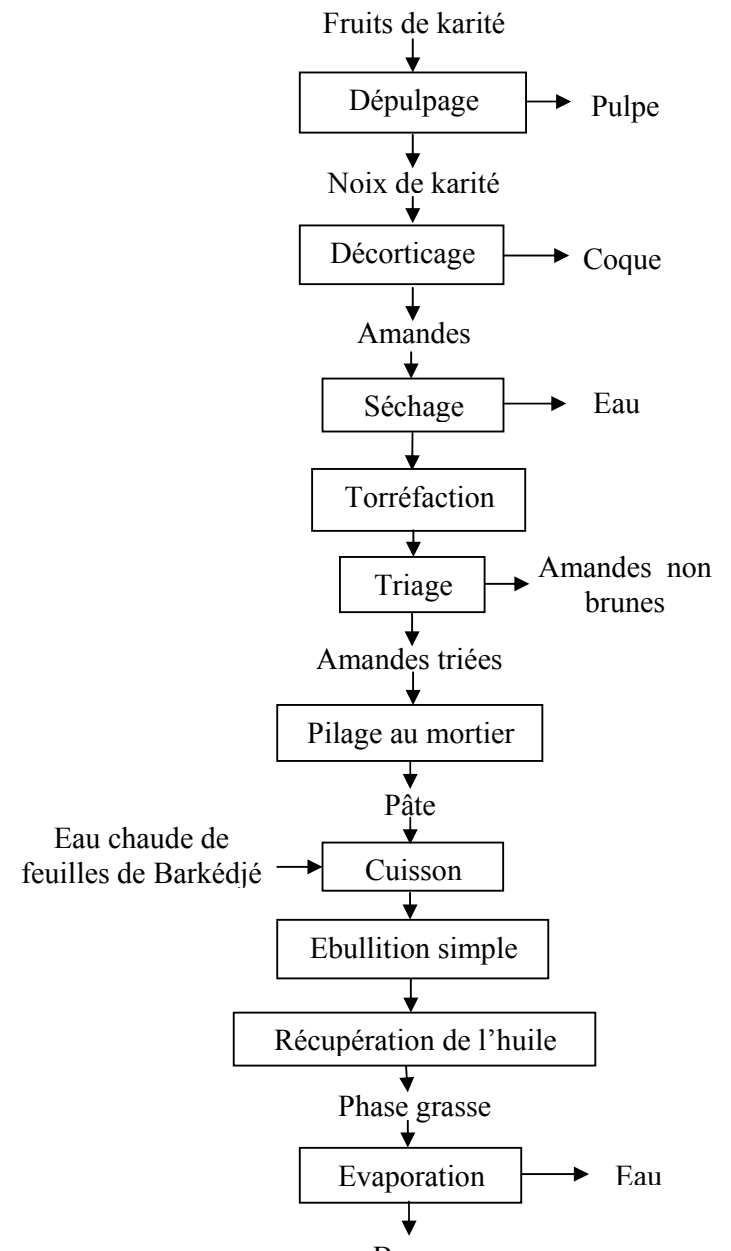


Figure 8 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité de Garoua (Djamboutou), Cameroun

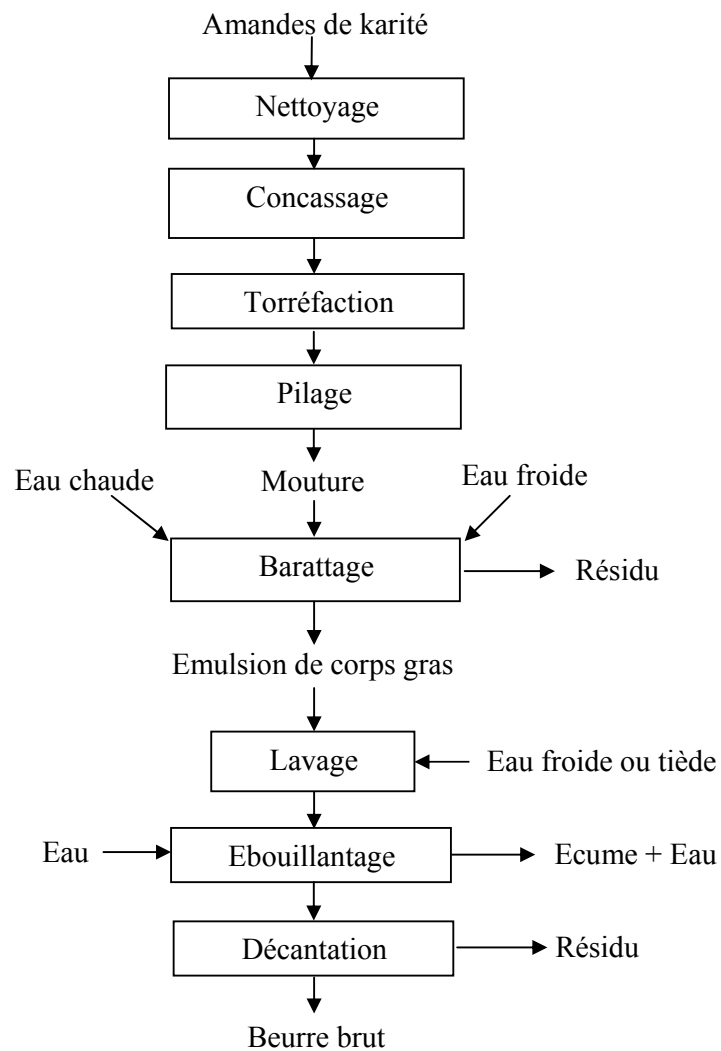


Figure 9 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité par barattage au Burkina Faso (Kassamba, 1997)

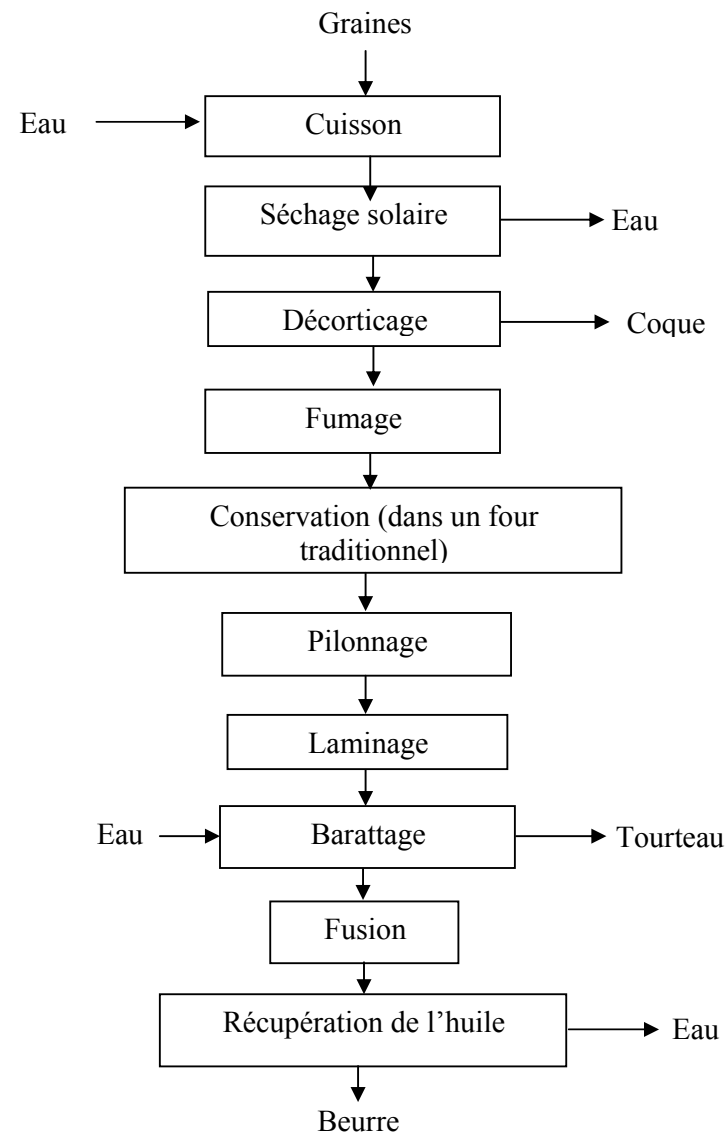


Figure 10 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité appliqué au Mali (N'Gouro Sanogo, 1997)

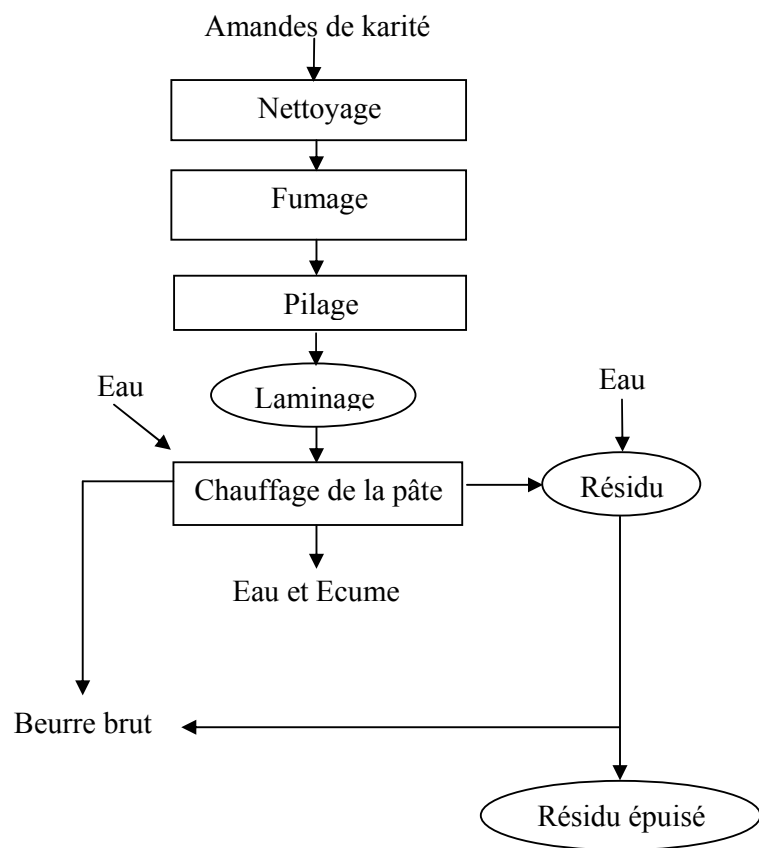


Figure 11 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité par chauffage de la pâte au Burkina Faso (Kassamba, 1997)

○ Facultatif

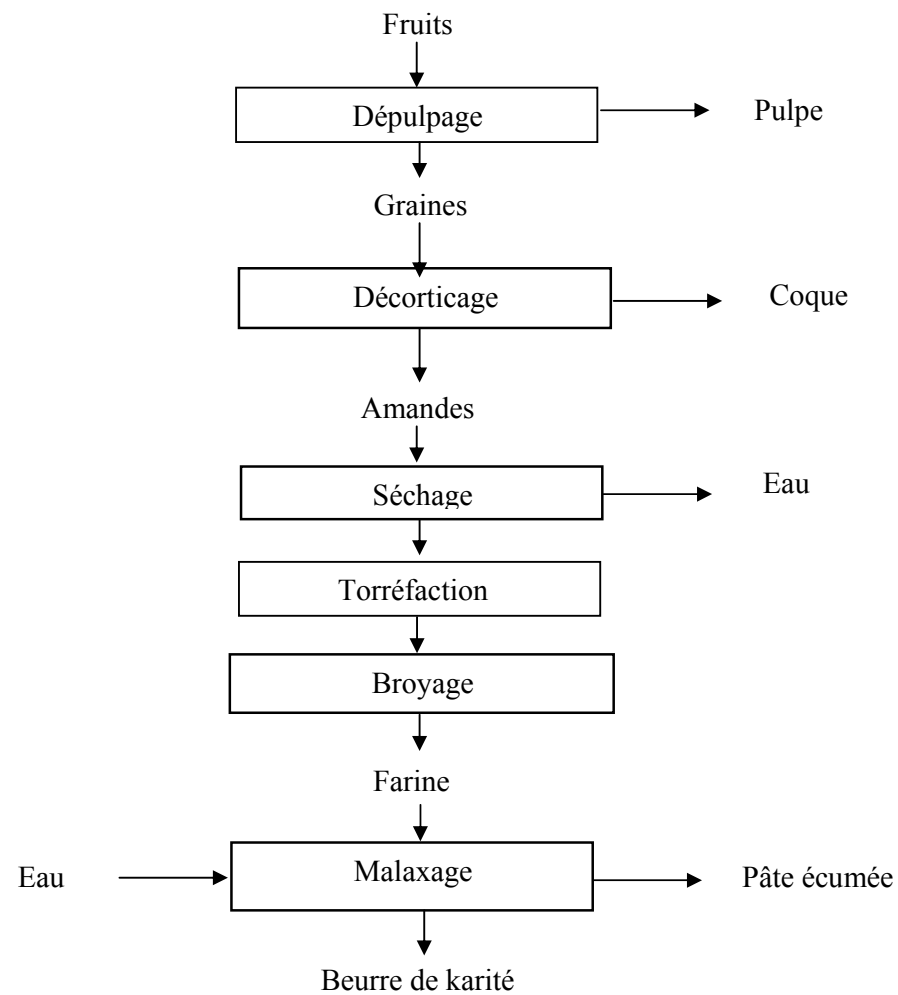


Figure 12 : Le schéma du procédé d'extraction du beurre de karité de Bangoua au Cameroun (Womeni, 2004)

1.3.1.1.2 Les procédés améliorés d'extraction

Les procédés traditionnels d'extraction du beurre du karité comprennent alors les opérations dites de grande pénibilité. Il s'agit notamment des opérations de décortilage des graines, de pilage des amandes, de broyage fin des amandes, de la cuisson (torréfaction) des amandes et surtout de celle d'extraction. Les méthodes améliorées d'extraction recherchent dans leur conception une baisse de la pénibilité du travail, une augmentation du rendement d'extraction et la qualité du beurre (Nianogo, Bougouma & Tapsoba, 1997). Singulièrement, les améliorations concernent d'une part le broyage manuel qui est remplacé par l'utilisation des moulins (broyeurs) à meules actionnés par un moteur, les amandes introduites étant entières ou pré-concassées. D'autre part, elles portent sur l'extraction proprement dite. Dans ce dernier cas, on utilise les presses qui peuvent être manuelles ou motorisées. Certains travaux (Tano-Debrah & Ohta, 1994) portent sur l'amélioration du rendement d'extraction aqueuse grâce aux enzymes.

a. L'extraction par presses manuelles

Elles comprennent des cylindres qui jouent le rôle de cartouche de pressage. Les dimensions, hauteur et diamètre, de ces cylindres varient en fonction des presses. Les perforations se trouvent sur tout le périmètre du cylindre. L'huile s'écoule pendant le pressage à travers ces orifices d'environ 1 à 2 mm de diamètre. Les amandes sont introduites de façon continue dans la cartouche en intercalant des plaques métalliques sphériques pour une bonne répartition des forces. La figure 13 donne un exemple de méthodes d'extraction du beurre de karité par pressage manuel. En dehors de l'opération d'extraction, les autres opérations sont similaires à celles déjà évoquées dans les procédés traditionnels.

On distingue 3 principales presses manuelles : la presse à vis verticale ; la presse à vis horizontale et la presse hydraulique ou à cric.

La société SPE/MTK (Société de Production et d'Exploitation de Matériel de Traitement de Karité) dont le siège est à Koudougou au Burkina Faso fabrique et distribue les presses à vis verticale. Dans ce pays, les presses horizontales sont mises au point par l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologie (IRSAT) basé à Ouagadougou. Ce type de presse est largement utilisée par les groupements de femmes au Burkina Faso (SNV, 1991 ; Kassamba, 1997 ; Nianogo *et al.*, 1997 ; UNIFEM, 1997). N'gouro Sanogo (1997) mentionne l'exploitation des presses à vis au Sénégal, en Gambie et au Mali où elles servent au traitement du karité et d'autres oléagineux conventionnels (arachide, sésame).

Au Burkina Faso, les femmes utilisent également la presse hydraulique. Cette dernière est développée par le Projet d'Appui à l'Artisanat dans le Yatenga et le Sourou (PAAYS) basé à Gourcy. Au Burkina Faso et au Mali, une presse à cric a été testée et vulgarisée pour remplacer toute la chaîne, depuis le pilage jusqu'au lavage (Bruinsma, 1997). Au Ghana, Oluwole, Aviara et Haque (2004) ont développé et testé la performance d'un broyeur motorisé à impact utilisant la force centrifuge du disque. Ce broyeur a donné de bons résultats dans le broyage des amandes de karité.

Une presse à vis verticale a été développée à l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles (ENSAI) de l'Université de Ngaoundéré au Cameroun. Cette presse dénommée KCT2002AIRE est encore à l'échelle pilote et sert aux travaux de recherche (Tchiégang, Ngo Oum, Aboubakar Dandjouma & Kapseu, 2004).

Les presses manuelles ont l'inconvénient de n'être accessibles qu'aux groupements organisés, et de présenter des pannes fréquentes. Ensuite, son coût élevé requiert un soutien extérieur pour son acquisition (Nianogo *et al.*, 1997). Elles présentent également une productivité limitée (200 kg d'amandes traitées par jour). Une granulométrie autour de 5 mm est nécessaire pour l'obtention d'un bon rendement d'extraction (SNV, 1991). Cependant, les

productrices obtiennent un rendement plus élevé (28 à 32,5%) que dans les procédés traditionnels (25 à 28%) (UNIFEM, 1997).

b. L'extraction par presses motorisées

Les presses motorisées sont des presses actionnées par un moteur. Dans ce type, on distingue les presses semi-industrielles de capacité de traitement d'amandes de 3 t/jour, et les presses industrielles de capacité supérieure à 25 t d'amandes/jour. Nianogo *et al.* (1997) notent au Burkina Faso l'existence de 6 types de presses motorisées : française, anglaise, taïwanaise, italienne, indienne et japonaise. Toutefois, seules les presses indienne et japonaise sont fonctionnelles (Kassamba, 1997 ; UNIFEM, 1997). Ce sont des presses à vis sans fin actionnées par un moteur.

Les procédés liés à chacune des deux presses présentent quelques variations. La presse japonaise (procédé CECOCO) agit directement sur les amandes naturelles. L'opération de torréfaction s'effectue aussi indépendamment de la presse. Au contraire, la presse indienne (procédé CINTEC), VIREN, est dotée d'un concasseur d'amandes et d'un cuiseur. La trémie servant de cuiseur est munie d'une arrivée de vapeur d'eau pour le chauffage et d'un racleur pour homogénéiser le mélange lors de la torréfaction. Elles sont par contre munies toutes les deux d'un filtre presse pour la filtration du beurre après pressage.

En ce qui concerne le procédé CINTEC, les amandes concassées sont envoyées dans la trémie pour torréfaction. La vis sans fin entraîne le produit chaud dans la cage de pressage. Sous la force de pression, l'huile s'écoule à travers les orifices de la cage et est recueillie dans un bac qui sert aussi au stockage de l'huile. Du bac, cette huile est pompée vers le filtre presse où elle traverse une toile filtrante pour être récupérée et conditionnée.

Quant au procédé CECOCO, les amandes sont déversées dans la trémie préchauffée afin de faciliter l'écoulement du beurre. Elles sont amenées ensuite dans la cage de pressage à l'aide d'une vis d'Archimède, qui procède à un broyage et un pressage en fin de vis. L'huile

arrive dans un bac en s'écoulant à travers les perforations de la cage. Elle est enfin pompée vers le filtre presse et récupérée comme dans le procédé précédent.

La figure 14 présente le procédé d'extraction du beurre de karité par presse motorisée. « SIS-Engineering », une entreprise au Ghana, a mis au point un appareil qui mécanise le barattage et le lavage (Womeni, 2004). Le système Mockarité est appliqué au Burkina Faso et au Mali. Il utilise les amandes entières et effectue pratiquement toutes les opérations jusqu'au barattage. Le beurre est ensuite recueilli dans la centrifugeuse par flottaison (UNIFEM, 1997). Deux petites presses à piston sont testées au Mali. Une de ces presses, manuelle, est actuellement vulgarisée au Zimbabwe et en Tanzanie pour la production d'huile de tournesol. Cependant, les résultats obtenus avec le karité n'ont pas été très encourageants.

Les presses motorisées ont une plus grande productivité, mais le coût d'acquisition est prohibitif pour la plupart des groupements de femmes. Par contre, le rendement d'extraction peut atteindre 36%.

A notre connaissance, l'utilisation des presses pour l'extraction du beurre de karité n'est pas encore appliquée au Cameroun, ni à l'échelle artisanale, ni à l'échelle industrielle.

c. L'extraction enzymatique

Il concerne essentiellement les procédés utilisant les catalyseurs biologiques pour améliorer le rendement d'extraction. En effet, Tano-Debrah et Ohta (1994) ont procédé à l'extraction aqueuse assistée d'enzymes et ont trouvé une amélioration du rendement. Ils étudient l'action des amylases, protéases, hemicellulases, cellulases et des pectinases sur de la farine autoclavée pour inactiver les enzymes intrinsèques. Elles sont ajoutées en préparation individuelle ou en composition après incubation et centrifugation, le surnageant est soumis à l'extraction grâce à l'éther de pétrole. Le beurre obtenu par cette technique aurait une teneur faible en matières insaponifiables, responsables des vertus reconnues au beurre de karité en cosmétique (Kassamba, 1997).

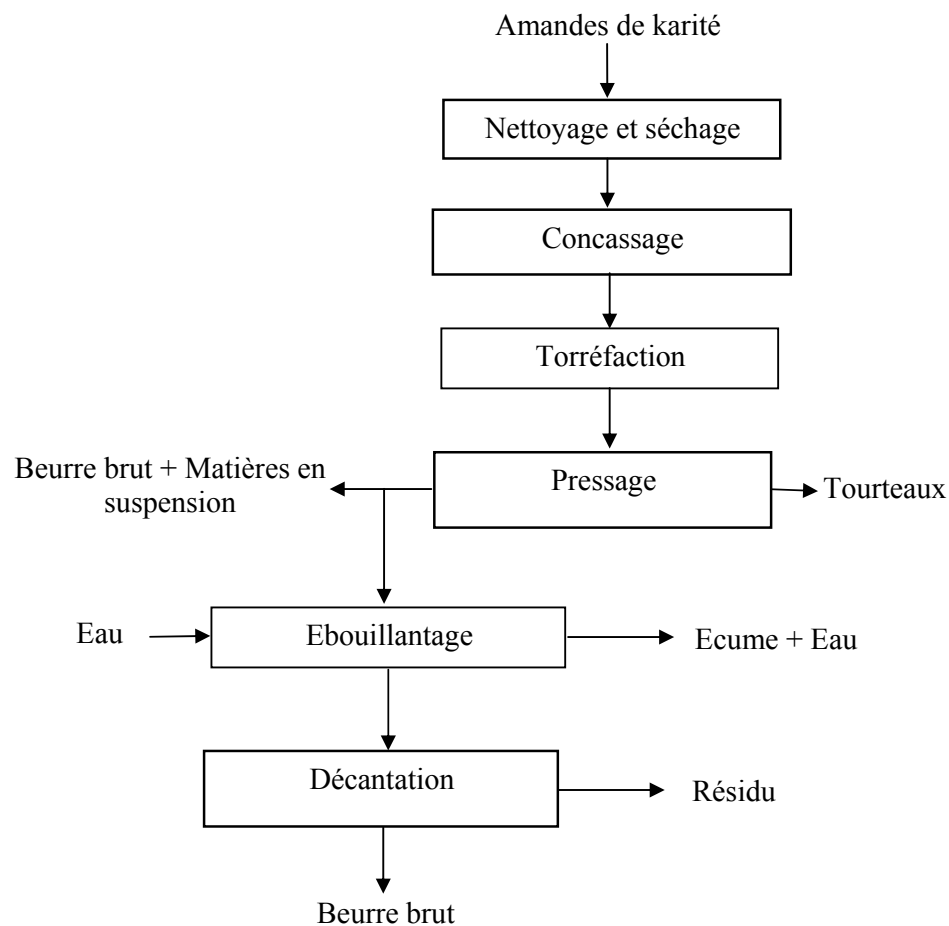


Figure 13 : Le procédé d'extraction du beurre de karité par presse manuelle au Burkina Faso (Kassamba, 1997)

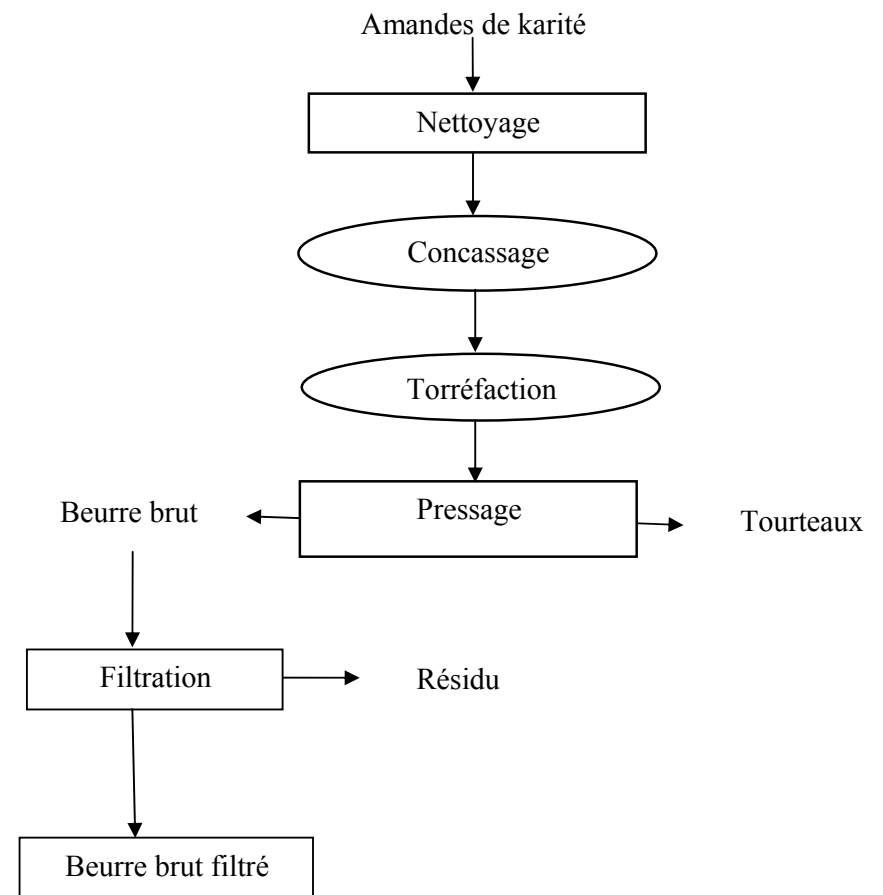


Figure 14 : Le procédé d'extraction du beurre de karité par presse motorisée au Burkina Faso (Kassamba, 1997)

○ N'existe pas dans le procédé CECOCO

I.3.1.2 Les caractéristiques du beurre de karité

I.3.1.2.1 Les caractéristiques organoleptiques

Généralement, à température ambiante, l'huile de karité forme une masse épaisse et parfois granulaire. Elle est dite concrète et appelée beurre de karité (planche 9). Le beurre de bonne qualité est de couleur blanchâtre, jaunâtre, jaune-claire ou blanc-grisâtre à l'état brut (SNV, 1991 ; Bekure, Donlan, Gordon & Thomson, 1997). Lorsque le procédé est mal conduit, le beurre est de couleur sombre et parfois rougeâtre. Le goût est étroitement lié à la qualité des amandes. Ainsi, une fermentation et un séchage mal conduits donnent des beurres rances peu attirant aussi bien pour l'utilisation alimentaire que cosmétique (SNV, 1991; APROMA, 1995).

Les beurres obtenus par barattage gardent la forme générale. Ils sont de couleur blanc-jaunâtre, ont un goût non agressif et une odeur caractéristique acceptable. Une décantation mal menée (trop courte) entraîne un beurre de couleur médiocre. Les amandes fermentées ou issues de graines trempées donnent une odeur de rance. D'où l'intérêt d'utiliser les amandes de bonne qualité. En effet, l'ébullition à l'eau pendant la phase de purification et de déshydratation entraîne, avec la vapeur d'eau, certains acides gras volatiles à courtes chaînes qui sont souvent responsables de l'odeur et du goût désagréable du beurre (Kassamba, 1997).

Quant à la méthode par chauffage de la pâte, la diffusion des composés colorants liposolubles dans le beurre, lui donne une couleur médiocre (sombre ou noir). Cette médiocrité est aussi due à la présence des résidus solides dans le beurre. Ce beurre est d'odeur et de saveur fortes.

Les beurres obtenus par les procédés traditionnels ne sont pas très attrayants sur les plans alimentaire et cosmétique. Ceci est dû à leur couleur et leur odeur. Une visite de terrain a permis d'observer des beurres noirs obtenus des amandes trempées pendant plusieurs semaines. La teneur en eau résiduelle élevée réduit considérablement la durée de

conservation. Le beurre est donc de moins bonne qualité (Kassamba, 1997 ; Nianogo *et al.*, 1997 ; PAF, 1999) si les procédés ne sont pas menés avec minutie, notamment le traitement des amandes et l'opération d'extraction proprement dite.

Le beurre provenant des presses manuelles a un goût désagréable. Ceci est un handicap en alimentation. Suite aux insuffisances du système de filtration, il contient aussi des matières en suspension qui réduisent son apparence. La réparation de ce problème par les femmes élève le taux d'humidité du beurre. La durée de conservation de ce beurre reste toutefois meilleure.

Les presses motorisées produisent un beurre de bonnes qualités organoleptiques. Il se conserve très bien. Cependant, la qualité initiale des amandes est primordiale car les amandes de qualité médiocre (fermentée ou trempée) donne au beurre une odeur de rance.

Le tableau 5 présente les caractéristiques du beurre en fonction du mode d'extraction.



Tableau 5 : Le beurre de karité en fonction du mode d'extraction (Kassamba, 1997)

Mode d'extraction	Caractéristiques du beurre (avec des amandes de bonne qualité)					
	Taux d'humidité	Taux d'impureté	Acidification	Oxydation	Destination alimentaire	Destination cosmétique
Barattage	élevé	élevé	prédisposé	prédisposé	bon	acceptable
Cuisson	élevé	peu	prédisposé	prédisposé	médiocre	médiocre
Presse manuelle	élevé	élevé	prédisposé	prédisposé	acceptable	acceptable
Presse motorisée	bon	bon	moindre	moindre	bon	Bon

1.3.1.2.2 Les caractéristiques physiques

Elles sont essentiellement tributaires de la composition chimique du beurre de karité. Ainsi, la teneur en acide oléique (et même en acide linoléique) abaisse son point de fusion. Cet acide gras insaturé a une température de fusion de 13,4°C. De façon générale, la fusion du beurre commence à 35°C pour être complète autour de 40°C. Le tableau 6 donne quelques paramètres physiques du beurre de karité.

Le beurre est complètement insoluble dans l'eau, peu soluble dans l'alcool éthylique absolu. Toutefois, sa solubilité augmente selon que le solvant est polaire. Son degré de solubilité est plus important quand on passe de l'éther éthylique au sulfure de carbone, en passant par l'hexane, le chloroforme et l'éther de pétrole (APROMA, 1995).

Tableau 6 : Les caractéristiques physiques du beurre de karité

Caractéristiques	Tchatchou (1991)	Tano-Debrah & Ohta (1994)	APROMA (1995)	Kapseu <i>et al.</i> (2001)	www.sheabutter.com
Eau et matières volatiles					< 0,05%
Couleur					Jaune
Densité	0,92			0,900 0,902	à 0,90 à 40°C
Impuretés insolubles dans l'hexane	9%				< 0.2 %
Point de fusion	39°C	34 à 36°C	35 à 40°C	40°C	29 à 34° Celsius
Point de solidification			23 à 25°C		

1.3.1.2.3 Les caractéristiques chimiques

Les caractéristiques chimiques du beurre de karité (tableau 7) sont étroitement liées à la méthode d'obtention. Le beurre obtenu par barattage ou chauffage de la pâte a une teneur faible en substances hydrosolubles à activité biologique recherchée tels que les tannins et les insaponifiables. Ceci le dévalorise pour les utilisations en cosmétique et pharmacologie. D'autre part, la teneur en eau résiduelle élevée le prédispose à la dégradation. Toutefois, la vapeur d'eau issue de la déshydratation ou de la cuisson emporte avec elle les acides gras volatiles, ceci réduit le taux d'acides gras libres (Kassamba, 1997). Womeni (2004) dans l'étude des relations entre les traitements traditionnels et la qualité du beurre afin d'identifier les opérations critiques des procédés traditionnels trouve aussi une limitation de l'acidification du beurre lors de la cuisson, mais une prédisposition à l'oxydation.

Les presses manuelles donnent des beurres de bien meilleures caractéristiques physico-chimiques, même si l'ébullition à l'eau pour éliminer les matières en suspension élève le taux d'humidité. Le couplage des presses motorisées à un système de filtration ne

donnant pas de matières en suspension dans le beurre, il confère à celui-ci des caractéristiques qui répondent le plus aux normes de qualité demandée (Kassamba, 1997).

De manière générale, en plus du latex, le beurre de karité brut contient les acides gras, les phytostérols et les insaponifiables. Il présente également un profil en triglycérides d'acides gras (principalement les acides oléique et stéarique) (tableau 8) semblables aux huiles végétales. La teneur en insaponifiable est très forte (environ 7% et voire jusqu'à 17%) dans le beurre de karité. Ceci le distingue du beurre de cacao ou de l'huile de palme. Cette teneur élevée est en partie due à la présence de latex guttoïde contenu dans l'amande (Ladurelle, 1984). En plus, selon Mensier (1957) on a trouvé dans l'insaponifiable le kartène, le lupéol, la β amyrine, le basséol et le parkéo 1.

Tableau 7: Les caractéristiques chimiques du beurre de karité

Caractéristiques	Terpend (1981)	Tchatchou (1991)	Tano-Debrah & Ohta (1994)	Kapseu <i>et al.</i> (2001)	www.sheabutter.com
Acides gras libres (%)	5		1,28		
Indice d'iode		71	58,53	55	64 à 72
Indice de saponification		174	180,37	180	160 à 200
Indice de peroxyde (méq/kg)		8	9,65		< 10
Matière insaponifiable (%)	3,5 à 17		7,48	5,9	environ 7 %

Tableau 8: La composition en acides gras (%) du beurre de karité

	Terpend (1981)	Feinberg, Favier & Ireland-Ripert (1987)	Tano Debrah & Ohta (1994)	Kapseu. (1998)
Acide caprylique (C8:0)			0,23	
Acide caprique (C10:0)			0,15	
Acide laurique (C12:0)			0,33	
Acide myristique (C14:0)			0,23	3,8
Acide palmitique (C16:0)	3	3,3	3,55	
Acide stéarique (C18:0)	45,5	44,0	44,44	41,6
Acide oléique (C18:1)	42,5	44,0	42,41	45,8
Acide linoléique (C18:2)	6,8	6,3	5,88	6,9
Acide linoléique (C18:3)	0,1	0,2	1,66	
Acide arachidique (C20:0)	1,5	1,7		1,4
Acide gadoléique	0,3			
Acide eicosénoïque (C20:1)		0,5		0,2
Acides gras saturés		49	48,94	46,8
Acides gras monoinsaturés		44,5	42,41	46
Acides gras polyinsaturés		6,5	7,54	6,9

I.3.1.3 Les propriétés du beurre de karité

Le beurre de karité constitue un produit recherché et apprécié pour ses propriétés dermatologiques liées à son taux élevé en matières insaponifiables, à sa teneur en vitamines et d'autres éléments actifs. En effet, comme toutes les graisses végétales, le beurre de karité a des effets adoucissants, hydratants et protecteurs. Il protège contre les rayons ultraviolets grâce à sa teneur en acide cinnamique, et est incorporé dans les produits antisolaires. Le latex présent dans le beurre de karité préviendrait également certaines allergies solaires (UNIFEM, 1997). Sa composition en vitamine A lui confère une activité régénératrice des cellules de la peau et augmente la circulation capillaire. Il permet de lutter contre les plaies, les dermites, les gerçures et les ulcères de la peau. La caractéristique anti-élastase du beurre de karité est utilisée en cosmétique pour lutter contre le vieillissement de la peau. Il participe alors à la

restructuration de l'épiderme. Son inertie dermatologique fait du visage un grand bénéficiaire de son usage quotidien. Il est ainsi appliqué dans tous les endroits, même les plus sensibles (environs des yeux, bases du nez et commissures des lèvres).

Le beurre de karité a un effet régénérateur sur les cheveux. Il est également reconnu efficace contre courbatures et rhumatismes, et sert de décongestionnant nasal contre le rhume de cerveau. Le beurre de karité est également de grand intérêt dans le domaine sportif. Il accélère l'échauffement du muscle et facilite la récupération de ce dernier après l'effort. Sur le plan médicinal, le beurre est utilisé comme excipient.

De façon générale, l'exploitation des propriétés du beurre de karité dans l'industrie agro-alimentaire vient de son point de fusion élevé (37,8°C) et de sa composition en acides gras. Dans l'industrie cosmétique (et pharmacologique) provient de son essence naturelle, mais surtout de sa composition chimique. Il est ainsi :

- riche en triglycérides (80%), ceci lui permet de lutter contre la déshydratation de la peau ;
- riche en insaponifiables (17% maximum), ceci permet d'étendre la plage de protection dans les filtres solaires (APROMA, 1995) ;
- riche en vitamines (A et F), ceci lui confère des propriétés curatives contre certaines maladies de la peau ;
- faible en acides gras libres (5%), ceci lui donne une tolérance absolue par la peau.

Des composés de la fraction insaponifiable et du latex sont responsables de plusieurs applications : protection de la peau (alpha et beta amyryne) ; cicatrisation (parkéol) ; désinfection (lupéol) ; applications avant et après soleil (butyruspermol) ; stimulation des cellules (alpha spinastérol) ; régénération (delta 7 stigmastérol) et prévention des allergies au soleil (latex).

I.3.1.4 Le marché et l'avenir du beurre de karité

Les principaux secteurs industriels utilisateurs du beurre de karité sont les industries agro-alimentaire et cosmétique. Le secteur agro-alimentaire représente 90% des utilisations de ce produit. L'industrie du chocolat en est le principal consommateur car le beurre de karité est un bon substitut du beurre de cacao, encore appelé «Cocoa Butter Equivalent» (CBE). Le marché de l'industrie chocolatière est fonction de deux critères : la similitude de texture et de composition du beurre de karité et de celui du cacao et le niveau des prix du beurre de karité par rapport aux prix du beurre de cacao. Les marchés de deux beurres sont donc étroitement liés. En plus du beurre de karité, l'huile de palme fractionnée et le beurre d'illipe ont une teneur en triglycérides proche de celle du beurre de cacao.

On note une amélioration des exportations du beurre de karité. Au Burkina Faso, elles se chiffraient en 1998 à 2300 t (pour une valeur de 730.000.000 FCFA) contre moins de 3 t de 1992 à 1996 (PAF, 1999). Cet optimisme est aussi encouragé par la décision de la Communauté Economique Européenne (CEE) de substituer le beurre de cacao par le beurre de karité et autres huiles végétales en chocolaterie à hauteur de 5%. Cette pratique était déjà courante en Angleterre, en Irlande et au Danemark avant l'adoption de cette réglementation. Ce pourcentage atteignait 15% dans les pays de l'Europe de l'Est, mais juste à titre gustatif. On peut aussi trouver au Japon des chocolats titrant jusqu'à 8% de substitut végétal.

Les critères d'acidité des grandes firmes acheteurs du beurre de karité sont les suivants :

- Acidité de base 6% avec une bonification réciproque de 1 pour 1 ;
- Acidité maximale à l'embarquement 9%.

Cela signifie que le prix d'achat du beurre est fixé à partir de 6% de degré d'acidité. A chaque baisse de 1 degré d'acidité en dessous de 6, le vendeur obtient une bonification de 1% sur le prix d'achat de base. Il perd 1% sur ce prix pour chaque degré d'acidité au dessus de 6

et ce, jusqu'à 9% d'acidité. La valeur de 9% est le taux d'acidité au dessus duquel le beurre n'est plus accepté (Kassamba, 1997).

L'industrie cosmétique est le deuxième plus important utilisateur du beurre de karité en Europe et au Japon (Bekure *et al.*, 1997). Toutefois, les volumes absorbés représentent juste 0,5% de la consommation annuelle européenne (200 à 400 t, contre 50 à 60000 t pour l'agro-alimentaire). Les produits cosmétiques à base de beurre de karité coûtent cher, d'où l'intérêt de ce secteur pour ce produit. A titre d'exemple, une tonne de beurre brut à destination alimentaire coûte environ 5000 FF alors qu'une tonne de matière première cosmétique à base de beurre de karité atteint les 35000 FF (APROMA, 1995). Cette industrie est par conséquent plus exigeante quant à la qualité du beurre. Le tableau 9 indique les indices souhaités du beurre de karité en cosmétologie. Les beurres rencontrés sur les marchés ne répondent pas à ces critères. Ils doivent au préalable être raffinés, et les principaux raffineurs sont installés en Europe.

Tableau 9: Les indices de qualité du beurre de karité en cosmétique et du beurre de karité trouvé en général sur les marchés (Kassamba, 1997)

Indices	Taux souhaités en cosmétique	Beurre commercialisé
Couleur (Gardner)	3	> 10
Impuretés (%)	0	> 1,5
Indice d'acide (acide oléique %)	0,3	> 5
Indice de peroxyde (meq/kg)	1	> 12,5

En définitive, les méthodes traditionnelles, semi-industrielles (presses à vis) et industrielles (presses motorisées) existent pour valoriser les amandes de karité en beurre. Ce beurre fait l'objet d'un commerce international et constitue pour les industries alimentaires (du chocolat) et cosmétiques une précieuse matière première, compte tenu de sa composition chimique. Il est utilisé pour de nombreux usages par les populations africaines. Les procédés traditionnels courants ne donnent pas un beurre de qualité souhaitée sur le marché mondial et

demandent des traitements ultérieurs (raffinage). La qualité du beurre est étroitement liée à plusieurs facteurs dont l'origine et le traitement des amandes. Ceci conduit à des beurres de qualité variable. Les presses à vis réduisent la pénibilité des opérations et augmentent le rendement d'extraction, mais nécessitent un entretien minutieux afin d'éviter les pannes. Les presses motorisées, quant à eux, donnent un beurre de qualité souhaitée si les amandes utilisées sont bonnes.

I.3.2 L'HUILE DE L'AIELE

I.3.2.1 L'extraction de l'huile de l'aiélé

En général, l'extraction de cette huile est réalisée lors des travaux de laboratoire aux solvants (hexane, éther de pétrole, chloroforme) ou à l'aide de presse à vis vertical (KCT 2002 AIRE). A cette échelle, les travaux de Agbo N'zi et Chatigre Kouamé (1996) et d'Aboubakar Djandjouma (2005) montrent que l'ajout d'enzymes sur la pulpe séchée améliore considérablement le taux d'extraction.

Toutefois, certains chercheurs signalent au Cameroun, l'extraction traditionnelle de cette huile par l'ethnie koma dans la région du Mont Alantika (Nord Cameroun) et par quelques ethnies de la région de Ngaoundal dans l'Adamaoua (Tchiegang *et al.*, 1998). L'enquête que nous avons effectuée a permis de déterminer la méthode d'extraction traditionnelle (figure 15) dans le village Kalaldi, situé dans le département du Mbere, province de l'Adamaoua (Cameroun) entre les villes de Ngaoundal et Meïganga. On retrouve les opérations de ramollissement de la pulpe, de pilage et d'extraction proprement dite.

a. Le ramollissement de la pulpe

Elle consiste à ramollir la pulpe des fruits par trempage dans de l'eau tiède. Cette opération a pour but aussi de faciliter l'extraction de l'huile.

b. Le pilage

Les fruits ramollis sont pilés afin de séparer la pulpe du noyau. Cette opération permet également d'affiner la pulpe en pâte.

c. L'extraction de l'huile

La pâte obtenue est introduite dans une marmite où on ajoute un peu d'eau. On procède à la cuisson à feu doux en récupérant à la surface et à la louche l'huile formée. L'ajout d'eau est effectué jusqu'à récupération totale de la matière grasse.

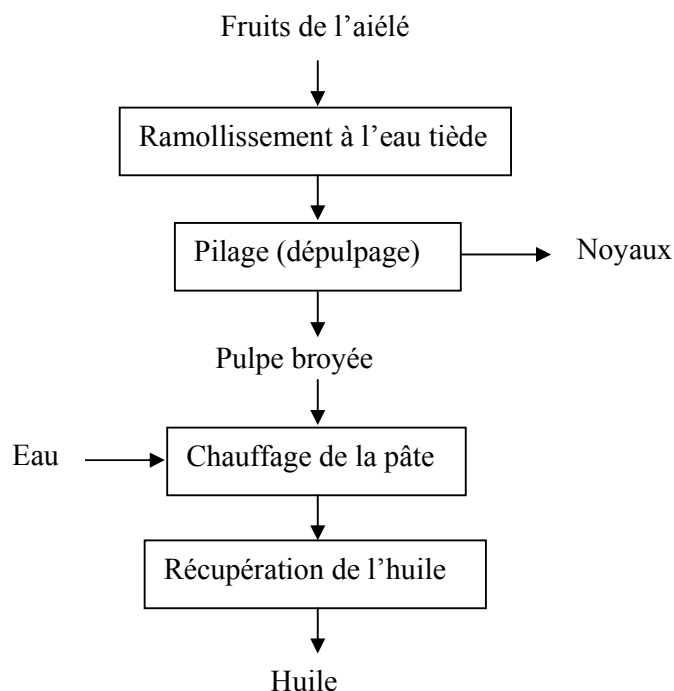


Figure 15 : Le procédé traditionnel d'extraction d'huile de l'ailé à Kalaldi (Cameroun)

I.3.2.2 Les caractéristiques de l'huile de l'ailé

I.3.2.2.1 Les caractéristiques organoleptiques

La forme de l'huile de l'ailé dépend du degré de maturité des fruits. Elle est fluide, semi-solide ou solide à température ambiante (Agbo N'zi, 1986). Sa couleur à l'état brut peut être verte ou vert-citron, et même vert-sombre (planche 10). L'huile de la pulpe de l'ailé brut

a un goût et une saveur « forts » et caractéristique. Le goût est aussi lié au soin apporté lors du séchage. Un séchage prononcé conduit à des huiles de goût « d'huile de friture ».



Planche 10 : L'huile de l'aiélé

1.3.2.2.2 Les caractéristiques physiques

La littérature ne ressort pas assez de données sur les paramètres physiques de l'huile de l'aiélé. Agbo N'zi *et al.* (1992) donnent, cependant, le point de fusion de cette huile à 44,5°C et celui de solidification à 35,5°C. On peut également dire que ces caractéristiques sont liées à la composition chimique de l'huile. En effet, la teneur en acide oléique (13,4°C) et en acide linoléique (-5°C) abaisse son point de fusion. Par contre, la teneur en acide palmitique (53,9°C) et en acide stéarique (69,6°C) augmente son point de solidification.

Par ailleurs, comme toute huile végétale, l'huile de la pulpe de l'aiélé n'est pas soluble dans l'eau, mais solubles dans les solvants organiques.

1.3.2.2.3 Les caractéristiques chimiques

Le tableau 10 fait état des résultats de quelques travaux sur les caractéristiques chimiques de l'huile de l'aiélé, tandis que le tableau 11 présente sa composition en acides gras.

Tableau 10 : Les caractéristiques chimiques de l'huile de la pulpe de l'aiélé

Caractéristiques	Agbo N'zi <i>et al.</i> (1992)	Ajiwe <i>et al.</i> (1998)	Kapseu <i>et al.</i> (1999)	Tchiégang <i>et al.</i> (2000)
Indice d'acide		32,48 ± 0,8		4,69 - 10,01
Indice d'iode	36 ± 3	100,5 ± 5,18	40	116,62 - 152,8
Indice de saponification	206,4 ± 2,6	44,8 ± 3,1	202	177,28 - 197,79
Matière insaponifiable (%)	1,0 ± 0,1		1,3	

Tableau 11: La composition en acides gras (%) de l'huile de la pulpe de l'aiélé

	Agbo N'zi <i>et al.</i> (1992)	Kapseu (1998)
Acide caprylique (C8:0)		
Acide caprique (C10:0)		
Acide laurique (C12:0)		
Acide myristique (C14:0)	0,3	0,1
Acide myristoléique (C14:1)	0,5	
Acide palmitique (C16:0)	3,8	35,3
Acide palmitoléique (C16:1)	0,8	0,7
Acide stéarique (C18:0)	3,2	1,5
Acide oléique (C18:1)	89,4	33,4
Acide linoléique (C18:2)	0,7	26,6
Acide linolénique (C18:3)	1,6	0,2
Acide arachidique (C20:0)	0,3	1,7
Acide eicosénoïque (C20:1)	0,6	0,5
Acide lignocérique (C24:0)		0,05
Acides gras saturés	7,6	36,9
Acides gras monoinsaturés	91,3	34,1
Acides gras polyinsaturés	2,3	28,8

I.3.2.3 Les propriétés de l'huile de l'aiélé

De nombreux facteurs (origine, cultivar, degré de maturité, et méthodes d'obtention) influencent les propriétés chimiques de l'huile de l'aiélé (Kapseu *et al.*, 1999). Car ils introduisent des variations dans la composition en acides gras de l'huile. Son importance en acides gras insaturés la rapproche en proportion à celle de l'huile de palme brute (IRHO, 1967) et la prédispose pour une utilisation alimentaire. De façon générale, cette huile est utilisée en :

- Alimentation. Du fait de sa composition en acides gras saturés et insaturés, elle peut servir en friture, en assaisonnement et en cuisine. Il serait intéressant de la désodoriser au préalable ;
- Cosmétologie. En dépit de sa faible fraction en insaponifiables qui ne constitue pas un atout pour son utilisation, l'huile de l'aiélé peut servir de matière première en savonnerie (Ajiwe, Ajibla & Martins, 1999), notamment au vu de son indice de saponification parfois élevée. Des investigations seraient faites au Nigeria dans son utilisation pour la mise au point des shampoings, cirages, laits de beauté et dans les moteurs à essence.

I.3.2.4 Le marché et l'avenir de l'huile de l'aiélé

L'absence de valorisation de la pulpe de l'aiélé en huile à une échelle autre que celle de l'expérimentation n'ouvre pas encore un marché pour ce produit. Toutefois, les résultats des travaux dans cette optique montre un grand horizon pour l'avenir de cette huile. Signalons qu'une entrave à cet avenir pourrait être le fruit lui-même, en ce sens qu'il est plus consommé comme fruit de bouche ou d'accompagnement que comme source d'huile.

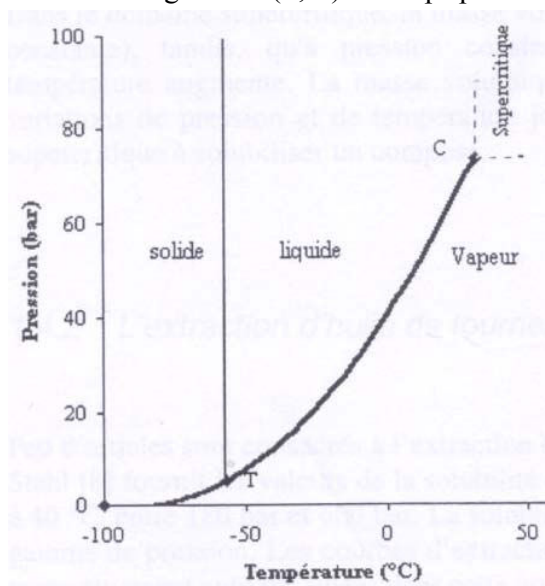
En définitive, les fruits de l'aiélé ne connaissent pas actuellement de valorisation en huile à une échelle autre que celle de l'expérimentation. L'huile de la pulpe de l'aiélé présente des aptitudes certaines en alimentation.

I.4 L'EXTRACTION DE MATIERE GRASSE DE KARITE ET D'AIELE PAR LE CO₂ SUPERCRITIQUE

Avec l'instauration des mesures contre la pollution et des réglementations dans les domaines sécuritaire et toxicologique (Mizandjian & Amen, 1987), les solvants d'extraction qui respectent ces conditions sont de plus en plus utilisés (Borch-Jensen & Mollerup, 1996). Dans ce registre, les fluides supercritiques bénéficient d'une place de choix (Pellerin, Camilli & Laloue, 1987 ; Pouillot, Dillow-Wilson & Eckert, 1995). L'extraction des substances naturelles, particulièrement des huiles, par le CO₂ supercritique est donc une technique relativement récente.

I.4.1 LES GENERALITES SUR LES FLUIDES SUPERCRITIQUES

Le point critique a été découvert par le baron français Charles Cagniard de La Tour en 1821, mais sa compréhension vient de Thomas Andrews vers la fin du 20^{ème} siècle. La figure 16 présente le diagramme (P, T) du corps pur CO₂.



T point triple : $P_t = 5,2$ bars ; $T_t = -56,6$ °C

C point critique : $P_c = 73,8$ bars ; $T_c = 31$ °C

Figure 16 : Le diagramme (P, T) du corps pur CO₂ (Royer, 1999)

I.4.1.1 Les définitions

Le point triple d'un corps est le point (température, pression) où il se trouve sous les trois états de la matière. Il est alors considéré comme pur.

Le point critique d'un mélange est le point au-dessus duquel le mélange se trouve dans un seul état, intermédiaire entre liquide et gaz.

Un fluide supercritique est un fluide qui possède à la fois les propriétés thermodynamiques d'un gaz (viscosité faible et répartition volumique uniforme) et d'un liquide (grande masse volumique). Autrement dit, un fluide supercritique (FSC) est donc un fluide aussi dense que le liquide tout en conservant certaines propriétés du gaz (Scheili & Schlenker, 1994).

I.4.1.2 L'importance des fluides supercritiques (FSC)

L'intérêt des FSC vient des propriétés thermodynamiques que leur confèrent leur état de gaz-liquide et leur innocuité sur l'environnement. Les propriétés thermodynamiques, hydrodynamiques et de transport d'un solvant au voisinage de son point critique varient considérablement. Ainsi le coefficient de compressibilité, K_T , est responsable d'un grand nombre de ses propriétés :

$$K_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dP} \right) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dP} \right) \quad (27)$$

Leur intérêt se justifie donc également par:

- Un pouvoir solvant : leur masse volumique élevée contribue à donner aux FSC un vaste domaine de sélectivité et un grand pouvoir solvant (Pouillot, 1995; Peter, 1996). Ceci réduit considérablement la consommation des solvants organiques (Borch-Jensen & Mollerup, 1996) et les quantités de déchets déversés dans l'environnement;
- Une propriété cinétique : la combinaison gaz-liquide entraîne une faible viscosité des FSC qui leur confère des transferts de matière rapides. La diffusion moléculaire élevée due

aux propriétés de l'état liquide permet des rendements élevés suite à une solubilisation importante des produits ;

- Une modulation continue : par une action sur la température et la pression, on peut favoriser le caractère gaz ou liquide (figure 17) et solubiliser des molécules différentes en phase supercritique et extraire des solutés par détente.

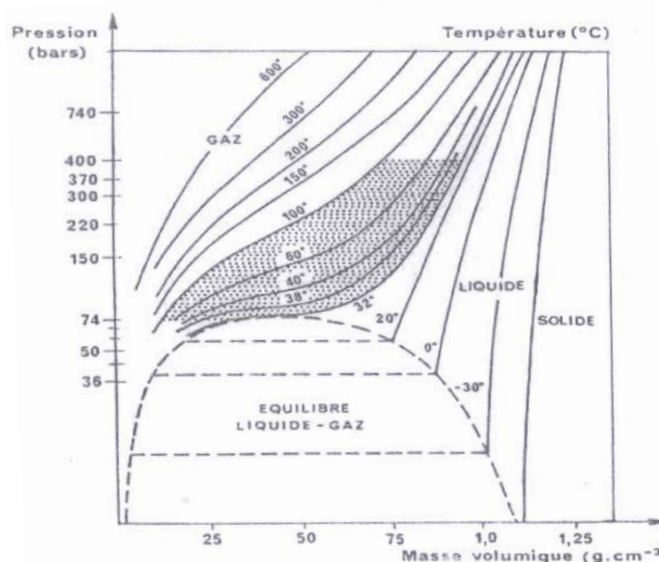


Figure 17 : Le diagramme (P, ρ) du dioxyde de carbone (Sandler, 1999 cité par Mendes Camelo, 2002)

Il est possible d'accroître le pouvoir solvant d'un FSC par ajout d'un cosolvant (généralement l'éthanol dans le cas du CO_2 supercritique). L'action des cosolvants provient des liaisons intermoléculaires (liaison H, formation de complexes) et des forces de dispersion (Richon, 1995). Ils modifient le comportement thermodynamique du solvant, augmente sa solubilité, améliore et crée sa sélectivité (Rossi, 1995).

Le cosolvant est un composé qui est ajouté au solvant pour accroître son pouvoir solvant (Rossi, 1995).

Les cosolvants apolaires sont moins sélectifs car ils améliorent sans distinction la solubilité des composés polaires et apolaires. Par contre, les cosolvants polaires sont plus

sélectifs par rapport aux composés polaires, ceci implique des pressions de fonctionnement moins élevées puisqu'ils sont plus volatiles. Il faut signaler que plus une substance est riche en groupements OH moins elle est soluble dans les FSC apolaires (Peter, 1996) à cause des interactions moléculaires.

I.4.2. LE CAS DU DIOXYDE DE CARBONE

I.4.2.1 Les avantages d'utilisation

Le dioxyde de carbone (CO_2) est le fluide supercritique le plus utilisé car il est peu onéreux et disponible (Richon, 1995 ; Chao, 1996). Il est de très bonne inflammabilité car il est bien toléré jusqu'aux concentrations significatives en air respirable. Toutefois, les concentrations supérieures à 3% sont nocives et asphyxiantes.

L'utilisation du CO_2 permet de réduire considérablement les temps d'analyse (en chromatographie). Il est utilisé comme solvant d'extraction dans les industries alimentaire et pharmacologique (exemple de l'extrait de dattes pour traiter la prostate du fait de son innocuité) (Del Valle, Rivera, Mattea, Ruetsch, Daghero & Flores, 2004).

Il y a absence des réactions secondaires et enrichissement en principes actifs typiques de la matière première (Pellerin *et al.*, 1987). Le CO_2 supercritique aurait un effet stérilisateur à des pressions moyennes allant de 10 à 100 bars (Perrut, 1995).

L'utilisation industrielle du CO_2 supercritique à grande échelle en immobiliserait des quantités importantes de CO_2 de l'atmosphère et protégerait ainsi l'environnement contre l'effet de serre.

I.4.2.2 Les contraintes d'utilisation

L'aspect économique peut constituer un handicap à l'utilisation des FSC. Par exemple, si en extraction des substances naturelles (Pellerin *et al.*, 1987) la qualité organoleptique des produits est meilleure, on ne peut pas certifier que les techniques utilisant les FSC sont

économiquement meilleures. Le véritable inconvénient serait le coût initial élevé de l'équipement car certains procédés exigent des pressions importantes (250 bars).

Par contre, Eggers (1996) affirme que l'extraction des huiles des oléagineux serait économique, du point de vue énergétique, si elle est conduite de façon continue.

I.4.2.3 L'extraction des huiles

Un des principaux domaines d'application est l'extraction des substances naturelles, dont les huiles. En général, cette extraction ramène à la maîtrise de la solubilité des solutés à travers la température et la pression. Cette solubilité est fonction des similitudes et des différences dans les propriétés thermodynamiques et structurales du soluté et du solvant (Lira, 1996). A ce propos, Chrastil (1982) donne au tableau 12 les constantes de solubilité (c) (g/l) à la température T égale à 323 K de quelques composés dans le dioxyde de carbone. Les paramètres a , b et k sont des paramètres empiriques de la corrélation de Chrastil ($c = \rho^k \exp\left(\frac{a}{T} + b\right)$, ρ la masse volumique du CO_2 (kg/m^3)). La solubilité dépend aussi de la granulométrie, la teneur en eau et de la porosité du produit (Eggers, 1996).

Tableau 12: Les constantes de solubilité dans le dioxyde de carbone (Chrastil, 1982)

Composés	k	a	b
Acide stéarique	1,821	-10664,5	22,320
Acide oléique	7,922	-15360,5	-2,499
Tripalmitine	2,980	-2387,8	-12,150
Tristéarine	9,750	-8771,6	-39,440
Trioléine	5,216	-11386,5	2,415
Trilinoléine	5,511	-10082,7	-4,060
Eau	1,549	-2826,4	-0,807

La littérature présente l'extraction des huiles des graines oléagineuses (soja, graines de coton, germes de maïs, noix de palme, palmiste, copra, arachide) par Eggers (1996), et de l'huile d'arachide par Goodrun, Kilgo et Santerre (1996). L'extraction de l'huile de tournesol

et de colza par CO₂ supercritique a été étudiée par Royer (1999) et d'autres travaux ont été menés sur l'extraction au CO₂ supercritique avec ou sans cosolvant (Rossi, 1995) en vue d'extraire le beurre de cacao. Aucun travail, à notre connaissance, n'a encore pas été effectué sur l'extraction au CO₂ supercritique des matières grasses du karité et de l'aiélé.

**CHAPITRE II :
ISOTHERMES DE SORPTION
D'EAU DE L'AMANDE DE
KARITE ET DE LA PULPE DE
L'AIELE**

I. INTRODUCTION

Le karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) (Booth & Wickens, 1988) et l'aiélé (*Canarium schweinfurthii* Engl.) (Aubreville, 1959 ; Njoukam, 1998a) sont des arbres à usages multiples dont les importances géographique et lipidique sont avérées. Toutefois, le peu de disponibilité des producteurs (karité) et les conditions atmosphériques des entrepôts d'écoulement (aiélé) les soumettent aux différents facteurs de détérioration, dont la température et l'humidité relative de l'environnement. L'importance des conditions microbiologiques sur le traitement de ces fruits a pourtant déjà été signalée (SNV, 1991 ; Jiokap Nono & Kapseu, 1999). Par ailleurs, l'entreposage inapproprié des fruits (enfouissement sous terre ou en tas au sol) cause une élévation de la température (BIT, 1986) qui, combinée à la teneur en eau, favorise la lipolyse. UNIFEM (1997) signale une germination des amandes du karité lors d'un stockage prolongé en fosses. Ceci mobilise les lipases qui rompent les chaînes de triglycérides et libèrent les acides gras. On observe alors une variabilité de la qualité de la matière grasse extraite causée par la non maîtrise des conditions de stockage. Il devient alors intéressant de maîtriser les conditions de stockage qui garantissent une meilleure conservation de ces fruits. La phase fondamentale dans la compréhension scientifique de la conservation implique l'état de l'eau dans ces produits et donc les isothermes de sorption. En effet, ces dernières permettent de prévoir le comportement d'un aliment, et donnent des informations relatives à l'attaque microbienne et aux changements lors d'un traitement ou de l'entreposage. La capacité d'adsorption ou de désorption d'eau, ainsi que la structure cellulaire des produits agricoles pouvant être influencées par leur composition (Bizot, 1983), il est important de déterminer les caractéristiques physiques et chimiques des échantillons afin de mieux appréhender et de mieux préciser leur comportement à la sorption. En effet, la libération ou l'adsorption de l'eau est fonction de la matière sèche constituant les produits en ce sens qu'elle interagit avec l'eau (Kaymak-Ertekin & Gedik, 2004). Aucune étude n'a encore été

effectuée sur les isothermes de sorption des amandes de karité. Les travaux de Noumi *et al.* (2003) se sont intéressés aux isothermes des fruits de l'aiélé. Ces travaux qui portent sur la détermination et la modélisation des isothermes de désorption de la pulpe des fruits de l'aiélé ont permis d'obtenir des isothermes à 50, 60 et 70°C, températures atteintes lors du séchage. Par contre, aux températures de conservation villageoise de ces fruits, aucune isotherme (adsorption et désorption en même temps) n'est pas encore obtenue à notre connaissance.

Dans ce chapitre, il est question de déterminer l'état de l'eau dans l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé afin de les stabiliser. Cette détermination sera décrite en terme d'isothermes d'adsorption et de désorption à 25, 35, 45 et 55°C, de modèles qui décrivent leur comportement à la sorption parmi les modèles connus dans la littérature et de chaleurs nettes de sorption à partir des données expérimentales.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1 Matériels

II.1.1 Matériel végétal

Les fruits frais de *Vitellaria paradoxa* Gaertn. (karité) et de *Canarium Schweinfurthii* Engl. (aiélé) proviennent respectivement du village Bambi, banlieue de la ville de Ngaoundéré (province de l'Adamaoua) et du village Bangou dans la province de l'Ouest au Cameroun. Le village Bangou a une altitude de 1600 m et est situé à 5°9'N de latitude et 10°32'E de longitude, et le village Bambi est localisé à 7°32'N de latitude et 13,33°78'E de longitude avec une altitude de 1381,66 m (Anonyme, 1978).

II.1.2 Matériel de préparation et de manipulation

Le matériel utilisé comprend : un pied à coulisse électronique de marque *Electronic Digital Caliper* (0,001mm), un couteau inox de marque *Pradel*, une balance de précision (0,0001g) de marque *Scaltec*, une étuve à vide, un broyeur de ménage de marque *Moulinex*.

Ce matériel a permis de déterminer les caractéristiques physiques des fruits tel que le présente la figure 18, travail préliminaire à la détermination des caractéristiques chimiques.

II.2 Méthodes

Les isothermes de sorption pouvant être influencées par la composition physico-chimique des produits, il est important de les préciser. Ceci permet une bonne compréhension de leur comportement à la sorption.

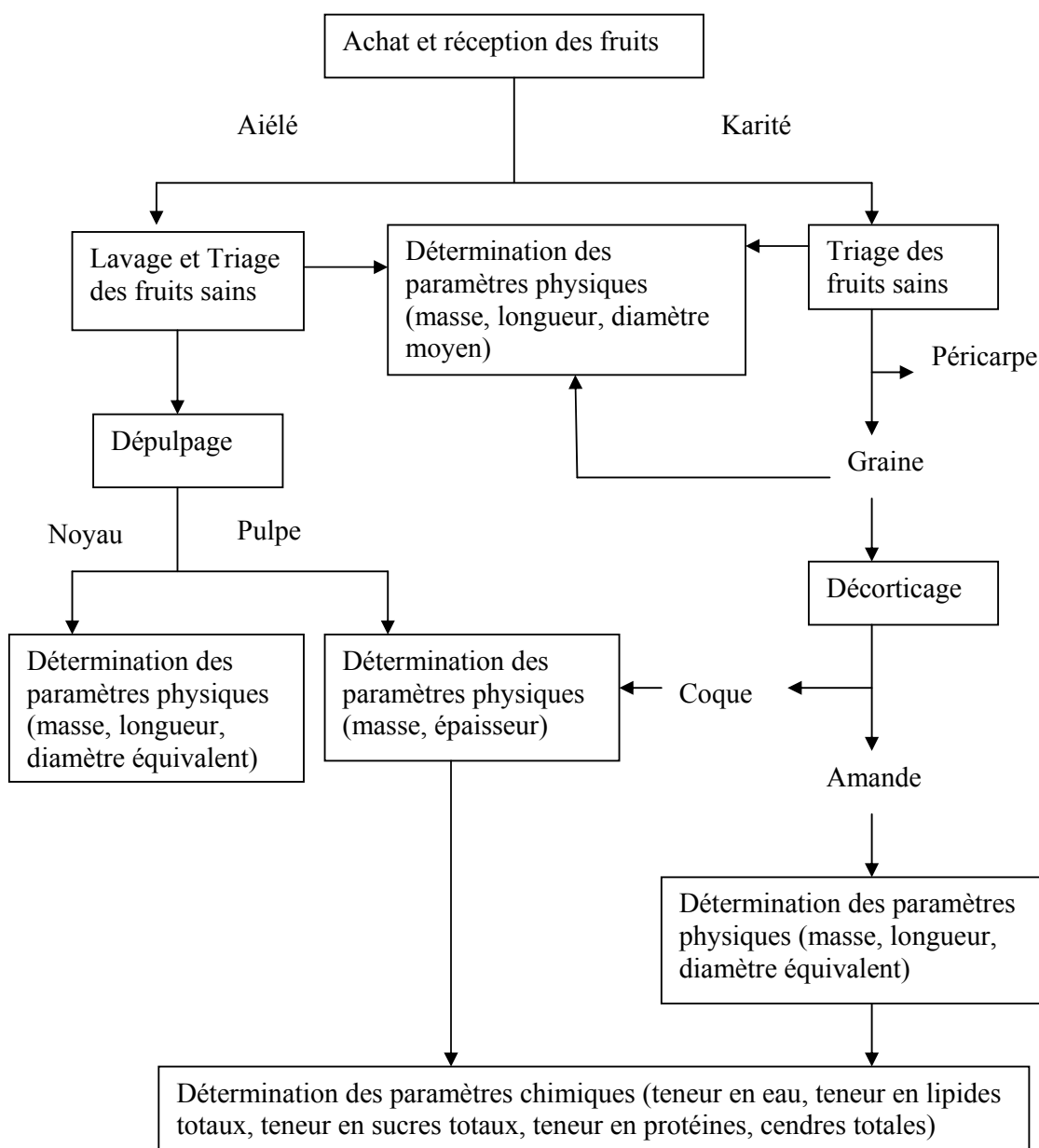


Figure 18 : Le schéma général de caractérisation des fruits

II.2.1 Caractérisation des fruits

II.2.1.1 Préparation des échantillons

Les amandes de karité ont été découpées transversalement à l'aide du couteau en acier inoxydable, ainsi que les fruits de l'aiélé, sauf qu'ici la découpe est longitudinale.

II.2.1.2 Caractéristiques physiques

Le diamètre et la longueur des fruits, des graines et des amandes (nombre de fruits: 100) ont été déterminés à l'aide du pied à coulisse. Le poids des fruits entiers a été relevé grâce à la balance de précision. Pour les fruits de l'aiélé, la pulpe a été séparée du noyau par section longitudinale à l'aide du couteau en acier inoxydable et les mêmes mesures, de poids du noyau et de la pulpe, sont effectuées. L'épaisseur de la pulpe a été déterminée avec le même pied à coulisse.

II.2.1.3 Caractéristiques chimiques

Les paramètres chimiques déterminés sont les teneurs en eau, en lipides, en cendres, en protéines et en glucides. Les résultats sont la moyenne de trois mesures.

II.2.1.3.1 Détermination de la teneur en eau

La teneur en eau d'un échantillon représente la perte de masse subie par cet échantillon dans les conditions expérimentales normées. La méthode AFNOR (1981) a été utilisée pour cette détermination.

Pour cela, on place dans une capsule, préalablement séchée et de masse M connue, 5 g d'échantillon. La masse de la capsule contenant l'échantillon, M_1 , est notée. L'ensemble est séché à 103 ± 2 °C jusqu'à poids constant à l'étuve pendant environ 24 heures et la masse notée M_2 . La teneur en eau (TE) est exprimée en pourcentage de masse humide selon la formule:

$$\%TE = \frac{[(M_1 - M_2) * 100]}{(M_1 - M)}$$

M est la masse en g de la capsule vide, M_1 est la masse en g de la capsule contenant la prise d'essai avant étuvage et M_2 est la masse en g de la capsule contenant la prise d'essai après étuvage.

II.2.1.3.2 Détermination des lipides totaux

La teneur en lipides totaux représente la totalité des corps gras extraits par une méthode normée. Les échantillons frais ont été découpés transversalement (amandes de karité) et longitudinalement (pulpe de l'aiélé) avant d'être séchés pendant 48 heures à 50°C. L'étuve utilisée pour le séchage est une étuve à convection naturelle de marque *R. Chaix, Meca* (Nancy, France). Après séchage, ils ont été broyés pendant environ 20 secondes à l'aide d'un broyeur de ménage de marque *Moulinex*, avant l'extraction au Soxhlet selon la méthode UICPA (1979).

L'extraction est basée sur la solubilité différentielle des lipides dans l'hexane. Elle se fait à chaud pendant une durée de 9 heures environ. Après cette opération, le solvant est éliminé par évaporation sous vide et l'huile est séchée à l'étuve et pesée. La teneur en lipides (H) en % de matière sèche est exprimée suivant la formule ci-dessous:

$$H = \frac{(S * 100)}{MS}$$

Avec S = pourcentage en masse d'huile de substance analysée.

MS = teneur en matière sèche, en pourcentage de masse, déduite de la teneur en eau

II.2.1.3.3 Détermination des cendres totales

Les cendres totales constituent la partie minérale d'un produit. La matière sèche (10 g, après étuvage $103 \pm 2^\circ\text{C}$) issue de la mesure de l'humidité a été incinérée dans un four à moufle à 550°C jusqu'à obtention des cendres blanches pendant 48 heures (Wolff, 1968).

Le taux de cendres totales (C) pour 100 g d'échantillon sec est donné par la relation :

$$C = \frac{[(M_3 - M_1) * 100]}{(M_2 - M_1)}$$

Avec : M_1 = masse en gramme de la capsule vide

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

M_3 = masse de la capsule contenant le résidu après incinération

II.2.1.3.4 Détermination des protéines totales

Les échantillons secs ont été minéralisés selon Kjeldahl (AFNOR, 1984) et l'azote a été ensuite dosé selon Devani, Shishoo, Shal & Suhagia (1989). La teneur en protéines brutes a été obtenue en multipliant la teneur en azote par le facteur conventionnel de 6,25 (FAO/WHO, 1978).

Dosage de l'azote : Méthode utilisant la réaction de Hantzsch (Devani *et al.*, 1989)

Principe

Cette méthode spectrophotométrique de la détermination de l'azote est basée sur la réaction de NH_3 avec l'acétylacétone et le formaldéhyde en milieu aqueux pour donner un produit jaune le 3,5 - diacétyl -1,4 -dihydrolutidine (Figure 19). Le composé présente un maximum d'absorption à 412 nm, et peut être dosé par spectrophotométrie dans les limites de 0,5 à 6 μg d'azote/ml.

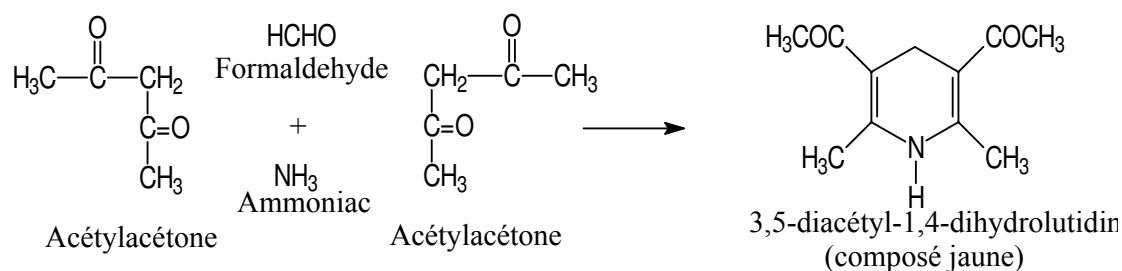


Figure 19 : L'équation de la réaction de Hantzsch (Devani *et al.*, 1989)

Mode opératoire

Une prise d'essai (m) d'échantillon sec broyé dans un tube de minéralisation. Ensuite, on y ajoute 5 ml d'acide sulfurique concentré (environ 98%) et 0,5 g de catalyseur de minéralisation. Le mélange est minéralisé jusqu'à obtention d'une solution limpide (soit

pendant 2 heures). Le minéralisât est transféré, après refroidissement, dans une fiole de 25 ml et le volume est ajusté avec de l'eau distillée.

Préparation des solutions

- Solution d'acétate de sodium (41g / 500 ml d'eau distillée)
- Solution réactive (15 ml de formaldéhyde 37% + 7,8 ml d'acétylacétone, volume complété à 100 ml avec de l'eau distillée)
- Solution standard 0,04 mg d'azote / ml préparée à partir du $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (PM = 132,14 g) de concentration 0,188 mg/ ml

Préparation de la gamme étalon

Les solutions ont été introduites dans une série de tubes à essai (tableau 13).

Tableau 13 : L'étalonnage avec la solution d'azote

N° des tubes	1	2	3	4	5	6	Inconnu
Echantillon (ml)	/	/	/	/	/	/	0,1
Solution standard 0,04mg de N/ml (ml)	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	
Acétate de sodium (ml)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Solution réactive	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Plonger les tubes dans l'eau bouillante (97,5°C) pendant 15 minutes et puis refroidir dans un courant d'eau froide pour baisser la température à 30°C.							
H ₂ O distillée (ml)	7,2	6,95	6,7	6,45	6,2	5,95	7,1
Quantité d'azote (µg)	0	10	20	30	40	50	

Expression des résultats

La quantité d'azote de chaque prise d'essai est déterminée en se référant à la courbe d'étalonnage de sulfate d'ammonium d'équation de régression :

$$\text{DO} = 6,5 \cdot 10^{-3} Q - 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ avec } r^2 = 0,991$$

Soient Q = la quantité d'azote en µg dans le volume d'échantillon analysé (0,1 ml) et m la masse de la prise d'essai et Q' la quantité d'azote dans 100mg d'échantillon sec on a :

$$Q' = \frac{[(100 * 250 * Q) * 100]}{m * (100 - H^0_r)} \quad \text{en } \mu\text{g d'azote / 100g de MS}$$

Hr° étant la teneur en eau résiduelle de l'échantillon étudié. La teneur en protéines totales est calculée avec le facteur de conversion de l'azote qui est de 6,25 (FAO/WHO, 1978).

D'où la teneur en protéines totales : $6,25 \times Q' \times 10^{-6}$ g/100 g de MS.

II.2.1.3.5 Détermination des sucres totaux

Les sucres totaux ont été extraits et dosés par colorimétrie selon la méthode de Dubois, Gilles, Hamilton, Roberts et Smith (1956).

Principe

En milieu acide et à chaud, les pentoses (C₅) et hexoses (C₆) subissent une cyclisation pour donner respectivement le furfural et l'hydroxyméthyl furfural. Les composés ainsi formés réagissent avec le phénol pour donner un complexe coloré jaune - orange présentant une absorption maximale à 450 nm (figure 20). Le complexe coloré ainsi formé permet le dosage spectrophotométrique des sucres et leurs dérivés.

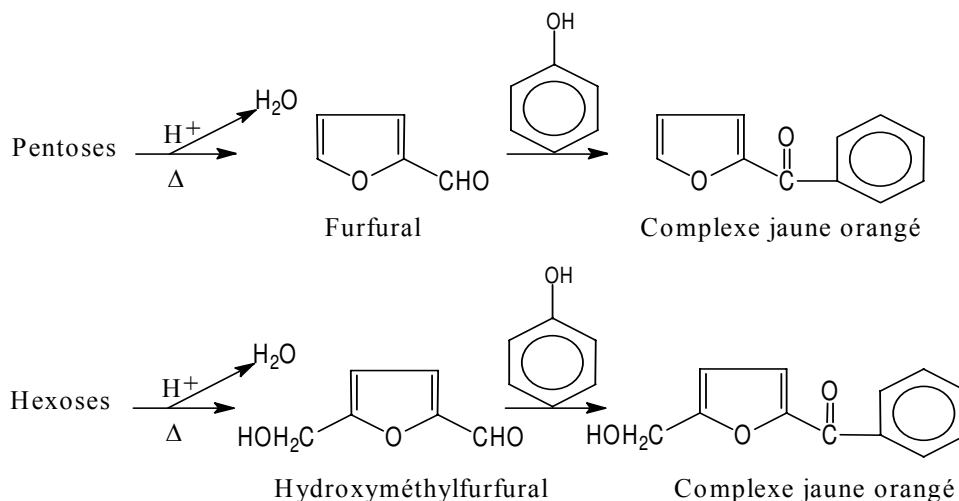


Figure 20 : L'équation de la réaction des oses avec le phénol en milieu acide et à chaud

Mode Opérateur

0,5 g d'échantillon est pesé dans un Erlenmeyer muni d'un bouchon avec tube de dégagement. On y introduit, ensuite, 10 ml de H_2SO_4 1,5N. On ferme l'erenmeyer pour laisser bouillir le mélange pendant 15 minutes au bain marie à 100°C . L'ensemble est refroidi à température ambiante. On y ajoute, après, 10 ml d'éthanol à 70% et 0,5 ml de sulfate de zinc (2g/100 ml) et 0,5 ml de $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ (10,6 g/100 ml). Le mélange est filtré dans une fiole de 50 ml et le volume est ajusté avec de l'eau distillée au trait de jauge.

Dosage proprement dit

La gamme a été préparée à l'aide d'une solution étalon de glucose 0,1 mg/ml (tableau 14).

Tableau 14 : L'étalonnage de la solution de glucose

N° des tubes	1	2	3	4	5	6	Inconnus
Etalon de glucose à 0,1mg/ml (ml)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	0
Echantillon à doser (ml)	/	/	/	/	/	/	0,05
Eau distillée (ml)	10	0,8	0,6	0,4	0,2	0	0,95
Phénol aqueux 50% (ml)	1	1	1	1	1	1	1
Acide sulfurique (ml)	5	5	5	5	5	5	5
Laisser reposer 10 minutes, agiter, puis incuber au bain-marie à 30°C pendant 20 minutes							
Glucose (mg)	0	20	40	60	80	100	

Expression des résultats

La quantité de sucres totaux de chaque prise d'essai a été déterminée en se reportant sur la courbe d'étalonnage d'équation de régression :

$$\text{DO} = 0,0087 Q' + 0,015 \quad \text{avec } r^2 = 0,981$$

Soient : Q' = Quantité de sucre dans la prise d'essai

V_T = volume total de l'extrait

m = prise d'essai en g

V = volume d'échantillon analysé

H^0_r = teneur en eau résiduelle

La quantité de sucres en g/100g de MS est donnée par la relation :

$$Q^r = \frac{(100 * Q' * V_T * 10^{-6})}{[m * V(100 - H^0_r)]}$$

II.2.2 Isothermes de sorption

II.2.2.1 Description du dispositif expérimental

La figure 21 présente le schéma général de mesure de l'activité de l'eau des échantillons. La méthode de détermination des isothermes est la méthode microgravimétrique statique basée sur l'augmentation de la masse du couple adsorbant/adsorbat tel que présentée par la figure 22. La masse de l'adsorbant peut être mesurée pendant l'acquisition à l'aide d'une microbalance *Sartorius 4201* à suspension magnétique (planche 11) en utilisant le montage et la méthode d'acquisition de données mises au point par Perrin, Ngyen, Clement & Neel (1996). Aucune perturbation de l'extérieur n'existe, car la cellule de mesure est complètement séparée de la mécanique de la balance. Cette méthode n'est utilisée que pour l'adsorption de monoconstituants, car la seule information dont on dispose est l'évolution de la masse de l'adsorbant.

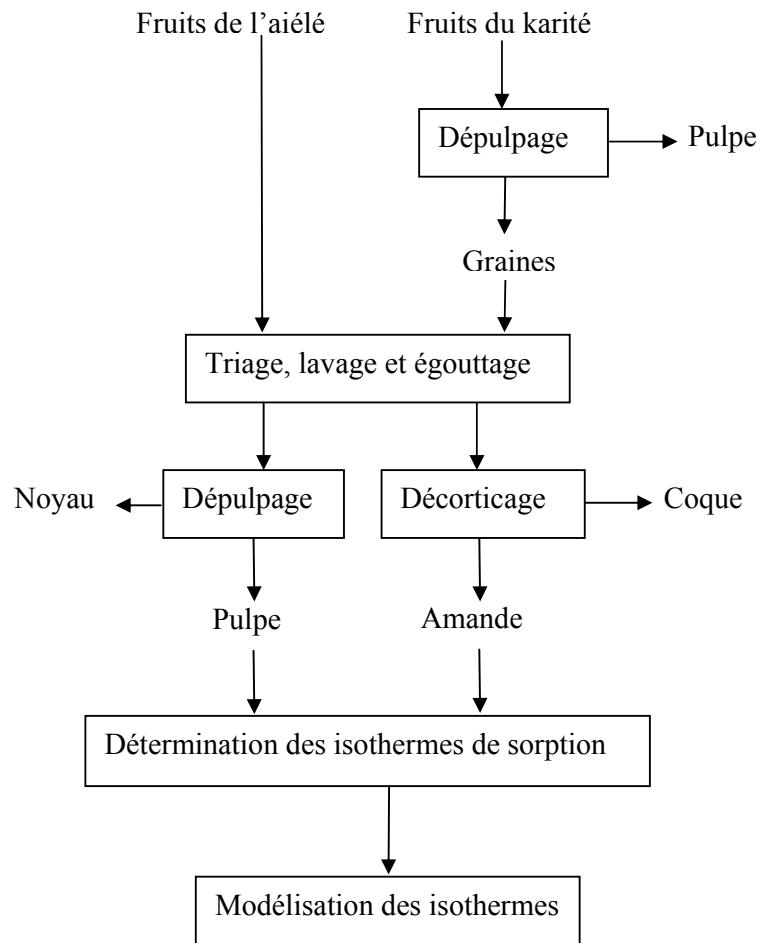


Figure 21 : Le schéma général de détermination des isothermes de sorption

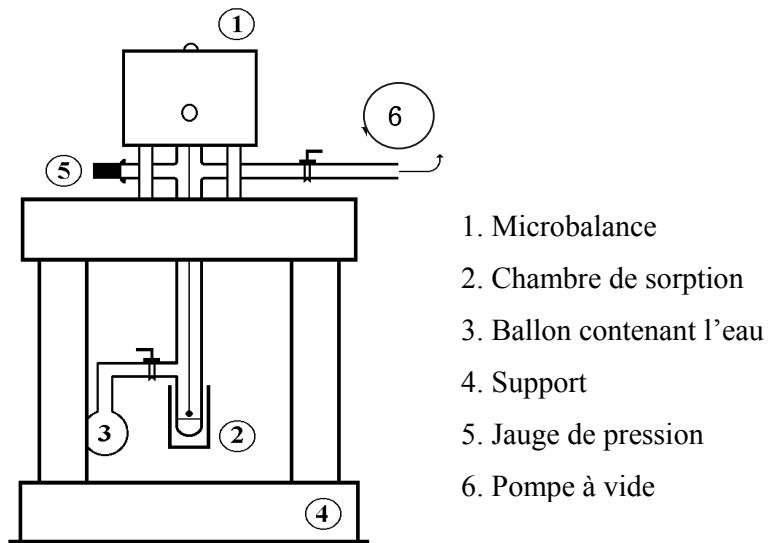


Figure 22 : Le schéma de description de la microbalance à suspension magnétique

Ce système thermogravimétrique est constitué de trois éléments principaux :

- Une balance à fléau compensée de façon électromagnétique ;
- Un dispositif de contrôle de la température régnant dans l'enceinte de pesée ;
- Un dispositif pour imposer une pression de vapeur dans l'enceinte de pesée.

Le couplage magnétique permet d'une part une conversion directe de la masse mesurée en signal électrique, et d'autre part un isolement complet de l'enceinte de pesée du milieu extérieur. Les principales caractéristiques de la balance sont regroupées dans le tableau 15.

Tableau 15 : Les caractéristiques de la microbalance

Modèle	Sartorius 4201
Fonctionnement	Suspension magnétique libre
Vide	Statique 10^{-7} bar
Charge minimale	10 mg
Portée	20 g
Charge maximale	30 g
Précision de lecture	2 μ g
Fil de porte échantillon	Pt

L'enceinte de sorption est reliée d'une part à la source de vapeur d'eau et d'autre part à une pompe à palettes double étage. Par ailleurs, cette enceinte est immergée dans un bain thermostaté (20 à 80°C), ce qui permet de fixer la température de sorption, notée T. cette température est alors celle de l'isotherme de sorption.

La source de vapeur d'eau est constituée d'un ballon contenant de l'eau permutée (résine échangeuse d'ions), bidistillée (classique), et filtrée (milliQ). Ce ballon est plongée dans un thermo-cryostat (-50° à 80°C) qui règle sa température, notée T_s, et donc sa pression de vapeur. Lorsque ce ballon est connecté à la chambre de sorption (dans laquelle on a préalablement fait le vide), il s'établit dans celle-ci la pression de vapeur saturante du solvant,

notée $P^{\text{vap}}(T_s)$ alors que la température qui y règne, T , est celle imposée par le thermostat. La connaissance du couple (P , T) du solvant étudié (de l'eau dans notre cas) est nécessaire.

Le poids de l'échantillon est en permanence compensé de manière électromagnétique et le courant électrique nécessaire constitue une mesure de la masse à déterminer. Les lignes de force du couplage réalisées traversent la fenêtre amagnétique (quartz) de l'enceinte de sorption. L'évolution de la masse de l'échantillon implique une évolution simultanée de la force exercée par l'électroaimant, ce qui nécessite une action de l'électronique qui met en œuvre trois circuits de réglage différents. L'ensemble des valeurs est enregistré automatiquement sur ordinateur. Les valeurs instantanées sont obtenues en faisant la moyenne de cinq valeurs de masse acquises à intervalle de 0,2 s autour du point temps (un point chaque 10 secondes).



Planche 11 : La photographie de la microbalance

II.2.2.2 Obtention des isothermes

Les échantillons frais (61,56% et 55,21% d'eau, base humide, respectivement pour l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé), découpés en épaisseur d'environ $350 \pm 50 \mu\text{m}$ à l'aide d'un scalpel (mesurés à l'aide d'un micromètre) et, de masse d'environ 536 mg de pulpe pour aiélé et 274 mg d'amandes pour le karité sont placés dans la microbalance. Cette microbalance est située dans la chambre de sorption pour être activée *in situ*, c'est-à-dire chauffé ($T = 35^\circ\text{C}$) sous vide dynamique de 10^{-3} Pa jusqu'à stabilisation de la masse du produit (15 heures). Tous les gaz présents dans l'enceinte sont ainsi éliminés. Après la suppression du vide, l'échantillon a perdu environ 5% de sa teneur en eau. L'échantillon est ensuite porté et maintenu à la température de l'isotherme que l'on désire mesurer. Les températures de 25, 35, 45 et 55°C ont été choisies parce qu'elles correspondent aux températures de conservation villageoise.

Une pression de vapeur, P^{vap} , du produit, connue et contrôlée, est ensuite établie par l'intermédiaire du thermo-cryostat qui règle la température de l'eau jusqu'à l'obtention de l'équilibre caractérisé par un palier. L'isotherme d'adsorption est tracée de proche en proche en renouvelant cette opération, par des incréments successifs de pression jusqu'à saturation de l'échantillon. L'état activé du produit représente l'état de référence pour décrire l'isotherme d'adsorption. L'isotherme de désorption est obtenue de la même manière que précédemment en effectuant simplement des décréments successifs de pression à partir de l'état saturé de l'échantillon qui constitue dans ce cas l'état de référence.

Le dispositif de la microbalance à suspension magnétique ne permet pas des mesures aux températures en dessous de 20°C , de l'ordre de 18°C , qui est une température rencontrée dans les zones de production de ces fruits. Il en est de même des températures négatives (par exemple -33°C), qui sont des températures industrielles de stockage. Le but étant, ici, de faciliter les stockages villageois et industriel.

Caurie (2006) a développé récemment avec succès une équation sur tout l'intervalle d'activité de l'eau, autant dans les conditions isobare que de teneur en eau constante. Nous nous proposons d'adapter cette équation afin de l'appliquer aux données expérimentales obtenues sur l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé. Ceci devrait nous permettre de déterminer les énergies d'attraction intermoléculaire de la monocouche et de prédire les isothermes de sorption en fonction de la température.

II.2.2.2.1 Calculs du nombre de sites d'adsorption (n) et des constantes (K et B)

Le calcul de n se fait à partir de l'équation (3). $\ln(M/M_0)$ en fonction $\ln[A_w/(1-A_w)]$ est tracé pour chaque température (25, 35, 45 et 55°C). La pente de la droite est alors égale à $2/n$ et l'ordonnée à l'origine $\ln(C)/n$. on peut alors estimer la valeur de n et C. sachant que $C=e^{Q/RT}$, on déduit donc la valeur de Q.

Le tracé de cette courbe nécessitant la connaissance de la teneur en eau de la monocouche m_0 (base sèche), les valeurs expérimentales utilisées dans les calculs sont celles obtenues en résolvant l'équation non linéaire issue de l'équation de GAB (Guggenheim (1966)-Anderson (1946)-de Boer (1953)).

Des données expérimentales de M et de A_w , et des équations (6) et (7), respectivement, on peut trouver les valeurs de k et de k_1 . Etant entendu que $b = \frac{1}{nR}$ et $b_1 = \frac{1}{2R}$.

On peut enfin trouver pour chaque teneur en eau et pour chaque température la valeur de K. De même, pour chaque température, on peut trouver B. Il faut préciser que $K = k * k_1$ et $B = b + b_1$.

II.2.2.2.2 Calcul de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q)

Comme considérée par Caurie (2006), la courbe d'adsorption reste notre courbe référence. C'est pourquoi les valeurs des paramètres K et B sont celles obtenues en adsorption. Les données utilisées en désorption pour cette validation (calcul de Q en désorption) sont uniquement les teneurs en eau, les activités de l'eau restant identiques.

II.2.2.2.3 Prédiction des isothermes

L'équation (8) a également servi à prédire les données de sorption (adsorption et désorption) à d'autres températures. Les cas de 18°C et -33°C ont été traités en raison de ce que la température de 18°C est souvent atteinte dans les régions de provenance des échantillons et -33°C est celle de stockage industriel (par le froid). Ici également, seule la valeur de Q en désorption est utilisée pour la détermination de la teneur en eau en désorption.

Pour le calcul des teneurs en eau à 18°C et -33°C, nous utilisons les valeurs moyennes de K pour chaque température et de B en adsorption.

A l'aide du logiciel Sigma plot pour Windows (version 9.01, 2004), les valeurs de K, Q et B sont ensuite tracées en fonction de la température, T. Les prédictions des valeurs de K, Q et B sont obtenues à partir de leurs courbes de régression.

II.2.2.3 Modélisation des isothermes

Certains modèles disponibles dans la littérature et permettant de décrire les isothermes de sorption ont été utilisés. Il s'agit notamment des équations d'Oswin, de Smith, de Halsey modifiée, de GAB et de Chung et Pfoest.

Tableau 16 : Les équations décrivant les isothermes de sorption d'eau

MODELE	EQUATION
Oswin (1946)	$M = C_1 \left(\frac{Aw}{1 - Aw} \right)^n$ (1)
Smith (1947)	$M = a - b \ln(1 - Aw)$ (2)
Halsey (1948) simplifiée	$Aw = \exp \left(- \frac{A}{M^r} \right)$ (3)
GAB (Guggenheim (1966)-Anderson (1946)-de Boer (1953))	$\frac{M}{M_0} = \frac{CKAw}{(1 - KAw)(1 - KAw + CKAw)}$ (4)
Chung et Pfoest (1967)	$\ln(Aw) = - \frac{C_1}{RT} \exp(-C_2 M)$ (5)

M est la teneur en eau du produit (base sèche), M_0 la teneur en eau de la couche monomoléculaire (base sèche). C, K, C_1 , A, r, n, a et b sont les constantes du modèle.

Pour le modèle de GAB, $C = C_0 e^{(\Delta H_c/RT)}$ et $K = K_0 e^{(\Delta H_k/RT)}$ où C_0 et K_0 sont des facteurs entropiques de proportionnalité, $\Delta H_c = H_m - H_n$ et $\Delta H_k = H_1 - H_n$ les fonctions de la chaleur de sorption, H_m est la chaleur totale de sorption de la monocouche, H_n est la chaleur de sorption des multicouches et H_1 est la chaleur de vaporisation de l'eau pure à la température T.

Après avoir transformé l'équation de GAB sous la forme $\frac{A_w}{M} = \alpha A_w^2 + \beta A_w + \gamma$, avec $\alpha = \frac{k}{M_0} \left[\frac{1}{C} - 1 \right]$, $\beta = \frac{1}{M_0} \left[1 - \frac{2}{C} \right]$, $\gamma = \frac{1}{M_0 C K}$, une régression quadratique est conduite sur les valeurs expérimentales. Les paramètres de l'équation originale ont été déduits après résolution du système d'équations précédent (la solution négative de l'équation de second degré n'est pas prise en compte à cause de son impossibilité physique). Les valeurs des paramètres de la régression non linéaire sont ajustées à l'aide du logiciel *OriginLab* (version 7.5, 2005).

Le modèle le plus descriptif a été obtenu en tenant compte du coefficient de détermination R^2 et surtout de la plus petite valeur moyenne relative du pourcentage de déviation, P (Boquet, Chirife & Iglesias, 1978 ; Lomauro, Bakshi & Labuza, 1985). P est

définie comme suit : $P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|M_{ei} - M_{pi}|}{M_{ei}}$, où M_{ei} et M_{pi} sont respectivement les valeurs expérimentale et théorique de la teneur en eau, et N le nombre de données expérimentales.

La détermination des chaleurs nettes de sorption est obtenue sur la base des équations (9) à (12) de la revue bibliographique (paragraphe I.2.3.5).

A partir des équations de corrélation entre les chaleurs nette de sorption et la teneur en eau, les valeurs calculées des énergies des boucles d'hystérésis ont été obtenues. Pour cela, les chaleurs de sorption ont été calculées pour chaque teneur en eau (le point 0 étant exclu pour des raisons pratiques), à chaque température et pour chaque sens de sorption. A chaque température et pour chaque produit, la somme des différences d'énergies (désorption moins adsorption) est effectuée. En cas de diminution progressive et significative de la boucle d'hystérésis, les énergies des boucles sont obtenues en calculant l'inverse des différences d'énergie.

II.2.2.4 Analyses statistiques

Une analyse des corrélations a été effectuée entre les différentes caractéristiques physiques de chaque échantillon, avec le logiciel Statistica version 5.0 (Statsoft, Inc. 1984-1995). Le logiciel Statgraphics pour windows Plus 3.0 (1994 – 1997) a été utilisé pour la détermination des coefficients de corrélation.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Caractérisation des fruits

III.1.1 Caractéristiques physiques

Le tableau 17, ci-dessous, regroupe les valeurs moyennes des résultats obtenus sur 100 fruits. Il faut préciser que la graine est interne au fruit dans le cas du karité, tandis qu'en ce qui concerne l'aiélé, le fruit entier est utilisé.

III.1.1.1 Karité

On note que la graine de longueur 4,26 cm et de diamètre 3,29 cm a une masse moyenne de 21,76 g. L'amande, quant à elle, pèse 16,08 g pour une longueur de 3,74 cm et un diamètre de 2,91 cm. Elle représente par ailleurs 74,18% de la masse totale de la graine. En dehors des masses de la graine et de l'amande qui sont légèrement inférieures, ces résultats

sont proches de ceux obtenus par Bup (2002) sur les graines de karité de même provenance et par Womeni (2004) sur les fruits de karité de provenances Dang et Tchabal. Mais, par rapport à la provenance Bangoua (Womeni, 2004), ces résultats sont significativement supérieurs. Par ailleurs, l'amande représente d'après Womeni (2004) 78,63%, 78,96% et 75,79% de la graine respectivement pour les provenances Dang, Tchabal et Bangoua. Avec Bup (2002), elle représente plutôt 82,84% de la graine. Il est possible également de retrouver quelques nuances morphologiques entre les fruits de la même localité. On peut expliquer ces différences par les variables géographiques particulières à chaque localité ou région, mais aussi par les particularités des arbres. UNIFEM (1997) trouvait déjà que la production de karité dépendait de la pluviométrie. Toutefois, au regard des intervalles de validité des valeurs moyennes, on pourrait étendre ces valeurs d'une région à une autre.

III.1.1.2 Aiélé

Les fruits de l'aiélé ont une masse moyenne de 5,12 g pour 2,99 cm de longueur et 1,69 cm de diamètre. Le noyau est long de 2,82 cm avec 1,25 cm de diamètre et 2,51 g de masse. La pulpe a une épaisseur de 0,30 cm, 2,59 g de masse et représente 50,25% du fruit. Les fruits ont les caractéristiques morphologiques similaires à celles trouvées par Tchiégang, Kapseu, Tchatchouang Ngasop et Parmentier (2002) sur les fruits de Mbouda. Elles sont significativement différentes de celles obtenues sur les fruits de Batoufam par les mêmes auteurs. Si nos valeurs sont différentes de celles de Tchiégang *et al.* (2000), le pourcentage de pulpe trouvé est proche de celui de ces derniers auteurs. Ces résultats entrent dans la gamme de valeurs proposées par Agbo N'zi *et al.* en 1992 (3-4 cm de longueur et 1,5-2 cm de diamètre) et Njoukam en 1998a avec 3-4 cm de longueur et 1,2-2 cm de diamètre. Cependant, nos résultats sont différents de ceux trouvés par Jiokap Nono et Kapseu (1999). Chaque village posséderait des spécificités qui expliquent les variations observées.

Tableau 17 : Les caractéristiques physiques des fruits de l'aiélé et des amandes de karité

Caractéristiques	<i>C. schweinfurthii</i>	<i>V. paradoxa</i>
Masse du fruit ou de la graine (g)	5,12 ± 1,14	21,76 ± 5,76
Longueur du fruit ou de la graine (cm)	2,99 ± 0,28	4,26 ± 0,41
Diamètre moyen du fruit ou de la graine (cm)	1,69 ± 0,11	3,29 ± 0,37
Diamètre équivalent du noyau ou de l'amande (cm)	1,25 ± 0,08	2,91 ± 0,50
Longueur du noyau ou de l'amande (cm)	2,82 ± 0,27	3,74 ± 0,50
Masse du noyau ou de l'amande (g)	2,51 ± 0,59	16,08 ± 4,13
Masse de la pulpe (g)	2,59 ± 0,67	
Masse de la pulpe/masse fruit ou masse amande/masse graine (%)	50,25 ± 5,47*	74,18 ± 5,18*
Epaisseur de la pulpe (cm)	0,30 ± 0,04	
Epaisseur de la coque de la graine (cm)		0,12 ± 0,02
Masse de la coque de la graine (g)		5,39 ± 1,77

* l'erreur n'est pas sur la mesure

L'étude des corrélations entre les paramètres physiques des fruits a été effectuée et placée en annexe 3.

III.1.2 Caractéristiques chimiques

Le tableau 18 présente quelques constituants chimiques (teneurs en eau, en lipides, en cendres, en protéines et en glucides) de la pulpe des fruits de l'aiélé et de l'amande des fruits du karité. Les teneurs en eau sont données par rapport à la matière humide.

Tableau 18 : Les caractéristiques chimiques de la pulpe des fruits frais de l'aiélé et des amandes des fruits du karité

Caractéristiques	<i>C. schweinfurthii</i>	<i>V. paradoxa</i>
Eau (%)	55,21 ± 0,19	61,56 ± 0,23
Lipides totaux (% MS)	42,67 ± 0,42	51,86 ± 0,21
Cendres totales (% MS)	4,66 ± 0,07	5,34 ± 0,14
Protéines totales (% MS)	4,16 ± 0,14	6,14 ± 0,27
Sucres totaux (% MS)	21,92 ± 0,03	36,19 ± 0,74

III.1.2.1 Détermination de la teneur en eau

III.1.2.1.1 Karité

Dans le cas des amandes de karité, la valeur de teneur en eau obtenue est de 61,56%. Elle est proche de celle obtenue par Tchankou (2001) sur les mêmes amandes directement à l'achat.

III.1.2.1.2 Aiélé

Pour la pulpe des fruits de l'aiélé, on obtient 55,21% de teneur en eau. Tchiégang *et al.* (2000) trouvent un résultat proche (respectivement 54,62%, 54,87% et 52,43%) avec les fruits de Bayangam 1 et Batoufam 1 Mbouda 1, mais ils trouvent des valeurs inférieures (respectivement 42,81% et 47,52%) avec les fruits de Bandjoun (1 et 2). Par contre, ce résultat est différent de ceux trouvés par Tchiégang *et al.* (2002) sur les fruits de Mbouda et de Batoufam avec respectivement 58,68% et 59,02% d'eau. Agbo N'zi *et al.* (1992) ont obtenu avec des fruits frais de Côte d'Ivoire 10,1%.

III.1.2.2 Détermination des lipides totaux

III.1.2.2.1 Karité

En ce qui concerne les amandes des fruits du karité, on a obtenu une teneur de 51,86% supérieure à celles obtenues par Womeni (2004) sur les amandes de Dang (45,44%), Tchabal (42,27%) et Bangoua (46,90%). Elle est similaire à celle obtenue par Kapseu *et al.* (2001) soit 50%, celle de Booth et Wickens (1988) soit 52,6%, celle de Sopade et Koku (1989) au Nigeria soit 51%. Duke et Atchley (1986) ont obtenu une valeur proche de 52,60%. Cependant, elle est inférieure à celle de Tano-Debrah et Ohta (1994) sur les amandes du Ghana avec 59,04%. En dehors des derniers chercheurs, ces résultats restent dans la gamme de 40 à 55% (Salunkhe & Desai, 1986).

III.1.2.2.2 Aiélé

Pour la pulpe des fruits de l'aiélé, on obtient 42,67%. Cette teneur est, respectivement, supérieure de 2% mais conforme à celles obtenues par Tchiégang *et al.* (2000) de 40,62% et de 42,14% sur les échantillons de Mbouda 1 et Bayangam 1 respectivement. Elle est supérieure de 6% à celle obtenue par Kapseu, Parmentier, Kayem, Schuffenecker et Dirand (1996) avec 36,1%, et de 3% de celle obtenue par Tchiégang *et al.* (2002) avec 39,24%. Les teneurs en lipides de la pulpe de l'aiélé restent dans la gamme de 30 à 50% tel que mentionnées par Agbo N'zi *et al.* (1992).

III.1.2.3 Détermination des cendres totales

III.1.2.3.1 Karité

Pour les amandes des fruits du karité, on a obtenu une valeur de 5,34%. Comparée à celles obtenues par Womeni (2004), cette valeur est supérieure à celles obtenues sur les échantillons de Dang (4,19%) et de Bangoua (3,87%), mais inférieure à celle des échantillons de Tchabal (6,71%). Ce résultat est significativement supérieur à celui de 1,8% de Booth et Wickens (1988), de celui de 3,2% de Sopade et Koku (1989) et de celui de Tano-Debrah et Ohta (1994) sur les amandes du Ghana avec 2,57%.

III.1.2.3.2 Aiélé

Quant à la pulpe des fruits de l'aiélé, on obtient 4,66%. Ce résultat est conforme à ceux obtenus par Tchiégang *et al.* (2000) et Tchiégang *et al.* (2002), mais il est significativement inférieur à 8,3% obtenu par Agbo N'zi *et al.* (1992).

III.1.2.4 Détermination des protéines totales

III.1.2.4.1 Karité

Les résultats présentent une teneur en protéines de 6,14% pour les amandes des fruits du karité. Cette teneur est inférieure d'environ 1% à celle de 7,3% de Sopade et Koku (1989) et de celle de Tano-Debrah et Ohta (1994) sur les amandes du Ghana avec 7,81%. Cette

valeur est conforme de celle obtenue par Womeni (2004) sur les échantillons de Bangoua (6,93%) mais inférieur à celle de provenance Dang (9,35%) et Tchabal (9,29%) du même auteur.

III.1.2.4.2 Aiélé

On obtient pour la pulpe des fruits de l'aiélé un résultat de 4,16% supérieur à ceux obtenus par Tchiégang *et al.* (2000) sur les échantillons Bayangam 1 (2,59%), Batoufam 1 (3,23%), Mbouda 1 (3,93%), Bandjoun 1 (2,82%) et Bandjoun 2 (3,80%). Tchiégang *et al.* (2002) ont trouvé une valeur inférieure de 2,61% sur l'échantillon de Mbouda et une valeur supérieure de 5,86% sur celui de Batoufam. Agbo N'zi *et al.* (1992), travaillant sur les échantillons de Côte-d'Ivoire, ont également obtenu une valeur supérieure de 5,6%.

III.1.2.5 Détermination des sucres totaux

III.1.2.5.1 Karité

En ce qui concerne les amandes des fruits du karité, on obtient une teneur de 36,19% inférieure à 41,02%, 42,76% et 42,30% obtenues sur les amandes respectives de Dang, Tchabal et Bangoua par Womeni (2004). Tano-Debrah et Ohta (1994) ont trouvé un résultat inférieur de 2% environ (34,77%) et, Sopade et Koku (1989) une teneur supérieure d'environ 2% (38,5%).

III.1.2.5.2 Aiélé

Les résultats donnent pour la pulpe des fruits de l'aiélé une teneur de 21,92%. Tchiégang *et al.* (2000) ont trouvé une valeur similaire de 21,22% sur l'échantillon de Batoufam 1, mais des valeurs éloignées sur les échantillons d'autres provenances. Tchiégang *et al.* (2002) ont trouvé pour les fruits de l'aiélé de Mbouda et de Batoufam, respectivement, des teneurs supérieures de 5% (26,31%) et de 6% (27, 19%).

III.2 Isothermes de sorption

III.2.1 Influence de la température

Les figures 23 et 24 présentent respectivement les isothermes de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé.

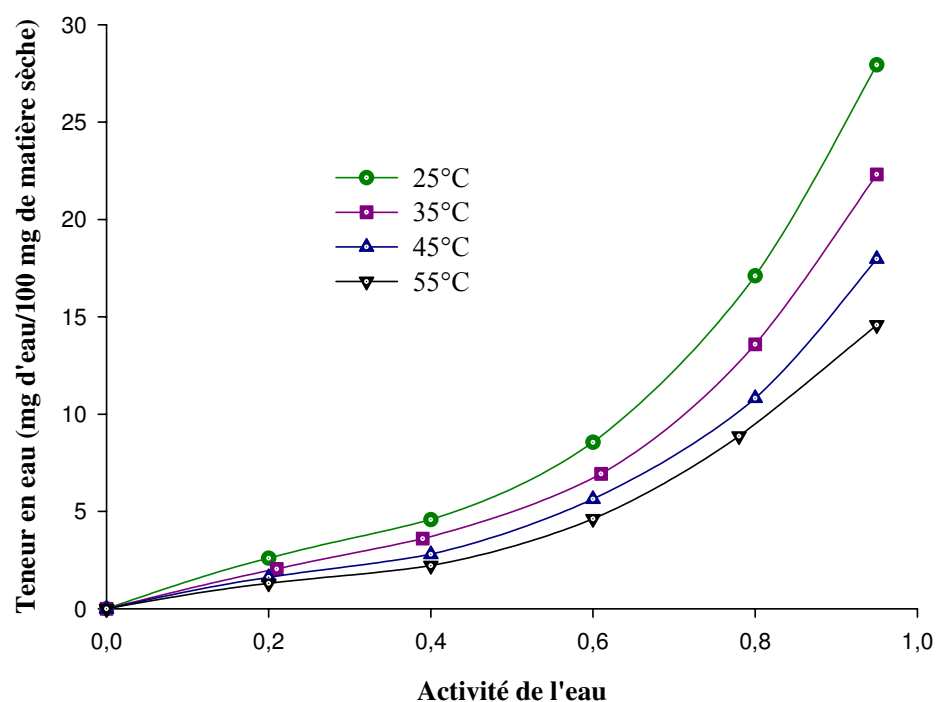


Figure 23 : Les isothermes de désorption de l'amande de karité à différentes températures

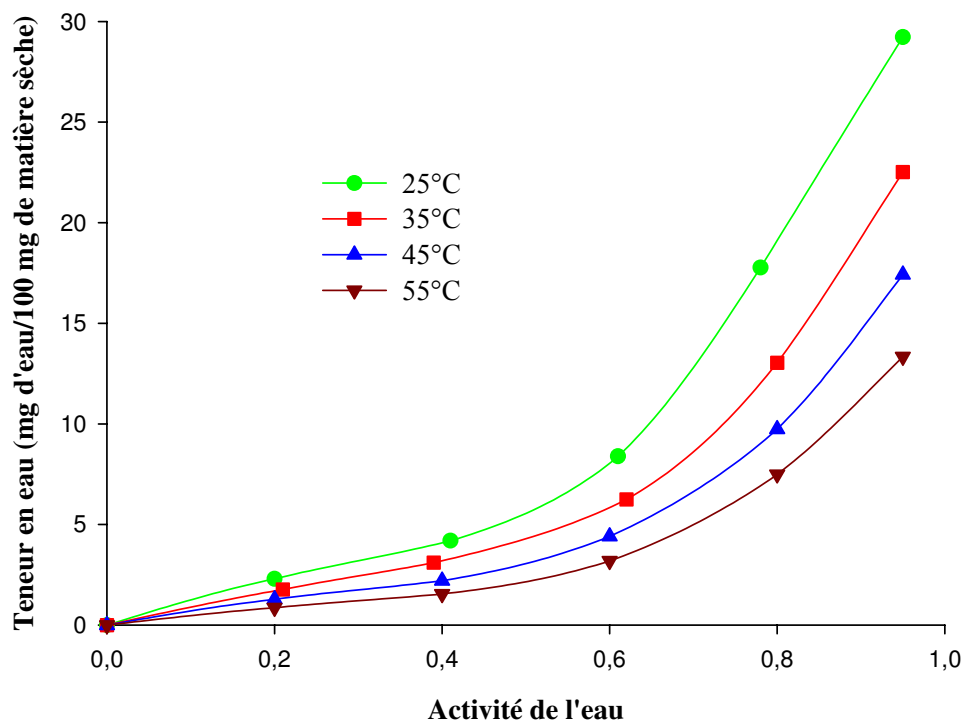


Figure 24 : Les isothermes de désorption de la pulpe de l'aiélé à différentes températures

On note de façon générale que les isothermes obtenues à des températures élevées sont en dessous de celles obtenues à des températures plus faibles. En effet, la teneur en eau à l'équilibre du produit diminue avec l'augmentation de la température, à une même activité de l'eau. Cette remarque est également valable pour les isothermes d'adsorption de l'amande du karité et de la pulpe de l'aiélé. Par ailleurs, de 25 à 55°C et pour une même activité de l'eau, la diminution est plus significative pour l'aiélé (à 0,2 A_w 2,30 à 0,86% en désorption) que pour le karité (à 0,2 A_w 2,60 à 1,31% en désorption). La pulpe de l'aiélé est plus sensible à l'augmentation de la température que l'amande de karité. D'autre part, l'augmentation de l'agitation thermique (Multon, 1982) expliquerait pourquoi la teneur en eau diminue avec l'augmentation de la température.

Par ailleurs, compte tenu du point de référence (point 0 après le vide dans la chambre de sorption) des mesures d'adsorption, les courbes d'adsorption (figures 25 et 26), comme

celles de désorption, ont une allure sigmoïdale comme la plupart des produits biologiques (Bizot, 1983 ; Saravacos, 1986 ; Martinez-Navarette & Chiralt, 1996 ; Gely & Giner, 2000), caractéristique des isothermes de type II selon la classification de Van der Waals (Rizvi, 1986). Ce type d'isothermes s'obtient lorsque le solide ne possède que de grands corps (Lowell & Shields, 1984). Il y a ainsi formation de monocouche, puis de multicouches (Danion, 2004). Les travaux antérieurs sur les isothermes de désorption de la pulpe de l'ailé à 50, 60 et 70°C présentent des isothermes de type II (Noumi *et al.*, 2003).

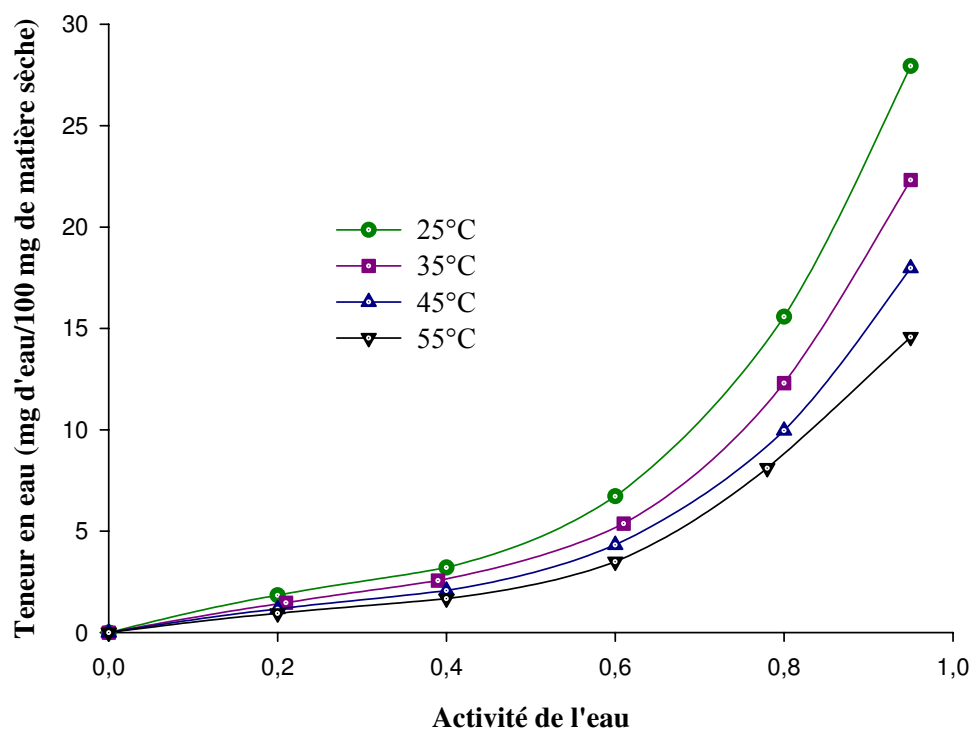


Figure 25 : Les isothermes d'adsorption de l'amande de karité à différentes températures

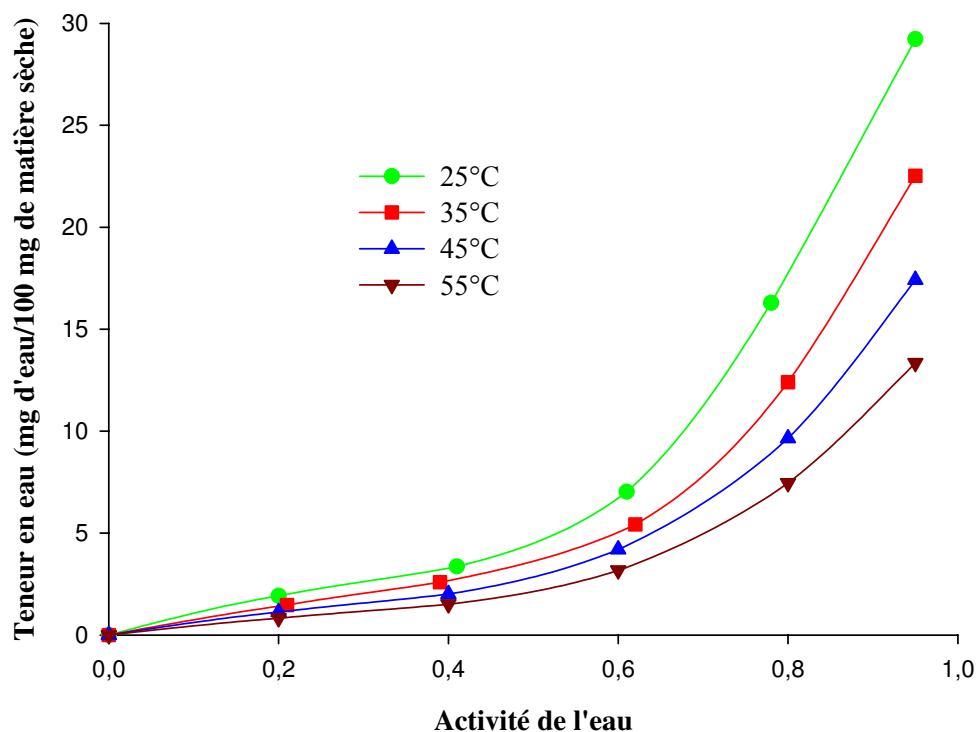


Figure 26: Les isothermes d'adsorption de la pulpe de l'aiélé à différentes températures

III.2.2 Influence de la nature des échantillons

Si l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé sont deux sources de lipides, elles sont cependant différentes par leur origine physiologique. L'amande de karité est une source interne (amande) de matière grasse alors que la pulpe de l'aiélé est une source externe (pulpe). Les courbes de la figure 27 montrent l'influence de la physiologie des produits sur les isothermes. On observe qu'à 25°C, et jusqu'à une activité de l'eau d'environ 0,6, la teneur en eau à l'équilibre de la pulpe est significativement inférieure à celle de l'amande. Par contre, à partir de 0,6 Aw, cette teneur en eau est plus élevée que celle de l'amande de karité. Plus la température augmente, plus la teneur en eau à l'équilibre de la pulpe de l'aiélé se rapproche de celle de l'amande de karité avant de passer en dessous d'elle. L'amande de karité devient alors plus hygroscopique que la pulpe de l'aiélé. On observe également, qu'à teneur en eau constante, la pulpe de l'aiélé présente à partir de 35°C une activité de l'eau plus élevée que

l'amande de karité. Ceci est un indice de la difficulté de conservation de la pulpe de l'aiélé par rapport à l'amande de karité. Le fait que la teneur en eau à l'équilibre de la pulpe de l'aiélé passe progressivement en dessous de celle de l'amande de karité indique que l'énergie nécessaire au processus de désorption est plus élevée pour l'amande de karité que pour la pulpe de l'aiélé. La forte liaison des molécules d'eau au niveau de l'amande de karité, s'expliquerait aussi par sa matière sèche, qui comprendrait plus de groupements hydrophiles (NH_3 , COO^- , OH) sur lesquels se fixent fortement les molécules d'eau (Watt, 1983 ; Cheftel & Cheftel, 1984 ; Kinsella & Fox, sans date ; Blond & Le Meste, 1988). En effet, à 25°C et aux valeurs d'activité de l'eau inférieures à 0,6 l'eau serait faiblement liée à la pulpe. Et aux valeurs supérieures 0,6 A_w on se rapproche plus vite de l'adsorption maximale de la pulpe, contrairement à l'amande qui continue à adsorber de l'eau. L'augmentation croissante de la différence de teneur en eau entre l'amande et la pulpe avec la température confirmerait la sensibilité de la pulpe à l'augmentation de température.

Ces remarques sont similaires pour les isothermes d'adsorption. Ainsi, plus la température augmente, plus la teneur en eau à l'équilibre de la pulpe de l'aiélé se rapproche de celle de l'amande de karité, se superpose à celle de l'amande de karité à 35°C avant de passer en dessous d'elle à 45 et 55°C. Précisons que l'état de désorption, favorable sur le plan thermodynamique (Multon, 1982), expose le mieux le phénomène décrit ci-dessous.

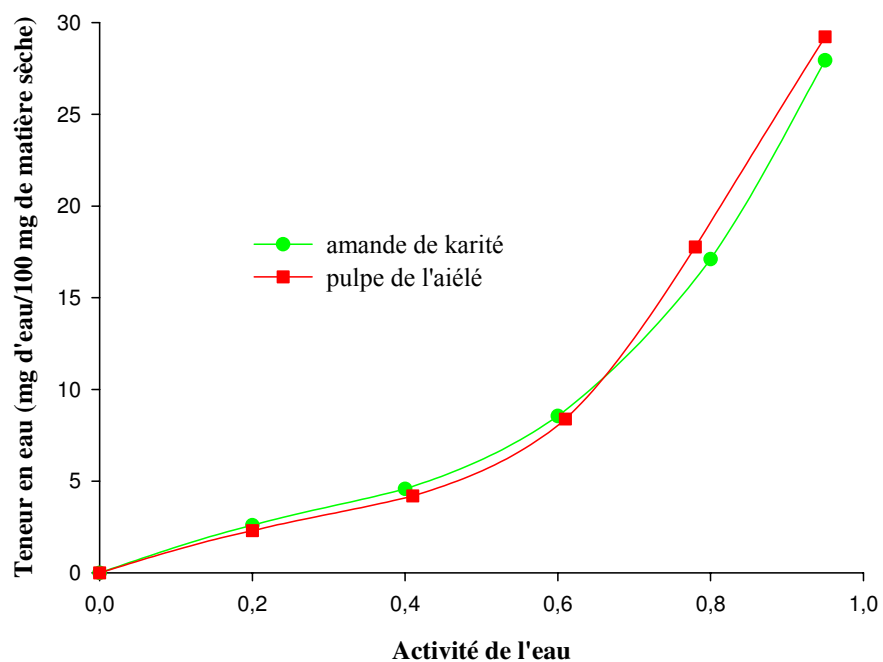


Figure 27a : Les isothermes de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'ailélé à 25°C

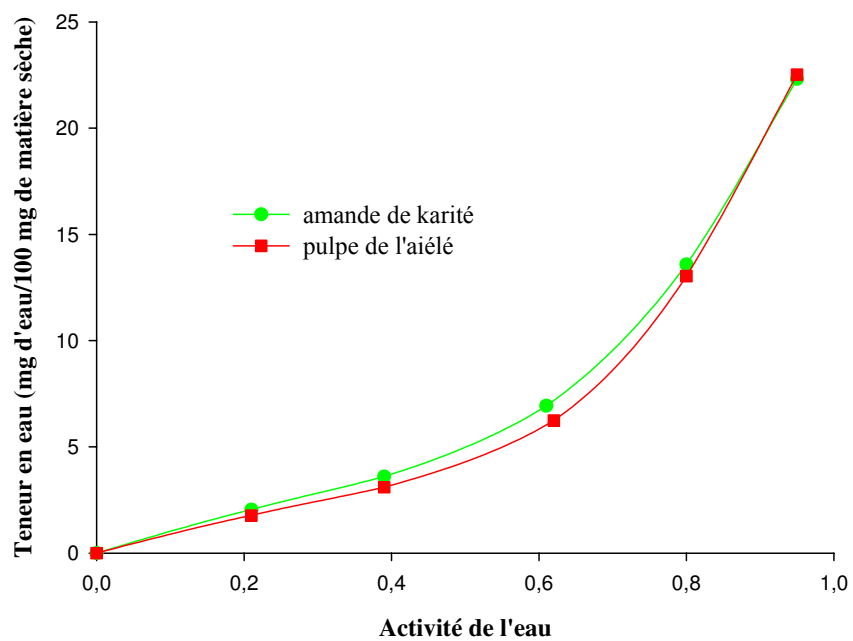


Figure 27b : Les isothermes de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'ailélé à 35°C

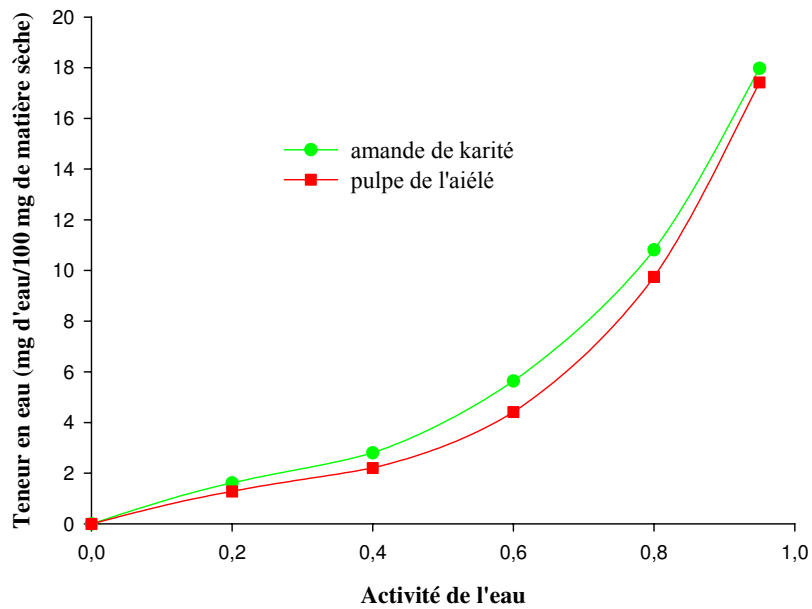


Figure 27c : Les isothermes de désorption de l’amande de karité et de la pulpe de l’ailé à 45°C

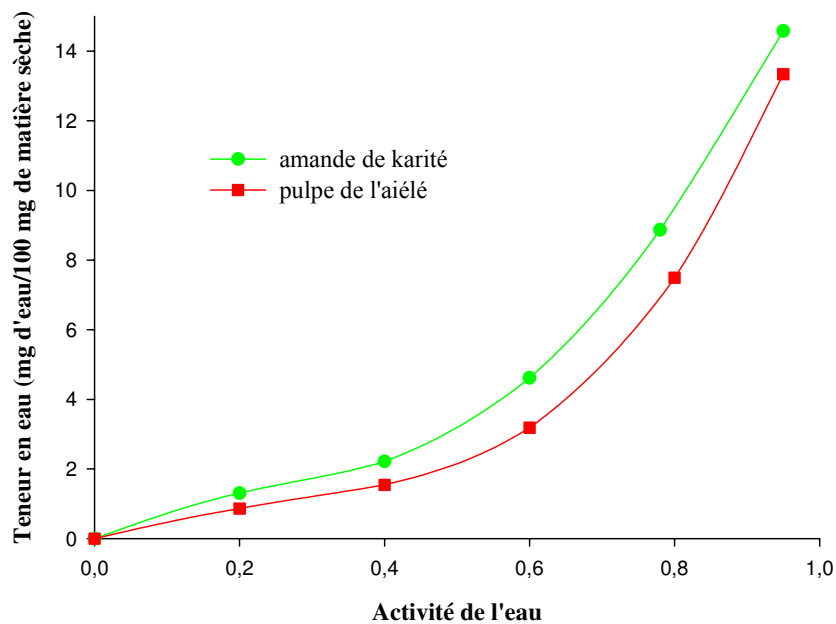


Figure 27d : Les isothermes de désorption de l’amande de karité et de la pulpe de l’ailé à 55°C

Figure 27 : Les isothermes de désorption de l’amande de karité et de la pulpe de l’ailé à différentes températures

III.2.3 Modélisation des isothermes

Les figures 28 à 31 présentent les résultats obtenus à 25°C en adsorption et désorption, et pour les deux produits. Elles illustrent parfaitement ceux obtenus aux autres températures. On observe que les courbes théoriques présentent également une allure sigmoïdale.

D'autre part, les tableaux 19 à 22 présentent les valeurs des paramètres des différentes équations. On peut observer que la teneur en eau de la monocouche du modèle de GAB dépend significativement de la température. En effet, elle diminue avec l'augmentation de la température. En outre, sa valeur en désorption (entre 4,41 et 2,29%) est supérieure à celle en adsorption (entre 4,16 et 1,47%) dans le cas de l'amande de karité. Il en est de même pour la pulpe de l'aiélé (entre 2,71 et 1,56% en adsorption et 3,52 et 1,54% en désorption). D'autre part, on remarque que ces teneurs sont plus élevées pour l'amande de karité que pour la pulpe de l'aiélé.

Autant pour le karité que pour l'aiélé, le modèle d'Oswin est le plus descriptif sur toute la gamme d'activité de l'eau. Il donne en effet des valeurs de P (%) les plus faibles et des coefficients de corrélation élevés. Par contre, le modèle de Chung et Pfoest est le moins indiqué pour les deux produits. Par ailleurs, la constante C_1 du modèle d'Oswin décroît également avec l'augmentation de la température et est supérieure pour la même température en désorption. L'équation de Halsey décrit, toutefois, parfaitement toutes les isothermes dans l'intervalle d'activité de l'eau compris entre 0,1 et 0,8.

Tableau 19 : Les paramètres calculés et la valeur de P (%) des équations de Halsey et de Chung et Pfof pour le karité

Modèle	Adsorption				Désorption			
	Température (°C)				Température (°C)			
	25	35	45	55	25	35	45	55
Halsey*								
A	2,86	2,24	1,85	1,52	4,36	3,24	2,64	2,10
r	0,96	0,93	0,94	0,93	1,04	1,00	1,02	1,01
P (%)	4,92	2,73	3,97	6,26	3,18	4,54	3,99	5,37
R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Chung et Pfof								
C ₁	5876,54	5825,64	6205,40	6356,52	6325,20	6145,37	6444,25	6445,74
C ₂	0,24	0,29	0,38	0,46	0,19	0,23	0,29	0,35
P (%)	24,68	22,08	24,23	24,89	16,43	14,33	17,38	18,80
R ²	0,95	0,96	0,96	0,95	0,97	0,98	0,97	0,96

* : activité de l'eau comprise entre 0,1 et 0,8 ; seules quatre données ont été utilisées

Tableau 20 : Les paramètres calculés et la valeur de P (%) des équations d'Oswin, de Smith et de GAB pour le karité

Modèle	Adsorption				Désorption			
	Température (°C)				Température (°C)			
	25	35	45	55	25	35	45	55
Oswin								
C ₁	4,38	3,41	2,79	2,26	5,55	4,29	3,49	2,83
n	0,63	0,64	0,63	0,63	0,55	0,560	0,56	0,56
P (%)	10,88	9,68	10,70	11,79	10,46	11,79	10,62	12,09
R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Smith								
a	0,77	0,46	0,45	0,38	1,06	0,63	0,69	0,60
b	4,78	4,25	3,18	2,53	6,90	6,02	4,13	3,17
P (%)	23,04	19,68	22,21	23,23	12,97	9,92	16,00	18,83
R ²	0,96	0,96	0,96	0,96	0,99	0,99	0,98	0,96
GAB								
M ₀ (% BS)	4,16	2,32	2,03	1,47	4,41	3,50	3,09	2,29
C	3,46	12,80	8,57	22,26	7,10	6,91	4,81	8,10
K	0,90	0,95	0,94	0,95	0,90	0,90	0,88	0,90
C ₀	1,49	2,38	3,15	1,85	2,27	2,22	1,57	1,73
K ₀	0,18	0,97	0,46	0,45	0,47	0,47	0,47	0,45
H _m (kJ/mol)	41,81	47,85	43,89	47,47	44,96	44,56	44,25	45,08
H _n (kJ/mol)	39,72	43,58	41,24	40,69	42,43	41,95	41,47	40,86
P (%)	15,30	21,28	19,92	26,41	12,69	13,03	11,20	18,75
R ²	0,98	0,96	0,96	0,95	0,98	0,98	0,99	0,96

BS : base sèche

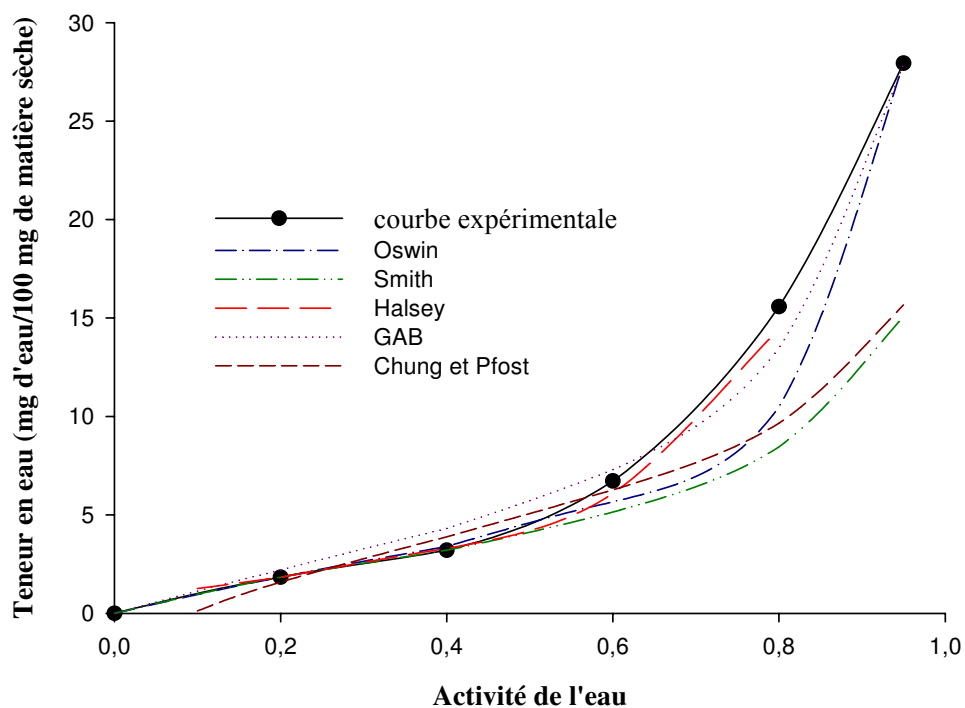


Figure 28 : Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 25°C

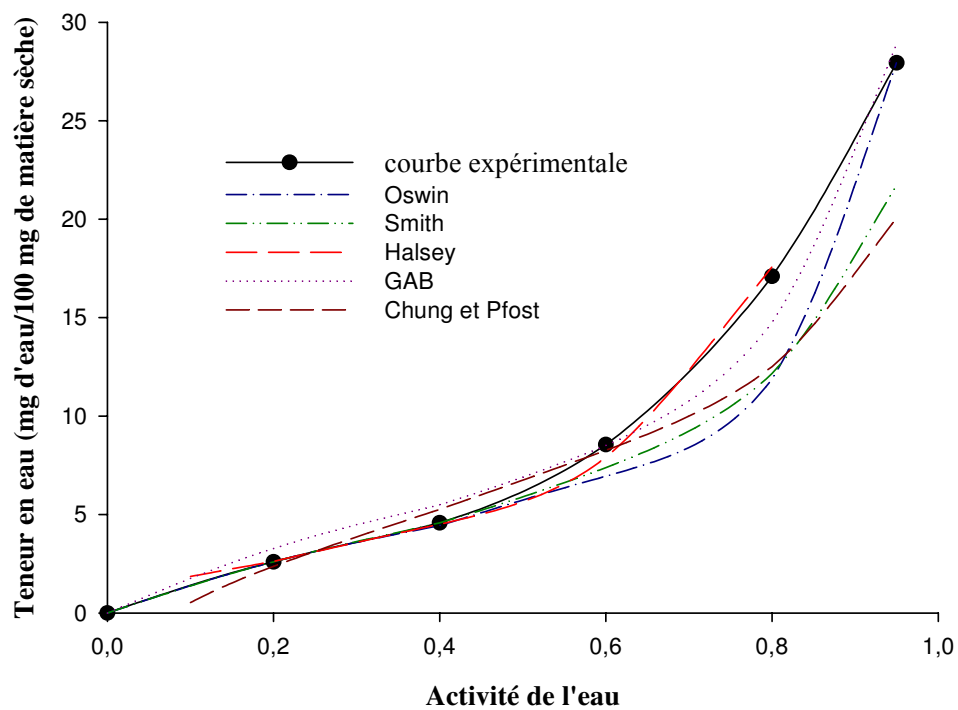


Figure 29 : Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 25°C

Tableau 21 : Les paramètres calculés et la valeur de P (%) des équations de Halsey et de Chung et Pfof pour l'aiélé

Modèle	Adsorption				Désorption			
	Température (°C)				Température (°C)			
	25	35	45	55	25	35	45	55
Halsey*								
A	2,99	2,26	1,79	1,35	3,61	2,76	2,06	1,40
r	0,96	0,94	0,94	0,92	0,97	0,98	1,00	0,94
P (%)	7,99	2,84	3,96	3,69	4,91	2,13	3,90	3,98
R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Chung et Pfof								
C ₁	5961,56	5906,08	6204,87	6298,96	5939,50	6054,93	6530,75	6458,56
C ₂	0,24	0,30	0,39	0,51	0,20	0,26	0,38	0,51
P (%)	26,25	22,12	24,22	24,60	21,04	18,09	22,44	24,26
R ²	0,94	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96

* : activité de l'eau comprise entre 0,1 et 0,8 ; seules quatre données ont été utilisées

Tableau 22 : Les paramètres calculés et la valeur de P (%) des équations d'Oswin, de Smith et de GAB pour l'aiélé

Modèle	Adsorption				Désorption			
	Température (°C)				Température (°C)			
	25	35	45	55	25	35	45	55
Oswin								
C ₁	4,58	3,43	2,95	2,01	5,18	3,90	2,70	2,07
n	0,63	0,64	0,60	0,64	0,59	0,60	0,63	0,63
P (%)	11,98	9,35	10,69	10,95	11,68	10,39	9,90	10,66
R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Smith								
a	0,86	0,46	0,44	0,29	0,91	0,56	0,56	0,33
b	4,72	4,30	3,08	2,38	6,23	5,15	3,22	2,38
P (%)	24,79	19,20	22,20	22,22	18,83	14,49	20,60	21,97
R ²	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	0,96	0,96
GAB								
M ₀ (% BS)	2,71	2,32	2,05	1,56	3,52	2,84	2,14	1,54
C	11,23	15,21	7,67	7,51	26,98	10,03	8,41	8,69
K	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,94
C ₀	4,09	5,57	2,79	2,74	9,80	3,66	1,67	3,18
K ₀	0,61	0,45	0,45	0,47	0,47	0,46	0,46	0,46
H _m (kJ/mol)	45,38	44,25	43,92	43,57	44,83	44,39	45,56	43,50
H _n (kJ/mol)	42,88	41,67	41,25	40,82	42,33	41,80	41,27	40,76
P (%)	18,71	22,58	20,23	22,02	26,00	17,25	17,02	21,48
R ²	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,98	0,98	0,96

BS : base sèche

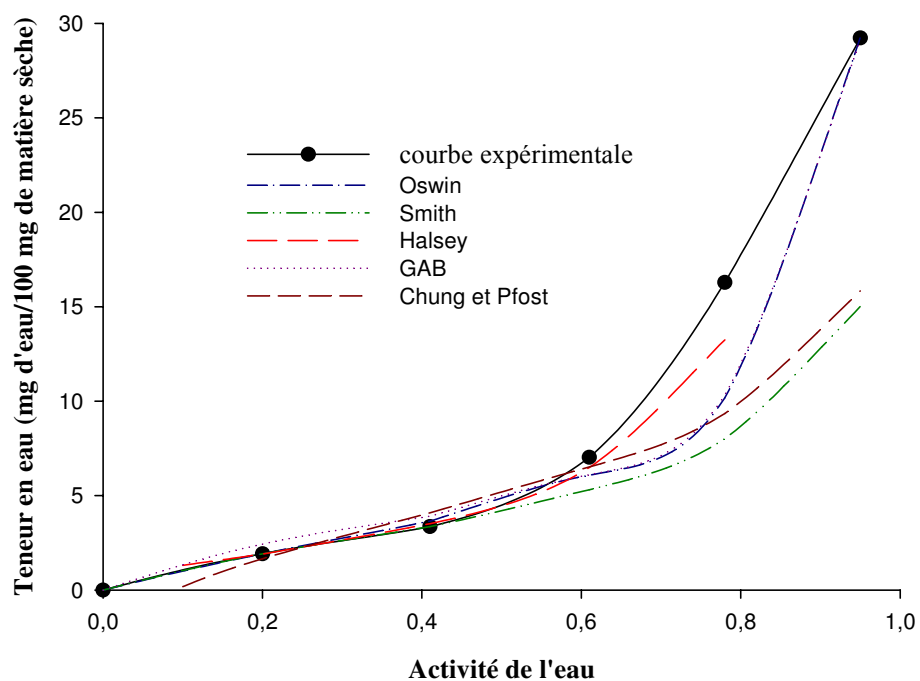


Figure 30 : Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 25°C

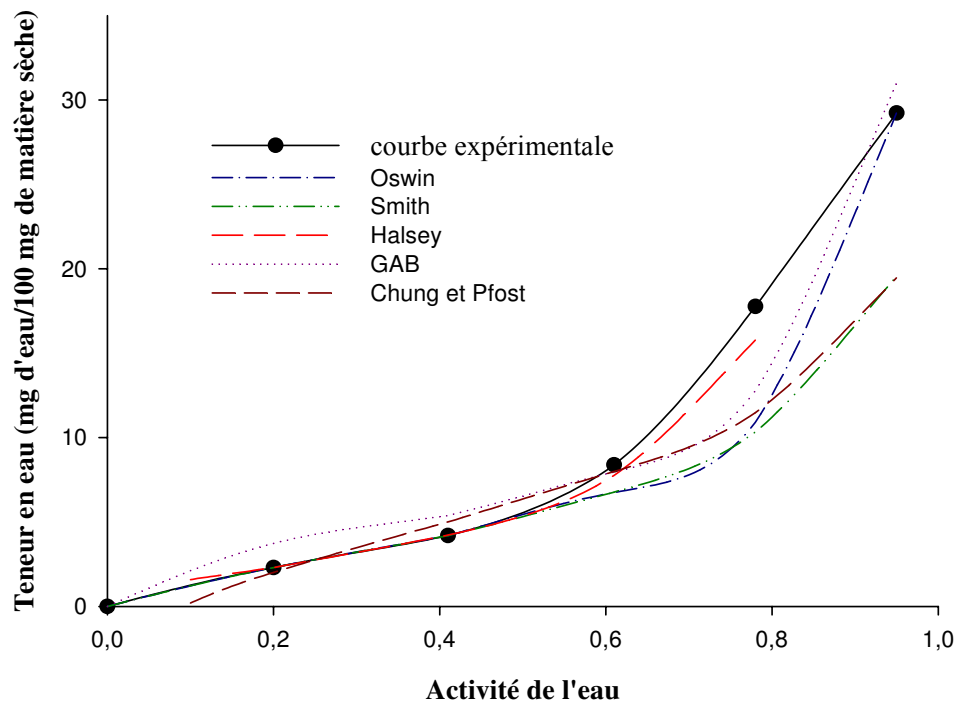


Figure 31 : Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 25°C

III.2.4 Chaleurs nettes de sorption

Les figures 32 et 33 représentent respectivement les chaleurs nettes de sorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé en fonction de la teneur en eau entre 25 et 55°C et les courbes de corrélations correspondantes. Leur détermination graphique à des teneurs en eau constantes variant entre 1,5 et 14,4% pour l'amande de karité, et entre 1,5 et 13,2% pour la pulpe de l'aiélé. Les chaleurs nettes de désorption sont supérieures à celles d'adsorption pour tous les produits étudiés. Ceci indique que l'énergie nécessaire dans le processus de désorption est supérieure à celle de l'adsorption comme exposé par Wang et Brennan (1991). Le maximum de chaleur nette est observé entre 0 et 6% de teneur en eau, avec une valeur de désorption (28,38 kJ/mol) supérieure à celle de l'adsorption (21,98 kJ/mol) pour l'amande de karité. Quant à la pulpe de l'aiélé, ce maximum a une valeur de désorption (26,61 kJ/mol) supérieure à celle de l'adsorption (21,98 kJ/mol). L'amande de karité présente une chaleur de désorption supérieure à celle de la pulpe de l'aiélé. C'est la première fois que les chaleurs nettes de sorption sont publiées sur l'amande de karité. Dans le cas de la pulpe de l'aiélé, c'est la première fois qu'elles le sont en ce qui concerne les chaleurs d'adsorption. Comparés aux résultats de la littérature, les maxima sont inférieurs à ceux obtenus par Noumi *et al.* (2003) sur la pulpe de l'aiélé (52,48 kJ/mol). La détermination des énergies par ces auteurs à des teneurs en eau élevées, entre 2,7 et 17,9%, justifierait cette différence.

On observe également une augmentation de la chaleur nette de sorption, quel que soit le produit et le sens de sorption, au fur et à mesure que l'on se rapproche des valeurs de teneur en eau faibles. Cela s'explique par le fait qu'à ces teneurs l'eau se lie aux sites de grandes énergies de liaison. Ces sites devenant occupés, la sorption s'opère sur les sites de faibles chaleurs de sorption (Palou, Lopez-Malo & Argai, 1997 ; Lewicki, 2000). Ainsi, les teneurs en eau faibles correspondent aux fortes interactions énergétiques dans le produit. On

considère aujourd'hui que la réduction de mobilité de l'eau à ces teneurs en eau participerait à cette difficulté à extraire l'eau (Do Amaral Sobral, Lebert & Bimbenet, 1999).

A l'aide du logiciel Sigma-plot (version 9.01, 2004), des corrélations satisfaisantes à la teneur en eau ont été effectuées sur les valeurs de chaleur de sorption. La fonction polynomiale inverse de 3^{ème} ordre est utilisée pour l'adsorption du karité avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,99$ ($Q_s = 4,39 + \frac{17,77}{M} - \frac{6,17}{M^2} + \frac{10,08}{M^3}$), et de l'aiélé avec un $R^2 = 0,99$ ($Q_s = 9,07 - \frac{19,99}{M} + \frac{107,04}{M^2} - \frac{72,06}{M^3}$). Quant à la désorption, la meilleure corrélation est obtenue avec la "courbe logistique à 4 paramètres" pour le karité ($Q_s = 7,12 + \frac{21,65}{1 + 10^{(\log 4,13 - M)4,71}}$, $R^2 = 0,99$) et avec la fonction polynomiale inverse de 3^{ème} ordre pour l'aiélé ($Q_s = 8,01 + \frac{21,27}{M} + \frac{22,81}{M^2} - \frac{19,28}{M^3}$, $R^2 = 0,99$).

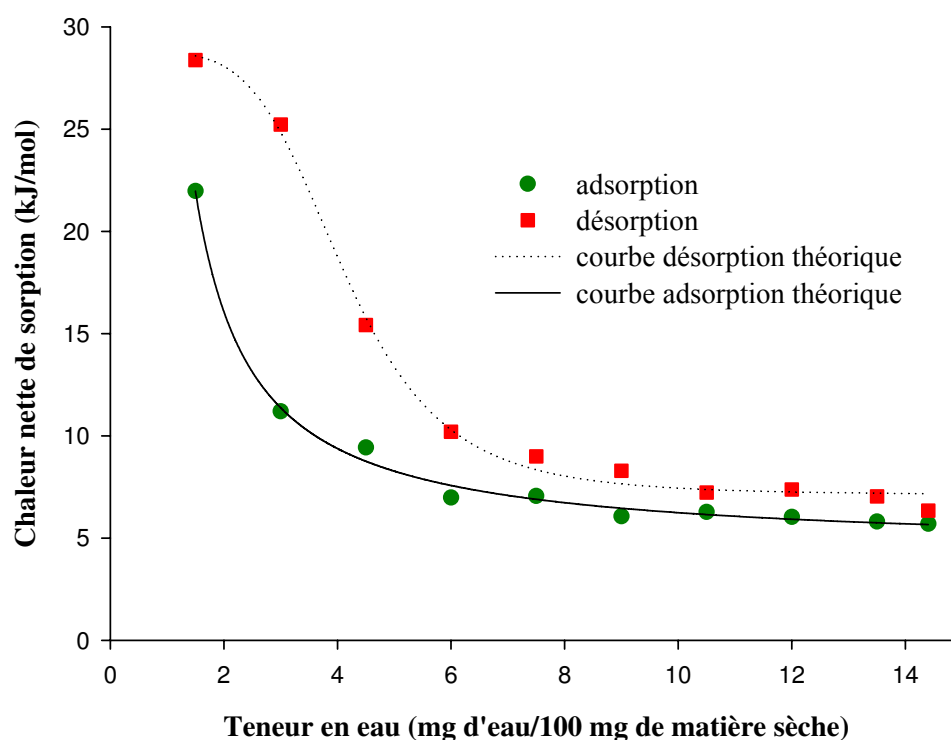


Figure 32 : La chaleur nette de sorption d'eau de l'amande de karité entre 25°C et 55°C

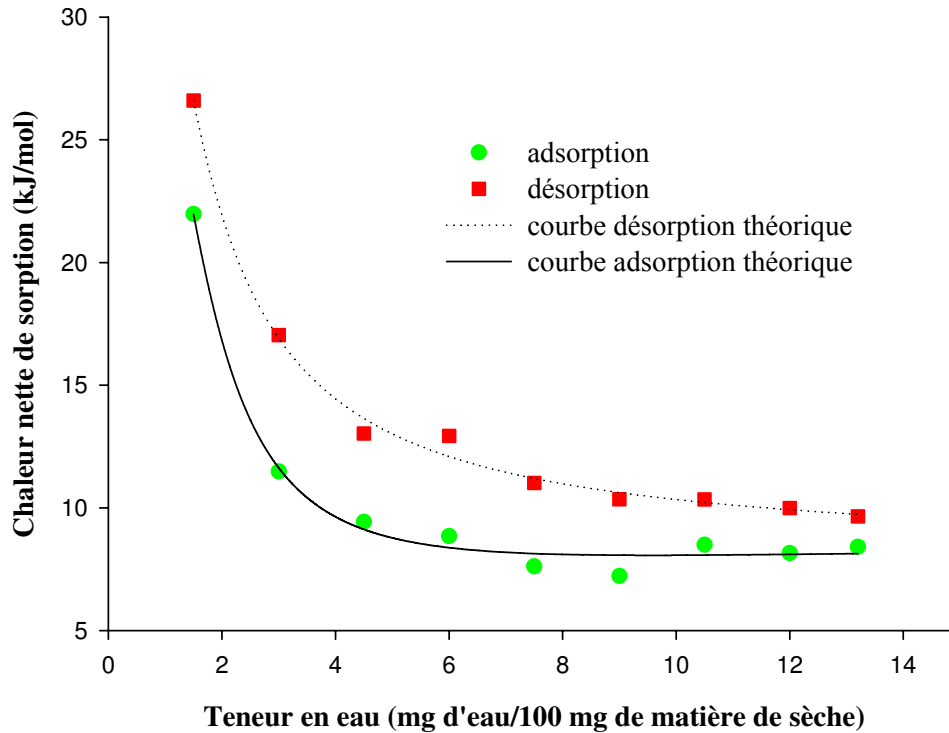


Figure 33 : La chaleur nette de sorption d'eau de la pulpe de l'aiélé entre 25°C et 55°C

III.2.5 Phénomène d'hystérésis

Le phénomène par lequel à une température et une activité de l'eau données un adsorbant contient plus d'eau pendant la désorption que pendant l'adsorption est appelé hystérésis, phénomène dont l'importance technologique, notamment en séchage et conservation, est notable. Les courbes de la figure 34 présentent les isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité. Il apparaît effectivement un phénomène d'hystérésis, quelle que soit la température. Ceci proviendrait du fait que l'énergie de désorption est supérieure à celle d'adsorption. En effet, après avoir établi une équation pour expliquer le phénomène d'hystérésis, Caurie (2006) constate qu'indépendamment de la méthode de résolution l'énergie de désorption est toujours supérieure à celle d'adsorption. Ceci est remarqué par le gonflement de certains adsorbants lorsque l'on adsorbe les molécules d'eau des basses pressions de vapeur vers les hautes. Ce gonflement cause un relâchement des

forces de pression (D'Arcy & Watt, 1981) et de cohésion (Bettelheim & Erhlich, 1963) dans la matrice de l'adsorbant. Ceci entraîne la formation des micro-fentes et des fissures qui exposeraient les sites profonds d'énergies initialement non disponibles aux molécules d'eau. Les quantités ainsi adsorbées (désorption) s'ajoutent à celles précédemment adsorbées (adsorption) à activité de l'eau spécifique pour créer la boucle d'hystérésis. Ceci s'expliquerait également par la dépression à la désorption (le sens retour vers les faibles activités de l'eau) lorsque les micro-fentes et fissures ont adsorbé une humidité additionnelle sur les sites non saturés. La formation de plusieurs couches de molécules d'eau en désorption exige alors plus d'énergie (Cheftel & Cheftel, 1984). La valeur des différences d'énergies d'attraction intermoléculaire de la monocouche estimée à partir des équations (3) à (7) du paragraphe I.2.3.4 de la revue bibliographique varie de 259,96 à 66,91 cal/mol en fonction de la température, de la teneur en eau et de l'activité de l'eau. Il faut noter que la différence à l'équilibre diminue avec l'augmentation de la température.

C'est la première fois que ces résultats sur l'hystérésis de l'amande de karité sont publiés.

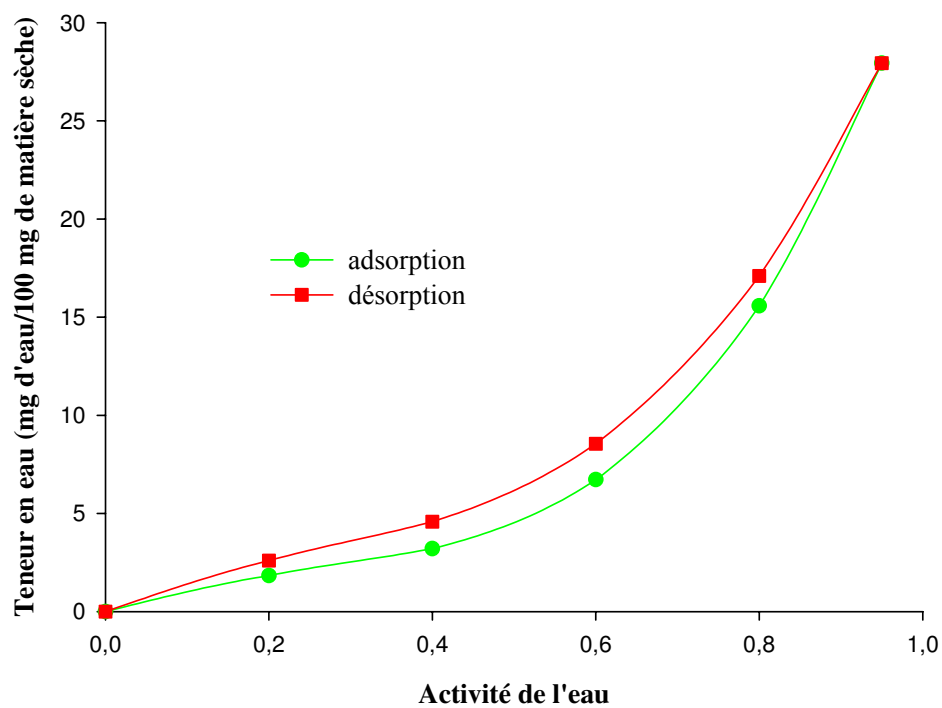


Figure 34a: Les isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité à 25°C

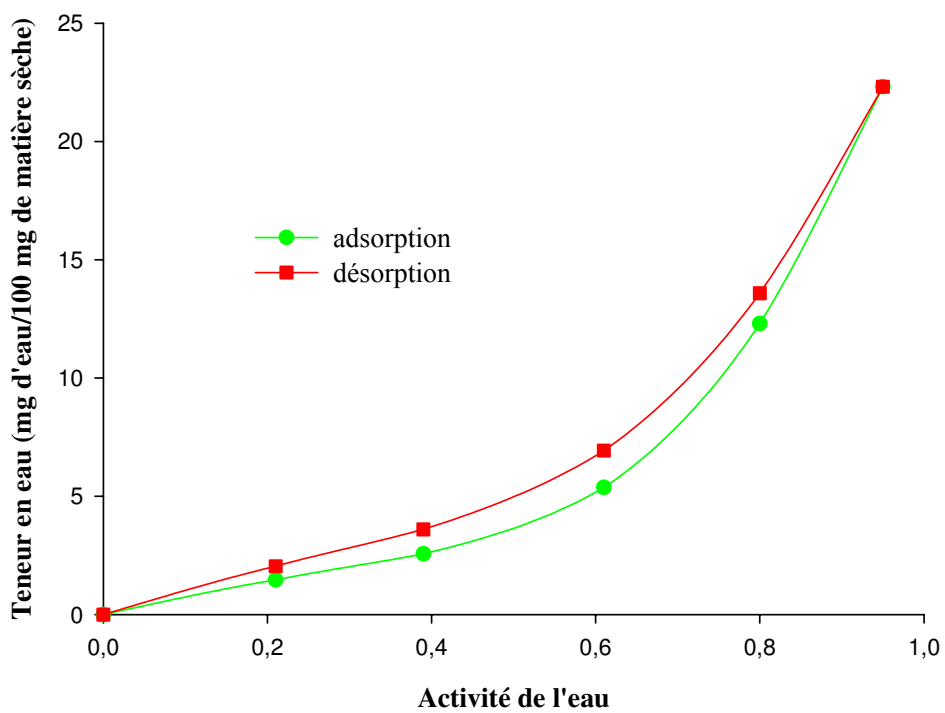


Figure 34b : Les isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité à 35°C

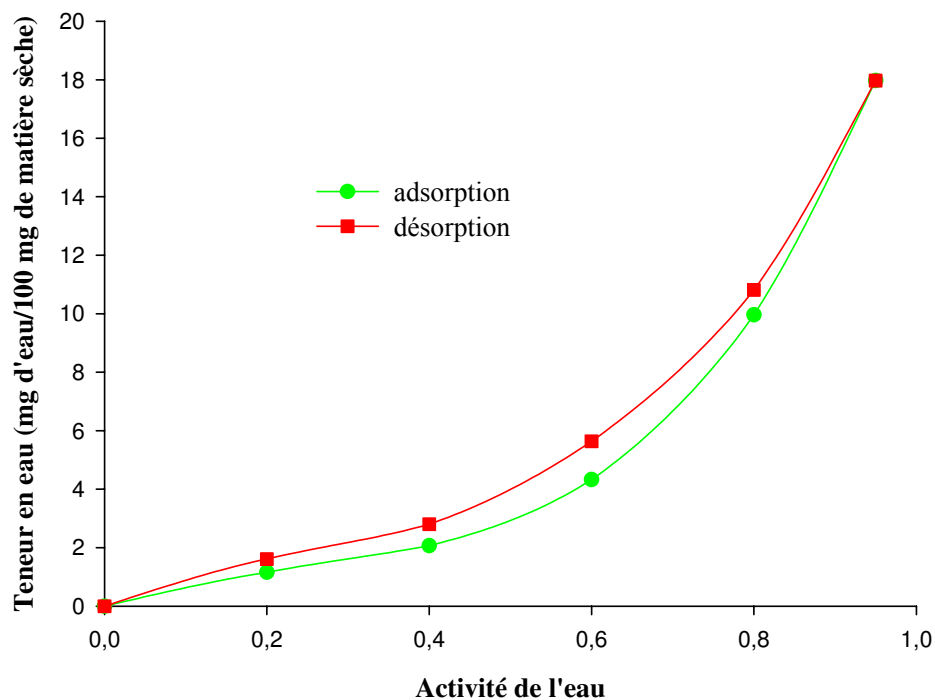


Figure 34c : Les isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité à 45°C

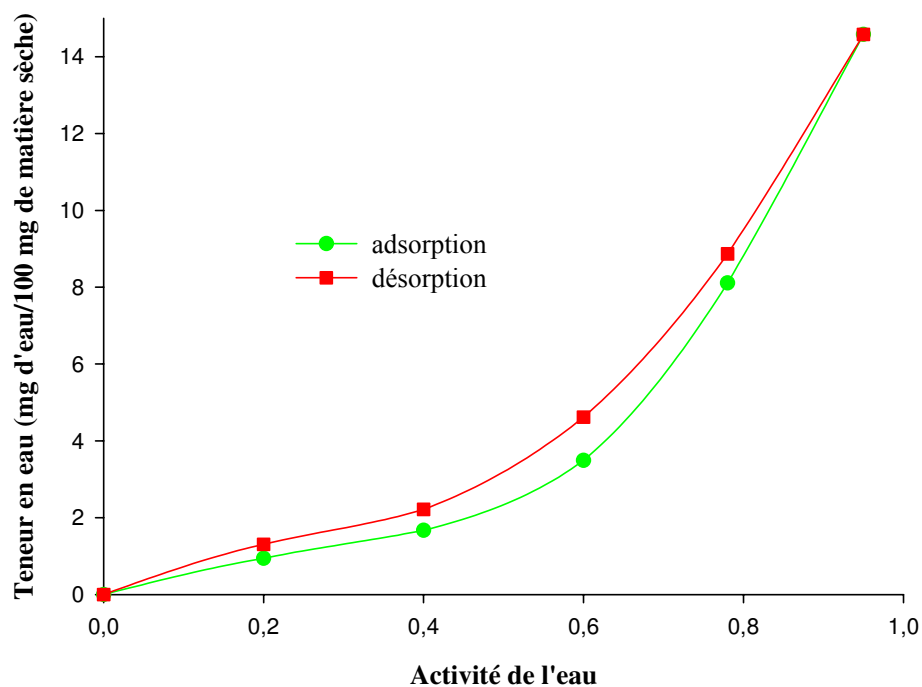


Figure 34d : Les isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité à 55°C

Figure 34 : Les isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité à différentes températures

Les courbes de la figure 35 donnent les isothermes d'adsorption et de désorption de la pulpe de l'aiélé à 25, 35, 45 et 55°C. Il apparaît à 25°C la présence d'un faible cycle d'hystérésis entre 0,2 et environ 0,8 A_w . Ce cycle diminue progressivement avec l'élévation de la température jusqu'à disparition apparente de l'hystérésis. On obtient alors une égalisation significative des données de désorption avec d'adsorption. Cela pourrait être attribué à l'égalisation des chaleurs de désorption et d'adsorption avec l'augmentation de la température, mais également à la sensibilité des liaisons hydrogène issues de la sorption des molécules d'eau par la matière sèche (avec l'élévation de la température), comparativement à l'amande de karité. D'ailleurs, l'estimation des énergies d'attraction intermoléculaire de la monocouche indique une différence de 128,58 à 4,17 cal/mol (37,08 à 4,17 cal/mol à 55°C) avec l'augmentation de la température. C'est la première fois que le phénomène d'hystérésis est mis en évidence sur les isothermes de sorption de la pulpe des fruits de l'aiélé.

En se fondant sur le volume de l'hystérèse, la conservation des amandes de karité est plus aisée que celle de la pulpe de l'aiélé car les isothermes de l'amande présente une boucle d'hystérésis plus prononcée. Par conséquent, la déshydratation de l'amande de karité exige plus d'énergie que celle de la pulpe de l'aiélé. Ceci est confirmé par le calcul des énergies des boucles d'hystérésis de l'amande de karité et de l'aiélé à toutes les températures (tableau 23). Les résultats présentés dans ce tableau reflètent la réalité expérimentale, même si cette méthode de calcul de l'énergie de la boucle d'hystérésis ne prend pas en compte les extrémités et tous les points de la boucle.

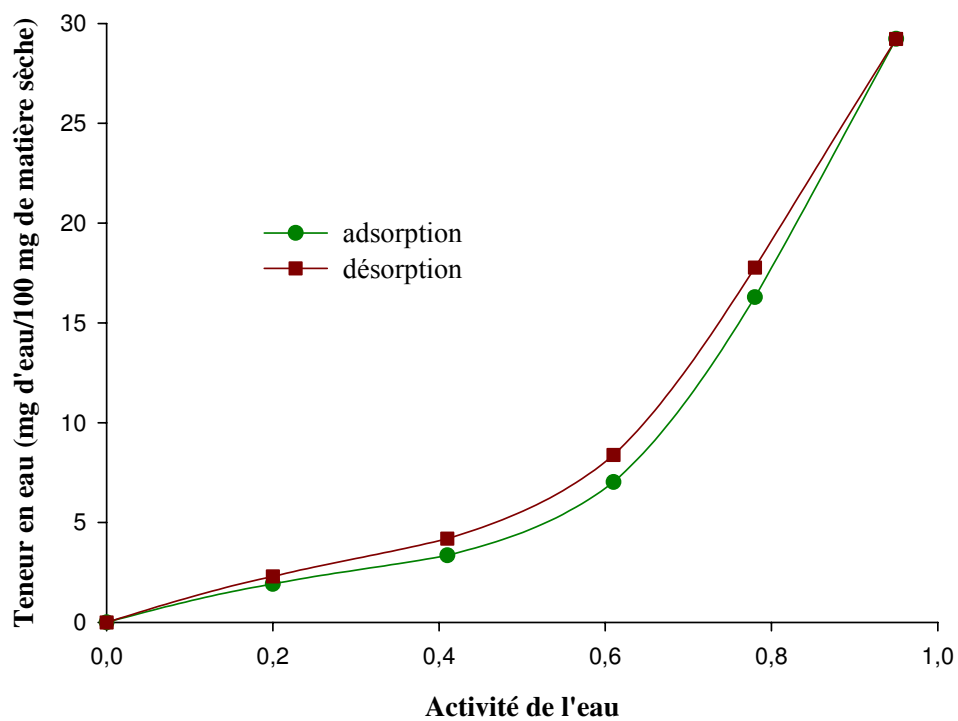


Figure 35a: Les isothermes d'adsorption et de désorption de la pulpe de l'aiélé à 25°C

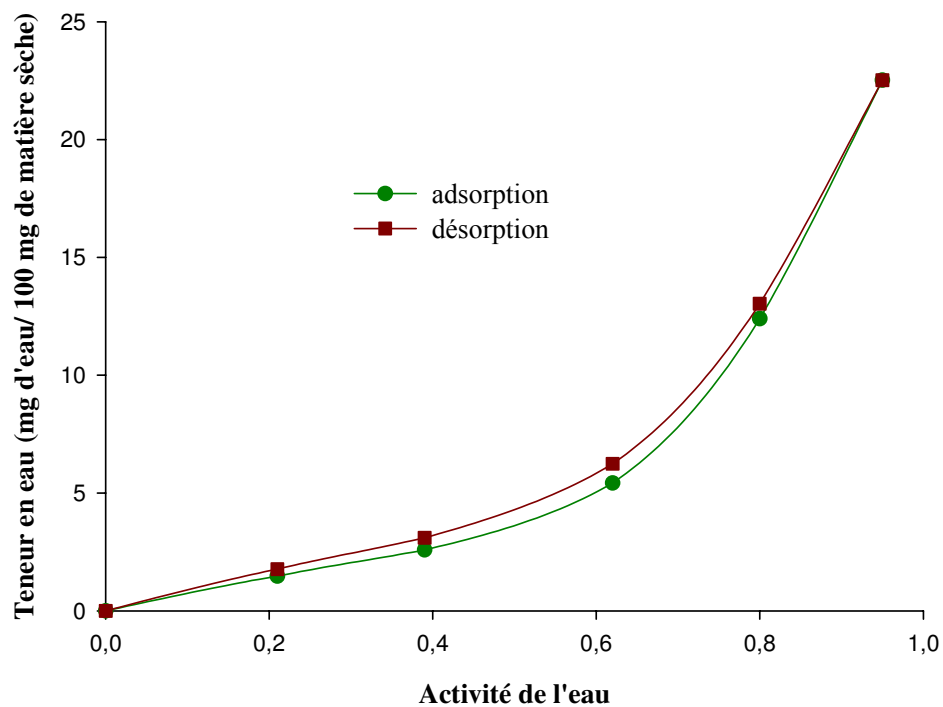


Figure 35b: Les isothermes d'adsorption et de désorption de la pulpe de l'aiélé à 35°C

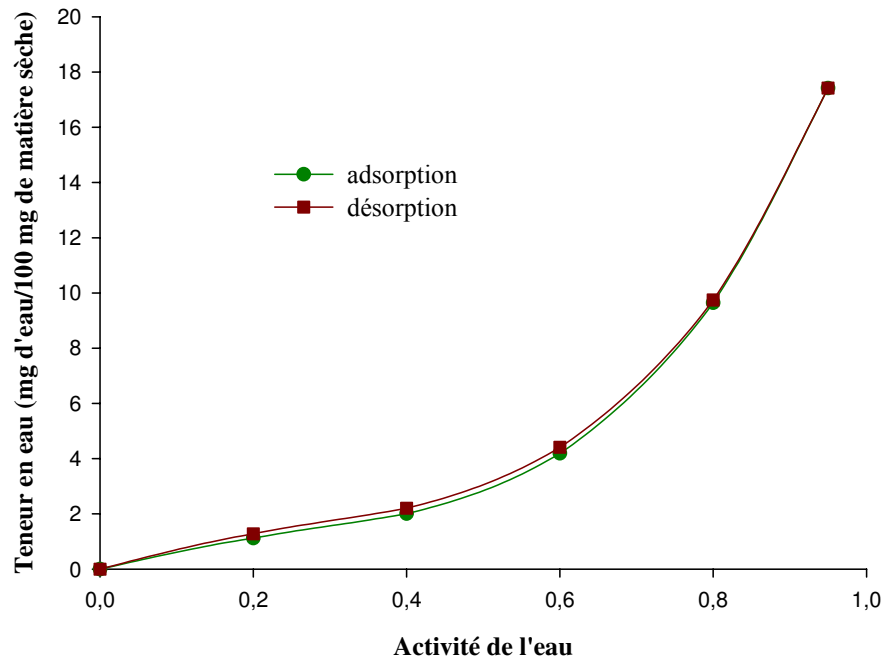


Figure 35c: Les isothermes d'adsorption et de désorption de la pulpe de l'aiélé à 45°C

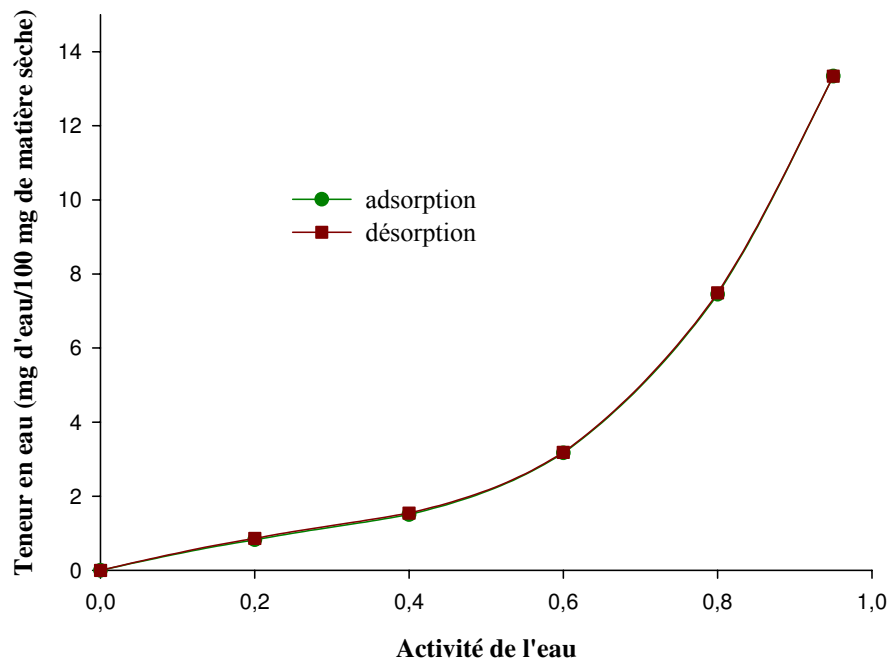


Figure 35d: Les isothermes d'adsorption et de désorption de la pulpe de l'aiélé à 55°C

Figure 35 : Les isothermes d'adsorption et de désorption de la pulpe de l'aiélé à différentes températures

Tableau 23 : La variation des valeurs calculées des énergies de la boucle d'hystérésis

Température (°C)	Energie de la boucle d'hystérésis (kJ/mol)	
	Amande de karité	Pulpe de l'aiélé
25	103,60	10,18
35	98,39	9,48
45	88,61	6,39
55	63,89	2,94

III.2.6 Conditions de conservation

La teneur en eau est le facteur de dégradation le plus important des produits stockés, car elle accroît le dégagement de chaleur au sein des stocks en favorisant la respiration des produits et des microorganismes. On admet qu'une augmentation de la teneur en eau du grain de 1,5% double l'échauffement des grains et réduit de moitié la durée de conservation (BIT, 1986). Pour cette raison, des teneurs en eau pour le stockage en régions tropicales des produits agricoles ont été recommandées, dont les grains (Ilo, 1984 ; Cogburn 1985). En ce qui concerne les amandes de karité, la FAO en 1988 (Lovett, 2004) recommande une teneur en eau inférieure à 7%. En se fondant sur cette recommandation, il serait souhaitable de conserver les amandes de karité et les fruits de l'aiélé dans une atmosphère d'humidité relative comprise entre 40 et 60% (0,4 et 0,6 Aw), zone de l'eau faiblement liée. Cela correspond à des teneurs en eau comprises entre 1,50 et 6,50% (amande de karité), et, entre 1,25 et 6,25% (pulpe de l'aiélé). Ceci est d'autant plus intéressant qu'en conservation des aliments et en technologie de stockage, la stabilité microbiologique des produits stockés dépend plus de leur activité de l'eau d'équilibre que de leur teneur en eau comme l'on peut apercevoir à partir du tableau 24. Il faut préciser que les activités de l'eau inférieures ou égales à 0,2 favorisent l'oxydation des lipides (Cheftel & Cheftel, 1984), raison pour laquelle nous ne les conseillons pas.

Tableau 24 : Les conditions de croissance des microorganismes et insectes

Microorganismes	Température (°C)	A _w	Auteurs
Moisissures	20 – 40	0,80 – 0,95	Moreau (1996)
Levures	25 (op)	0,65 - 0,70	Belin (1996)
Bactéries	30 -40	0,75 – 0,97	Adams & Moss (1995)
Insectes	10 – 45 (op 30)		ILO (1984), BIT (1986)

op : température optimale

La comparaison des valeurs expérimentales et théoriques des teneurs en eau de l'amande de karité à 25, 35, 45 et 55°C donne, jusqu'à l'activité de l'eau de 0,8, un coefficient de détermination de 0,99, quelque que soit le sens de sorption. Ainsi, l'équation (8) a été utilisée pour la prédiction des isothermes de sorption. Les tracés des valeurs moyennes de K et de B ont permis d'obtenir les équations de régression polynomiales de la forme $y = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$ où y_0 , a, b et c sont des constantes, à partir desquelles les différents paramètres de l'équation (8) ont été déterminés. Le tracé des valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche en désorption, et en fonction de la température, donne également des équations polynomiales de troisième ordre pour le karité et l'aiélé tandis qu'en adsorption on obtient une équation identique uniquement pour l'aiélé, le karité ne donnant qu'une équation linéaire. Les constantes et les coefficients de détermination (R^2) de ces équations sont rassemblés dans les tableaux 25 et 26. De ces paramètres, la prédiction des isothermes a été effectuée telle que le présentent les figures 36 et 37 des isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé à 18 et à -33°C, respectivement. On observe qu'à 18°C et indépendamment du produit, les données de désorption sont supérieures à celle d'adsorption. Ce qui n'est pas le cas pour l'amande de karité à -33°C. Par ailleurs, les teneurs en eau d'équilibre sont considérablement élevées à -33°C et généralement supérieures aux teneurs recommandées, même si dans le cas de la pulpe de l'aiélé (en adsorption), seul l'activité de l'eau de 0,95 donne une teneur en eau supérieure à 2%. De ce qui précède et du fait que sur la structure des produits change avec la

congélation, les isothermes obtenues à -33°C ne sont pas pratiques, même si cette température peut faciliter une capacité et une durée de stockage importantes (industriel). Par contre, les prédictions à 18°C présentent l'avantage que les teneurs en eau sont proches de celles recommandées entre 0,4 et 0,6 A_w . Etant entendu que les conditions de stockage paysannes (exemple d'après une visite de terrain, température de 25,6°C et humidité relative de 71%) donnent des teneurs en eau d'équilibre élevées (dans ce cas 10%).

On observe, tout de même des figures 36 et 37, qu'aux activités de l'eau supérieures à 0,8, la teneur en eau augmente considérablement. La déviation des teneurs en eau à 0,95 A_w s'expliquerait par la signification de la constante, C, de Caurie. En effet, la valeur de C est proportionnelle à la densité d'eau adsorbée, mais inversement proportionnelle au nombre de couches d'eau adsorbées. Ainsi, au delà de 0,90 A_w , les énergies impliquées dans l'adsorption ne sont plus les forces de surfaces mais de condensation. Dans ce domaine, c'est la loi de Raoult qui s'applique (Caurie, 1981), d'où la déviation de la teneur en eau aux activités de l'eau supérieures à 0,9. Le modèle ainsi adapté est alors valable jusqu'à 0,90 A_w .

Tableau 25 : Les paramètres des équations et valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) et des constantes (K et B) pour l'amande de karité

	y_0	a	b	c	R^2	Valeurs	
						18°C	-33°C
Adsorption							
K	33,6604	-2,3040	0,0536	-0,0004	1	7,22	182,44
Q (cal/mol)	176,8	22,94			0,72	236,12	-933,82
B	0,3924	$2,045 \cdot 10^{-3}$	$-5,215 \cdot 10^{-5}$	$4,319 \cdot 10^{-7}$	1	0,41	0,25
Désorption							
Q (cal/mol)	-4214	429,2	-11,90	0,1043	1	260,68	-35084,93

Tableau 26 : Les paramètres des équations et valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) et des constantes (K et B) pour la pulpe de l'aiélé

	y_0	a	b	c	R^2	Valeurs	
						18°C	-33°C
Adsorption							
K	3,3737	-0,2155	0,0063	$-6 \cdot 10^{-5}$	1	1,19	19,50
Q (cal/mol)	381,13	91,317	-3,3172	0,0321	1	1137,27	-7398,34
B	$3,768 \cdot 10^{-1}$	0,0036	-10^{-4}	$9 \cdot 10^{-7}$	1	0,41	0,15
Désorption							
Q (cal/mol)	2397	-98,377	2,0316	-0,0141	1	1202,22	8362,57

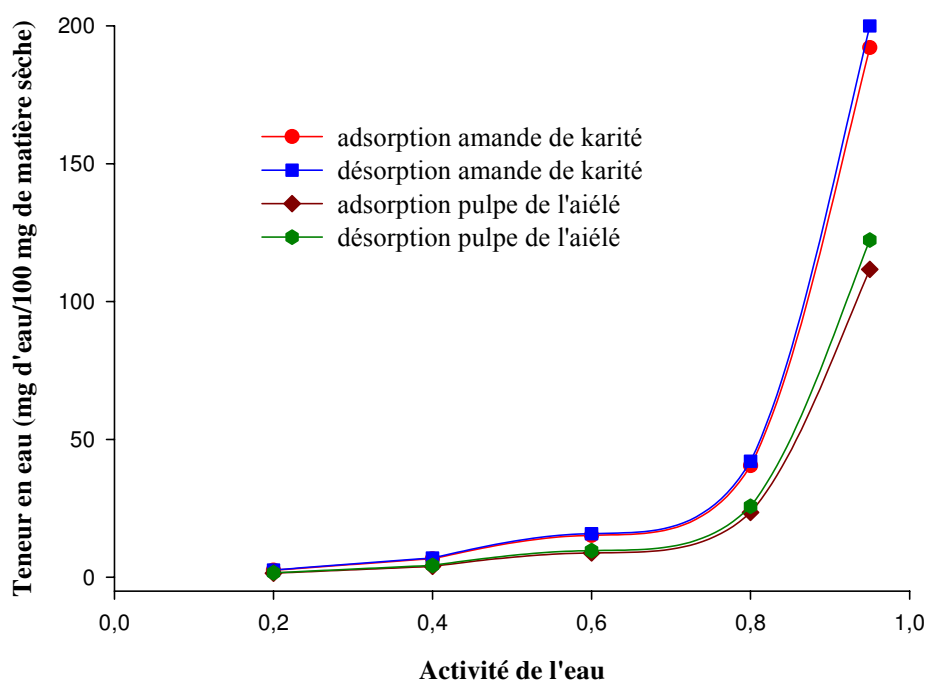


Figure 36: Les prédictions des isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé à 18°C

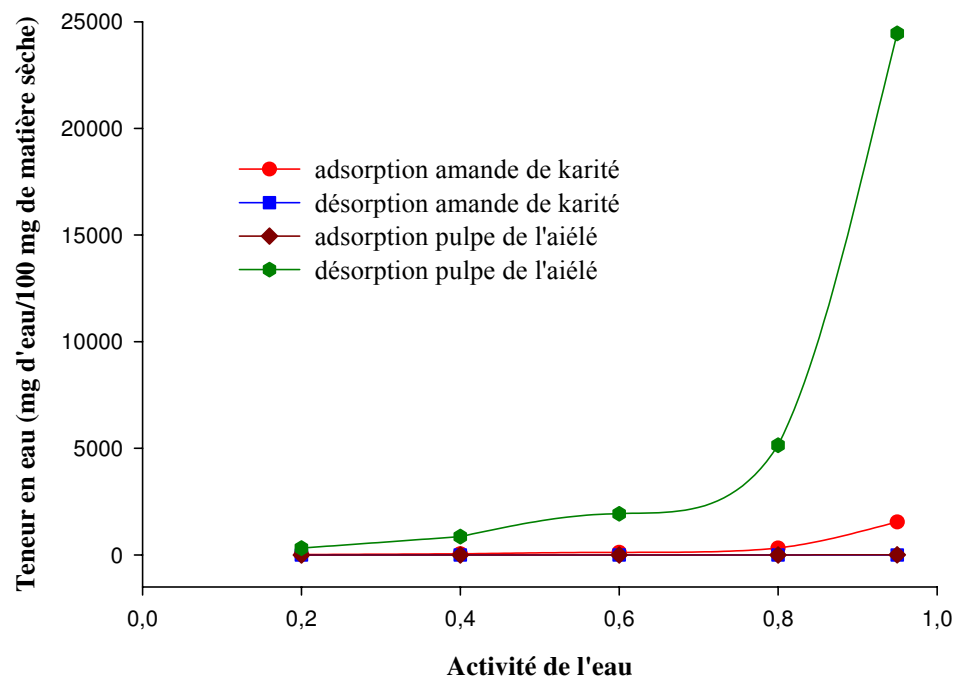


Figure 37: Les prédictions des isothermes d'adsorption et de désorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé à -33°C

IV. CONCLUSION PARTIELLE

Il était question dans ce chapitre de déterminer l'état de l'eau dans l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé en termes d'isothermes de sorption, de modèles des isothermes et de chaleurs nettes de sorption entre 25 et 55°C. La teneur en eau à l'équilibre diminue avec l'augmentation de la température. Les isothermes de sorption des amandes de karité et de la pulpe de l'aiélé sont de type II. La pulpe de l'aiélé est plus hygroscopique que l'amande de karité à 25°C, tandis qu'entre 35 et 55°C on observe le phénomène inverse. Parmi les modèles testés, celui d'Oswin décrit le mieux les données de sorption des deux produits sur toute la plage des activités de l'eau. Pour la première fois, le phénomène d'hystérésis est mis en évidence sur l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé. Ce phénomène diminue significativement avec la température vers l'égalisation des énergies de sorption dans le cas de la pulpe de l'aiélé. En effet, la conservation de la pulpe de l'aiélé est plus difficile que celle de l'amande de karité. La conservation de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé doit s'effectuer dans une atmosphère d'humidité relative comprise entre 40 et 60% (activités de l'eau de 0,4 et 0,6). Ces humidités relatives donnent des teneurs en eau (d'équilibre) recommandées (de 6,50 à 1,25% entre 25 et 55°C). Un modèle adapté de prédiction des isothermes de sorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé en deçà de 25°C et au delà de 55°C a été obtenu. Il a permis de prédire les isothermes de ces produits à 18°C, température rencontrée dans les régions de production.

Après avoir établi l'état de l'eau et les conditions d'entreposage de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé au moyen des isothermes de sorption, il serait souhaitable de connaître le comportement de ces produits en stockage, notamment par rapport à la matière grasse qui les constituent. L'extraction aux solvants organiques étant classique, quels peuvent être le rendement d'extraction et les indices de qualité des matières grasses extraites au CO₂ supercritique? C'est à ces préoccupations que s'attellera de répondre le chapitre suivant.

**CHAPITRE III :
EXTRACTION DES MATIERES
GRASSES PAR DEUX SOLVANTS :
HEXANE ET CO₂
SUPERCRITIQUE**

I. INTRODUCTION

La prédominance des acides gras insaturés dans les matières grasses des amandes de karité et des pulpes des fruits de l'aiélé les rend susceptibles à la dégradation (Cheftel & Cheftel, 1984 ; MSDA, 2005). Ensuite, la période de production du karité coïncide avec la saison des pluies, saison des travaux champêtres. Ceci limite l'extraction du beurre du karité en une activité secondaire pour les femmes à qui il apporte un peu de revenus. C'est ainsi que les fruits non exploités sont stockés. Or pour éviter les pertes en période de production, il faut vite transformer (extraction de lipides) ces produits ou les stocker dans les conditions qui prolongent leur durée d'utilisation. Traditionnellement, les populations locales effectuent une extraction du beurre de karité à l'eau (SNV, 1991; Kassamba, 1997). De nombreux travaux se sont aussi intéressés à l'extraction à l'eau des lipides de ces deux produits (N'Gouro Sanogo, 1997), et à d'autres solvants organiques toxiques tels que le méthanol (Maranz *et al.*, 2003 ; Kapchie Noutchougoué *et al.*, 2004), le chloroforme (Womeni *et al.*, 2002) l'éther de pétrole (Ajiwe *et al.*, 1998), et l'hexane (Agbo N'zi & Chatigre Kouamé, 1996 ; Kapseu *et al.*, 1999 ; Tchiégang *et al.*, 2003). Mais, aucun travail, à notre connaissance, ne porte sur leur extraction au CO₂ supercritique, connu pour être inerte.

Par ailleurs, les conditions de stockage des fruits du karité non exploités et des fruits de l'aiélé ne sont pas sans inconvénients sur la qualité des huiles. Ceci à cause de l'activité physiologique des fruits (BIT, 1986). UNIFEM (1997) signale une germination des amandes du karité lors d'un stockage prolongé en fosses. Ceci mobilise les lipases qui rompent les chaînes de triglycérides et libèrent les acides gras. Les méthodes traditionnelles ayant montré leurs limites, l'exploration du stockage conventionnel de ces oléagineux s'imposent. Si les travaux de Womeni (2004) ont porté sur le stockage des graines de karité en conditions ambiantes, de réfrigération et de congélation, les résultats obtenus sont limités à deux mois et ne donnent pas une tendance claire de ce qu'on obtiendrait en prolongeant le stockage. En

effet, dans le cadre d'une exploitation à grande échelle de ces fruits, il est souhaitable de connaître la qualité des lipides sur une période plus longue. Tchiégang *et al.* (2001) ont étudié le stockage des fruits de l'aiélé en conditions ambiantes, de réfrigération et de congélation, mais ce travail est limité à 3 mois, à l'influence du stockage sur le ramollissement des fruits et ne fait aucun cas de l'extraction des huiles des fruits en stockage.

En outre, il y aurait une corrélation entre la texture de ces fruits et les indices de qualité de leurs huiles. En effet, exposés à l'air libre, les fruits de l'aiélé durcissent après environ une semaine (Jiokap Nono & Kapseu, 1999), et selon les conditions d'entreposage, les amandes de karité germent ou sont attaquées par les insectes. En effet, Kapchie Noutchogoué (2005) a trouvé qu'après 7 jours de stockage à $22 \pm 1^\circ\text{C}$, les fruits de l'aiélé présentent les pulpes les plus dures et l'huile à l'indice d'acide le plus élevé comparativement aux fruits soumis au ramollissement humide à $45 \pm 1^\circ\text{C}$ et à $70 \pm 1^\circ\text{C}$. Les études de Kapchie Noutchogoué *et al.* (2005) ont mis en évidence la relation entre les modifications biochimiques et texturaux des pulpes des fruits d'aiélé pendant la conservation en solution suivie du traitement à la chaleur. Ces travaux sont limités à une semaine et ne concernent pas les fruits en stockage prolongé. Il ressort que, dans la limite de nos connaissances, aucune étude n'a encore été effectuée sur la texture des amandes de karité et de la pulpe de l'aiélé en stockage.

Il s'agit dans ce chapitre d'étudier l'influence des conditions de stockage sur les rendements d'extraction à l'hexane et au CO_2 supercritique, les caractéristiques chimiques des matières grasses extraites, et, les corrélations entre les indices de qualité et les paramètres texturaux. Ceci permettra de comparer ces deux solvants, ainsi que les oléagineux à amande et à pulpe.

II. MATERIEL ET METHODES

II.1 Matériel végétal et dispositif expérimental

Le matériel végétal est constitué des fruits de *Vitellaria paradoxa* Gaertn. et de *Canarium schweinfurthii* Engl. dont les provenances sont identiques à celles indiquées au chapitre 2 (paragraphe II.1.1). Le matériel végétal est ensuite stocké dans différentes conditions :

- Stockage en salle (laboratoire), emballé dans les sachets blancs en polyéthylène basse densité et ouvert à l'air ambiant (température : $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidité relative : $38 \pm 3\%$)
- Stockage dans un congélateur de marque *Vestfrost*, emballé dans les sachets blancs en polyéthylène basse densité attaché (température : $-33 \pm 3^{\circ}\text{C}$, humidité relative : $37 \pm 2\%$)

La température et l'humidité ont été prélevées à l'aide d'un thermohygromètre de marque *NOVO*. 2°C 3 %

Les produits ont été échantillonnés à des périodes de stockage variables avec l'extraction à l'hexane ou au CO_2 supercritique. Pour l'extraction à l'hexane, les temps d'échantillonnage sont 0, 1, 2, 3, 4, 5, 12 et 24 mois, et pour l'extraction au CO_2 supercritique 1, 12 et 24 mois. Les produits stockés au congélateur ont été dégivrés pendant environ 5 heures à température ambiante avant les expérimentations. Les huiles ainsi extraites ont été conservées au congélateur jusqu'à utilisation.

II.2 Méthodes

II.2.1 Extraction des matières grasses

Avant de procéder à l'extraction des lipides, la répartition granulométrique des fruits broyés a été effectuée à l'aide du granulomètre laser (*Malvern Instruments, England*). Son principe est basé sur l'éclairage d'une particule par un faisceau de lumière cohérente et monochromatique, la particule étant supposée sphérique, non poreuse et opaque. Il apparaît alors un motif de diffraction sous forme de franges concentriques alternativement claires et

sombres. L'intensité du rayonnement diffracté est une fonction du rayon des particules. L'angle de diffraction, défini par le premier point d'annulation, est d'autant plus grand que les particules sont petites.

Les teneurs en eau des échantillons utilisés lors des extractions ont été également déterminées.

II.2.1.1 Extraction à l'hexane

Tous les échantillons ont été traités tel que décrit au paragraphe II.2.1.3.2 du chapitre 2, avant de procéder à l'extraction dont le schéma général est présenté par la figure 38. Le rendement d'extraction a été calculé selon la formule du paragraphe signalé ci-dessus.

II.2.1.2 Extraction au CO₂ supercritique

II.2.1.2.1 Description de l'installation au CO₂ supercritique

La figure 39 présente le schéma de l'installation d'extraction dynamique supercritique. L'extracteur est un cylindre, en acier inoxydable, monté en série avec trois séparateurs de type *cyclone*. Il est lié en même temps à un bain thermostaté qui permet la montée en température (d'extraction) et à une pompe à membrane, de marque *Dosapro Milton Roy-Milroyal D*, qui permet d'atteindre la pression d'extraction. Cette pompe a un débit maximal de 3,2 kg/h et la tête de pompe est refroidie à l'aide d'un bain froid. Un débitmètre à force de Coriolis, de marque *Micro Motion*, fixé à l'entrée de la colonne d'extraction permet de mesurer le débit pendant la manipulation. Les séparateurs sont reliés à un autre bain thermostaté. Un boîtier électrique permet d'introduire la pression d'extraction de consigne.

II.2.1.2.2 Principe d'extraction

Le CO₂ (fourni par *Messer*) de qualité industrielle (pureté 99,95%), sort de la bouteille à l'état gazeux. La température étant celle de l'ambiance et la pression de la bouteille comprise entre 50 et 60 bars. Le CO₂ gazeux est ensuite refroidi à une température entre 4 et 5°C, à l'aide d'un échangeur froid. Le liquide est pompé puis réchauffé à la température

d'extraction avant d'être dirigé vers l'extracteur, qui est déjà à la température d'extraction. A ce niveau, il est supercritique. Une fois la pression de travail atteinte, on ouvre la vanne entre l'extracteur et le premier séparateur, pour amener le CO₂. Les vannes sont ensuite réglées de façon à laisser circuler le CO₂ jusqu'à la sortie. Le réglage des vannes permet d'atteindre le débit souhaité. L'huile est recueillie au pied des séparateurs à l'aide de vannes et le CO₂ envoyé dans l'atmosphère.

Quant à l'extraction proprement dite, le CO₂ supercritique déjà en contact avec le produit se lie d'affinité avec le corps gras (durée de contact : 30 à 45 minutes). La circulation du CO₂ se fait de bas en haut dans l'extracteur. La matière grasse est ensuite séparée du CO₂ supercritique par dépression dans les séparateurs et récupérée (figure 40). Les températures des séparateurs sont respectivement de 70°C pour le beurre de karité et de 60°C pour l'huile de l'aiélé. Les prélèvements sont effectués tous les quarts d'heure et les huiles obtenues pesées. Les temps de contact CO₂-produit et d'extraction sont rassemblés dans le tableau 27. La pression de consigne est de 210 bars. La fin de l'extraction a été déterminée par l'obtention d'un palier dans la courbe d'extraction.

Tableau 27 : Les paramètres d'extraction des différentes expérimentations

Ech	T _{stock} (°C)	Mc (g)	Q (g)	Pression (bars)				T ₀
				P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	
Karité	18°C	8,82-10,13	85-95	220	40	30	20	50
	-33°C	9,02-10,06	86-105	220	40	30	20	50
Aiélé	18°C	10,01-10,15	77-97	220	40	30	20	40
	-33°C	10,01-10,09	94-117	220	40	30	20	40

Ech : échantillon ; **T_{stock}** : température du mode de stockage ; **T** : température du mode de stockage en °C ; **Mc** : masse de la charge ; **Q** : masse de CO₂ en contact avec la charge ; (**P₀**, **T₀**) : pression et température de l'extracteur ; (**P_{1,2,3}**) : pressions respectives des séparateurs 1, 2 et 3.

II.2.1.2.3 Caractéristiques et remplissage de l'extracteur

La fermeture de l'extracteur se fait en utilisant des frittés et des cerclips permettant d'assurer son étanchéité. Le tableau 28 présente les caractéristiques de l'extracteur.

Tableau 28 : Les caractéristiques de l'extracteur

Volume (cm³)	125
Hauteur (mm)	300
Diamètre interne (mm)	23
Pression maximale (bars)	250
Température maximale (°C)	80
Nature du matériau	Acier inoxydable

Le remplissage s'effectue du bas vers le haut. On introduit le fritté, la laine de verre et le produit. L'ensemble est recouvert de laine de verre et de fritté. La colonne d'extraction est alors introduite dans l'extracteur pour le début de l'expérimentation. La laine de verre empêche l'entraînement de l'échantillon broyé et pesé à l'aide d'une balance de précision (0,0001 g) de marque *Scaltec* pendant l'extraction. La masse de laine de verre utilisée est comprise entre 0,4 et 0,6 g.

II.2.1.2.4 Détermination du rendement d'extraction

Le rendement d'extraction, en base sèche, a été également calculé selon la formule du paragraphe II.2.1.3.2 du chapitre 2. Le pourcentage d'huile, S, a été obtenu selon la formule :

$$S = \frac{[(P_2 - P_1) * 100]}{M}$$

où P₂ est la masse du flacon après récupération du corps gras, P₁ la masse du flacon vide et M la masse du produit.

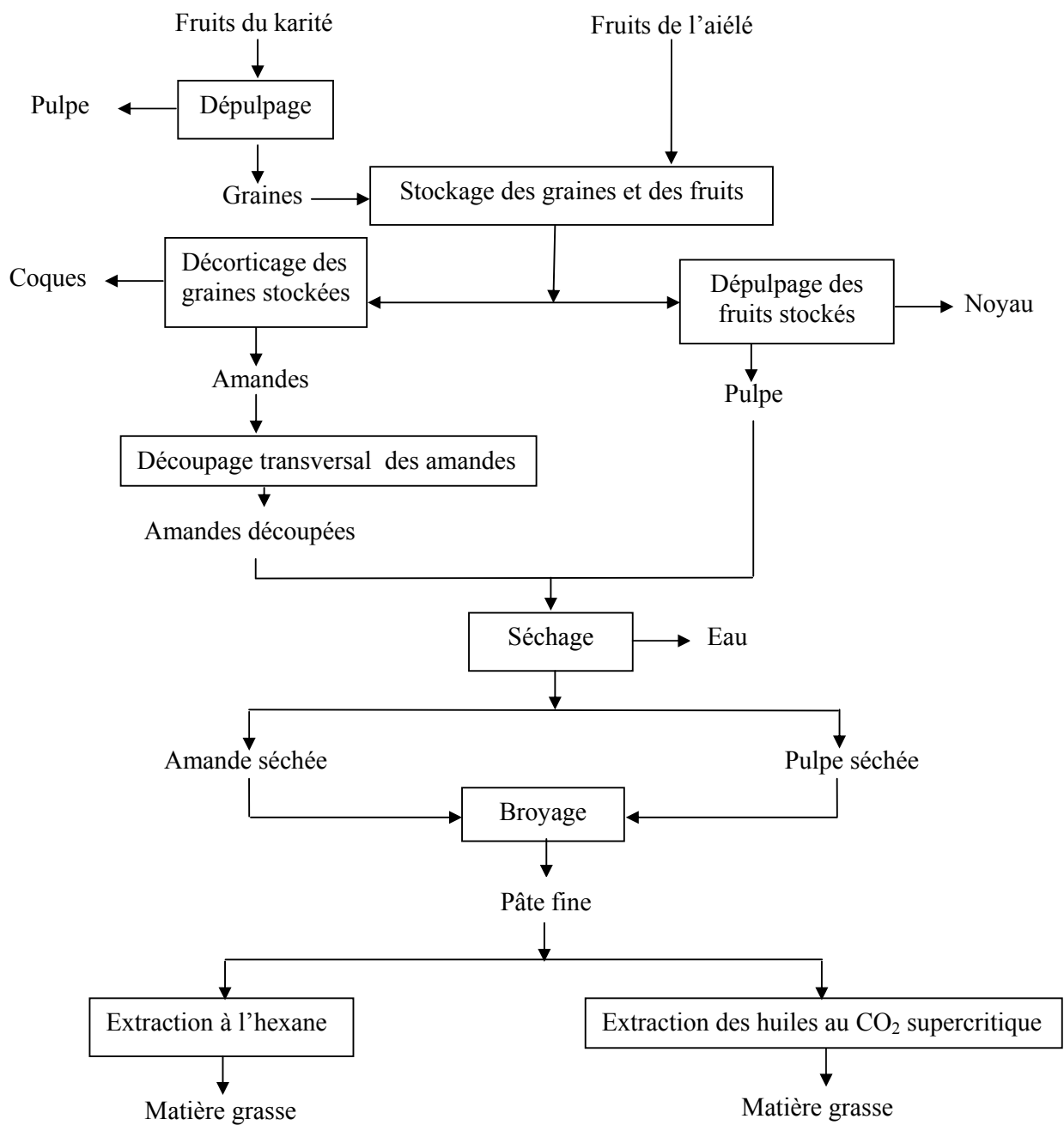


Figure 38 : Schéma du procédé d'extraction du beurre de karité et de l'huile de l'aiélé

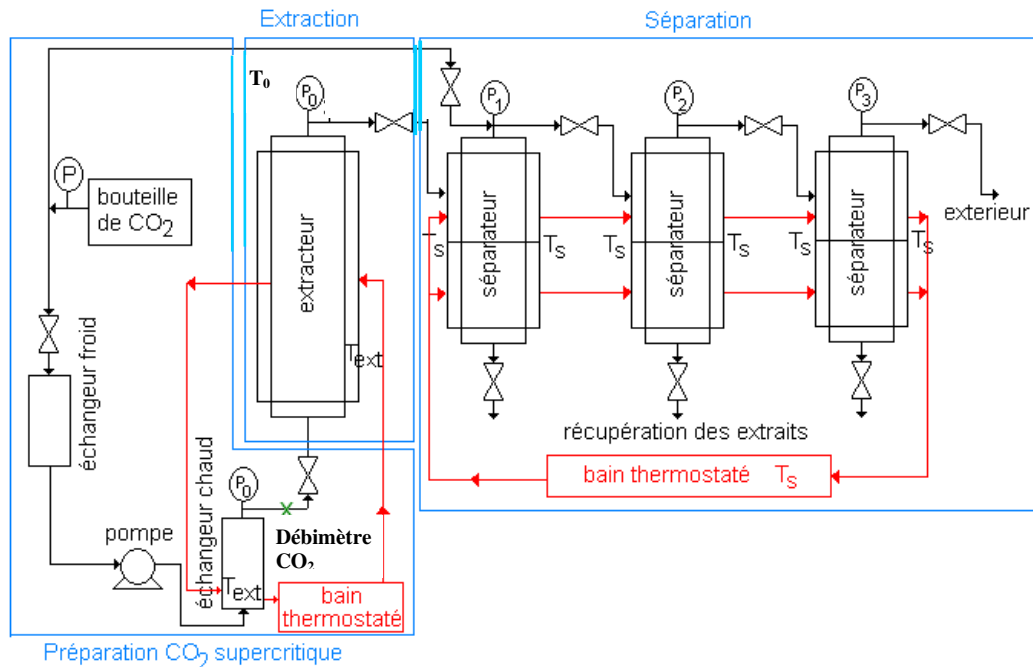


Figure 39 : L'installation d'extraction dynamique supercritique (conditions limites d'utilisation : $T = 80^{\circ}\text{C}$, $P = 250$ bars)

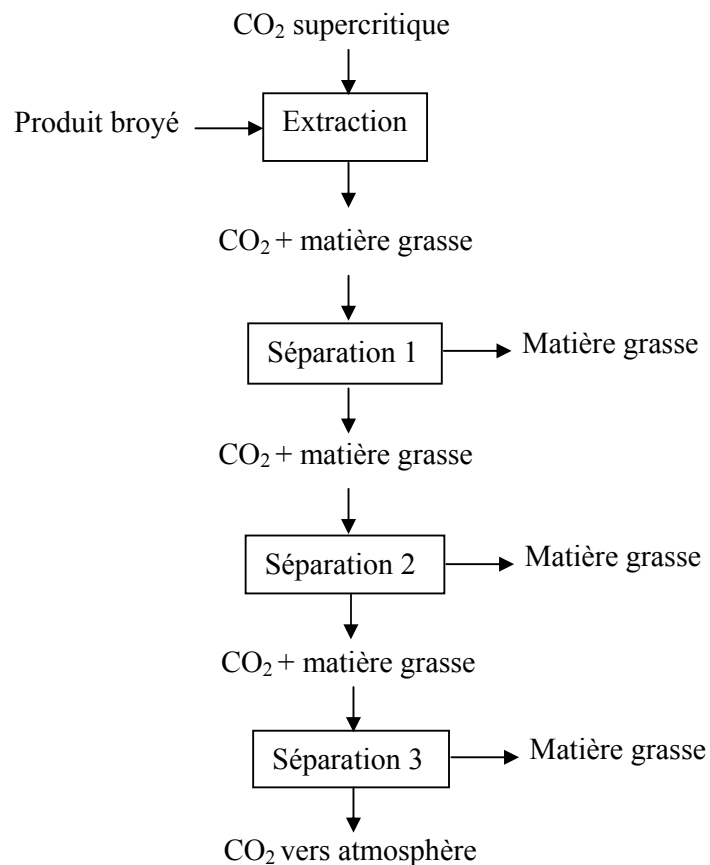


Figure 40 : Le schéma de procédé d'extraction dynamique supercritique

II.2.2 Caractérisation des huiles extraites

Les huiles extraites ont été caractérisées par la détermination des indices d'acide et d'iode, la composition en acides gras et les différentes classes de lipides.

II.2.2.1 Indice d'acide

La norme AFNOR (1981) a été utilisée pour la détermination de l'indice d'acide. L'indice d'acide (I_A) rend compte du degré d'altération de l'huile. Il représente la quantité d'hydroxyde de potassium en mg nécessaire pour neutraliser les acides gras libres présents dans 1 g de matière grasse.

Principe

Sa détermination consiste à dissoudre dans une quantité connue de matière grasse dans un mélange d'éthanol à 95% et d'oxyde diéthylénique (v/v). Les acides gras libres présents sont ensuite titrés par une solution éthanolique d'hydroxyde de potassium 0,1N en présence de la phénolphthaléine à 1% dans l'éthanol à 95% selon la réaction :



Mode opératoire

Une masse de 0,5 à 0,6 g de corps gras est dissoute dans 100 ml de mélange d'éthanol et d'oxyde diéthylénique (v/v). La solution est titrée avec de l'hydroxyde de potassium 0,1N en présence de la phénolphthaléine comme indicateur coloré. Le volume V de KOH utilisé pour atteindre le virage est noté.

L'indice d'acide est alors donné par la formule: $I_A = [56,1 * N * (V - V_0)] / M$ où

V est le volume de la solution titrée de KOH utilisée pour titrer la prise d'essai ;

V_0 est le volume de la solution titrée de KOH utilisée pour l'essai à blanc ;

N est la normalité exacte de la solution titrée de KOH utilisée ;

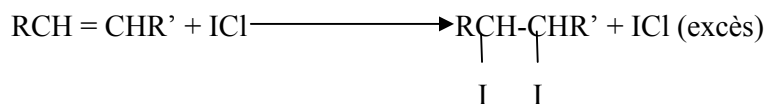
M est la masse de la prise d'essai.

II.2.2.2 Indice d'iode

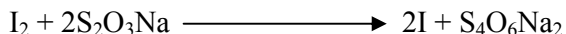
La norme AFNOR (1981) a été utilisée pour la détermination de l'indice d'iode. L'indice d'iode (I_I) est la quantité d'halogène (g) fixée par 100 g de matière grasse et exprimée en iode. Il permet d'avoir une idée sur le degré d'insaturation de l'huile extraite. La méthode au réactif de Wijs modifiée est utilisée. En effet, la modification apportée par Hoffmann et Green permet d'accélérer la réaction en utilisant l'acétate mercurique comme catalyseur.

Principe

Le principe consiste à additionner à la prise d'essai de matière grasse une solution de monochlorure d'iode dans un mélange d'acide acétique et de tétrachlorure de carbone. Après 5 minutes de réaction, la détermination de l'excès d'halogène est effectuée par addition de l'iodure de potassium et d'eau. Ensuite, on titre l'iode libéré par une solution de thiosulfate de sodium. Les réactions sont caractérisées par les équations suivantes :



L'iode en excès réagit avec le thiosulfate de sodium selon la réaction :



Mode opératoire

25 ml de CCl_4 sont introduits dans un erlen meyer de 250 ml contenant 0, 1 g (aiélé) ou 0,2 g (karité) de matière grasse. Le mélange est agité rapidement. Ensuite, sont ajoutés 10 ml de la solution de Wijs et 10 ml d'acétate de mercure. Après réaction à l'obscurité pendant 5 minutes, 100 ml d'eau et 15 ml de KI à 10% sont ajoutés. La préparation est titrée avec la solution de thiosulfate de sodium en présence d'empois d'amidon comme indicateur coloré jusqu'à décoloration complète des deux phases. Un essai à blanc est effectué parallèlement.

L'indice d'iode est donné par la formule: $I_I = [12,7 * N * (V_0 - V)] / M$ où

V_0 est le volume de la solution titrée de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ utilisée pour l'essai à blanc ;

V est le volume de la solution titrée de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ utilisée pour la prise d'essai ;

N est la normalité exacte de la solution titrée de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ utilisée ;

M est la masse de la prise d'essai.

II.2.2.3 Composition en acides gras

La composition en acides gras a été effectuée dans le but d'examiner l'influence des conditions et de la durée de stockage sur les acides gras de la matière grasse des fruits.

Principe

Elle consiste en une rétention inégale des esters méthyliques à séparer par la phase stationnaire dans la traversée de la colonne. Les constituants se déplacent alors avec des vitesses différentes et sont élués de la colonne les uns après les autres et décelés au fur et à mesure par le détecteur.

Mode opératoire

Préparation des esters méthyliques

Environ 40 mg de matière grasse, auquel on ajoute 1 ml d'éther de pétrole, est introduit dans un tube à vis. Après agitation pendant 2 secondes, 0,2 ml de NaOH méthanolique (2N) est introduit. Le tube est rapidement bouché et le mélange est agité pendant 10 secondes avant d'être porté au bain-marie pendant 1 minute. Une agitation pendant 10 secondes est effectuée avant ajout de 0,2 ml de HCl méthanolique (2N). La préparation est légèrement agitée et laissée à décantation. L'analyse par chromatographie en phase gazeuse (CPG) peut alors être directement effectuée.

Analyse par CPG

Le chromatographe utilisé est un appareil *Varian série 1400* équipé de :

- un injecteur manuel ;

- un détecteur à ionisation de flamme (FID) ;
- une colonne remplie en silice fondue de longueur 1,5 m, de diamètre 0,125 mm et d'épaisseur 2 mm ;
- un intégrateur Spectra Physics SP 4100.

Les températures isothermes de la colonne et de l'injecteur sont respectivement de 190°C et de 240°C. Le gaz vecteur est l'azote (15 ml/min). L'injection manuelle de 1 µl d'échantillon se fait après rinçage d'au moins cinq fois de la microseringue à l'aide de l'éther de pétrole. L'identification des pics a été faite par étalonnage externe à l'aide d'huiles de référence (huile de coco, de blé et d'olive).

II.2.2.4 Différentes classes de lipides

Les différents types de lipides (triglycérides, diglycérides, monoglycérides et acides gras libres) ont été déterminés à l'aide du Iatroscan TLC/FID Analyser (*Iatron Laboratories, Inc., Tokyo, Japan*). Le Iatroscan (figure 41) est un détecteur automatique qui accomplit l'analyse quantitative des mélanges organiques séparés par chromatographie sur couche mince (CCM) et détectés par un système d'ionisation de flamme d'hydrogène (FID). La séparation des composés est effectuée sur une couche mince exceptionnelle (*Chromarod*) de la même manière que sur la couche mince à phase normale. Son système de détection à ionisation de flamme a une grande sensibilité pour presque tous les composés organiques. La sélectivité de la détection s'applique à une large variété d'échantillons. Particulièrement, l'analyse des lipides, l'enregistrement des vitesses de réaction dans les synthèses organiques et le fractionnement des résidus des huiles brutes et asphaltes sont aisément réalisés avec le Iatroscan. 10 *Chromarods* sont portés par un seul râtelier permettant de déposer au même moment jusqu'à 10 échantillons. Tous les 10 sont réalisés simultanément et détectés en série pour obtenir rapidement le résultat final.

Principe

Lorsque les échantillons sont développés et séparés sur le *Chromarod* et scannés directement dans la flamme d'hydrogène à toute vitesse. Les composés organiques séparés sur cette surface de couche mince sont positifs. Les ions négatifs migrent vers le brûleur et les ions positifs à l'électrode collectrice à cause du champ électrique entre les pôles électriques du détecteur à ionisation de flamme (brûleur positif (+) et collecteur négatif (-)). Ce flux de courants d'ions entre le brûleur et le collecteur est proportionnel à la masse de composés ionisés dans la flamme d'hydrogène. Le courant d'ion est amplifié par le circuit du FID et les composés sont quantitativement mesurés et enregistrés par l'unité de traitement des données.

Mode opératoire

Les huiles sont dissoutes dans le chloroforme à raison de 10 mg d'huile pour 1 ml de solvant. Des microseringues de 1 μ l sont utilisées pour déposer, sur deux *Chromarods* consécutifs 1 et 2 μ l d'une même dilution d'échantillon. Les *Chromarods* sont développés à la température ambiante dans le mélange de solvant hexane – diéthyléther – acide formique (80 : 20 : 0,2) puis séchés à 100°C pendant une minute. La révélation est faite avec le détecteur à ionisation de flamme du Iatroscan avec une vitesse du flux d'hydrogène constant de 160 ml/min.

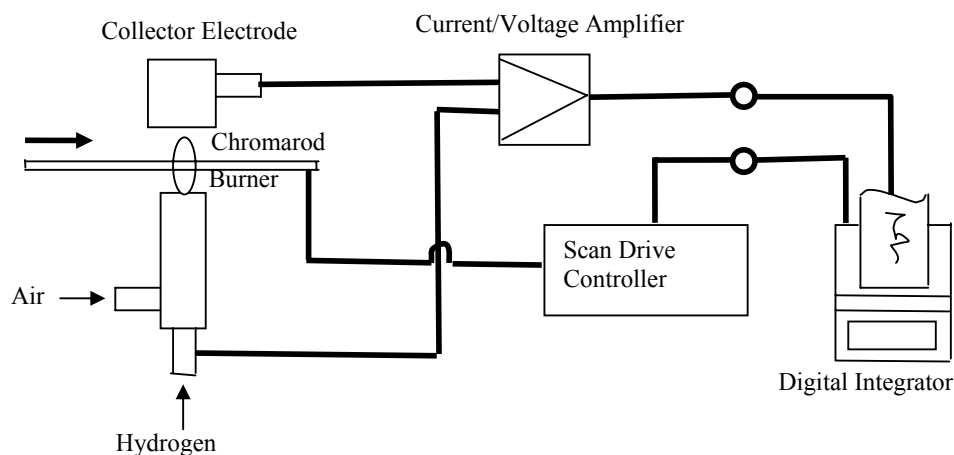


Figure 41 : Le schéma du Iatroscan

II.2.3 Détermination des paramètres texturaux

Les paramètres texturaux ont été déterminés sur la pulpe des fruits de l'aiélé et sur l'amande des fruits du karité. La figure 42 présente le diagramme général de caractérisation de la texture des fruits. Les échantillons entreposés au congélateur ont été sortis 5 heures avant la mesure afin de limiter les effets de l'humidité adsorbée et de permettre le dégivrage.

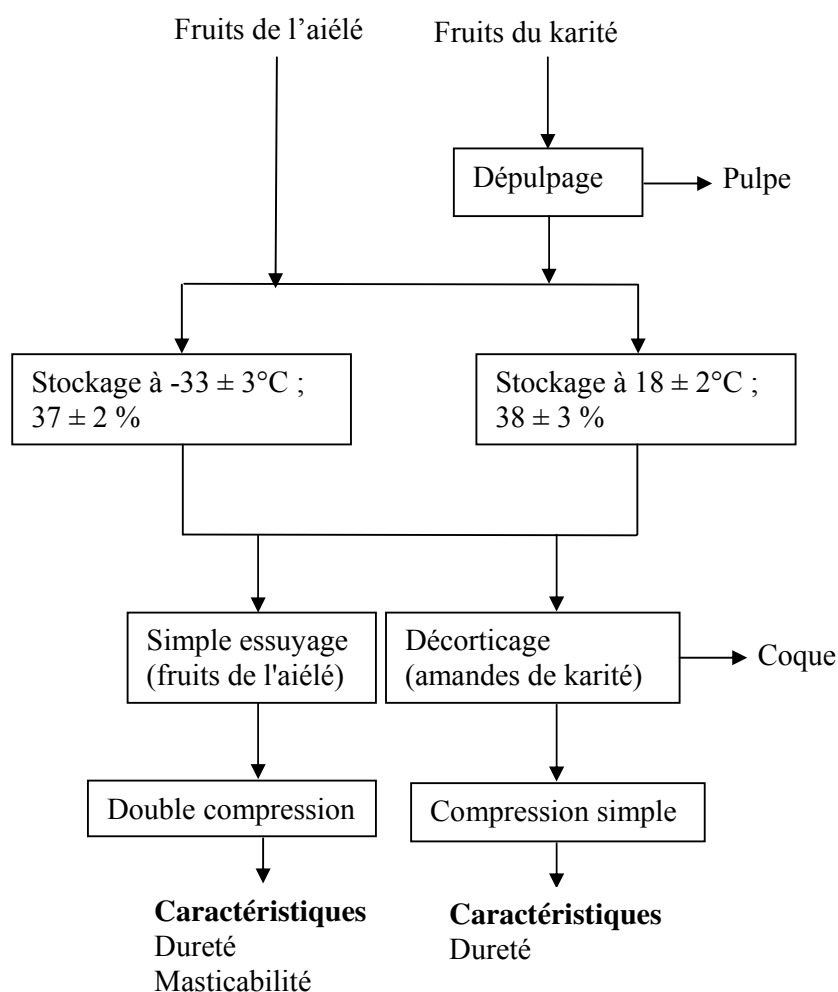


Figure 42 : Le schéma général de caractérisation texturale des échantillons de karité et d'aiélé

L'appareil ayant servi à la mesure des paramètres texturaux est un *Instron Séries 5500 Load Frames* piloté par le logiciel *Merlin*. Un capteur de 50 KN portant un poinçon de 1 cm de diamètre est fixé dans sa partie supérieure. Les compressions ont été effectuées sur 16 mm et 2 mm pour les amandes de karité et les fruits (pulpe) de l'aiélé, respectivement, à une

vitesse de pénétration de 5 mm/min. Ces compressions représentent environ 55% et 66%, respectivement, pour l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé. Les échantillons sont compressés sur la médiane et dans la direction transversale.

L'enregistreur graphique donne automatiquement l'évolution de la force de compression en fonction de la distance et du temps de pénétration. Les données automatiquement enregistrées permettent de tracer la force en fonction du temps. A partir des courbes obtenues sur l'enregistreur graphique, les différentes caractéristiques de la texture ont été déterminées. Les profils typiques de compressions de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé sont représentés sur les figures 43 et 44, respectivement.

Il faut préciser que la double compression, encore appelée analyse du profil textural (Texture Profil Analysis, TPA) est une analyse qui simule la réaction d'un aliment à la mastication (Bourne, 1982). La morsure de l'aliment par la dent est simulée ici par la compression de l'échantillon par le poinçon. Elle a l'avantage qu'au cours d'un essai unique, on obtient plusieurs paramètres texturaux. Elle consiste à appliquer successivement deux compressions (une force donnée) sur le fruit par l'intermédiaire du poinçon fixé sur le capteur de l'*Instron*. Le poinçon descend et comprime le fruit une première fois (simulant la première morsure de l'aliment par les dents). Il remonte et redescend immédiatement pour comprimer de nouveau l'échantillon (deuxième morsure de l'aliment par les dents).

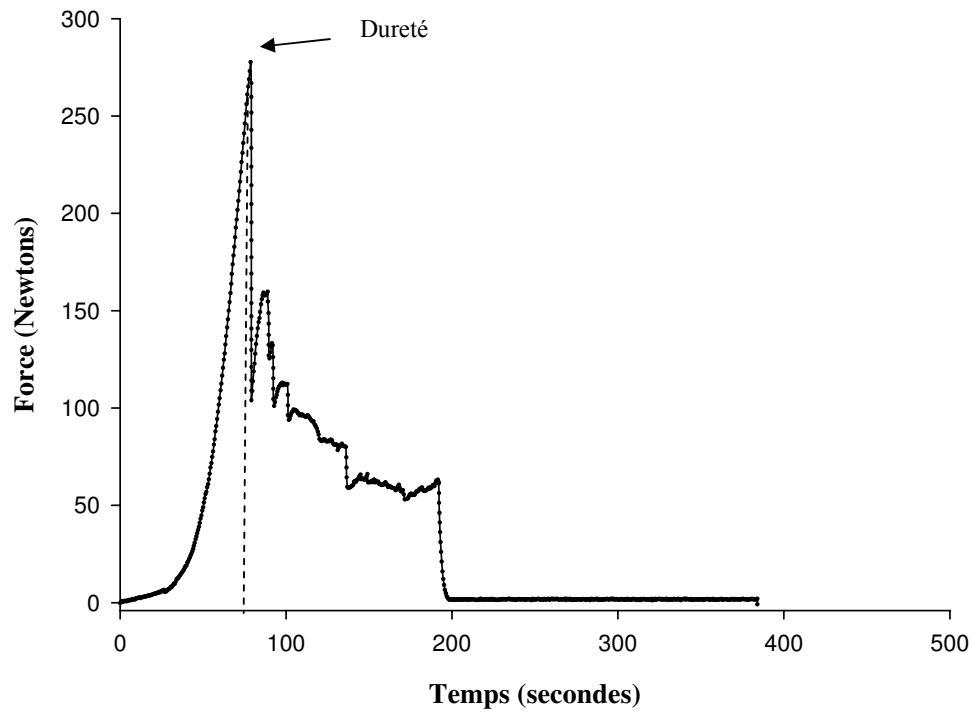


Figure 43 : La courbe type de l'analyse du profil textural de l'amande de karité

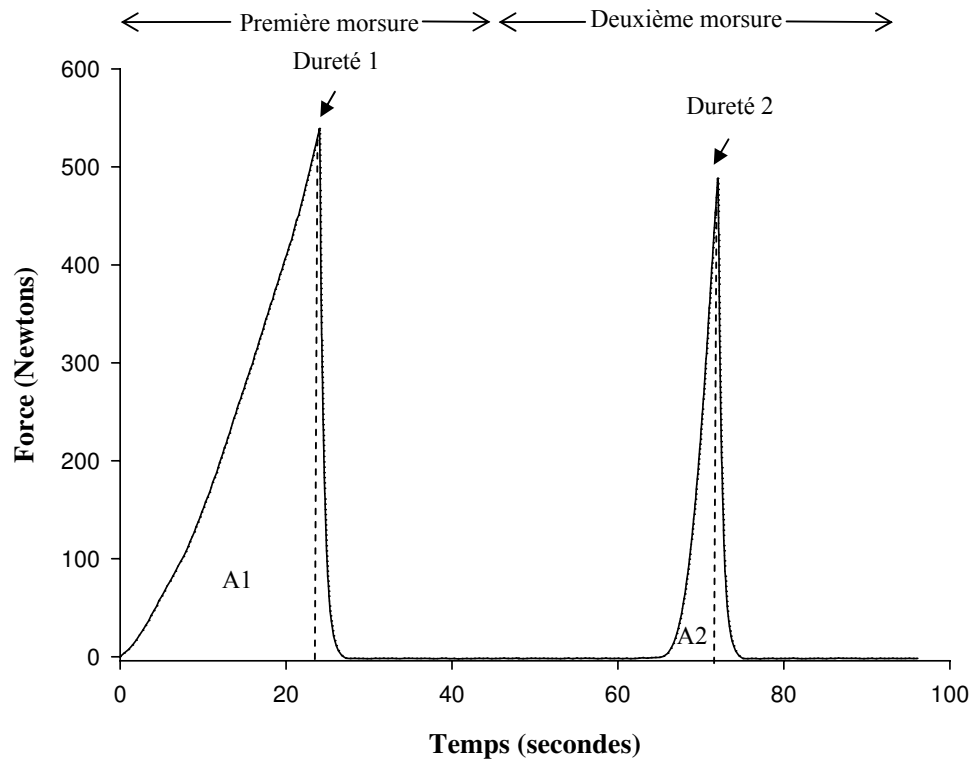


Figure 44 : La courbe type de l'analyse du profil textural de la pulpe de l'aiélé

La dureté est la force nécessaire pour atteindre une déformation donnée. Elle traduit la résistance à une force donnée et est mesurée au maximum de compression.

La cohésivité est le comportement du produit à la deuxième compression par rapport à la première. Elle traduit la force qui unit les constituants de l'aliment. Les calculs se font en divisant la somme des forces de A2 par celle de A1.

L'élasticité est la propriété du produit à reprendre sa forme ou son volume après cessation de la déformation appliquée pendant le deuxième cycle. Elle est donnée par la longueur (entre le premier cycle de compression et le début du second) au pic de la seconde compression.

Appliquée aux produits solides, la masticabilité est le produit de la dureté, la cohésivité et l'élasticité.

II.2.4 Observations microscopiques de la surface des échantillons

Les observations microscopiques ont été effectuées sur les échantillons tout au long du stockage. Le microscope électronique de modèle *Jsm – T330A Scanning Microscope* et de marque *JEOL*, piloté par le logiciel *Spirit version 1.05* a été utilisé à cet effet. Son principe est basé sur l'extraction d'un faisceau d'électrons, accéléré par une forte tension, qui est repris par un jeu de lentilles formant une image agrandie de l'objet. Auparavant, il a fallu d'abord procéder à une métallisation qui consiste à déposer une couche de mélange d'or et de platine à la surface des échantillons. Le dépôt de cette couche de métal, sous vide grâce à une pompe à palettes, permet la visualisation des surfaces étudiées.

Les amandes de karité et les pulpes de l'aiélé ont été au préalable séchées sous vide à 40°C pendant 24 heures afin d'éliminer l'humidité et faciliter leur métallisation.

II.2.5 Analyses statistiques

Les essais sont effectués en triple. Les moyennes et les écartypes ont été calculés. Le logiciel Statgraphics sous Windows Plus 3.0 (1994 – 1997) a été utilisé pour l'analyse des variances. Lorsque l'influence était significative, le test de comparaison multiple de DUNCAN au seuil de 5% a été faite. L'étude des corrélations a été faite entre la dureté des produits et les caractéristiques chimiques des lipides.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Extraction des matières grasses

III.1.1 Répartition granulométrique des fruits broyés

La répartition granulométrique des fruits broyés est présentée par la figure 45. Il ressort que l'amande de karité a une distribution unimodale avec une moyenne à 555,7 μm . La pulpe de l'aiélé, quant à elle, a une distribution bimodale dont une a un diamètre moyen à 258,95 μm et l'autre à 2981,5 μm . On peut remarquer que les répartitions granulométriques des deux produits sont différentes, l'aiélé ayant un pourcentage de grosses particules plus élevée que celui du karité. Ceci est probablement lié à des compositions chimiques différentes. En effet, les études de Tano Debrah et Ohta (1994) et de Agbo N'zi *et al.* (1992) ont montré des taux de cellulose de 5,95% et de 11,8% par rapport à la proportion des carbohydrates, respectivement pour l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé. Ces différences semblent bien s'expliquer dans le cadre de ce travail en ce sens que la présence de la cellulose est connue pour renforcer la dureté de la paroi cellulaire des produits végétaux (Waldron, Parker & Smith, 2003 ; Harris & Smith, 2006).

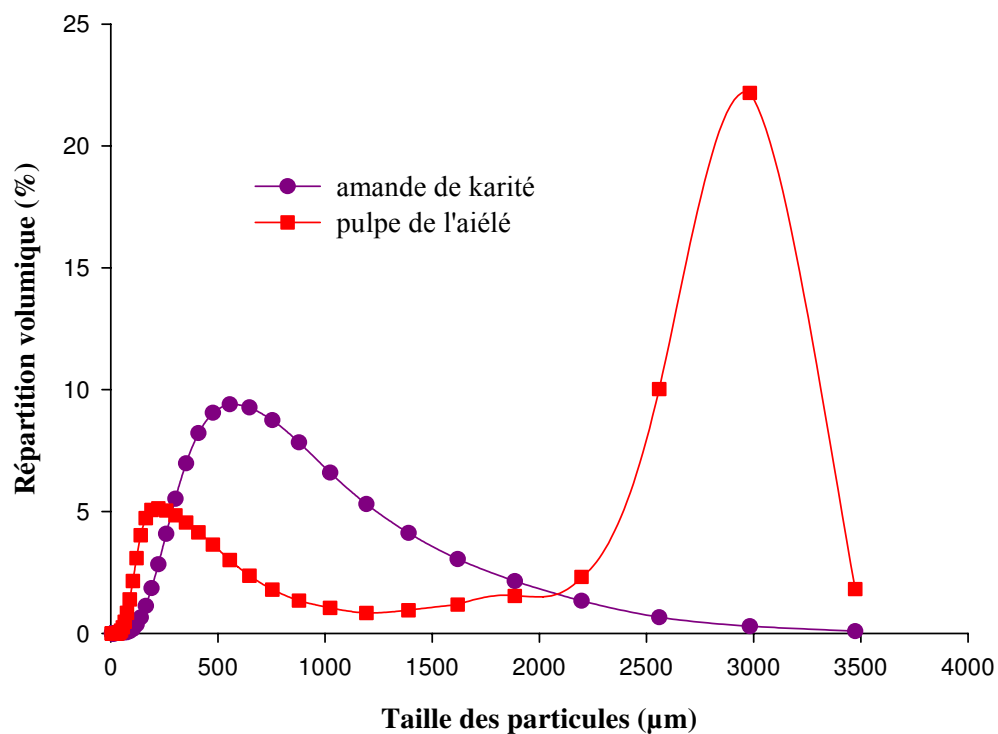


Figure 45 : La répartition granulométrique des fruits broyés

III.1.2 Rendements d'extraction

On peut observer de la figure 46 que les rendements d'extraction à l'hexane du beurre des graines de karité stockées à 18°C et -33°C ($p < 0,05$) varient avec le mode et la durée de stockage. Quelque soit le mode de stockage, on observe dès les premiers mois une réduction du rendement, puis une augmentation. Le temps de stockage pendant lequel on observe une durée de réduction du rendement est de 2 et 5 mois de stockage à 18°C et -33°C, respectivement. La baisse du rendement au 1^{er} et 2^{ème} mois lors du stockage à 18°C serait due à la texture des amandes "encore fraîche" qui ne facilite pas la libération du beurre par les cellules oléifères. L'analyse de corrélation de la dureté des amandes des graines stockées à 18°C montre qu'elle est significativement corrélée au rendement d'extraction ($R = 0,34$, $p \leq 0,05$). Ce rendement augmente après en raison de l'augmentation de la matière sèche qui facilite la libération du beurre. La perte de matière lors de la décongélation serait à l'origine

de la diminution du rendement au cours du stockage à -33°C. En effet, lorsque l'eau se transforme en glace, le volume augmente d'environ 9%. Ce changement de volume briserait les parois cellulaires et par là causerait une perte de liquide (exsudation) lors de la décongélation (Cheftel *et al.*, 1983). Dès le 5^{ème} mois, la structure des amandes serait tellement dégradée que les cellules oléifères seraient plus exposées. Ceci expliquerait l'augmentation du rendement d'extraction. Comparés aux résultats de Womeni (2004), nos rendements sont supérieurs probablement en raison des différences de conditions de stockage qui étaient pour ce dernier $24,5 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ de température et $94,5 \pm 2,5\%$ d'humidité relative, conditions qui seraient favorables à la baisse de la proportion du beurre. D'autre part, cet auteur a observé une germination et une croissance des moisissures après 30 jours de stockage.

Dans le cas des fruits de l'aiélé (figure 47), seule la durée de stockage influence significativement ($p \leq 0,05$) le rendement d'extraction. On observe en général une baisse du rendement au cours du stockage. Pendant le stockage, on a observé une réduction de la teneur en eau. On se serait attendu comme dans le cas du karité à une augmentation du rendement d'extraction, ce qui n'est pas le cas ici où on a observé une baisse significative. Ceci serait lié à la nature chimique de la pulpe. En effet, les travaux de Kapchie Noutchougoué (2005) ont montré que les taux de lignine et de cellulose de la pulpe de l'aiélé augmentent pendant le stockage. Ces composés jouent un rôle dans le renforcement de la paroi cellulaire (Waldron, Parker & Smith, 2003 ; Harris & Smith, 2006). On peut à ce titre observer les différences de rendements d'extraction de l'huile entre l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé, ce dernier présentant un rendement faible.

Sur la base du rendement d'extraction, il ressort que le stockage des graines de karité et des fruits de l'aiélé ne devrait pas excéder 12 et 5 mois à 18°C, respectivement. Au cours du stockage à -33°C des fruits de l'aiélé, les rendements restent intéressants.

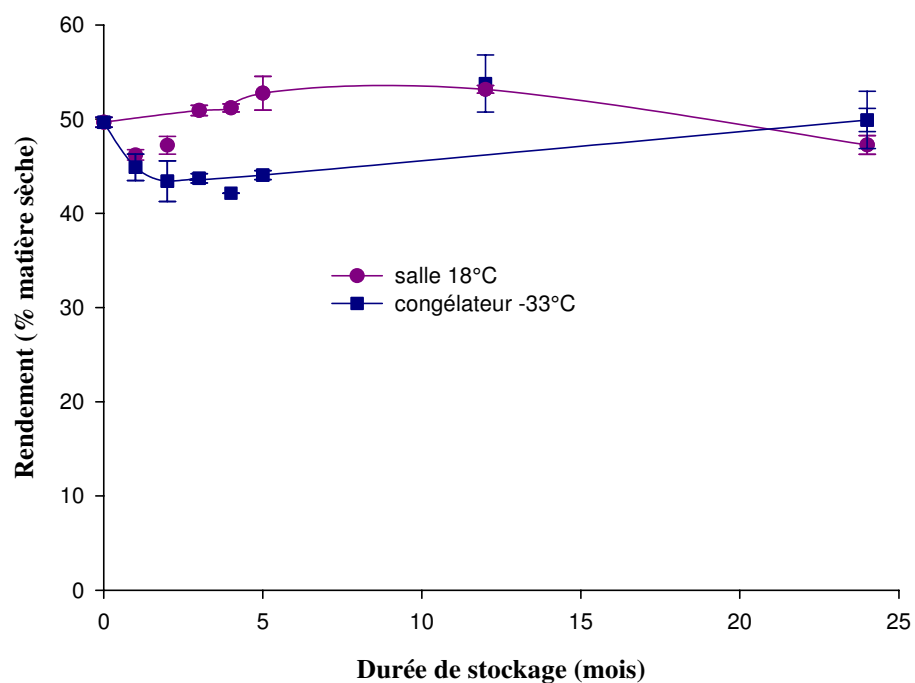


Figure 46 : Le rendement d'extraction à l'hexane du beurre des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C

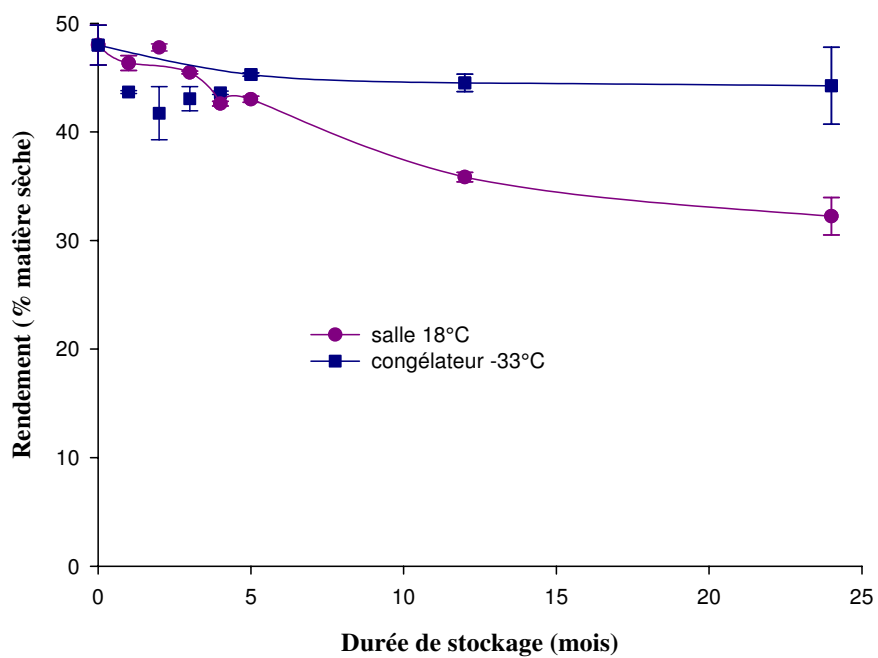


Figure 47 : Le rendement d'extraction à l'hexane de l'huile des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C

Les figures 48 et 49 présentent les rendements d'extraction au CO₂ supercritique des beurres de karité et des huiles de l'aiélé, respectivement. Ils sont significativement influencés par la durée et le mode de stockage ($p \leq 0,05$). Il ressort, de façon générale, que les tendances observées aux mêmes périodes dans le cas de l'extraction par l'hexane se retrouvent également avec une baisse marquée des rendements d'extraction du beurre de karité au premier mois. Toutefois, les rendements sont inférieurs à ceux obtenus pour l'extraction à l'hexane. Les faibles rendements au 1^{er} mois seraient dus à la non standardisation ou à la non prise en compte de certains paramètres qui les influencent (débit de CO₂ non stable, granulométrie particulière de chaque échantillon, temps d'extraction non standard).

Le faible rendement au CO₂ supercritique par rapport à l'hexane s'expliquerait par la faible teneur en eau des échantillons à l'extraction. Selon Royer (1999), les rendements d'extraction des huiles de tournesol et de colza sont d'autant plus élevés que les graines sont non déshydratées. On peut donc envisager un effet de polarité : l'eau polaire faciliterait l'extraction par le CO₂ apolaire des corps gras ; des interactions se créant entre l'eau et les lipides. Ces interactions pourraient, par analogie avec l'extraction de la caféine (Wang, 1997), être de type H₂CO₃-Huile, le CO₂ se mettant sous la forme H₂CO₃ à l'état supercritique, en présence d'eau. On a observé après extraction, pour certains échantillons, un mélange d'huile et d'eau, la solubilité de l'eau étant presque 100 fois supérieure dans le CO₂ que dans l'hexane (0,01 kg/m³ dans l'hexane à 50°C et 1,35 kg/m³ dans le CO₂ à 50°C et 125 bars).

Une autre raison du faible rendement d'extraction dans le cas du CO₂ supercritique serait la faible solubilité des triglycérides dans le CO₂ comparativement à l'hexane. On se serait attendu, comme dans le cas de l'acide oléique (Chrastil, 1982 ; Bernard, 1995), à une solubilité élevée des triglycérides dans le CO₂ supercritique, mais ce n'est pas le cas. La solubilité des triglycérides est considérablement réduite à cause du glycérol, dans nos conditions de travail. Selon Francis (1954), la solubilité du glycérol dans le CO₂ liquide est de

0,5 g/kg (masse volumique de 650 kg/m³ et température de 298°K), or le CO₂ liquide est "meilleur solvant" que le CO₂ supercritique (Vallée & Barth, 1997). Garcia, Alvarez, Canete, Sovova et Kucera (1994) ont d'ailleurs trouvé que le rendement d'extraction à l'heptane des lipides des sous-produits de la canne à sucre était supérieur à celui obtenu au CO₂ supercritique.

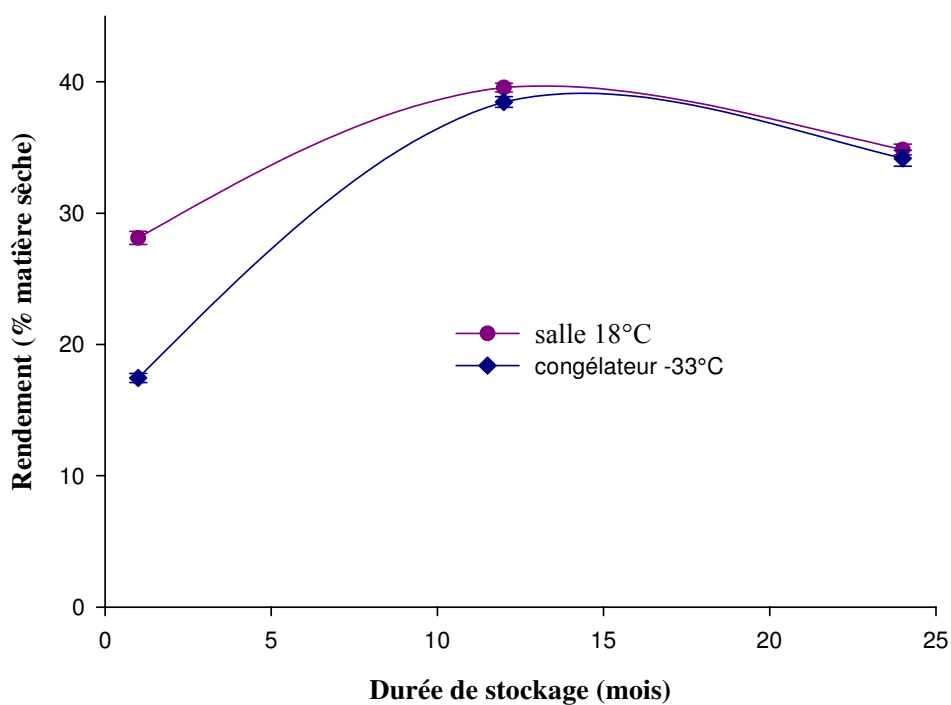


Figure 48: Le rendement d'extraction au CO₂ supercritique du beurre des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C

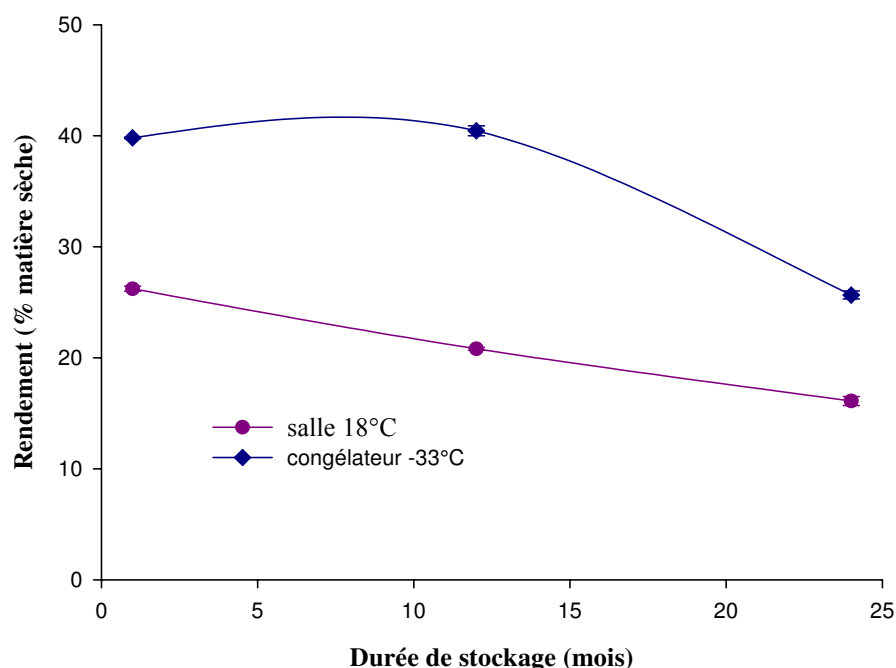


Figure 49 : Le rendement d'extraction au CO₂ supercritique de l'huile des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C

III.1.3 Indice d'acide

III.1.3.1 Amande de karité

Les indices d'acide des beurres des amandes de karité extraits à l'hexane varient significativement ($p \leq 0,05$) avec le temps et le mode de stockage (figure 50). Cette figure montre que l'indice d'acide des beurres des graines stockées à 18°C est plus élevé que celui des graines entreposées à -33°C pour lesquelles on remarque une augmentation de l'indice à partir du 5^{ème} mois. Ceci s'expliquerait par l'effet de la lumière et l'oxygène, très important sur les graines à 18°C qu'à -33°C. Ceci aurait entraîné l'autoxydation des acides gras polyinsaturés par les lipoxydases avec formation des hydroperoxydes (Cheftel & Cheftel, 1984 ; Wiemer & Altes, 1989 ; MSDA, 2005). Ces conditions favoriseraient également l'action des enzymes endogènes (lipases). L'augmentation de l'indice d'acide du beurre des graines stockées à -33°C serait également due à l'action des lipases tant lors du dégivrage que

du stockage. En effet, le froid, notamment les températures inférieures à -20°C , n'empêche pas l'oxydation du beurre des amandes (<http://www.u-bourgogne.fr/GPAB/Enseign/tphall2006/TPcuisson2006.htm>, 2007). Comparés aux résultats obtenus par Womeni (2004) pour le stockage à $24,5^{\circ}\text{C}$ (27,85 et 29,84) et à -18°C (27,85 et 17,90) pendant 1 et 2 mois de stockage, les valeurs d'indice d'acide obtenus dans ce travail sont faibles. Ceci pourrait s'expliquer par la charge trop importante (paquet de 2 kg) et les conditions de température et d'humidité relative (94,5%) utilisées par ce dernier, qui auraient favoriser une plus grande activité physiologique des graines.

L'indice d'acide du beurre de karité doit avoir une valeur supérieure à 5 (pourcentage d'acide oléique) pour rester commercialisable (Kassamba, 1997). A ce titre, il faudra que le séjour des fruits n'excède pas 12 mois à -33°C et moins d'un mois à 18°C .

Le mode et la durée de stockage ont également une influence significative sur l'indice d'acide des beurres extraits au CO_2 supercritique (figure 51). Les observations et les explications sont identiques à celles évoquées dans le cas des beurres extraits à l'hexane. Comparativement aux beurres extraits à l'hexane, les valeurs d'indice, dans le cas du CO_2 supercritique, sont plus élevées. Ceci serait dû à la forte solubilité des acides gras libres dans le CO_2 . Les substances pauvres en groupements OH sont effectivement plus solubles dans les fluides supercritiques apolaires (Peter, 1996). La qualité des beurres obtenus par ce solvant est donc plus dépendante de la qualité des amandes. L'extraction au CO_2 supercritique donne des beurres ayant des indices d'acide supérieurs à 0,6 (0,3% d'acide oléique), valeur limite préconisée en cosmétique (Kassamba, 1997). Ces beurres restent tout de même proche de ceux requis ($> 5\%$ d'acide oléique, environ un indice de 10) après un mois de stockage.

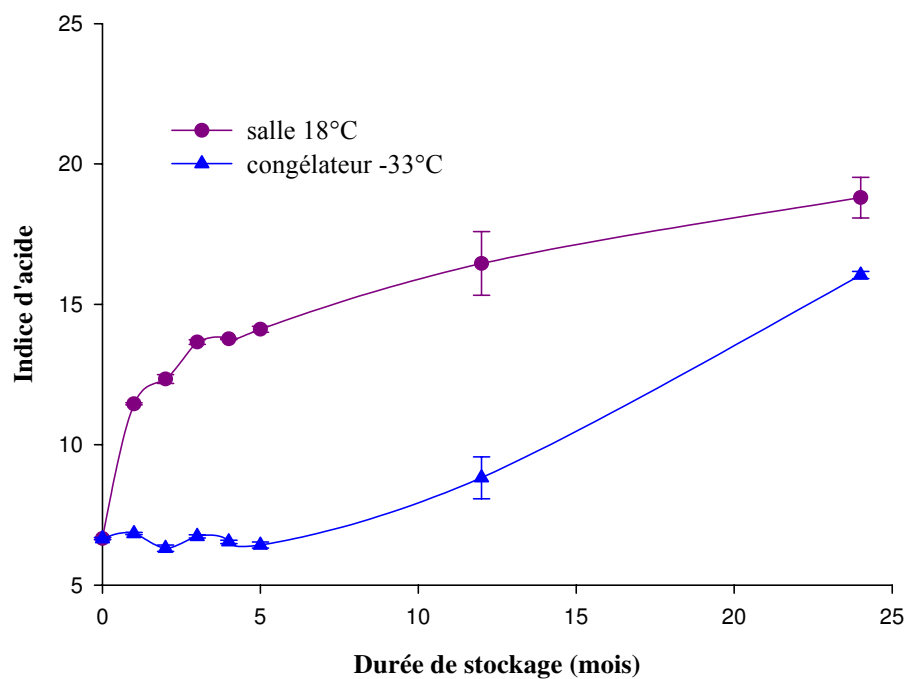


Figure 50 : Les indices d'acide des beurres extraits à l'hexane des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C

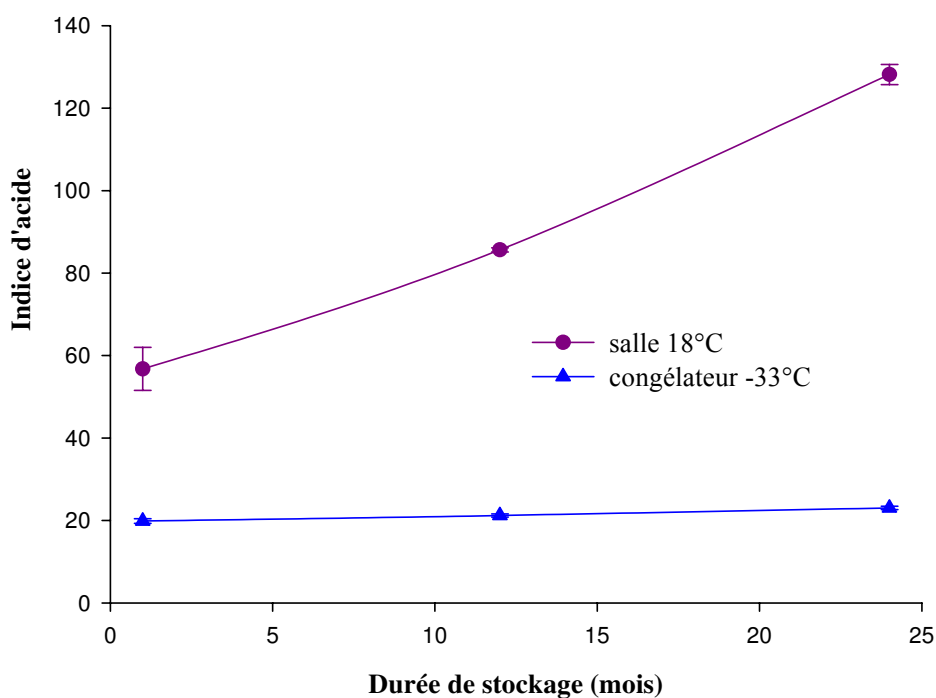


Figure 51 : Les indices d'acide des beurres extraits au CO₂ supercritique des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C

III.1.3.2 Pulpe de l'aiélé

Le mode et la durée de stockage influencent significativement ($p \leq 0,05$) l'indice d'acide des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane (figure 52). Les valeurs de cet indice sont plus élevées pour un stockage à 18°C que pour un stockage à -33°C. On observe également une augmentation progressive de cet indice avec le temps pour les fruits stockés à 18°C. Cette augmentation est marquée après 5 mois de stockage à -33°C. Les raisons évoquées dans le cas des amandes de karité sont valables pour les fruits de l'aiélé. Toutefois, au cours du stockage à 18°C, les valeurs sont élevées à cause de l'exposition directe de la pulpe à l'ambiance (lumière, oxygène). Ces résultats montrent l'importance des conditions hygiéniques dans la conservation des fruits de l'aiélé. Après une semaine de stockage à $22 \pm 1^\circ\text{C}$, Kapchie Noutchogoué *et al.* (2004) ont trouvé un indice de $12,08 \pm 0,02$, valeur inférieure à celle obtenue dans le présent travail après un mois de stockage à 18°C. Ceci s'expliquerait par la durée de stockage plus longue dans notre cas. Comparés aux beurres de karité extraits à 18°C, les huiles de l'aiélé ont des indices élevés. Ceci indiquerait une certaine "action protectrice" de la coque sur les amandes de karité.

Quant aux huiles extraites au CO₂ (figure 53), l'influence de la durée et du mode de stockage est significative. Les valeurs d'indice d'acide sont plus élevées à 18°C qu'à -33°C. Cela s'expliquerait par les raisons évoquées plus haut dans l'extraction à l'hexane. Comparés aux indices des huiles extraites à l'hexane, les huiles extraites au CO₂ ont des indices élevés. Cela serait dû aux raisons évoquées dans le cas des amandes de karité.

Pour obtenir une huile peu acide, le stockage des fruits à -33°C est plus approprié.

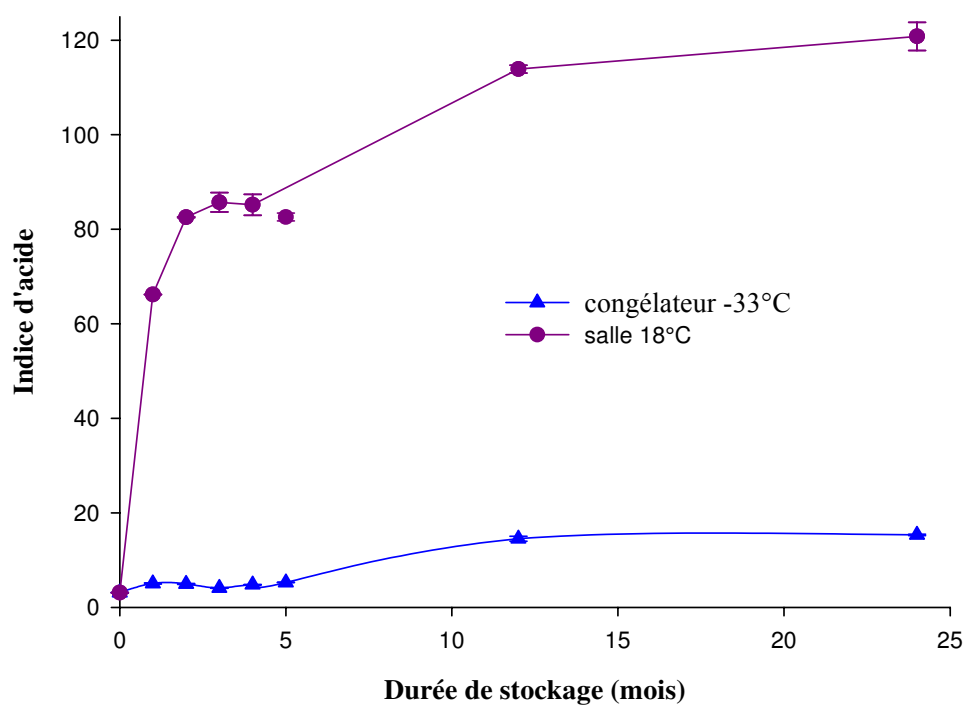


Figure 52 : Les indices d'acide des huiles extraites à l'hexane des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C

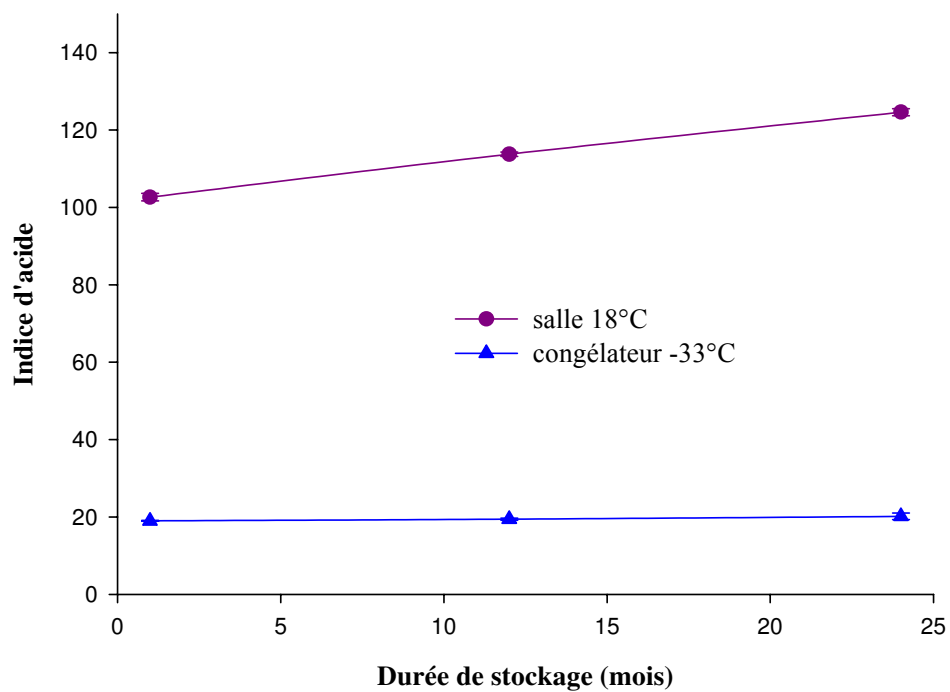


Figure 53 : Les indices d'acide des huiles extraites au CO₂ supercritique des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C

III.1.4 Indice d'iode

III.1.4.1 Amande de karité

Les figures 54 et 55 indiquent l'évolution de l'indice d'iode des beurres extraits, en fonction de la durée et du mode de stockage, à l'hexane et au CO₂ supercritique, respectivement. On observe une baisse de l'indice d'iode avec le temps de stockage, quelque soit le mode de stockage et le solvant d'extraction. Ceci serait dû à l'autoxydation progressive lors du stockage. On observe également une valeur élevée pour le stockage à 18°C. Ceci semble paradoxal d'un premier point de vue car on se serait attendu à ce que la lumière et l'oxygène augmentent l'autoxydation des acides gras libres des beurres de karité. Ceci confirmerait le rôle protecteur que jouerait la coque de la graine de karité, tandis que la congélation favoriserait les ruptures cellulaires et exposerait davantage les huiles. Après avoir fait la même observation sur l'évolution des valeurs des indices à 24,5°C et à -18°C, Womeni (2004) obtient des valeurs (de 100 et 94 à 24,5°C ; et de 85 et 73 à -18°C respectivement aux 1^{er} et 2^{ème} mois) supérieures aux nôtres. Cette différence proviendrait des fruits qui donnent déjà à l'origine une valeur d'indice d'iode d'environ 102, supérieur d'environ de 24 à celle obtenue dans le présent travail.

Comparés de façon générale aux résultats obtenus pour l'extraction à l'hexane, les indices des beurres extraits au CO₂ supercritique sont plus faibles. Le faible degré d'insaturation des beurres extraits au CO₂ supercritique serait dû à la faible solubilité des triglycérides dans le CO₂ supercritique tel que exposé au paragraphe III.1.2 ci-dessus.

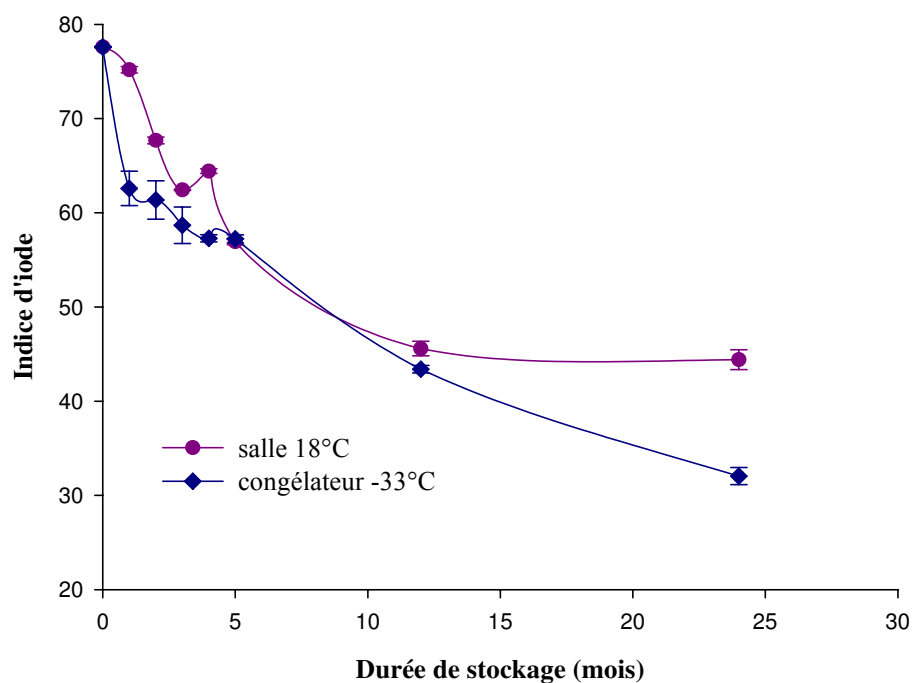


Figure 54 : Les indices d'iode des beurres extraits à l'hexane des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C

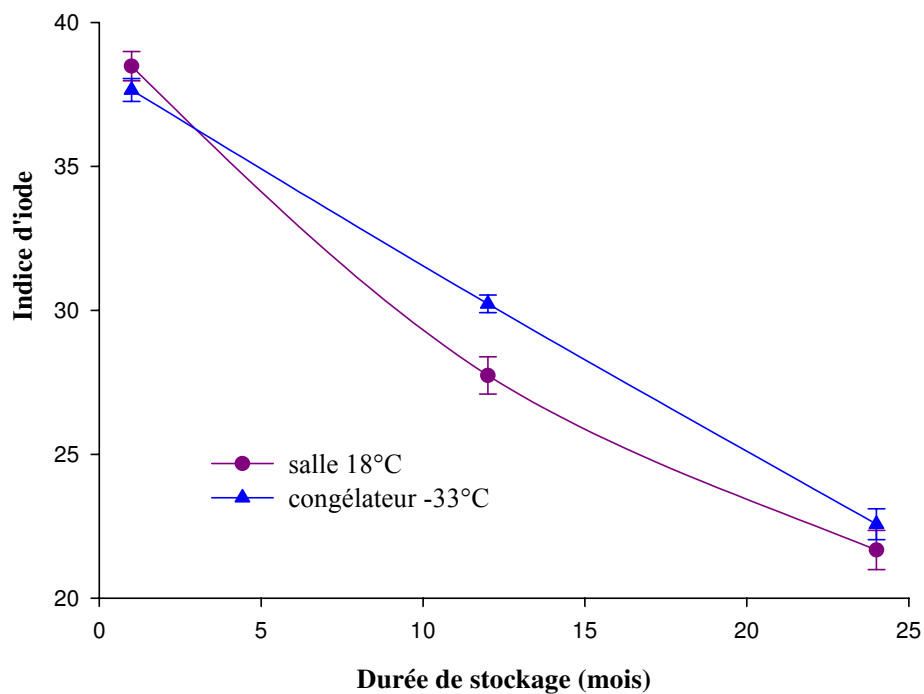


Figure 55 : Les indices d'iode des beurres extraits au CO₂ supercritique des graines de karité stockées à 18°C et à -33°C

III.1.4.2 Pulpe de l'aiélé

La durée et le mode de stockage induisent une différence significative ($p \leq 0,05$) entre les valeurs d'indice d'iode des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane (figure 56). En général, les indices des huiles des fruits stockées à 18°C sont moins élevés que ceux des fruits stockés à -33°C. Ceci serait dû à une autoxydation importante des huiles lors de l'entreposage à 18°C. Cette observation est l'inverse de celle faite avec le beurre de karité où l'indice d'iode pour le stockage à 18°C est supérieur à celui du stockage à -33°C. Ceci serait lié au fait que la pulpe de l'aiélé est directement exposée aux facteurs d'oxydation des acides gras insaturés et l'amande de karité est "protégée" par une coque.

Les huiles extraites par le CO₂ sont aussi significativement ($p \leq 0,05$) influencées par le mode et la durée de stockage (figure 57). L'observation faite dans le cas des huiles extraites à l'hexane est également valable dans le cas du CO₂. Toutefois, comparativement aux huiles extraites à l'hexane, ces huiles donnent des valeurs d'indice d'iode inférieures. Les raisons évoquées dans le cas du beurre de karité sont également valables dans ce cas.

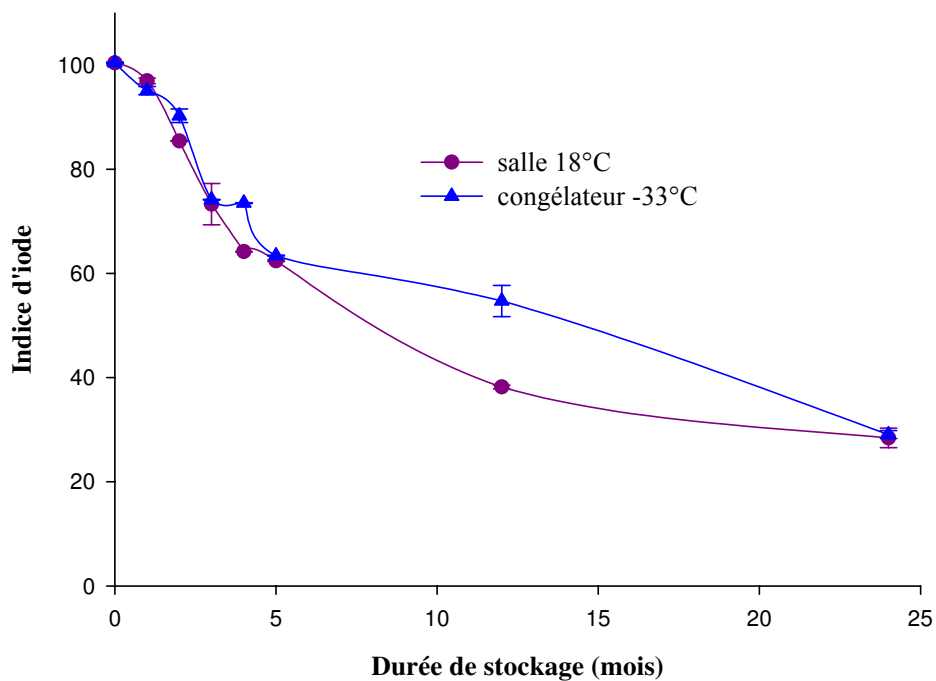


Figure 56 : Les indices d'iode des huiles extraites à l'hexane des fruits de l'ailé stockés à 18°C et à -33°C

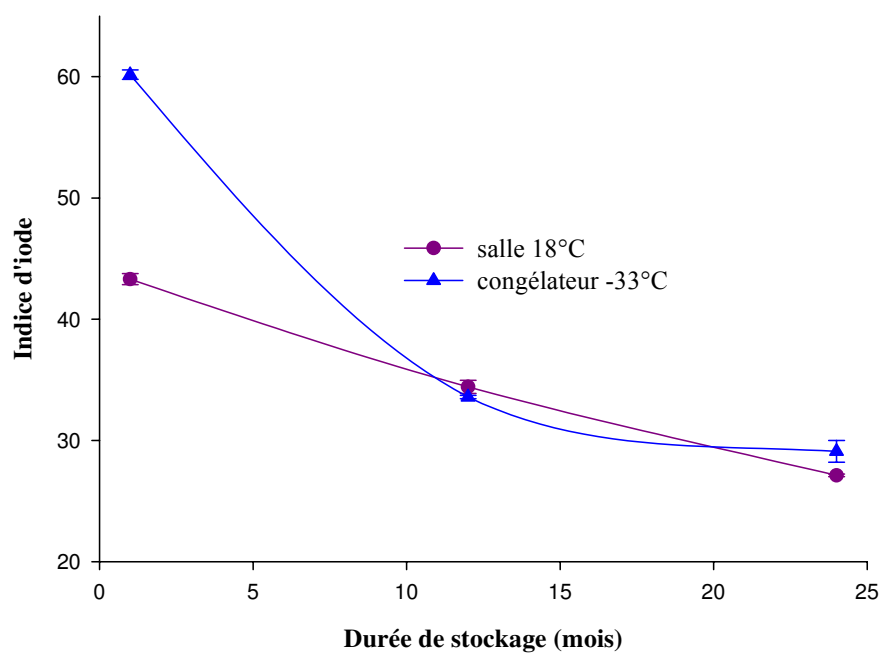


Figure 57 : Les indices d'iode des huiles extraites au CO₂ supercritique des fruits de l'ailé stockés à 18°C et à -33°C

III.1.5 Composition en acides gras

III.1.5.1 Amande de karité

Les tableaux 29 et 30 présentent la composition en acides gras des beurres de karité extraits à l'hexane en fonction du temps de stockage, respectivement à 18°C et à -33°C. Il ressort de ces tableaux que certains acides gras à courtes chaînes (acide laurique dès le 1^{er} mois et acide myristique dès le 5^{ème} mois) sont absents et qu'après un mois de stockage les beurres de karité ne contiennent plus d'acide palmitoléique (C16 :1). Par ailleurs, les profils en acides gras montrent que l'acide stéarique constitue après l'acide oléique la deuxième composante en proportion des beurres extraits à l'hexane. Les proportions des principaux acides gras sont de 26,87 – 38,52% à 18°C et 25,60 – 36,61% à -33°C pour l'acide stéarique et, de 49,16 – 59,71% à 18°C et 49,73 – 58,93% à -33°C pour l'acide oléique. Elles sont similaires à celles obtenues du beurre des amandes fraîches avec 35,64% d'acide stéarique et 53,11% d'acide oléique. Comparés aux résultats de 87,4% du beurre brut provenant de Ngaoundéré au Cameroun obtenu par Kapseu (1998), les acides stéarique et oléique ont des proportions (88,8% des acides gras totaux) supérieures d'environ 1%. Cette proportion est également supérieure de 2% de celle obtenue par Tano-Debrah et Ohta (1994) sur le beurre des amandes de karité du Ghana stockées pendant six semaines à 5°C (86,85%). On observe alors de façon générale que ces deux acides gras du beurre de karité représentent une proportion comprise entre 84 et 89% des acides gras totaux. Les proportions en acides gras polyinsaturés restent également similaires. Quant aux beurres de karité obtenus de l'extraction au CO₂ (tableau 31), ils sont constitués exclusivement d'acides palmitique, stéarique, oléique et linoléique, avec deux constituants majeurs : acide stéarique (31,14 – 34,41% à 18°C et 34,29 – 36,74% à -33°C) et acide oléique (51,88 – 54,45% à 18°C et 50,67 – 53,66% à -33°C). Comparés aux beurres extraits à l'hexane, on rencontre les principaux acides gras dans les beurres extraits au CO₂, sauf l'acide linoléique qui est absent.

L'absence de l'acide linoléique dans les matières grasses extraites au CO₂ supercritique, dans les conditions de travail, laisse penser à une sélectivité de ce solvant vis-à-vis de l'acide linoléique. Elle suggère également, sur le plan de la conservation, que les huiles ranciraient moins vite que celle extraites à l'hexane. Par contre, sur le plan nutritionnel, cela représente un inconvénient parce que l'acide linoléique est un acide gras essentiel.

Tableau 29 : La composition en acides gras des beurres de karité extraits à l'hexane après différents temps de stockage à 18°C

Acides gras (%) / mois	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%							
	0	1	2	3	4	5	12	24
C12	0,10	0,06						
C14	0,18	0,22	0,20	0,29	0,33	0,10		
C16	4,45	6,23	5,29	4,57	4,86	6,16	4,63	4,02
C16 : 1	0,10	0,14						
C18	35,64	31,06	33,70	38,52	35,91	32,68	26,87	36,43
C18 : 1	53,11	53,34	53,59	49,16	51,02	53,82	59,71	53,00
C18 : 2	6,41	8,69	7,23	7,46	7,66	7,00	8,41	6,26
C18 : 3		0,26			0,22	0,24	0,38	0,29
Total AGS	40,37	37,57	39,18	43,38	41,09	38,94	31,5	40,45
Total AGM	53,22	53,48	53,59	49,16	51,02	53,82	59,71	53,00
Total AGP	6,41	8,95	7,23	7,46	7,88	7,24	8,79	6,55

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement ; AGS : acides gras saturés ; AGM : acides gras monoinsaturés ; AGP : acides gras polyinsaturés

Tableau 30 : La composition en acides gras des beurres de karité extraits à l'hexane après différents temps de stockage à -33°C

Acides gras (%) / mois	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%							
	0	1	2	3	4	5	12	24
C12	0,10	0,09						
C14	0,18	0,49	0,08	0,23	0,14	0,22		
C16	4,45	4,83	5,21	4,80	4,55	4,75	6,77	4,67
C16 : 1	0,10							
C18	35,64	31,32	34,43	36,61	33,15	34,75	25,60	33,02
C18 : 1	53,11	54,57	52,33	49,73	53,93	52,43	58,93	54,93
C18 : 2	6,41	8,46	7,95	8,63	7,96	7,57	8,37	7,13
C18 : 3		0,24			0,27	0,28	0,33	0,25
Total AGS	40,37	36,73	39,72	41,64	37,85	39,72	32,37	37,69
Total AGM	53,22	54,57	52,33	49,73	53,93	52,43	58,93	54,93
Total AGP	6,41	8,70	7,95	8,63	8,22	7,85	8,70	7,38

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement ; AGS : acides gras saturés ; AGM : acides gras monoinsaturés ; AGP : acides gras polyinsaturés

Tableau 31 : La composition en acides gras des beurres de karité extraits au CO₂ supercritique après différents temps de stockage

Acides gras (%) / mois	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%			T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%		
	1	12	24	1	12	24
C12						
C14						
C16	6,24	5,73	4,49	5,66	6,49	5,49
C16 : 1						
C18	31,14	34,41	33,67	34,39	36,74	34,29
C18 : 1	53,18	51,88	54,45	51,55	50,67	53,66
C18 : 2	9,44	7,98	7,39	8,40	6,11	6,56
C18 : 3						
Total AGS	37,38	40,14	38,16	40,05	43,23	39,78
Total AGM	53,18	51,88	54,45	51,55	50,66	53,66
Total AGP	9,44	7,98	7,39	8,40	6,11	6,56

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement ; AGS : acides gras saturés ; AGM : acides gras monoinsaturés ; AGP : acides gras polyinsaturés

III.1.5.2 Pulpe de l'aiélé

La composition en acides gras des huiles des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et -33°C est rapportée dans les tableaux 32 et 33, respectivement. Après un mois de stockage, elles ne contiennent plus d'acide laurique. Elles sont constituées majoritairement des acides palmitique, oléique et linoléique. La proportion de 35,83% d'acide palmitique des fruits frais est inférieure à celles de 40,95 – 53,67% pour le stockage à 18°C, mais similaire de celle de 34,93 – 41,34% pour le stockage à -33°C. On obtient 38,46% d'acide oléique dans l'huile des fruits frais, proportion que l'on retrouve en général à tous les modes et durées de stockage (31,82 – 38,53% à 18°C et 26,20 – 41,54% à -33°C). De l'huile des fruits frais on a une proportion de 24,89% d'acide linoléique supérieure à celles de 3,67 – 20,77% (18°C) mais similaire à celle de 16,86 – 26,40% (-33°C). L'augmentation de la proportion d'acide palmitique et la baisse de la proportion de l'acide linoléique tout au long du stockage à 18°C confirme l'action des facteurs de dégradation de l'huile (autoxydation et hydrolyse). Par contre, à -33°C la proportion d'acides gras polyinsaturés reste constante. Ces résultats sur les fruits frais sont supérieurs de 0,53%, 5% et inférieur de 2% de ceux de Kapseu *et al.* (1996) qui étaient de 35,3%, 33,4% et 26,6% respectivement pour les acides palmitique, oléique et linoléique dans l'huile extraite de la pulpe des fruits crus de l'aiélé. En outre, Kapchie *et al.* (2004) obtiennent, après une semaine de stockage à $22 \pm 1^\circ\text{C}$, des proportions d'acide palmitique, oléique et linoléique de 40,33, 31,81 et 20,95%, respectivement. Ces trois acides gras représentent 93,09% des acides gras totaux de l'huile de l'aiélé pour ces auteurs, proportion similaire de la nôtre de 94,56%.

Comparativement au beurre de karité, l'huile de l'aiélé est plus équilibrée (environ 1/3 d'acides gras saturés, 1/3 d'acides gras monoinsaturés et 1/3 d'acides gras polyinsaturés). Pour obtenir une huile de composition en acides gras constante, il faudrait stocker les fruits de l'aiélé à -33°C. A 18°C, il faut un temps de séjour ne dépassant pas un mois.

Les huiles extraites au CO₂ (tableau 34) ont une proportion d'acide palmitique à 18°C (52,96 – 58,29%) supérieure à celle de -33°C (33,27 – 37,25%). A -33°C on a une proportion importante d'acide linoléique (21,45 – 26,28%) par rapport à 18°C. Comparés aux extraits à l'hexane, les proportions des principaux acides gras sont proches à -33°C, l'influence des conditions de stockage est plus marquée et l'acide linoléique est absent.

Tableau 32 : La composition en acides gras des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane après différents temps de stockage à 18°C

Acides gras (%) / mois	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%							
	0	1	2	3	4	5	12	24
C12	0,12	0,15						
C14	0,28	0,60	0,55	0,37	0,67	0,45	0,17	0,17
C16	35,83	40,95	52,44	42,01	44,15	44,91	48,42	53,67
C16 : 1	0,92	2,44	2,61	2,46	2,75	2,55	1,68	
C18	1,67	1,71	2,18	1,70	2,33	1,91	2,84	3,84
C18 : 1	35,46	32,84	31,82	36,03	31,94	32,84	37,89	38,53
C18 : 2	24,89	20,77	10,39	16,96	17,60	16,87	8,57	3,67
C18 : 3	0,83	0,56		0,48	0,56	0,47	0,43	0,12
Total AGS	37,90	43,40	55,18	44,08	47,15	47,27	51,43	57,68
Total AGM	36,38	35,28	34,43	38,49	34,69	35,39	39,57	38,53
Total AGP	25,72	21,32	10,39	17,44	18,16	17,34	9,00	3,79

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement ; AGS : acides gras saturés ; AGM : acides gras monoinsaturés ; AGP : acides gras polyinsaturés

Tableau 33 : La composition en acides gras des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane après différents temps de stockage à -33°C

Acides gras (%) / mois	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%							
	0	1	2	3	4	5	12	24
C12	0,12	0,08						
C14	0,28	0,13	0,43	0,61	0,36	0,36	0,07	0,13
C16	35,83	37,60	39,98	41,34	38,05	38,30	35,90	34,93
C16 : 1	0,92	1,88	2,57	2,85	2,17	2,01	3,40	0,23
C18	1,67	2,11	1,61	1,69	1,63	1,70	1,75	1,98
C18 : 1	35,46	31,84	31,31	26,20	32,15	30,89	41,54	35,13
C18 : 2	24,89	25,57	23,38	26,40	24,83	25,89	16,86	26,39
C18 : 3	0,83	0,79	0,72	0,91	0,82	0,85	0,48	1,21
Total AGS	37,90	39,92	42,02	43,64	40,04	40,36	37,72	37,04
Total AGM	36,38	33,72	33,88	29,05	34,31	32,90	44,94	35,36
Total AGP	25,72	26,36	24,10	27,31	25,65	26,74	17,34	27,60

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement ; AGS : acides gras saturés ; AGM : acides gras monoinsaturés ; AGP : acides gras polyinsaturés

Tableau 34 : La composition en acides gras des huiles de l'ailé extraites au CO₂ supercritique après différents temps de stockage

Acides gras (%) / mois	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%			T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%		
	1	12	24	1	12	24
C12						
C14						
C16	52,96	58,29	55,60	37,25	33,37	35,99
C16 : 1				1,22	1,40	
C18	2,28	3,45	3,15	1,80	1,63	1,84
C18 : 1	44,76	35,42	35,12	38,28	40,25	35,89
C18 : 2		2,84	6,13	21,45	23,35	26,28
C18 : 3						
Total AGS	55,24	61,74	58,75	39,05	35,00	37,83
Total AGM	44,76	35,42	35,12	39,50	41,65	35,89
Total AGP		2,84	6,13	21,45	23,35	26,28

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement ; AGS : acides gras saturés ; AGM : acides gras monoinsaturés ; AGP : acides gras polyinsaturés

III.1.6 Différentes classes de lipides

III.1.6.1 Amande de karité

Les quantités de triglycérides, diglycérides, monoglycérides et acides gras libres ont été déterminées dans les échantillons de beurres de karité obtenus par l'hexane des graines stockées dans différentes conditions et durées (tableaux 35 et 36). On remarque, de façon générale, une variation des proportions des différentes classes de lipides avec le mode et la durée de stockage.

On note que les proportions de triglycérides les plus basses sont obtenues au 2^{ème} mois (75,75% à -33°C) et au 12^{ème} mois (79,50 à 18°C). Les proportions de monoglycérides sont les plus élevées au 2^{ème} mois (16,89 à -33°C) et au 3^{ème} mois (11,63 à 18°C), tandis que le taux le plus élevé d'acides gras libres s'observe au 12^{ème} mois à 18°C (4,95%). C'est également à cette période et à ce stockage que l'on a noté d'importantes quantités de diglycérides (2,81%).

Dans l'ensemble, les proportions de diglycérides sont restées faibles (0,55 à 2,81%).

Pour maintenir la richesse du beurre de karité en triglycérides (80%), il faut stocker les fruits pendant au plus 2 mois à 18°C et à -33°C jusqu'à 24 mois.

En ce qui concerne les beurres extraits au CO₂ (tableau 37), on observe également des variations des différentes classes de lipides. De façon générale, on note que les taux de triglycérides augmente avec le temps pour atteindre la plus forte valeur de 87,78% à 18°C et 89,13% à -33°C. Les teneurs en acides gras libres sont marqués à 18°C (31,51%). Les quantités les plus importantes de monoglycérides (8,47%) et de diglycérides (4,17%) sont observées à 18°C. Avec le CO₂ supercritique aussi, la température de -33°C s'avère plus adaptée pour stocker les fruits de karité. L'apparition d'importantes quantités d'acides gras libres, par rapport aux beurres extraits à l'hexane, traduit également la forte solubilité des acides gras libres dans le CO₂.

Tableau 35 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des beurres de karité extraits à l'hexane au cours du stockage à 18°C

	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%							
	0	1	2	3	4	5	12	24
Triglycérides (TG)	94,56 ± 0,04 ^a	89,81 ± 1,18 ^b	81,07 ± 1,19 ^d	80,07 ± 0,28 ^d	90,42 ± 0,30 ^b	91,14 ± 0,47 ^b	79,50 ± 1,28 ^d	86,09 ± 0,95 ^c
Acides gras libres (AGL)	0,23 ± 0,01 ^d	3,80 ± 0,57 ^{ab}	2,32 ± 0,33 ^c	3,90 ± 1,08 ^{ab}	2,43 ± 0,16 ^{bc}	2,03 ± 0,01 ^c	4,95 ± 0,08 ^a	1,77 ± 0,03 ^c
Monoglycérides (MG)	0,73 ± 0,02 ^e	6,12 ± 0,26 ^c	11,32 ± 0,34 ^{ab}	11,63 ± 1,35 ^a	1,38 ± 0,12 ^c	2,42 ± 0,33 ^{de}	9,03 ± 0,25 ^b	3,87 ± 0,56 ^{cd}
Diglycérides (DG)	0,12 ± 0,04 ^b	1,99 ± 0,09 ^{ab}	0,97 ± 0,07 ^{ab}	1,84 ± 0,46 ^{ab}	1,33 ± 0,04 ^{ab}	1,14 ± 0,16 ^{ab}	2,81 ± 0,24 ^a	2,71 ± 0,78 ^a

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 36 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des beurres de karité extraits à l'hexane au cours du stockage à -33°C

	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%							
	0	1	2	3	4	5	12	24
Triglycérides (TG)	94,56 ± 0,04 ^{ab}	94,38 ± 0,61 ^{ab}	75,75 ± 4,48 ^{ab}	86,79 ± 1,66 ^{ab}	75,20 ± 9,38 ^b	91,10 ± 0,32 ^{ab}	95,35 ± 1,24 ^a	93,73 ± 1,08 ^{ab}
Acides gras libres (AGL)	0,23 ± 0,01 ^c	0,85 ± 0,08 ^{bc}	0,72 ± 0,08 ^{bc}	2,19 ± 0,18 ^{ab}	1,83 ± 0,17 ^{bc}	0,59 ± 0,03 ^{bc}	1,76 ± 0,19 ^{bc}	3,76 ± 0,71 ^a
Monoglycérides (MG)	0,73 ± 0,02 ^a	2,26 ± 0,56 ^a	16,89 ± 2,28 ^a	5,14 ± 0,15 ^a	10,95 ± 1,16 ^a	3,79 ± 0,67 ^a	0,17 ± 0,01 ^a	0,35 ± 0,03 ^a
Diglycérides (DG)	0,12 ± 0,04 ^a	1,14 ± 0,25 ^a	1,34 ± 0,02 ^a	1,43 ± 0,31 ^a	1,25 ± 0,12 ^a	0,55 ± 0,03 ^a	1,06 ± 0,06 ^a	1,39 ± 0,10 ^a

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 37 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des beurres de karité extraits au CO₂ supercritique au cours du stockage

	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%			T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%		
	1	12	24	1	12	24
Triglycérides (TG)	59,40 ± 1,50 ^b	78,70 ± 3,40 ^a	87,78 ± 0,63 ^a	81,83 ± 1,64 ^b	89,13 ± 0,09 ^a	83,13 ± 1,09 ^b
Acides gras libres (AGL)	31,51 ± 1,20 ^a	4,81 ± 0,18 ^b	3,32 ± 0,57 ^b	7,52 ± 0,11 ^a	3,39 ± 0,54 ^b	7,72 ± 0,94 ^a
Monoglycérides (MG)	1,42 ± 0,69 ^a	8,47 ± 0,86 ^a	4,58 ± 0,61 ^a	1,87 ± 0,09 ^a	3,56 ± 0,85 ^a	3,00 ± 0,76 ^a
Diglycérides (DG)	4,17 ± 0,04 ^a	3,33 ± 0,73 ^a	2,42 ± 0,20 ^a	4,06 ± 0,26 ^a	1,76 ± 0,36 ^b	1,61 ± 0,34 ^b

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

III.1.6.2 Pulpe de l'aiélé

Les tableaux 38 et 39 présentent les quantités de triglycérides, diglycérides, monoglycérides et acides gras libres déterminées dans les huiles obtenues à l'hexane des fruits de l'aiélé stockés à 18°C et à -33°C, respectivement. On note, de façon générale, une variation des proportions des différentes classes de lipides.

Les proportions de triglycérides baissent considérablement dans le temps à 18°C. La teneur la plus faible s'observe à 18°C au 2^{ème} mois (21,19%). Cette proportion reste proche (83,07 à 91,91%) de celle de l'huile des fruits crus frais à -33°C. Les taux d'acides gras libres les plus élevés s'observent également à 18°C (29,41%) au 5^{ème} mois. Ce taux reste faible à -33°C (2,65%). Les taux de monoglycérides observent la même tendance que celle des acides gras libres. Dans l'ensemble, les proportions de diglycérides restent faibles (1,33 à 6,23%) mais supérieures à celle de l'huile des fruits frais de 0,80%).

Pour maintenir la qualité des huiles de l'aiélé (teneur en triglycérides environ 90%, faibles taux d'acides gras libres, de monoglycérides et de diglycérides), il faut stocker les fruits à -33°C.

Le tableau 40 donne les quantités des différentes classes de lipides des huiles extraites au CO₂. Seules les huiles à -33°C présentent une composition en triglycérides d'environ 80% et un taux d'acides gras libres faible. Les huiles à 18°C donnent des taux de triglycérides et d'acides gras libres considérablement faibles et élevés respectivement. Les huiles des fruits stockés à -33°C présentent une composition intéressante en glycérides. Comparées aux huiles extraites à l'hexane, elles ont des taux élevés d'acides gras libres et de monoglycérides. Ceci confirme l'affinité du CO₂ supercritique pour les acides gras libres par rapport à l'hexane.

Tableau 38 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane au cours du stockage à 18°C

	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%							
	0	1	2	3	4	5	12	24
Triglycérides (TG)	93,15 ± 1,54 ^a	26,90 ± 1,09 ^d	21,19 ± 0,22 ^d	49,30 ± 1,55 ^c	35,74 ± 2,22 ^c	41,43 ± 3,90 ^c	59,26 ± 0,44 ^b	41,35 ± 1,16 ^{cd}
Acides gras libres (AGL)	0,10 ± 0,02 ^e	20,82 ± 0,92 ^c	25,53 ± 1,65 ^{ab}	13,17 ± 0,27 ^d	24,53 ± 2,65 ^{bc}	29,41 ± 1,38 ^a	0,71 ± 0,14 ^e	0,71 ± 0,08 ^e
Monoglycérides (MG)	4,84 ± 1,54 ^d	42,44 ± 0,65 ^{ab}	42,53 ± 1,24 ^{ab}	26,66 ± 2,95 ^c	32,52 ± 3,07 ^{bc}	23,41 ± 2,38 ^c	33,94 ± 0,40 ^{bc}	47,10 ± 1,37 ^a
Diglycérides (DG)	0,80 ± 0,06 ^c	5,06 ± 0,83 ^{ab}	6,23 ± 0,59 ^a	6,14 ± 0,80 ^a	4,77 ± 0,50 ^{ab}	2,86 ± 0,13 ^{bc}	5,53 ± 0,11 ^{ab}	6,02 ± 0,15 ^a

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 39 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane au cours du stockage à -33°C

	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%							
	0	1	2	3	4	5	12	24
Triglycérides (TG)	93,15 ± 1,54 ^a	83,07 ± 5,40 ^a	87,23 ± 3,31 ^a	86,24 ± 7,65 ^a	90,85 ± 0,52 ^a	91,91 ± 4,03 ^a	88,20 ± 1,86 ^a	84,86 ± 1,72 ^a
Acides gras libres (AGL)	0,10 ± 0,02 ^d	2,65 ± 0,38 ^a	2,33 ± 0,50 ^{ab}	0,84 ± 0,08 ^{cd}	0,48 ± 0,09 ^d	0,22 ± 0,01 ^d	2,00 ± 0,17 ^{ab}	1,60 ± 0,04 ^{bc}
Monoglycérides (MG)	4,84 ± 1,54 ^a	5,00 ± 0,20 ^a	3,31 ± 0,18 ^a	6,44 ± 0,55 ^a	3,82 ± 0,94 ^a	1,13 ± 0,00 ^a	0,93 ± 0,02 ^a	3,95 ± 0,44 ^a
Diglycérides (DG)	0,80 ± 0,06 ^c	5,80 ± 0,90 ^a	2,25 ± 0,12 ^{bc}	3,09 ± 0,27 ^b	1,71 ± 0,05 ^{bc}	1,33 ± 0,10 ^{bc}	3,07 ± 0,02 ^b	3,30 ± 0,18 ^b

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 40 : La variation des proportions des différentes classes de lipides des huiles de l'aiélé extraites au CO₂ supercritique au cours du stockage

	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%			T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%		
	1	12	24	1	12	24
Triglycérides (TG)	27,81 ± 1,67 ^a	8,33 ± 0,72 ^b	11,49 ± 0,33 ^b	76,46 ± 8,47 ^a	81,02 ± 2,02 ^a	88,85 ± 2,90 ^a
Acides gras libres (AGL)	47,86 ± 2,02 ^a	52,62 ± 1,90 ^a	56,12 ± 1,56 ^a	5,46 ± 0,07 ^a	2,86 ± 0,33 ^b	2,09 ± 0,42 ^b
Monoglycérides (MG)	10,39 ± 0,83 ^c	27,13 ± 0,66 ^a	18,42 ± 0,93 ^b	10,74 ± 0,85 ^a	8,65 ± 0,23 ^a	2,29 ± 0,08 ^a
Diglycérides (DG)	7,69 ± 0,21 ^b	6,72 ± 0,13 ^c	8,74 ± 0,14 ^a	3,15 ± 0,25 ^b	4,01 ± 0,11 ^a	2,25 ± 0,07 ^c

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

III.2 Paramètres texturaux

III.2.1 Amande de karité

III.2.1.1 Dureté

La dureté donne une idée de la fermeté des amandes de karité. Il ressort des résultats que la durée et le mode de stockage ont une influence significative ($p \leq 0,05$) sur la fermeté des amandes (figure 58). En effet, la dureté des amandes stockées à 18°C augmente avec le temps tandis que celle des amandes entreposées à -33°C est significativement moins élevée. La dureté élevée à 18°C serait due à la déshydratation pendant le stockage. Une analyse de la corrélation a d'ailleurs donné un coefficient significatif et négatif entre la teneur en eau et la dureté ($R = -0,94$, $p \leq 0,05$). A -33°C la baisse de la fermeté proviendrait de l'effet de la congélation-décongélation qui fragilise la structure de l'amande (Cheftel & Cheftel, 1984 ; Womeni, Ndjouenkeu, Tchatchueng & Kapseu, 2000). En effet, l'observation de la structure microscopique des amandes indique une structure lâche après un mois de stockage à -33°C (figure 59) contrairement à 18°C (figure 60) où l'on a un raffermissement de la structure. Ces changements de la paroi cellulaire s'accroissent progressivement avec la durée de stockage jusqu'au 24^{ème} mois (figures 61 et 62 respectivement pour le stockage à -33°C et 18°C).

La dureté des amandes n'est pas significativement corrélée à l'indice d'iode du beurre ($R = -0,13$, $p \leq 0,05$), mais est significativement corrélée à l'indice d'acide ($R = 0,70$, $p \leq 0,05$), qui est un indice de qualité important intervenant dans la qualification et la commercialisation du beurre de karité. Ainsi, une dureté élevée de l'amande de karité présage d'un beurre plus acide.

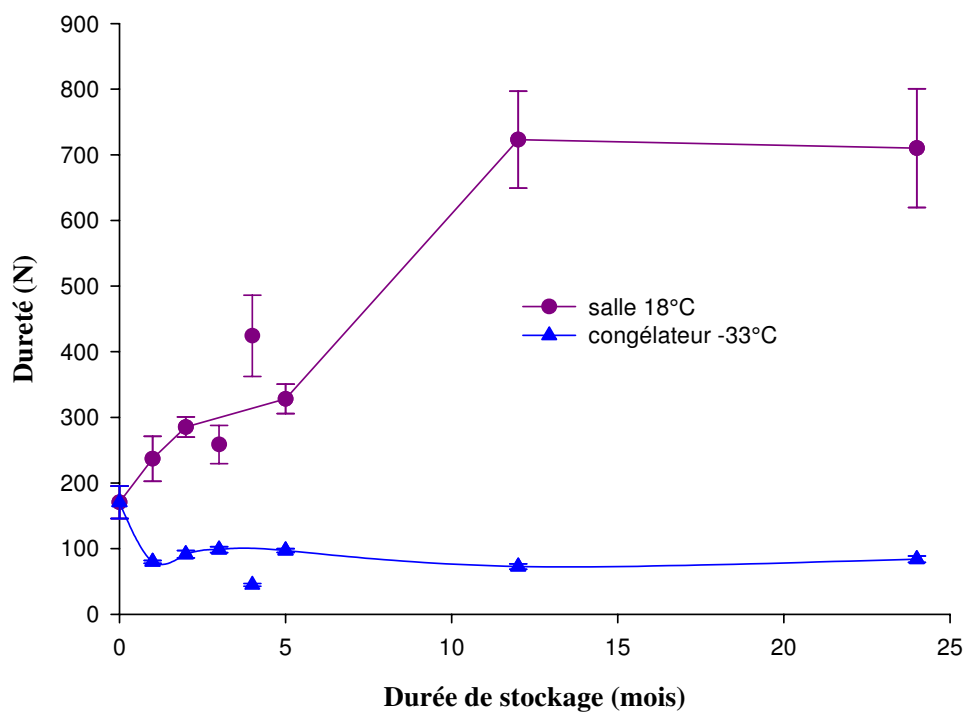


Figure 58 : L'évolution de la dureté de l'amande de karité en fonction de la durée et du mode de stockage

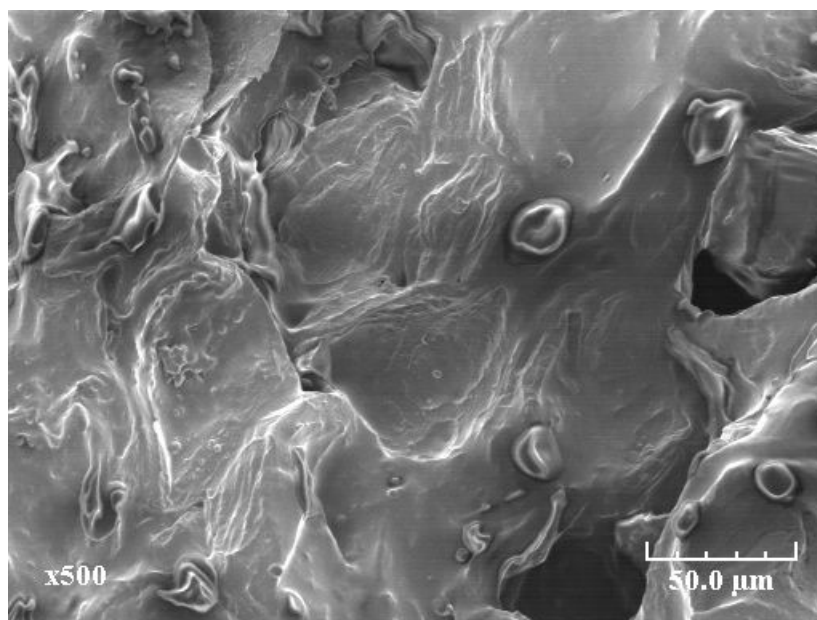


Figure 59 : L'observation microscopique de l'amande de karité après 1 mois de stockage à -33°C

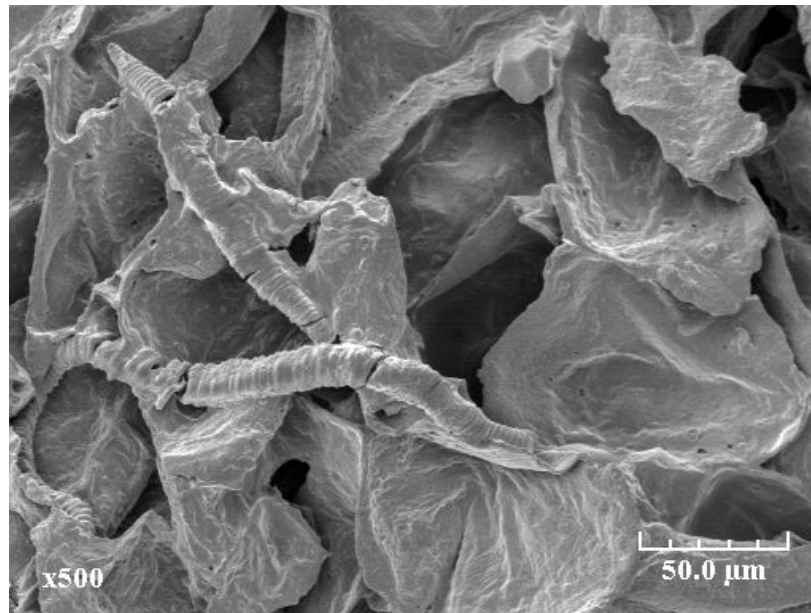


Figure 60 : L'observation microscopique de l'amande de karité après 1 mois de stockage à 18°C

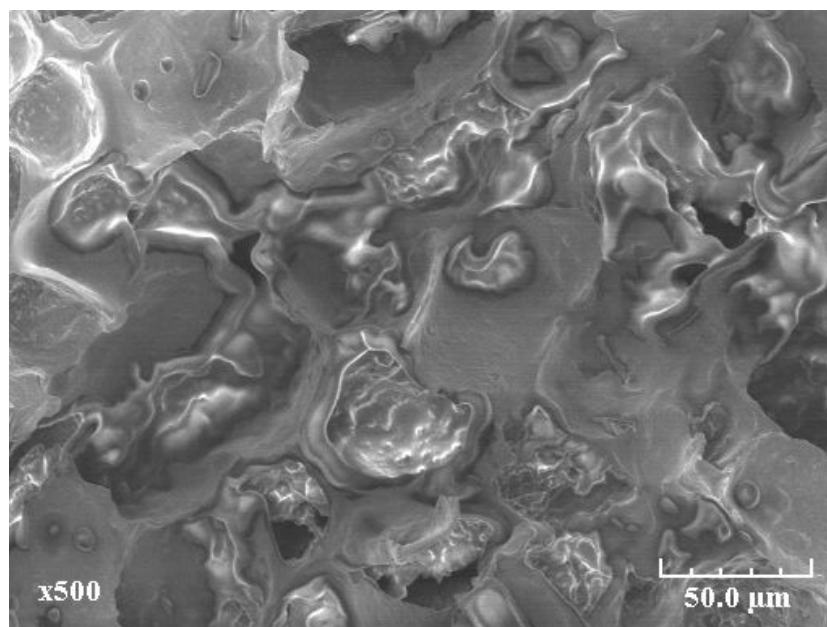


Figure 61 : L'observation microscopique de l'amande de karité après 24 mois de stockage à -33°C

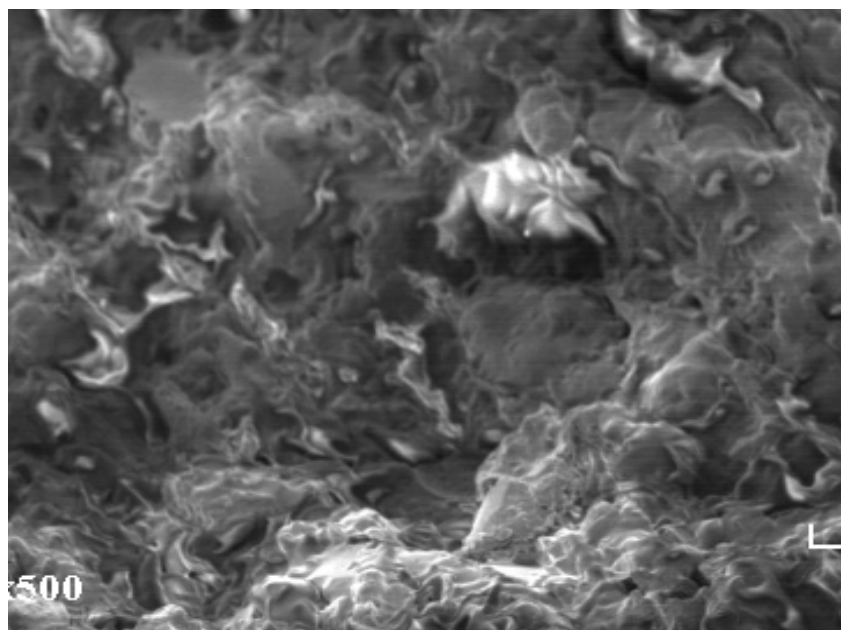


Figure 62 : L'observation microscopique de l'amande de karité après 24 mois de stockage à 18°C

Ces résultats sur la résistance à la compression des amandes de karité stockées à 18°C indiquent qu'elles exigent des énergies de broyage plus grandes que celles stockées à -33°C.

III.2.2 Pulpe de l'aiélé

III.2.2.1 Dureté

L'analyse des résultats obtenus montre que la durée et le mode de stockage influence significativement ($p \leq 0,05$) la dureté de la pulpe des fruits de l'aiélé (figure 63). La dureté des pulpes des fruits stockées à 18°C est significativement plus élevée que celle des pulpes des fruits stockés à -33°C. En effet, elle varie à 18°C de 402,51 à 919,55 N avec un pic de 1438,58 N au 12^{ème} mois et, à -33°C elle fluctue entre 15,08 N et 22,28 N. Ceci s'expliquerait par la déshydratation des pulpes des fruits pendant le stockage à 18°C et la fragilisation des parois de la pulpe des fruits stockés à -33°C par la congélation-décongélation. L'analyse de corrélation donne d'ailleurs avec la dureté des coefficients de corrélations significatifs avec la teneur en eau ($R = -0,92$) et avec l'indice d'acide ($R = 0,89$). Selon Tchiégang *et al.* (2004), le

durcissement de la pulpe lors du stockage à $22 \pm 1^\circ\text{C}$ serait lié à la déshydratation de la pulpe. Ceci augmente le taux de cellulose et de lignine (Kapchie Noutchogoué, 2005). En plus, selon Tchiégang, Kapchie Noutchogoué, Kapseu, Fanni et Parmentier (2004), on observe la présence des activités enzymatiques dans la pulpe de l'aiélé. Ceci favoriserait, avec l'augmentation de la température pendant la décongélation, un ramollissement des pulpes des fruits stockés à -33°C . Comparée à la dureté de l'amande de karité, on observe que la pulpe des fruits de l'aiélé présente des pics de dureté les plus élevés à 18°C et les plus faibles à -33°C . Ceci traduit la sensibilité des fruits de l'aiélé aux conditions ambiantes. Dans le présent travail, la dureté a une valeur maximale de 1438,58 N sept fois supérieure à la valeur de 220 N obtenue après 7 jours de stockage par Kapchie Noutchogoué *et al.* (2005), probablement en raison de la courte période de stockage de ces derniers.

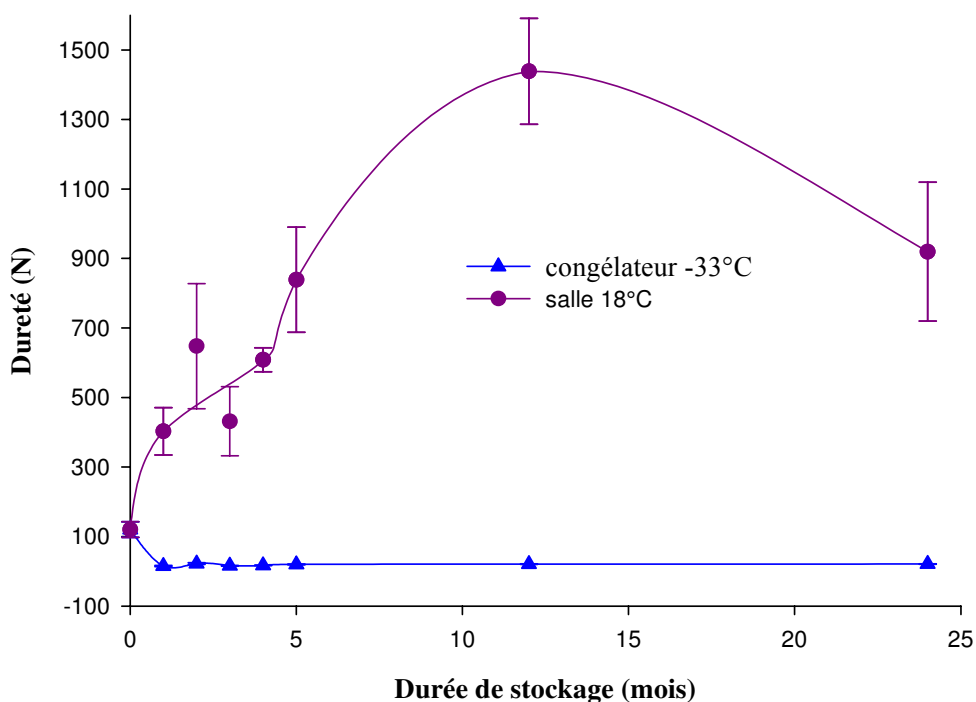


Figure 63 : L'évolution de la dureté de la pulpe de l'aiélé en fonction de la durée et du mode de stockage

III.2.2.2 Masticabilité

C'est le produit de plusieurs propriétés : dureté, cohésivité et l'élasticité. La figure 64 présente l'évolution de la masticabilité en fonction du temps et du mode de stockage. Les résultats montrent que seul le mode de stockage a une influence significative ($P \leq 0,05$) sur la masticabilité de la pulpe. Elle est plus élevée à 18°C (166,08 J) qu'à -33°C (13,22 J). On observe une corrélation significative ($R = -0,66$) entre la masticabilité et l'élasticité des pulpes de l'ailé. Ainsi, il faut plus d'énergie pour mastiquer la pulpe stockée à 18°C afin de la rendre absorbable, que celles entreposées à -33°C. La dureté serait la composante principale pour induire la masticabilité des pulpes des fruits de l'ailé.

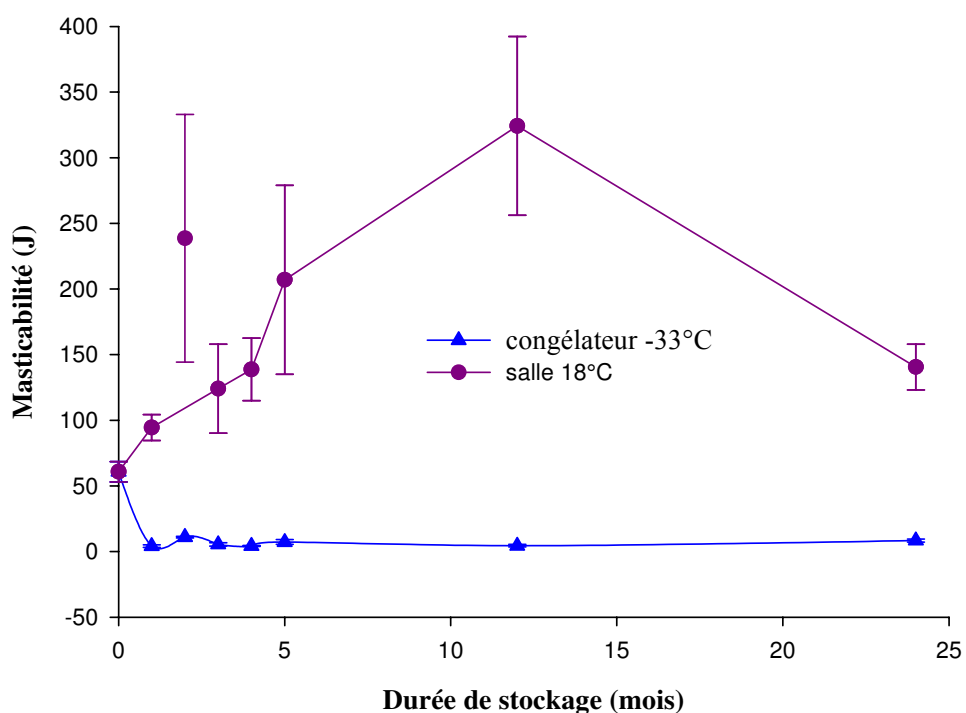


Figure 64 : L'évolution de la masticabilité de la pulpe de l'ailé en fonction de la durée et du mode de stockage

VI. CONCLUSION PARTIELLE

Le stockage à 18°C entraîne une augmentation de l'indice d'acide. Quelque soient le mode de stockage et le solvant d'extraction, l'indice d'iode baisse avec le stockage. A la température de -33°C, le stockage peut se faire pendant 5 mois et permettre des rendements d'extraction élevés. Le stockage des produits à 18°C doit être évité. Par rapport à l'hexane, le CO₂ supercritique dans les conditions expérimentales étudiées donne des rendements d'extraction faibles et, des matières grasses à indices d'acide élevés et à degré d'oxydation bas.

Les proportions des acides gras des lipides extraits à l'hexane des produits stockés restent proches de celles des produits frais. Les beurres obtenus de l'extraction au CO₂ sont constitués exclusivement d'acides palmitique, stéarique, oléique et linoléique, tandis que les huiles de l'aiélé extraites au CO₂ sont constituées des acides palmitique, oléique et linoléique. Les proportions des principaux acides gras des huiles de l'aiélé obtenues au CO₂ sont similaires à -33°C à celles des huiles extraites à l'hexane. Le CO₂ supercritique présente une sélectivité vis-à-vis de l'acide linoléique.

Le stockage à -33°C donne des matières grasses (à l'hexane) dont les proportions de triglycérides restent similaires à celles des fruits frais. Cependant, les taux de monoglycérides et de diglycérides augmentent relativement avec le stockage. A cette température, les taux de triglycérides des matières grasses extraites au CO₂ sont d'environ 90%, mais la proportion d'acides gras libres est plus élevée, comparativement aux lipides extraits à l'hexane.

Le stockage à 18°C entraîne le durcissement des amandes de karité et des pulpes de l'aiélé. Ce durcissement est corrélé négativement à l'indice d'acide des matières extraites de ces oléagineux. Les résultats obtenus permettent, toutefois, de noter la fragilisation (effet de congélation-décongélation) de la paroi cellulaire des produits stockés dans les conditions de congélation.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans cette thèse, l'étude de la conservation des fruits du karité et de l'aiélé, en termes de détermination des isothermes de sorption d'eau et de l'extraction des matières grasses des fruits stockés a été effectuée.

La détermination des isothermes de sorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé montre qu'elles sont de type II selon la classification de Van der Waals. La teneur en eau à l'équilibre diminue avec l'augmentation de la température. La pulpe de l'aiélé est plus hygroscopique à 25°C et l'amande de karité de 35 à 55°C. Pour la première fois, le phénomène d'hystérésis est mis en évidence lors des mesures de sorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé. Le modèle d'Oswin décrit le mieux les données de sorption des deux produits. La conservation à 25, 35, 45 et 55°C des amandes de karité et des fruits de l'aiélé frais doit s'effectuer dans une atmosphère à humidité relative de l'air comprise entre 40 et 60%. Ceci correspond à des teneurs en eau inférieures à 7%, teneurs en eau recommandées pour la conservation des oléagineux en zones tropicales. Un modèle adapté de prédiction des isothermes de sorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé en deçà de 25°C et au delà de 55°C

L'analyse de l'extraction des matières grasses des amandes de karité et des pulpes de l'aiélé montre que les rendements d'extraction à l'hexane sont supérieurs à ceux au CO₂ supercritique. Les rendements d'extraction à l'hexane des beurres des amandes de karité restent supérieurs à 40%, tandis que seuls les fruits de l'aiélé stockés à -33°C permettent d'obtenir ce rendement. Les résultats de l'analyse des matières grasses extraites conduisent aux observations suivantes :

- Quelque soit le solvant d'extraction, les indices d'acide des beurres de karité et des huiles de l'aiélé extraits des produits stockés à 18°C sont les plus élevés. Cet indice est plus grand pour les beurres et les huiles extraits au CO₂, par rapport à l'hexane ;

- Quelque soient le mode de stockage et le solvant d'extraction, l'indice d'iode baisse avec le stockage. Les résultats montrent que les indices d'iode des matières grasses extraites à l'hexane sont les plus élevés que ceux des lipides extraits au CO₂ supercritique ;
- Les proportions des principaux acides gras des huiles obtenues par le CO₂ sont similaires à -33°C de celles des huiles à l'hexane. La proportion des acides stéarique et oléique des beurres ne varie pas significativement avec le mode et la durée de stockage. Les beurres obtenus de l'extraction au le CO₂ sont constitués exclusivement d'acides palmitique, stéarique, oléique et linoléique. Ce solvant présente une sélectivité vis-à-vis de l'acide linoléique ;
- La détermination des différentes classes de lipides montre que les taux de triglycérides des beurres extraits au CO₂ sont les plus bas, alors que ceux des acides gras libres et des diglycérides sont les plus grands. Les huiles des fruits de l'aiélé stockés à -33°C présentent les taux de triglycérides proches, extraites à l'hexane ou au CO₂. Les taux d'acides gras libres et de monoglycérides sont plus élevés dans les huiles extraites au CO₂. Les proportions de triglycérides des beurres extraits à l'hexane sont en général proches de la valeur initiale, tandis les taux de monoglycérides et de diglycérides sont plus grands ;

Au regard des résultats obtenus, le stockage à -33°C est le meilleur moyen de stockage des graines de karité et des fruits de l'aiélé. Dans ces conditions, l'entreposage ne doit pas excéder 5 mois. Les acides gras libres sont plus solubles dans le CO₂ supercritique. A cet égard, l'extraction au CO₂ des matières grasses doit s'effectuer sur des fruits frais ou stockés à -33°C. Les perspectives d'utilisation des extraits au CO₂ supercritique sont intéressantes en raison de leur sélectivité.

L'analyse de l'évolution de la texture indique que les produits stockés à 18°C ont la dureté et l'énergie de mastication plus élevées que ceux stockés à -33°C. Les conditions de stockage à -33°C conservent le mieux physiquement les fruits de l'aiélé.

Comme perspectives pour ce travail, il serait intéressant, dans les conditions de conservation de ce travail, de :

- Etudier l'incidence des facteurs de dégradation (ambiance et microorganismes, insectes) dans le temps et sur la qualité de la matière grasse résultante ;
- Déterminer la relation entre l'activité de l'eau et la qualité des lipides au cours de la conservation afin de connaître la teneur en eau limite de dégradation des huiles ;
- Etudier la sélectivité de l'hexane et CO₂ supercritique pendant l'extraction des lipides des amandes de karité et des pulpes de l'aiélé.
- Mettre le produit scellé, notamment la pulpe de l'aiélé, sur le marché puisqu'il est connu qu'à une certaine température la pulpe se ramollit. L'activité de l'eau et la teneur en eau du produit étant connues, il ne restera alors que de déterminer le temps de conservation.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboubakar Dandjouma A. K., 2005.** *Contribution à l'étude des conditions de production et des aptitudes technologiques des huiles des oléagineux non-conventionnels : cas de Ricinodendron heudelotii* Bail. Pierre ex Pax et de *Canarium Schweinfurthii* Engl., Thèse de Doctorat/Ph.D, ENSAI - Université de Ngaoundéré, Cameroun, 204p.
- Achour M., Hamdi S. & Benzarti L., 1999.** Détermination des isothermes de sorption de dattes Deglet Nour entreposées en Tunisie. *Fruits*, 54 (2), 123-128.
- Adams M. R. & Moss M. O., 1995.** Food microbiology, The Royal Society of Chemistry. Chapter 3, pp 39-45.
- Adoum, 1996.** Technique artisanale d'extraction du beurre de karité au Moyen-Chari Sud du Tchad. In Siaka Kone (éd), *Atelier International d'échanges sur « Oléagineux et petites technologies »*. 23-27 septembre, Ngaoundéré, Cameroun, pp 92-96.
- AFNOR (Association Française pour la Normalisation), 1981.** *Recueil des normes françaises. Corps gras graines oléagineuses, produits dérivés*, 2^e édition, afnor, Paris, France, pp 216-218, 224-230, 438.
- AFNOR (Association Française pour la Normalisation), 1984.** *Produits alimentaires : directives générales pour le dosage de l'azote avec minéralisation selon la méthode de Kjeldahl*. In Godon B. & Popineau, 1984. *Guide pratique des céréales*. Apria France, pp 263-266.
- Agbo N'zi G., 1986.** *Canarium schweinfurthii* Engl. : Un nouveau facteur de développement en Côte d'Ivoire, Sénégal, *Réseau Prélude*, 345, 23p.
- Agbo N'zi G., Chatigre Kouamé O. & Simard R. E., 1992.** *Canarium schweinfurthii* Engl. : Chemical composition of fruit pulp. *J.A.O.C.S.*, 69 (4), 317-320.
- Agbo N'zi G. & Chatigre Kouamé O., 1996.** Amélioration de l'extraction de la matière grasse du fruit de *Canarium schweinfurthii* Engl. par ajout d'enzymes. *Sciences des Aliments*, 16, 77-82.
- Ahouannou C, Jannot Y, Nganhon J, Lips B & Lallemand A., 1999.** Caractérisation thermophysique de produits agricoles en vue d'une modélisation de séchoirs. In C. Kapseu & J. Kayem (éds), *Actes du séminaire international sur le séchage et la valorisation du karité et de l'aiélé*. 1-3 décembre, Ngaoundéré, Cameroun, pp 179-194.
- Ajiwe V. I. E., Okeke C. A., Ogbuagu J. O., Ojukwu U. & Onwukeme V. I., 1998.** Characterization and Applications of oils extracted from *Canarium schweinfurthii*, *Vitex doniana* and *Xylopia aethiopica* fruits/seeds. *Bioresources Technology*, 64, 249-252.
- Ajiwe V. I. E., Ajibla V. & Martins C. M. O. A., 1999.** *Canarium schweinfurthii* oils: potential alternative source to diesel oil. In C. Kapseu & J. Kayem (éds), *Actes du*

- séminaire international sur le séchage et la valorisation du karité et de l'aiélé. 1-3 décembre, Ngaoundéré, Cameroun*, pp 145-154.
- Amti J. P. S., 1998.** *Recherche d'une technique améliorée d'extraction du beurre de karité*, Mémoire de fin d'études de DUT, IUT de Ngaoundéré, 27p.
- Anonyme, 1978.** Carte du Cameroun, Bafoussam 1/200000, Centre Géographique National, Sopecam (Cameroun).
- APROMA (Association des PROduits à MArché), 1995.** Etude de la filière karité du Burkina Faso, Volume : Rapport principal. Union Européenne, Délégation de la commission européenne du Burkina Faso, Ouagadougou, pp 15-24.
- Asubiojo O. I., Guinn U. P. & Okunuga A., 1982.** Multielment analysis of nigerian chewing sticks by instrumental neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 74 (1), 149-156.
- Aubreville A., 1959.** La Flore forestière de la Côte d'Ivoire. Centre technique forestier de la Côte d'Ivoire, pp 138-139.
- Aviara N. A. & Haque M. A., 2001.** Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel. *J Food Eng.*, 47 (2), 109-113.
- Bekure Z., Donlan M., Gordon Y. & Thomson J., 1997.** Données de base sur le beurre de karité dans UNIFEM (Fonds de développement des Nations Unies pour la Femme), éditeur, Du local au Mondial, Le marché international du beurre de karité, Chapitre 4, New-York, pp 29-32.
- Belin J. M., 1996.** Les levures. In *Microbiologie alimentaire, Tome 1, Aspect microbiologique de la sécurité et de la qualité des aliments*, Partie 3, coordonnateurs C. Bourgeois, J. F. Mescle & J. Zucca. Technique et Documentation, Paris (France), pp 225-227 ; 230-231.
- Bernard P., 1995.** *Synthèse par voie enzymatique : étude comparative de milieux réactionnels*, Thèse de Doctorat, ENSIC - INPL, France, pp 124-126.
- Bettelheim F. A. & Erhlich S. H., 1963.** Water vapour sorption of mucopolysaccharides, *Journal of Physical Chemistry*, 67, 1948-1953.
- BIT (Bureau International du Travail), 1986.** Le stockage du grain. Série Technologie, Dossier technique N°11. Genève (Suisse). pp 5-20.
- Bizot. H., 1983.** Using the 'G.A.B.' model to construct sorption isotherms. In R. Jowitt (éds), *Physical Properties of Foods*. Applied Science Publishers, London. Part 1, Chapter 4, pp 43-54.

- Blond G. & Le Meste M., 1988.** Propriétés d'hydratation des macromolécules. Relation avec leurs propriétés fonctionnelles. In D. Lorient, B. Colas & Le Meste M. (éds), *Propriétés Fonctionnelles des Macromolécules Alimentaires. Les Cahiers de l'ENS-BANA, N°6*. Techniques et Documentation Lavoisier, Paris, pp 11-15.
- Booth S. F. M. & Wickens G. E., 1988.** Non-timbers uses of selected arid zone trees and shrubs in Africa. FAO conservation guide 19, Rome (Italie), pp 34-45.
- Boquet R., Chirife J., Iglesias H. A., 1978.** Equations for fitting water sorption isotherms of foods. II. Evaluation of various two-parameter models. *Journal of Food Technology*, 13, 319-327.
- Borch-Jensen C. & Mollerup J, 1996.** Supercritical processing of fish oils: Data evaluation and assessment. In ISF (éds), *Oils-Fats-Lipids, vol 1, Proceedings of the 21st world congress of the international society for fat research (ISF)*, PJ Barnes and associates, Tharneslink Ltd, Windsor, pp 175-180.
- Bouix M. & Leveau J-Y., 1991.** Les levures. In *Techniques d'analyse et de contrôle dans les industries agro-alimentaires*, Partie 2, Chapitre 6, coordonnateurs C. Bourgeois & J-Y. Leveau. Lavoisier-Tec et Doc, Apria, Paris, pp 216-219.
- Bourne M. C., 1982.** Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement, Academic Press San Diego, 325p.
- Bruinsma D., 1997.** La fabrication du beurre de karité, Quelles technologies pour les femmes ?, *TPA*, N°13, pp 22-25.
- Bup D. N., 2002.** *Drying and oil extraction from Bucchozia coriacea Engl. (mvan) and (Butyrospermum parkii (G. Don) Kotschy)(shea)*. DEA Thesis in process engineering, ENSAI - University of Ngaoundere, Cameroon, 70p.
- Caurie M., 1981.** Derivation of full range moisture isotherms. In L. B. Rockland & G. F. Stewart (éds), *Water Activity. Influences on Food Quality*, Academic Press, New York, 63-87.
- Caurie M., 2005.** The unimolecular character of the classical Brunauer, Emmett and Teller adsorption equation and moisture adsorption, *International Journal of Food Science and Technology*, 40, 283-293.
- Caurie M., 2006.** Hysteresis phenomenon in foods, *International Journal of Food Science and Technology*, 1-5.
- Chao R. R., 1996.** Supercritical CO₂ extraction of meat products and edible animal fats for cholesterol reduction. In W. King Jerry & R. Gary (éds), *Supercritical fluid technology in oil and lipid chemistry*, Chapter 11, AOCS PRESS, Champaign, Illinois, USA, pp 230-246.

- Cheftel. J. C. & Cheftel. H., 1984.** *In Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, Vol 1, Chapitre 1*, Techniques et Documentation Lavoisier, Paris, pp 6-22 ; 303-332.
- Cheftel J. C., Cheftel H. & Besancon P., 1983.** *In Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, vol 2*. Techniques et Documentation Lavoisier, Paris, pp 167-198, 201-204, 210.
- Chevalier A., 1946.** Le karité ou arbre à beurre. Oléagineux, p.4. In Les oléagineux dans les pays d'Afrique occidentale associés au marché commun ; I la production, le commerce et la transformation des produits. *Editions Champion*, Paris, pp 1-109.
- Chirife J. & Iglesias H. A., 1978.** Equations for fitting water sorption isotherms of foods. Part I. A review. *Journal of Food Technology*, 13, 159-174.
- Chirife J., Boquet R., Ferro Fontan C. & Iglesias H. A., 1983.** A new model for describing the water sorption isotherm of food, *J Food Sci*, 48, 1382-1383.
- Chrastil J., 1982.** Solubility of Solids and Liquids in Supercritical Gases, *J Phys Chem*, 86 (15), 3016-3021.
- Chung D. S. & Pfost H. B., 1967.** Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products, *Transactions of the Am Soc Agric Eng*, paper No 66-821.
- CTFT (Centre Technique Forestier Tropicale), 1989.** Mémento du Forestier. “ Technique en Afrique ”, 3^e édition, Ministère Français de la Coopération, 565p.
- Cogburn R. R., 1985.** Rough rice storage. In B. O. Juliano (éds), *Rice: chemistry and technology*, American Association of Cereals Chemists, Minnesota 55121, 265-287.
- Danion A., 2004.** *Développement d'un réacteur à base de fibres optiques photocatalytiquement actives pour la dépollution de l'eau*, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, pp 41-42.
- D'Arcy R. L. & Watt I. C., 1981.** Water vapour sorption isotherms on Macromolecular substrates. In L. B. Rockland & G. F. Stewart (éds), *Water Activity. Influences on Food Quality*, Academic Press, New York, 111-142.
- Del Valle J. M., Rivera O., Mattea M., Ruetsch L., Daghero J. & Flores A., 2004.** Supercritical CO₂ processing of pretreated rosehip seeds: effect of process scale on oil extraction kinetics. *Journal of Supercritical Fluids*, 31, 159-167.
- Devani M. D, Shishoo J. C., Shal S. A. & Suhagia B. N., 1989.** Spectrophotometric method for microdetermination of nitrogen in Kjeldahl digest. *J.A.O.A.C.*, 72 (6), 953-956.
- Do Amaral Sobral P. J., Lebert A. & Bimbenet J-J., 1999.** Isothermes de désorption de la pomme de terre entre 40 et 70°C. *Sci. Aliments*, 19, 711-720.

- Dubois M., Gilles K. A., Hamilton J. K., Roberts P. A. & Smith F., 1956.** Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem*, 28, N°3, 350-356.
- Duke J. A. & Atchley A., 1986.** CRC handbook of proximate analysis tables of higher plants. Boca Raton, Florida, CRC press.
- Eggers R., 1996.** Supercritical fluid extraction (SFE) of oilseeds/lipids in natural products. In *W. King Jerry & R. Gary LIST (éds) Supercritical fluid technology in oil and lipid chemistry*, Chapter 3, AOCS PRESS, Champaign, Illinois, USA, pp 35-64.
- FAO/WHO (Food and Agriculture Organisation/World Health Organization), 1978.** Energy and protein requirements, WHO technical reports series, n° 522; FAO nutrition meeting reporting series, n° 52.
- Feinberg M., Favier J. C. & Ireland-Ripert J., 1987.** Répertoire général des aliments, Tome 1: Table de composition des corps gras, *Technique et Documentation Lavoisier/CIQUAL-REGAL/INRA*, Paris.
- Francis A. W., 1954.** Ternary systems of liquids carbon dioxide. *J Phys Chem*, 58, 1099-1114.
- Gabas A. L., Menegalli F. C & Telis-Romero J., 1999.** Effect of chemical pre-treatment on the physical properties of dehydrated grapes, *Drying Technol*, 17 (6), 1215-1226.
- Garcia A., Alvarez A., Canete R., Sovova H. & Kucera J., 1994.** Supercritical extraction of lipids from sugar cane by products. In G. Brunner & M. Perrut (éds), *Proceedings of the 3rd international symposium on supercritical fluids, 17-18-19 october*, pp 383-387.
- Gely. M. C. & Giner. S. A., 2000.** Water – corn equilibrium : temperature dependency of the G.AB model parameters and calculation of the heat of sorption, *Drying Technol.*, 18 (7), 1449-1464.
- Goodrun J. W., Kilgo M. K. & Santerre C. R., 1996.** Oilseed solubility and extraction modelling. In *W. King Jerry & R. Gary LIST (éds) Supercritical fluid technology in oil and lipid chemistry*, Chapter 5, AOCS PRESS, Champaign, Illinois, USA, pp 1-19.
- Harker F. R., Maindonald J., Murray S. H., Gunson F. A., Hallett I. C. & Walker S. B., 2002.** Sensory interpretation of instrumental measurements 1: texture of apple fruit, *Postharvest Biology and Technology*, 24, 225-239.
- Harris P. J. & Smith B. G., 2006.** Plant cell walls and cell-wall polysaccharides: structures, properties and uses in food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 41 (Supplement 2), 129–143.
- Hart J., 1964.** Hysteresis effects in mixtures of wheats taken from the same wheat but having different moisture content. *Cereal Chemistry*, 41, n° 5, 340-350.

<http://www.u-bourgogne.fr/GPAB/Enseign/tphall2006/TPcuisson2006.htm>, 2007 (consulté le 6 avril 2007). Page 1.

ILO (International Labour Organisation), 1984. Small scale maize milling. Technical memorandum N°7. Technologies series, Geneva 22. pp 39-45.

IRHO (Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux), 1967. Manuel de l'Huilerie de Palme, Nouvelle édition, 11, Square Pétrarque, Paris (XVI^e), pp 10-11.

Jiokap Nono Y. & Kapseu C., 1999. Problématique du traitement et de la distribution des fruits de l'aiélé (*Canarium Schweinfurthii* Engl.) au Cameroun, *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, Vol LXXVI, 21-26.

Kapchie Noutchogoué V., 2005. *les fruits de l'aiélé (Canarium Schweinfurthii Engl.) : recherche des causes de durcissement et conservation humide*, Thèse de Doctorat/Ph.D, ENSAI - Université de Ngaoundéré, Cameroun, 217p.

Kapchie Noutchogoué V., Tchiegang C., Kapseu C., Linder M. & Parmentier M., 2004. Qualités physico-chimiques des huiles des fruits des l'aiélé (*Canarium Schweinfurthii* Engl.) en fonction de quelques traitements de conservation, *Procédés Biologiques et Alimentaires*. <http://spip.refer.org/pbal/rubrique9.html>

Kapchie Noutchogoué V., Tchiegang C., Kapseu C., Piffaut B. & Parmentier M., 2005. Textural and biochemical Changes Associated with the Hardening Phenomenon in Aiele Fruit (*Canarium Schweinfurthii* Engl.), *J. Food Technol*, 3 (2), 143-148.

Kapseu C., 1998. Quelques propriétés physico-chimiques des huiles des oléagineux non conventionnels du Cameroun. *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, Vol LXXV, 295-298.

Kapseu C., Jiokap.Nono Y. & Parmentier M., 1999. Fruits d'aiélé (*Canarium Schweinfurthii* Engl.), olives d'Afrique sub-saharienne, *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, Vol LXXVI, 181-183.

Kapseu C., Jiokap Nono Y., Parmentier M., Dirand M. & Dellacherie J., 2001. Acides gras et triglycérides du beurre de karité du Cameroun, *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, Vol LXXVIII, 31-34.

Kapseu C., Parmentier M., Kayem G. J., Schuffenecker L. & Dirand M., 1996. Fatty acid and triglycerides of *Canarium Schweinfurthii* Engl. *International Tree Crops Journal*, 9, 77-86.

Karo G. B., Baïdi D. & Dramane S., 1988. La presse à karité. *Projet karité GTZ/DMA*, Bamako. 125p.

- Kassamba B., 1997.** Synthèse des techniques connues d'extraction et de conditionnement du beurre de karité au Burkina Faso, Rapport Final, Projet filière karité du CECI-IRSAT, Ouagadougou, 59p.
- Kaymak-Ertekin F. & Gedik A., 2004.** Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, 37, 429-438.
- Keey R B., 1978.** Introduction to industrial drying operations, first edition, Chapter 2, Pergamon press Ltd., Headington Hill Hall, England, pp 23-54.
- Kinsella J. E. & Fox P. F., sans date.** Water sorption by proteins: milk and whey proteins, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 24 (2), 99-100.
- Konopacka D. & Plochanski W. J., 2004.** Effect of storage conditions on the relationship between apple firmness and texture acceptability, *Postharvest Biology and Technology*, 32, 205-211.
- Labuza T. P., Tannenbaum S. R. & Karel M., 1970.** Water Content and Stability of Low-Moisture, and Intermédiaire-Moisture Foods, *Food Technology*, 24, 543-550.
- Ladurelle H., 1984.** Le beurre de karité, Mémoire de thèse de l'Université Scientifique et médicale de Grenoble, U.E.R. de pharmacie, 127p.
- Landrock A. H & Proctor B. E., 1951.** A new graphical Interpolation method for obtaining humidity equilibria data, with special reference to its role in food packaging studies, 11^{èmes} rencontres annuelles de l'IFT, 19 juin. New York, pp 332-337.
- Lang K. W., Mccune T. D. & Steinberg M. P., 1981.** A proximity equilibration cell for rapid determination of sorption isotherms, *J. Food Sci*, 46, 936-938.
- LE PETIT LAROUSSE ILLUSTRÉ, 2004.** Mots de la langue, Noms propres, Chronologie, Planches visuelles, *LAROUSSE*, 21, Rue du Montparnasse 75283 Paris Cedex, p 251.
- Lewicki Piotr P., 2000.** Raoult's law based food water sorption isotherm. *J. Food Eng.*, 43, 31-40.
- Lira C. T., 1996.** Thermodynamics of supercritical fluids with respect to lipid-containing systems. In *W. King Jerry & R. Gary LIST (éds) Supercritical fluid technology in oil and lipid chemistry*, Chapter 1, AOCS PRESS, Champaign, Illinois, USA, pp 1-19.
- Lomauro C. J., Bakshi A. S. & Labuza T. P., 1985.** Evaluation of food moisture isotherm equation, Part I. Fruit, vegetable and meat products, *Lebensmittel – Wissenschaft und Technologie*, 18, 111-117.
- Lovett P. N. C., 2004.** Research and development of premium quality shea butter for promotion in northern ghana – phase three, Technoserve Inc. Ghana, pp 21-22.

- Lowell S. & Shields J. E., 1984.** Powder surface area and porosity, second edition, Chapman and Hall Ltd, London, pp 7-13, 139-192.
- Maldangoï Y, Woin N. & Cathala M., 2003.** L'oignon camerounais, une filière fragile qui se développe dans Inter-Réseaux, CTA (Coopération Agricole et Rurale) (éditeur), Forum commerce des produits agricoles-pays, *ACP*, 1p.
- Maranz S., Wiesman Z. & Garti N., 2003.** Phénolic Constituents of shea (*Vitellaria paradoxa*) kernels, *J Agric Food Chem*, 51, 6268-6273.
- Martinez-Navarrete N. & Chiralt A., 1996.** Influence of roasting on the water sorption isotherms of nuts, *Food Sci Technol Int*, 2 (6), 399-404.
- Mbida Mindzie C., 1999.** L'aiélé (*Canarium schweinfurthii*) en Afrique Centrale: Histoire de la plante et les débuts de la domestication. In C. Kapseu & J. Kayem (éds), *Actes du séminaire international sur le séchage et la valorisation du karité et de l'aiélé. 1-3 décembre, Ngaoundéré, Cameroun*, pp 68-78.
- Mendes Camelo J., P., 2002.** Synthèse de Glycérides d'acides gras polyinsaturés n-3 par voie enzymatique en milieu supercritique, Mémoire de DEA, LTMP-ENSIC-INPL, Nancy, France, 103p.
- Mensier P., 1946.** Oléagineux coloniaux, lexiques des huiles végétales, Sociétés d'Édition Techniques Coloniales, Marseille, p 34-35.
- Mensier P. H., 1957.** Dictionnaire des huiles végétales, Edition Paul Chevalier, Paris, pp 108-110.
- Mizandjian J. L. & Amen J. C., 1987.** Procédés d'extraction par fluides supercritiques. In M. Perrut (coordinateur), *les Fluides Supercritiques, Actes du colloque de pont-a-mousson, 20-21 mai, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), France. Deuxième partie*, pp 215-216.
- Mizrach A., Flitsanov U., Akerman M. & Zauberman G., 2000.** Monitoring avocado softening in low-temperature storage using ultrasonic measurements, *Computers and Electronics in Agriculture*, 26, 199-207.
- Moreau C., 1996.** Les moisissures. In *Microbiologie alimentaire, Tome 1, Aspect microbiologique de la sécurité et de la qualité des aliments*, Partie 3, coordonnateurs C. Bourgeois, J. F. Mescle & J. Zucca. Technique et Documentation, Paris, pp 241-245.
- MSDA (Manuel Suisse des Denrées Alimentaires), 2005.** Graisses comestibles, Huiles comestibles et graisses émulsionnées, chapitre 7, 32p.
- Multon J. L., 1982.** Interactions entre l'eau et les constituants des grains et graines et produits dérivés. In *Conservation et Stockage des grains et graines et produits dérivés, Céréales*,

- oléagineux, protéagineux, aliments pour animaux*, Partie II, chapitre 4, coordonnateur J. L. Multon, Techniques et Documentation Lavoisier, Paris, pp 115-187.
- Murayama H., Katsumata T., Horiuchi O. & Fukushima T., 2002.** Relationship between fruit softening and cell wall polysaccharides in pears after different storage periods, *Postharvest Biology and Technology*, 26, 15-21.
- Nadeau J. P. & Puiggali J. R., 1995.** Séchage: Des processus physiques aux procédés industriels, Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, 307p.
- Nganhou J., 2000.** Séchage et qualité des produits agroalimentaires et du bois en zone tropicale, Mémoire présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à diriger les travaux de recherche, Université de Poitiers (France), pp 46-55.
- N'Gouro Sanogo, 1997.** Comment avoir du beurre de karité sans transpirer, *Le grenier*, N°04, pp 4-5.
- Nianogo A. J., Bougouma V. & Tapsoba B., 1997.** Les presses motorisées à karité au Burkina Faso, Rapport Final, Projet filière karité du CECI, Ouagadougou, 35p.
- Njoukam R., 1998a.** L'arbre aux fruits noirs : l'aiélé. *Le Flamboyant*, France, 46, pp 11-15.
- Njoukam R., 1998b.** Germination des semences et croissance de l'aiélé (*Canarium Schweinfurthii* Engl.) en plantation. In C. Kapseu & J. Kayem (éds), *Actes du 2^{ème} séminaire international sur la valorisation du safou et d'autres oléagineux non conventionnels, 3-5 décembre, Ngaoundéré, Cameroun*, pp 185-192.
- Njoukam R. & Peltier R., 2002.** L'aiélé (*Canarium Schweinfurthii* Engl.) : premier essai de plantation dans l'Ouest du Cameroun, *Fruits*, 57, 239-248.
- Noumi G. B., Ngameni E., Kapseu C. & Broto F., 2003.** Isothermes de désorption d'eau sur les pulpes des fruits de l'aiélé (*Canarium Schweinfurthii* Engl.). *Sci. Aliments*, 23, 264-272.
- Olaniyan A. M. & Oje K., 2002.** Some Aspects of the Mechanical Properties of Shea Nut, *Biosystems Engineering*, 81 (4), 413-420.
- Oluwole F. A., Aviara N. A. & Haque M. A., 2004.** Development and performance tests of a sheanut cracker, *Journal of Food Engineering*, 65, 117-123.
- OriginLab, 2005 (version 7.5).**
- Ozdemir M., Seyhan F. G., Ozdes Bodur A. & Onur Devres Y., 2000.** Effect of initial moisture content on the thin layer drying characteristics of halzenuts during roasting, *Drying Technol*, 18(7), 1465-1479.
- PAF (Projet d'Appui aux Filières Bio-Alimentaires), 1999.** La filière karité, Rapport Définitif, Sicarex, Ouagadougou, 71p.

- Palou E., Lopez-Malo A. & Argai A., 1997.** Effect of temperature on the moisture sorption isotherms of some cookies and corn snacks. *J. Food Eng.*, 35, 85-93.
- Pehaut Y., 1976.** Les oléagineux dans les pays d'Afrique occidentale associés au marché commun : la production, le commerce et la transformation des produits, Editions Champion, Paris, pp 1-109.
- Pellerin P., Camilli A. & Laloue, 1987.** Extraction au CO₂ supercritique des matières premières naturelles aromatiques. In M. Perrut (coordinateur) *les Fluides Supercritiques, Actes du colloque de pont-a-mousson, 20-21 mai 1987, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), France*, deuxième partie, pp 217-234.
- Perrin L., Ngyen Q. T., Clement R. & Neel J., 1996.** Sorption and diffusion of solvent vapours in poly(vinylalcohol) membranes of different crystallinity degrees. *Polym. Int.*, 39, 251-260.
- Perrut M., 1995.** Applications des fluides supercritiques. In F. Cansell & J-P. Petit (éds), *Fluides Supercritiques et Matériaux, Château du Thil, 71390 Saint-Boil, France*, pp 60-109.
- Peter S., 1996.** Supercritical fractionation of lipids. In W. King Jerry & R. Gary LIST (eds) *Supercritical fluid technology in oil and lipid chemistry*, Chapter 4, AOCS PRESS, Champaign, Illinois, USA, pp 65-80.
- Pouillot F., Dillow-Wilson A. K. & Eckert C. A., 1995.** Interactions moléculaires dans les fluides supercritiques. In F. Cansell & J-P. Petit (éds), *Fluides Supercritiques et Matériaux, Château du Thil, 71390 Saint-Boil, France*, pp 60-109.
- Rahman S., 1995.** Food Properties Handbook, chapter 1, CRC PRESS, New-York. <http://books.google.com/books?> pp 23-46 (Consulté le 30 juin 2006).
- Raponda-Walker A. & Sillans R., 1961.** Les plantes utiles au Gabon : essai d'inventaire et de la concordance des noms vernaculaires et scientifiques des plantes spontanées et introduites, Description des espèces, propriétés, utilisation économiques ethnographiques et artistiques, Editions Paul le Chevalier, 614p.
- Richon D., 1995.** Equilibres multiphasiques dans les fluides. In F. Cansell & J-P. Petit (éds), *Fluides Supercritiques et Matériaux, Château du Thil, 71390 Saint-Boil, France*, pp 17-59.
- Rizvi S. S. H., 1986.** Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. In M. A. RAO & S. S. H. RIZVI (eds), *Engineering Properties of Foods*, Chapter 2, Marcel Dekker, Inc, NewYork 10016, pp 140-164.

- Rossi M., 1996.** Supercritical fluid extraction of cocoa and cocoa products. In W. King Jerry & R. Gary LIST (eds), *Supercritical fluid technology in oil and lipid chemistry*, Chapter 10, AOCS PRESS, Champaign, Illinois, USA, pp 1-19.
- Royer F., 1999.** Extraction d'huile de Tournesol par CO₂ supercritique, Mémoire de DEA, EFS-LTS-ENSIC-INPL, Nancy, France, 78p.
- Salunkhe D. K & Desai B. B., 1986.** Post-harvest Biotechnology of Oilseeds. CRC Press Inc., Boca Raton, pages 204-205.
- Saravacos G. D., 1986.** Mass Transfer Properties of Foods. In Rao M. A. & Rizvi S. S. H. (eds), *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker, NewYork, Chapter 2, pp 114–117.
- Sarsavadia P. N, Sawhney R. L., Pangavhane D. R. & Singh S. P., 1999.** Drying behaviour of brined onion slices, *J. Food Eng*, 40, 114–117.
- Scheili P. & Schlenker W., 1994.** La teinture en gaz carbonique supercritique, une percée écologique, *L'industrie Textile*, N° 1250, 52-54.
- Sigma-plot pour Windows, 2004, version 9.01.**
- Silou T., Bitoungui J. P. & Mavah G., 1995.** Mesure du ramollissement naturel de la pulpe de safou par pénétrométrie, *Fruits*, 50, 375-378.
- SNV (Association Néerlandaise d'Assistance au Développement), 1991.** Manuel de karité, conservation et transformation. Koudougou, version provisoire, pp 1-62.
- Sopade P. A. & Koku I. T., 1989.** An assessment of the traditional methods of extraction of oil from sheanut *Butyrospermum Parkii* Kostchy and their effects on yield and consumer acceptability, *Annals of Borno*, 6(7), 231-236.
- Statgraphics for windows Plus 3.0 (1994 – 1997). Statistical Graphics Corp.**
- Statistica version 5.0 (Statsoft, Inc. 1984-1995).**
- Szczesniak A. S., 2002.** Texture is a sensory property, *Food Quality and Preference*, 13, 215-225.
- Talla A., 1999.** *Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des fruits tropicaux en vue de leur séchage, application à la banane, la mangue et la papaye.* Mémoire DEA, ENSP-Université de Yaoundé 1, pp 33-40, 56-63.
- Tano-Debrah K. & Ohta Y., 1994.** Enzyme - assisted aqueous extraction of fat from kernels of the shea tree, *Butyrospermum parkii*. *J.A.O.C.S.*, 9 (71), 979-983.
- Tchandjou Djoumbi M., 1999.** Utilisations traditionnelles et recettes à base des fruits de l'aiélé. In C. Kapseu et J. Kayem (éd), *Actes du Séminaire sur le séchage et la valorisation du karité et de l'aiélé, 1-3 décembre, Ngaoundéré, Cameroun*, pp 329-333.

- Tchankou L. C. B. 2001.** *Influence de l'humidité sur l'extraction du beurre des amandes des fruits de karité (Butyrospermum parkii (G. Don) Kotschy) et de l'huile de la pulpe des fruits de l'aiélé (Canarium schweinfurthii Engl.).* Mémoire de DEA en sciences alimentaires et nutrition, ENSAI - Université de Ngaoundéré, Cameroun, 67p.
- Tchatchou A., 1991.** *Clarification du beurre de karité,* Mémoire d'ingénieur de conception Agro-alimentaires, ENSIAAC-Centre Universitaire de Ngaoundéré, Cameroun, 65p.
- Tchiegang C., Kamga R. & Kapseu C., 1998.** African black olive (*Canarium Schweinfurthii Engl.*) : a novel ingredient for small scales traditional oil production. *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, 75, 565-567.
- Tchiégang C., Kapchie Noutchougoué V., Mbofung C. M. & Kapseu C., 2000.** Variation dans les caractéristiques physico-chimiques des fruits de l'aiélé (*Canarium schweinfurthii Engl.*) de différentes provenances du Cameroun, *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, Vol LXXVII, 537-542.
- Tchiégang C, Kapchie Noutchougoué V., Kapseu C. & Parmentier M., 2001.** Influence du temps, de la température et des conditions de stockage sur le ramollissement des fruits de l'aiélé (*Canarium Schweinfurthii Engl.*). *J. Food Eng*, 47, 63-68.
- Tchiégang C, Kapseu C, Tchatchouang Ngasop L & Parmentier M., 2002.** Etude de quelques paramètres physicochimiques des fruits ramollis de *Canarium Schweinfurthii Engl.* pendant la conservation dans différentes solutions acides. *Sci. aliments*, 22, 289-304.
- Tchiégang C., Tchankou Leudeu B. C. & Kapseu C., 2003.** Influence de l'humidité sur l'extraction et la qualité physico-chimique du beurre des amandes de karité (*Butyrospermum parkii G. Don Kotschy*) au cours du séchage, *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, Vol LXXX, 307-311.
- Tchiégang C., Kapchie Noutchougoué V., Kapseu C., Fanni J. & Parmentier M., 2004.** Activités enzymatiques de quelques pectinases au cours du durcissement de la pulpe des fruits de l'aiélé (*Canarium schweinfurthii Engl.*). *Actes du séminaire d'animation régional sur le management de la qualité dans l'industrie alimentaire, 12-14 mai, Chisinau (Moldavie)*, pp 232-240.
- Tchiégang C., Ngo Oum M., Aboubakar Dandjouma A. & Kapseu C., 2004.** Qualité et stabilité de l'huile extraite par pressage des amandes de *Ricinodendron heudelotii* (Bail.) Pierre ex Pax pendant la conservation à température ambiante, *J. Food Eng.*, 62, 69-77.
- Tchiégang C., Tchankou Leudeu B. C., Kapseu C., Fomethe A. & Parmentier M., 2004.** Influence of water content of the pulp on the extraction and the physicochemical properties of *Canarium schweinfurthii* oil, *Eur. J. Lipd Sci. Technol.*, 106, 613-620.

- Tchouamo I. R. & Simonet M., 1999.** Impact socio-économique de l'ailé dans les hautes terres de l'ouest du Cameroun. In C. Kapseu et J. Kayem (éds), *Actes du séminaire international sur le séchage et sur la valorisation du karité et de l'ailé. 1-3 Décembre. Ngaoundéré, Cameroun*, pp 229-242.
- Tchouamo I. R., Tchoumboue J., Simonet M. A. & Pinta J. Y., 2000.** La commercialisation des fruits de l'ailé (*Canarium Schweinfurthii* Engl.) dans les hautes terres de l'ouest du Cameroun, *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, Vol LXXVII.
- Terpend N. M., 1981.** La filière karité, pp 7-15. In Identification du karité dans la zone de l'Adamaoua (Cameroun) Rapport de stage, 03 juillet au 03 Août 1995, ENSAI, Ngaoundéré, 43p.
- Tsami E., 1991.** Net Isothermic Heat of Sorption in Dried Fruits. *Journal of Food Engineering*, 14, 327-335.
- UICPA (Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée), 1979.** Méthodes d'analyse des matières grasses, sixième édition. *International Digest of Health Legislation*, 46 (2), 214p.
- UNIFEM (Fonds de Développement des Nations Unies pour la Femme), 1997.** *Le karité l'or blanc des africaines*. Bureau régional de Dakar, Sénégal, 39p.
- Vallee G. & Barth D., 1997.** Supercritical carbon dioxide desorption of organics from activated carbon and zeolithe. In D. Barth, J. M. Blanchard & F. Cansell (éds), *Supercritical Fluids and Environment, 4th Meeting on Supercritical Fluids, 20-21 January, INSA-Villeurbanne, France*, pp 99-109.
- Vivien J. & Faure J. J., 1996.** Fruitiers sauvages d'Afrique: espèces du Cameroun. Coopération française, CTA 416 p.
- Vliet T. v., 2002.** On the relation between texture perception and fundamental mechanical parameters for liquids and time dependent solids, *Food Quality and Preference*, 13, 227-236.
- Von Maydel H. J., 1983.** Arbres et arbustes du sahel : leurs caractéristiques et leurs utilisations, *ESCHBORN*, pp 182-187.
- Waldron K.W., Parker M.L. & Smith A.C., 2003.** Plant Cell Walls and Food Quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Vol. 2, 101-119.
- Wang S, 1997.** Investigation and modelling of decaffeination from raw coffee beans with supercritical CO₂. In D. Barth, J. M. Blanchard & F. Cansell (éds), *Supercritical Fluids and Environment, 4th Meeting on Supercritical Fluids, 20-21 January, INSA-Villeurbanne, France*, pp 35-43.

- Wang N. & Brennan J. G., 1991.** Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *J. Food Eng.*, 14, 269-282.
- Watt. I. C., 1983.** The theory of water sorption by biological materials. In R. Jowitt (ed). *Physical properties of foods*, Chapter 3, Applied Science Publishers, London, pp 27-30.
- Wiemer H-J. & Altes F. W. K. 1989.** Small scale processing of oilfruit and oilseeds, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, p 16.
- Wolff, 1968.** Manuel d'analyse des corps gras, 519p., Azoulay, Paris.
- Womeni H. M., 2004.** *Identification et analyse des opérations critiques de préparation des fruits, graines et amandes de karité (Butyrospermum parkii (G. Don) Kotschy) : étude de leur influence sur la qualité du beurre.* Thèse de Doctorat/Ph.D, ENSAI - Université de Ngaoundéré, Cameroun, pages 70-77.
- Womeni H. M., Ndjouenkeu R., Tchatchueng J. B. & Kapseu C., 2000.** Effet de la conservation des fruits du karité par le froid sur la cinétique de séchage et la qualité de l'huile. In C. M. F. Mbofung & F-X. Etoa (éds), *Biosciences Proceedings*, 7, pp 147-154.
- Womeni H. M., Kamga R., Tchiégang C. & Kapseu C., 2002.** Extraction du beurre de karité : influence du séchage des amandes et de la technique d'extraction, *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, Vol LXXIX, 33-37.
- www.sheabutter.com (consulté le 15 novembre 2004).**

ANNEXES

ANNEXE 1 : Fiche d'enquête sur la conservation, la valorisation en huile des fruits de l'ailé

FICHE D'ENQUETE

Date :

**INVENTAIRE DES METHODES DE CONSERVATION, DE VALORISATION EN HUILE, ET
DES UTILISATIONS DE L'HUILE DES FRUITS DE *CANARIUM***

- 1) Noms et prénoms : _____
- 2) Sexe : Féminin ☐ Masculin ☐
- 3) Province d'origine : _____
- 4) Département d'origine : _____
- 5) Village (Arrondissement) : _____
- 6) Connaissez-vous les fruits de *Canarium* ? oui ☐ non ☐
- 6.1) En trouve t-on dans votre province (village) oui ☐ non ☐
Si oui, par quel nom est-il connu ? _____
- 6.2) Consommez-vous ce fruit ? oui ☐ non ☐
Si oui, comment ? (Décrivez) _____

- 6.3) Connaissez-vous d'autres usages ? oui ☐ non ☐
Si oui, lesquels ? _____
- 7) Quelles sont, d'après vous, les différentes techniques de récolte de *Canarium* ?

- 8) Après cueillette ou récolte des fruits sont-ils directement vendus ? oui ☐ non ☐
- 9) Comment gardez-vous les fruits achetés ? _____

- 9.1) Comment gardez-vous les fruits invendus ? _____

- 10) Connaissez-vous les méthodes de transformations des fruits de *Canarium* ? oui ☐ non ☐
Si oui, écrivez-les ? _____

- 11) Quelle est la durée de stockage des fruits crus ? _____
- 12) Quelle est la durée de stockage des fruits cuits ? _____
- 13) Avez-vous déjà entendu parler de l'huile de *Canarium* ? oui ☐ non ☐
- 14) Avez-vous déjà entendu parler des techniques de transformation en huile des fruits de *Canarium* ? oui ☐ non ☐
Si oui, décrivez-les SVP _____

- Si oui dans quel village ? _____
- 15) Avez-vous déjà utilisé cette huile ? oui ☐ non ☐
- 16) Quelles utilisations ? _____
- 17) Avez-vous apprécié ? oui ☐ non ☐
- 18) Avez-vous des remarques à faire quant à la conservation, la transformation en huile et la qualité que vous faites des fruits de *Canarium* ?

Merci de votre participation

ANNEXE 2

Tableau 1: Caractéristiques morphologiques des graines et amandes du karité (nombre de graines: 100)

Longueur des graines (cm)	Diamètre moyen des graines (cm)	Masse de la graine (g)	Longueur des amandes (cm)	Diamètre moyen des amandes (cm)	Masse des amandes (g)	Epaisseur de la coque (cm)	Masse de la coque (g)	masse amande/masse graine (en %)
3,508	3,101	16,868	3,311	2,726	13,533	0,128	4,777	80,228
3,542	3,669	25,411	3,156	2,916	18,568	0,105	5,923	73,070
3,569	3,011	17,215	3,345	3,245	13,088	0,123	3,787	76,026
3,613	3,412	19,155	3,878	2,623	13,784	0,143	5,699	71,960
3,654	2,348	13,106	3,213	2,096	8,655	0,134	4,426	66,038
3,657	2,968	19,982	3,106	2,438	13,123	0,134	5,675	65,674
3,666	2,639	17,789	3,133	2,177	11,468	0,134	3,877	64,466
3,676	3,177	16,696	3,415	2,656	13,646	0,127	3,422	81,732
3,746	3,011	18,049	3,208	2,207	12,689	0,106	4,300	70,303
3,752	3,056	24,786	3,001	2,468	17,877	0,095	5,54	72,125
3,758	3,100	14,99	3,156	3,155	11,100	0,110	3,099	74,049
3,763	3,599	22,251	3,256	2,817	14,226	0,107	5,835	63,934
3,766	3,026	16,467	3,198	3,080	11,990	0,109	3,412	72,812
3,767	3,199	16,949	3,401	2,764	13,485	0,106	3,424	79,562
3,768	3,041	18,025	3,400	2,760	11,725	0,075	5,412	65,048
3,769	3,059	21,654	3,406	2,141	14,724	0,121	5,702	67,996
3,786	3,028	21,469	3,250	2,650	14,416	0,104	6,156	67,147
3,788	2,429	13,057	3,239	2,112	8,874	0,141	4,411	67,963
3,823	2,695	18,472	3,336	2,241	12,524	0,131	3,656	67,799
3,868	2,523	13,409	3,252	2,057	8,965	0,157	4,435	66,858
3,869	3,712	18,764	3,550	3,120	12,156	0,086	5,569	64,783
3,875	3,100	15,824	3,213	3,120	12,821	0,109	3,110	81,022
3,883	3,756	19,112	3,345	2,517	13,358	0,104	5,222	69,893
3,887	3,11	14,956	3,465	2,366	11,657	0,109	3,104	77,941
3,947	3,000	20,689	3,100	2,417	14,568	0,103	5,543	70,414
3,95	3,181	17,452	3,287	2,565	14,846	0,148	3,454	85,067
3,968	2,947	18,287	3,407	2,157	12,475	0,104	4,312	68,217
3,987	2,986	19,122	3,868	2,995	14,013	0,144	5,149	73,282
3,988	2,543	22,764	3,561	2,069	15,657	0,125	5,468	68,779
4,018	3,546	21,578	3,750	2,856	16,352	0,132	4,267	75,780
4,024	3,015	15,986	3,158	2,432	12,776	0,100	3,872	79,919
4,038	3,063	14,594	3,523	2,406	11,106	0,108	3,471	76,099
4,058	3,100	15,112	3,125	2,213	11,887	0,148	3,454	78,659
4,078	3,026	16,858	3,308	2,653	13,077	0,097	3,764	77,571
4,085	3,446	26,111	3,816	3,333	19,751	0,13	5,665	75,642
4,096	3,102	14,215	3,356	2,408	12,101	0,108	3,479	85,128
4,112	3,142	16,59	3,878	2,611	13,587	0,107	3,012	81,898
4,112	3,125	19,022	3,653	3,466	14,121	0,125	3,876	74,235
4,112	3,141	17,413	3,581	2,543	13,874	0,118	3,867	79,676
4,115	3,511	16,565	3,856	3,578	12,999	0,102	4,210	78,472
4,121	3,211	16,811	3,686	3,566	13,588	0,124	3,313	80,828
4,121	2,897	15,867	3,456	2,423	13,138	0,107	4,575	82,800
4,124	3,214	16,499	3,269	2,454	13,557	0,106	3,244	82,168

4,124	3,126	16,256	3,785	2,345	12,432	0,106	3,764	76,476
4,124	2,437	16,116	3,313	2,717	12,675	0,142	5,145	78,648
4,156	3,243	17,788	3,782	2,458	11,521	0,146	6,711	64,768
4,163	3,961	18,936	3,745	2,667	13,793	0,118	4,999	72,840
4,195	3,197	21,385	3,534	2,547	14,996	0,134	5,560	70,123
4,211	3,143	16,284	3,225	2,225	11,831	0,122	3,215	72,654
4,212	3,089	15,308	3,744	2,479	12,358	0,105	3,078	80,728
4,213	3,562	21,115	3,261	3,211	15,972	0,108	5,202	75,642
4,218	3,282	21,385	3,561	2,667	15,799	0,135	5,575	73,878
4,221	3,223	18,899	3,617	2,694	13,553	0,117	5,335	71,712
4,221	3,215	17,695	3,418	2,456	12,537	0,118	5,245	70,850
4,250	3,502	17,501	3,678	3,715	13,517	0,103	4,020	77,235
4,251	3,546	15,122	3,445	3,339	12,112	0,108	3,174	80,095
4,262	3,145	16,413	3,453	2,567	12,471	0,098	3,687	75,982
4,263	3,326	17,787	3,444	3,311	13,688	0,134	4,110	76,955
4,268	3,879	21,655	3,870	3,252	16,167	0,135	4,157	74,657
4,314	3,652	20,981	3,262	3,210	16,146	0,112	3,825	76,953
4,332	3,342	25,745	4,352	3,118	19,513	0,121	5,568	75,793
4,344	3,456	22,315	3,950	3,878	17,656	0,121	4,813	79,121
4,350	3,154	19,239	3,950	2,506	13,662	0,105	4,435	71,012
4,375	3,026	21,986	3,880	2,878	16,568	0,107	5,678	75,357
4,398	3,618	20,983	3,656	2,742	15,468	0,094	5,412	73,716
4,433	3,654	16,879	3,656	3,676	13,789	0,120	3,142	81,693
4,466	3,646	30,981	4,876	3,767	22,104	0,128	7,969	71,346
4,479	3,000	22,578	3,920	2,947	16,948	0,105	5,632	75,064
4,513	4,153	21,112	3,216	3,099	17,250	0,107	3,453	81,707
4,565	3,560	30,099	4,786	3,576	22,090	0,138	7,655	73,391
4,575	3,444	31,282	4,988	3,898	21,738	0,119	7,999	69,490
4,585	3,855	29,898	4,566	3,453	21,112	0,143	8,150	70,613
4,653	3,254	17,996	3,784	2,550	11,514	0,145	6,459	63,980
4,653	3,198	30,142	4,125	3,107	23,094	0,134	7,344	76,617
4,655	3,566	30,106	4,687	3,614	21,212	0,119	7,983	70,457
4,656	3,521	30,064	3,785	3,100	21,325	0,110	8,2125	70,932
4,678	3,568	30,468	4,898	4,678	21,718	0,143	8,879	71,281
4,679	3,728	21,467	3,786	2,869	16,341	0,127	5,900	76,121
4,685	3,678	31,053	4,446	3,251	20,354	0,134	9,236	65,546
4,733	3,232	30,191	4,332	3,110	22,643	0,140	6,858	74,999
4,755	2,959	30,821	4,896	3,769	22,83	0,108	8,187	74,072
4,756	3,761	25,878	4,576	3,215	21,417	0,112	4,701	82,761
4,769	3,341	21,279	3,687	2,986	16,431	0,119	4,867	77,216
4,775	3,284	30,186	4,215	3,118	22,743	0,143	7,214	75,342
4,785	3,111	29,252	3,867	3,431	21,567	0,111	8,779	73,728
4,788	2,988	29,212	3,768	3,143	21,645	0,143	7,687	74,096
4,812	3,265	30,213	4,512	3,114	23,156	0,142	8,221	76,642
4,855	3,395	30,195	4,304	3,138	22,755	0,148	7,373	75,360
4,856	3,876	30,195	4,851	3,521	21,543	0,117	8,653	71,346
4,857	3,678	31,465	4,157	3,150	22,579	0,112	7,654	71,759
4,859	3,721	30,064	3,895	3,130	21,675	0,102	8,341	72,096
4,865	3,671	26,124	4,695	3,126	21,456	0,117	4,402	82,131
4,873	4,011	28,094	4,321	3,215	22,262	0,114	5,879	79,241
4,878	3,634	30,178	4,268	2,968	21,756	0,115	8,954	72,092

4,878	2,879	30,064	3,687	3,431	21,447	0,121	7,844	71,337
4,943	3,786	30,164	4,512	3,112	20,253	0,108	8,544	67,142
4,955	3,544	32,423	4,138	3,03	23,315	0,132	7,484	71,908
4,960	3,498	30,254	4,207	3,096	22,412	0,104	8,224	74,079
4,960	3,875	28,965	4,150	3,274	20,880	0,102	6,764	72,087
4,976	3,811	19,669	3,885	2,698	16,143	0,143	3,989	82,073

Tableau 2: Caractéristiques morphologiques des fruits de l'aiélé (nombre de fruits : 100)

Longueur des fruits (cm)	Diamètre moyen des fruits (cm)	Masse du fruit (g)	Longueur du noyau (cm)	Diamètre moyen du noyau (cm)	Masse du noyau (g)	Epaisseur de la pulpe (cm)	Masse de la pulpe (g)	Masse de la pulpe/masse fruit (en %)
2,897	1,512	4,946	2,752	1,194	2,320	0,318	2,506	50,667
2,980	1,747	5,572	2,832	1,204	2,382	0,395	3,098	55,599
2,876	1,604	4,413	2,765	1,186	2,177	0,326	2,200	49,852
2,857	1,677	4,255	2,705	1,204	2,196	0,297	2,027	47,638
2,617	1,684	3,927	2,479	1,173	2,082	0,321	1,798	45,785
2,969	1,774	5,628	2,758	1,216	2,517	0,449	3,065	54,459
3,064	1,825	5,644	2,92	1,219	2,396	0,360	3,197	56,644
3,013	1,688	5,216	2,87	1,212	2,279	0,322	2,892	55,444
2,790	1,701	4,768	2,648	1,175	2,243	0,315	2,463	51,656
2,940	1,630	4,279	2,764	1,177	2,277	0,348	1,935	45,220
2,974	1,654	4,460	2,817	1,153	2,055	0,306	2,352	52,735
2,773	1,557	4,164	2,600	1,218	2,144	0,266	1,987	47,718
2,808	1,661	4,415	2,604	1,169	1,961	0,363	2,357	53,386
2,929	1,769	5,400	2,745	1,256	2,632	0,291	2,707	50,129
2,905	1,599	4,835	2,632	1,159	2,152	0,320	2,638	54,560
2,758	1,625	3,975	2,586	1,205	2,205	0,236	1,736	43,672
2,824	1,683	5,192	2,662	1,182	2,173	0,325	2,954	56,895
2,609	1,639	4,158	2,474	1,224	2,217	0,290	1,903	45,767
3,545	2,032	8,558	3,244	1,472	3,661	0,346	4,643	54,253
3,196	1,596	5,751	2,866	1,266	2,539	0,33	3,153	54,825
2,878	1,798	5,579	2,714	1,262	2,604	0,363	2,927	52,464
3,027	1,578	4,17	2,84	1,152	2,098	0,284	1,993	47,793
3,330	1,915	7,169	3,076	1,395	3,145	0,358	3,961	55,251
2,839	1,608	4,692	2,674	1,157	2,387	0,214	2,245	47,847
3,216	2,007	7,555	3,067	1,33	3,295	0,248	3,911	51,767
2,959	1,682	4,336	2,773	1,244	2,315	0,310	1,989	45,871
2,998	1,689	5,074	2,745	1,21	2,427	0,298	2,618	51,596
2,797	1,657	4,486	2,670	1,225	2,273	0,294	2,177	48,528
3,120	1,580	4,581	2,967	1,167	2,201	0,293	2,331	50,884
2,660	1,723	4,406	2,485	1,303	2,273	0,321	2,097	47,594
3,055	1,787	5,214	2,848	1,278	2,493	0,333	2,675	51,304
2,881	1,522	3,690	2,775	1,131	1,939	0,260	1,717	46,531
3,065	1,724	5,013	2,868	1,227	2,445	0,343	2,533	50,528
3,203	1,823	6,055	2,975	1,27	2,601	0,362	3,389	55,970
2,669	1,619	3,871	2,529	1,167	1,961	0,288	1,884	48,669
3,241	1,964	7,510	3,001	1,373	3,110	0,365	4,339	57,776
2,702	1,462	3,489	2,634	1,136	1,724	0,290	1,722	49,355
2,743	1,590	3,714	2,59	1,215	2,132	0,277	1,550	41,733
2,692	1,691	4,634	2,523	1,197	2,212	0,336	2,391	51,596
2,909	1,739	5,481	2,754	1,211	2,45	0,300	2,976	54,296

2,967	1,659	4,287	2,793	1,159	2,296	0,284	1,960	45,719
3,260	1,810	6,026	3,047	1,423	3,271	0,300	2,716	45,071
2,772	1,661	4,432	2,647	1,223	2,313	0,288	2,064	46,570
3,388	1,750	7,261	3,079	1,357	3,316	0,321	3,877	53,394
3,415	1,735	6,112	3,118	1,298	2,664	0,324	3,389	55,448
2,841	1,716	4,892	2,629	1,281	2,494	0,333	2,363	48,303
3,001	1,611	4,622	2,843	1,186	2,179	0,343	2,406	52,055
2,843	1,691	4,691	2,657	1,260	2,423	0,286	2,213	47,175
2,815	1,818	5,895	2,675	1,365	2,687	0,333	3,179	53,927
2,873	1,565	4,251	2,718	1,214	2,282	0,255	1,93	45,401
3,000	1,758	5,560	2,888	1,35	2,679	0,348	2,836	51,007
2,928	1,754	5,110	2,789	1,345	2,776	0,339	2,302	45,048
2,608	1,74	4,420	2,465	1,222	2,216	0,255	2,165	48,981
2,912	1,607	4,355	2,734	1,294	2,442	0,308	1,886	43,306
2,849	1,572	4,016	2,679	1,247	2,173	0,289	1,814	45,169
2,844	1,641	4,250	2,757	1,325	2,424	0,290	1,804	42,447
3,036	1,693	4,816	2,966	1,219	2,381	0,310	2,378	49,377
3,247	1,810	5,919	2,998	1,329	2,602	0,353	3,244	54,806
3,320	1,816	6,746	3,024	1,308	2,916	0,328	3,765	55,810
2,946	1,700	4,886	2,759	1,292	2,512	0,344	3,515	71,940
3,119	1,672	5,358	2,898	1,256	2,450	0,297	2,866	53,490
3,123	1,649	5,659	2,875	1,259	2,418	0,350	3,184	56,264
2,930	1,650	4,549	2,716	1,217	2,285	0,323	2,241	49,263
2,832	1,702	4,283	2,619	1,285	2,413	0,285	1,829	42,703
3,946	1,775	7,397	3,713	1,395	4,375	0,329	2,910	39,340
3,387	1,843	6,840	3,377	1,409	3,933	0,253	2,865	41,885
2,930	1,711	4,986	2,828	1,315	2,621	0,291	2,328	46,690
3,008	1,647	4,571	2,808	1,256	2,247	0,311	2,290	50,098
2,751	1,543	3,901	2,614	1,200	2,218	0,222	1,644	42,143
2,882	1,696	5,210	2,716	1,196	2,056	0,316	3,106	59,616
2,946	1,593	4,345	2,744	1,134	1,990	0,328	2,310	53,164
2,853	1,691	4,889	2,696	1,255	2,209	0,311	2,629	53,773
2,747	1,606	3,912	2,606	1,141	1,872	0,266	2,010	51,380
2,642	1,617	4,204	2,464	1,164	2,042	0,250	2,130	50,666
2,832	1,696	4,429	2,672	1,241	2,407	0,262	1,995	45,044
2,961	1,634	4,272	2,763	1,181	2,255	0,249	1,98	46,348
2,674	1,529	3,861	2,466	1,053	1,672	0,265	2,143	55,503
2,745	1,711	4,550	2,573	1,270	2,461	0,244	2,054	45,142
2,837	1,743	5,292	2,605	1,225	2,463	0,260	2,771	52,362
2,820	1,591	4,106	2,695	1,253	2,156	0,234	1,912	46,566
3,891	1,808	8,276	3,754	1,454	4,724	0,271	3,513	42,448
2,873	1,777	5,704	2,696	1,260	2,654	0,274	3,997	70,073
4,064	1,860	8,230	3,905	1,451	4,735	0,254	3,446	41,871
2,902	1,583	4,536	2,715	1,241	2,212	0,260	2,275	50,154
2,764	1,655	4,932	2,644	1,230	2,279	0,298	2,614	53,001
3,336	1,894	6,770	3,017	1,286	2,988	0,290	3,715	54,874
2,997	1,513	4,280	2,802	1,161	2,198	0,255	2,111	49,322
3,153	1,740	5,635	2,915	1,289	2,517	0,305	3,059	54,285
3,704	1,730	6,326	3,618	1,315	3,744	0,237	2,564	40,531
3,438	1,858	7,18	3,226	1,418	3,936	0,27	3,187	44,387
2,993	1,724	5,173	2,797	1,265	2,287	0,35	2,842	54,939

3,063	1,647	4,877	2,919	1,211	2,464	0,273	2,373	48,656
3,198	1,746	6,077	2,957	1,271	2,605	0,251	3,431	56,458
2,920	1,611	4,826	2,761	1,183	2,113	0,362	2,676	55,449
2,685	1,549	3,738	2,564	1,138	1,882	0,267	1,821	48,715
3,168	1,856	6,268	2,948	1,279	2,828	0,349	3,397	54,195
2,708	1,640	4,225	2,509	1,180	2,253	0,279	1,929	45,656
2,754	1,625	4,337	2,625	1,142	1,986	0,246	2,301	53,055
3,005	1,496	3,728	2,769	1,182	2,063	0,266	1,627	43,642
3,622	1,890	7,821	3,484	1,406	4,149	0,225	3,625	46,349

ANNEXE 3 : Etude des corrélations

Les coefficients de corrélation entre les propriétés morphologiques des graines des fruits du karité et des fruits de l'aiélé sont, respectivement, présentés aux tableaux 1 et 2.

a) Karité

Le tableau 1 présente une corrélation positive significative à $p < 0,05$ entre les différents paramètres, sauf entre l'épaisseur de la coque et tous les autres paramètres, ainsi qu'entre l'épaisseur et la masse de la coque. On a la corrélation la plus importante entre la masse des graines et celles des amandes. Ce résultat indique qu'il faut plus se fonder sur la masse des graines que sur leur longueur pour espérer obtenir davantage d'amandes.

Tableau 1 : Corrélations des paramètres physiques des amandes des fruits du karité

	Masse (graine)	Longueur (graine)	Diamètre (graine)	Diamètre (amande)	Longueur (amande)	Masse (amande)	Epaisseur (coque)	Masse (coque)
Masse (graine)		0,74*	0,47*	0,58*	0,76*	0,97*	0,12 ^{ns}	0,88*
Longueur (graine)			0,51*	0,52*	0,74*	0,78*	0,11 ^{ns}	0,63*
Diamètre (graine)				0,54*	0,47*	0,51*	-0,15 ^{ns}	0,30*
Diamètre (amande)					0,65*	0,62*	0,02 ^{ns}	0,45*
Longueur (amande)						0,78*	0,20 ^{ns}	0,68*
Masse (amande)							0,12 ^{ns}	0,79*
Epaisseur (coque)								0,18 ^{ns}
Masse (coque)								

* indique une corrélation significative entre les paramètres à $p < 0,05$; ns = non significatif

b) Aiélé

A partir du tableau 2 on peut remarquer qu'il n'existe pas de corrélation significative ($p < 0,05$) entre l'épaisseur de la pulpe et la longueur des fruits, le diamètre, la longueur et la masse du noyau. Par contre, il existe bien une corrélation positive significative ($p < 0,05$) entre les autres paramètres des fruits. La corrélation la plus haute étant celles de la longueur du noyau et la longueur du fruit, suivie de la masse du noyau et sa longueur. La masse et le diamètre des fruits interpréteraient mieux les fruits charnus que leur longueur.

Tableau 2 : Corrélations des paramètres physiques des fruits de l'aiélé

	Masse (fruit)	Longueur (fruit)	Diamètre (fruit)	Diamètre (noyau)	Longueur (noyau)	Masse (noyau)	Masse (pulpe)	Epaisseur (pulpe)
Masse (fruit)		0,85*	0,85*	0,81*	0,82*	0,89*	0,89*	0,20*
Longueur (fruit)			0,58*	0,71*	0,98*	0,88*	0,65*	0,07 ^{ns}
Diamètre (fruit)				0,76*	0,55*	0,71*	0,80*	0,28*
Diamètre (noyau)					0,70*	0,86*	0,62*	0,10 ^{ns}
Longueur (noyau)						0,90*	0,58*	0,01 ^{ns}
Masse (noyau)							0,62*	-0,04 ^{ns}
Masse (pulpe)								0,37*
Epaisseur (pulpe)								

* indique une corrélation significative entre les paramètres à $p < 0,05$; ns = non significatif

ANNEXE 4

Tableau 1: Valeurs brutes de calcul de teneur en eau des fruits frais

M (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Teneur en eau (%)	Moyenne TE (%)	Ecart-type TE (%)
Aiélé					
2,39	9,61	5,64	55,03	55,21	0,19
2,39	12,48	6,90	55,25		
2,38	10,69	6,08	55,46		
2,40	12,38	6,88	55,10		
Karité					
2,40	11,70	6,00	61,33	61,56	0,23
2,40	10,92	5,67	61,62		
2,38	11,60	5,90	61,85		
2,41	11,41	5,88	61,45		

M est la masse de la capsule vide, M₁ est la masse de la capsule contenant la prise d'essai avant étuvage, M₂ est la masse de la capsule contenant la prise d'essai après étuvage.

Tableau 3: Valeurs brutes de calcul de teneur en lipides

M ₁ (g)	M ₀ (g)	M ₂ (g)	S en %	Moyenne (%)	SEcart-type S (%)	MS	Moyenne partielle H (%)	Moyenne H (%)	Ecartype H (%)
Aiélé									
189,29	187,41	5,29	35,53	35,23	0,35	82,57	43,04	42,67	0,42
190,47	188,21	6,49	34,85				42,21		
193,68	190,26	9,69	35,30				42,76		
Karité									
212,02	208,86	10,02	31,54	31,68	0,13	61,07	51,64	51,86	0,21
243,83	239,12	14,82	31,79				52,06		
249,38	242,92	20,38	31,70				51,90		

$$S = ((M_1 - M_0) / M_2) * 100 \text{ où}$$

M₁ est la masse du ballon contenant la matière grasse après étuvage

M₀ est la masse du ballon vide

M₂ est la masse de la prise d'essai

Tableau 4: Valeurs brutes de calcul de teneur en cendres

M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	C(%)	Moyenne	Ecart-type
Aiélé					
17,05	18,72	17,13	4,67	4,66	0,07
17,00	18,82	17,08	4,73		
17,49	19,42	17,58	4,59		
Karité					
15,44	18,52	15,61	5,47	5,34	0,14
15,66	18,34	15,80	5,34		
15,66	18,69	15,81	5,20		

M₁ : la masse en gramme de la capsule vide ; M₂: la masse de la capsule + la masse de la prise d'essai séchée à 105°C à l'étuve ; M₃: la masse de la capsule contenant le résidu après incinération.

Tableau 5: Valeurs brutes de calcul de teneur en protéines

Q	m	100 - Hr (%)	Qr	6,25 x Qr x 10 ⁻⁶ (%)
Aiélé				
2,71	0,11	97,63	664879,15	4,16
Karité				
3,92	0,10	96,69	982223,35	6,14

Tableau 6: Valeurs des densités optiques obtenues pour l'étalonnage de la solution d'azote

Numéro des tubes	1	2	3	4	5	6
Densité optique à 412 nm	0	0,045	0,134	0,179	0,268	0,313

Tableau 7: Valeurs brutes de calcul de teneur en sucres totaux

Q'	Vt	V	m	100 - Hr	Qr' (%)
Aiélé					
86,470	50	0,050	0,500	78,884	21,923
Karité					
65,605	50	0,050	0,500	36,258	36,188

Tableau 8: Valeurs des densités optiques obtenues pour l'étalonnage de la solution de glucose

Numéro des tubes	1	2	3	4	5	6
Densité optique à 485 nm	0	0,206	0,419	0,464	0,697	0,915

ANNEXE 5 : Valeurs expérimentales brutes et points des courbes pour l'adsorption et la désorption

Tableau 1 : Valeurs expérimentales brutes et points des courbes pour l'adsorption et la désorption pour le karité

25°C				35°C				45°C				55°C			
T (°C)	Aw	Masse (%) sorption	Masse (%) desorption	T (°C)	Aw	Masse (%) sorption	Masse (%) desorption	T (°C)	Aw	Masse (%) sorption	Masse (%) desorption	T (°C)	Aw	Masse (%) sorption	Masse (%) desorption
	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
0,6	0,2	0,6	0,85	9,5	0,21	0,48	0,67	16,8	0,2	0,38	0,53	25	0,2	0,31	0,43
10,5	0,4	1,05	1,5	19	0,39	0,84	1,18	28,3	0,4	0,68	0,92	37	0,4	0,55	0,73
16,7	0,6	2,2	2,8	26,4	0,61	1,76	2,27	35,7	0,6	1,42	1,85	44,8	0,6	1,15	1,52
21,3	0,8	5,1	5,6	31,1	0,8	4,03	4,45	40,7	0,8	3,27	3,55	49,9	0,78	2,67	2,92
24,2	0,95	9,15	9,15	34,1	0,95	7,31	7,31	44	0,95	5,9	5,9	53,9	0,95	4,8	4,8

T : température ; Aw : activité de l'eau

Tableau 2 : Valeurs expérimentales brutes et points des courbes pour l'adsorption et la désorption pour l'aiélé

25°C				35°C				45°C				55°C			
T (°C)	Aw	Masse (%) sorption	Masse (%) desorption	T (°C)	Aw	Masse (%) sorption	Masse (%) desorption	T (°C)	Aw	Masse (%) sorption	Masse (%) desorption	T (°C)	Aw	Masse (%) sorption	Masse (%) desorption
	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
0,6	0,2	0,96	1,15	9,5	0,21	0,74	0,89	16,8	0,2	0,57	0,65	25	0,2	0,42	0,44
11	0,41	1,68	2,1	19	0,39	1,3	1,56	28,3	0,4	1,02	1,12	37	0,4	0,77	0,79
17	0,61	3,52	4,2	26,6	0,62	2,73	3,14	35,5	0,6	2,13	2,24	44,8	0,6	1,62	1,63
21	0,78	8,16	8,9	31,1	0,8	6,24	6,56	40,7	0,8	4,9	4,95	50,4	0,8	3,81	3,83
24,2	0,95	14,64	14,64	34,1	0,95	11,33	11,33	44	0,95	8,85	8,85	53,9	0,95	6,82	6,82

T : température ; Aw : activité de l'eau

ANNEXE 6 : Isothermes d'adsorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé à différentes températures

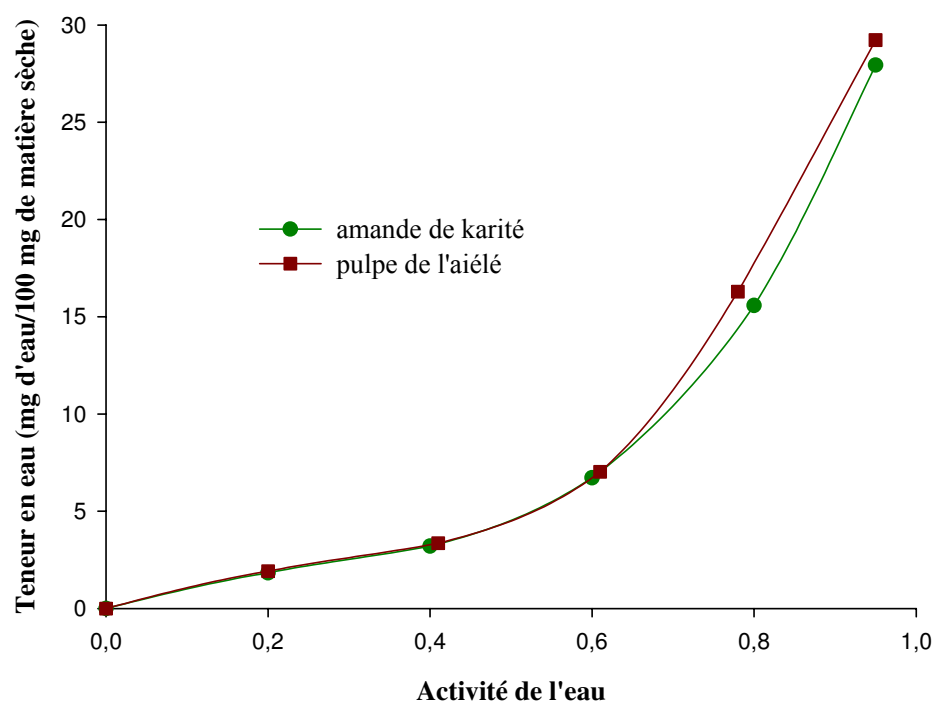


Figure 1 : Isothermes d'adsorption de l'amande de karité et la pulpe de l'aiélé à 25°C

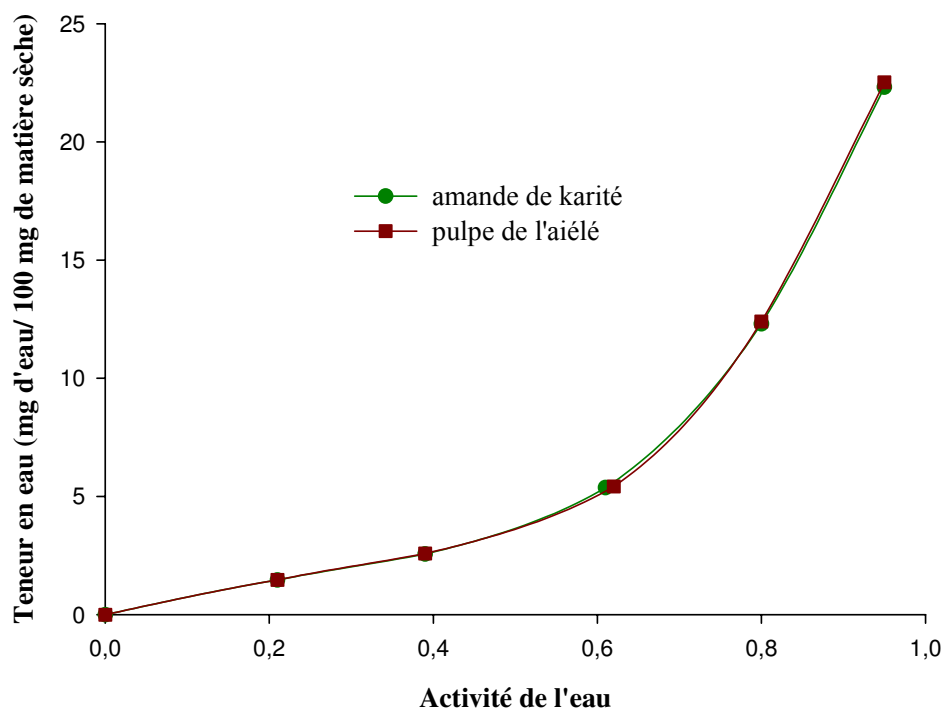


Figure 2 : Isothermes d'adsorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'aiélé à 35°C

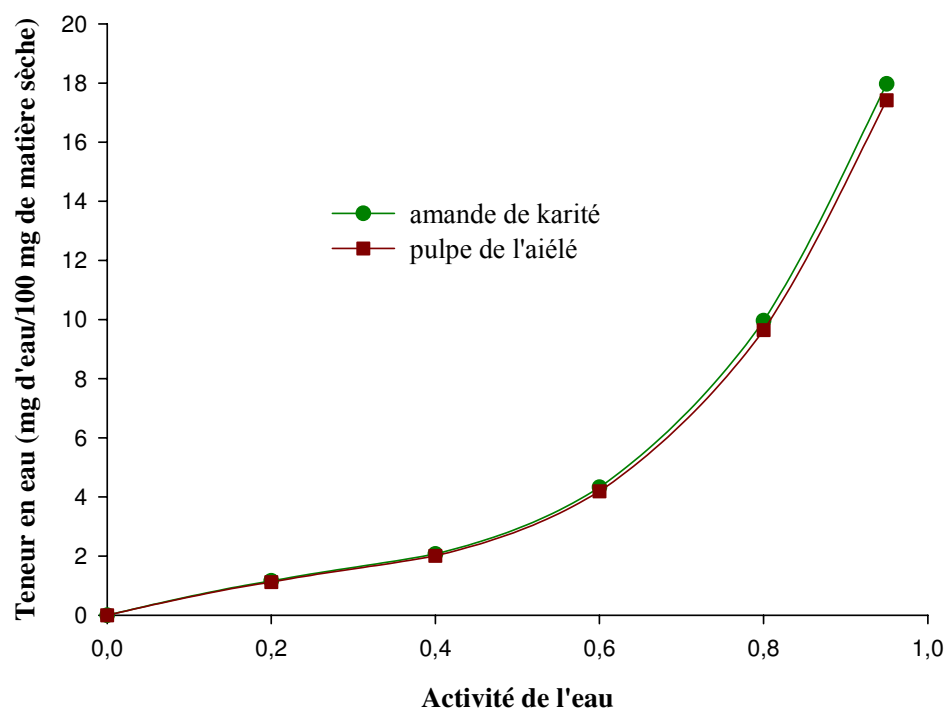


Figure 3 : Isothermes d'adsorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'ailé à 45°C

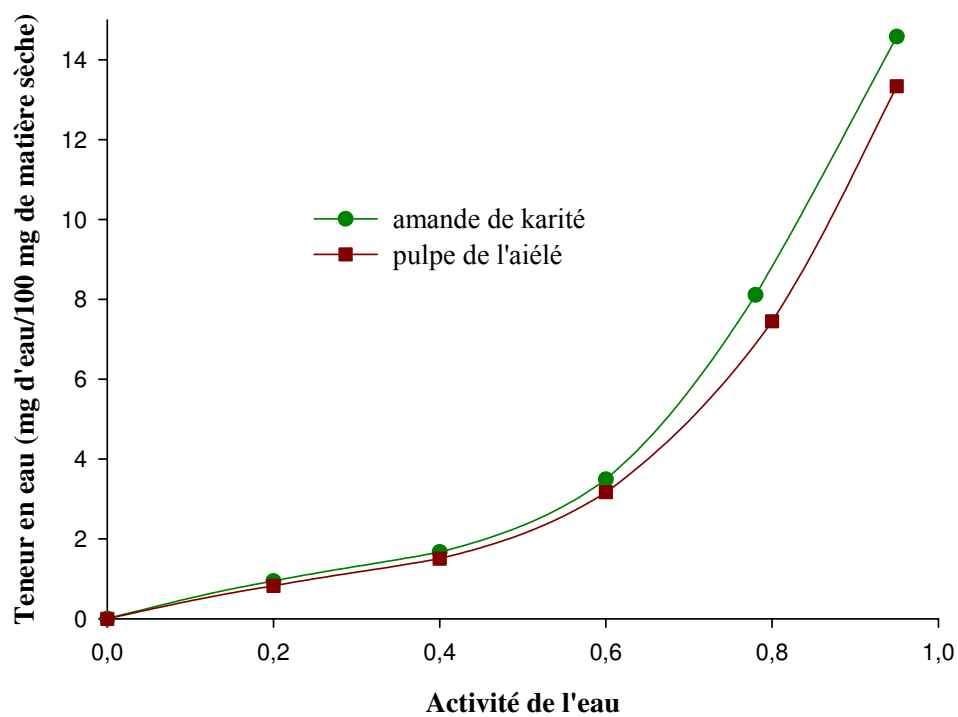


Figure 4 : Isothermes d'adsorption de l'amande de karité et de la pulpe de l'ailé à 55°C

ANNEXE 7 : Isothermes de sorption théorique et expérimentale du karité et de l'aiélé

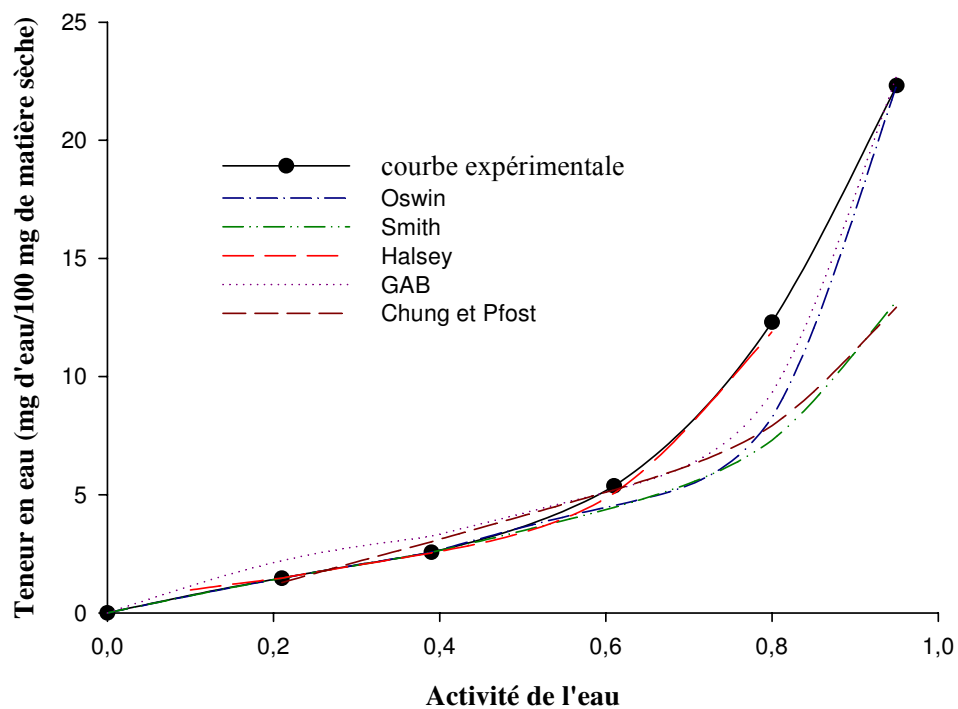


Figure 1: Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 35°C

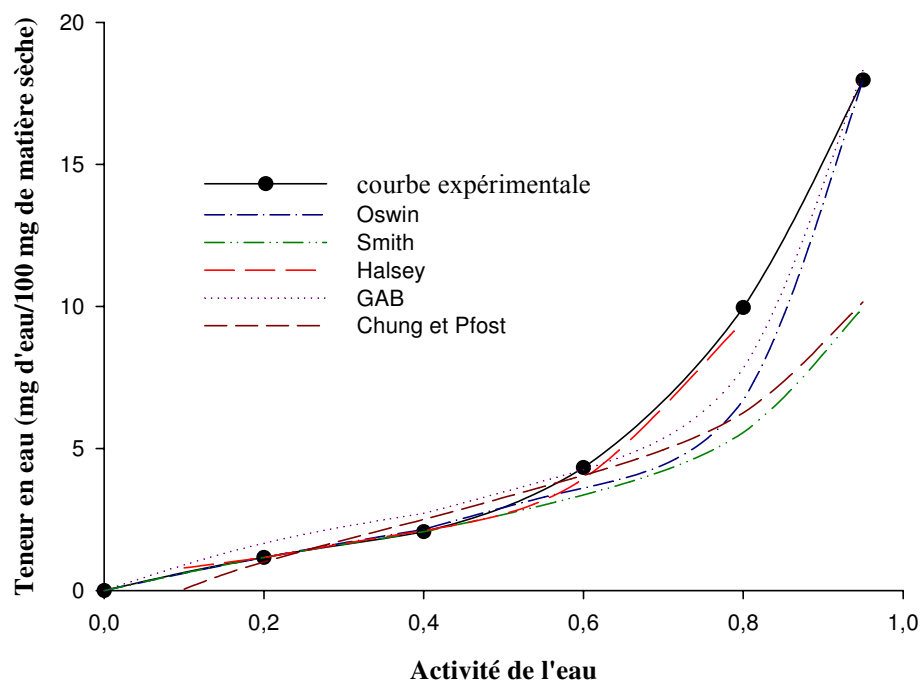


Figure 2: Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 45°C

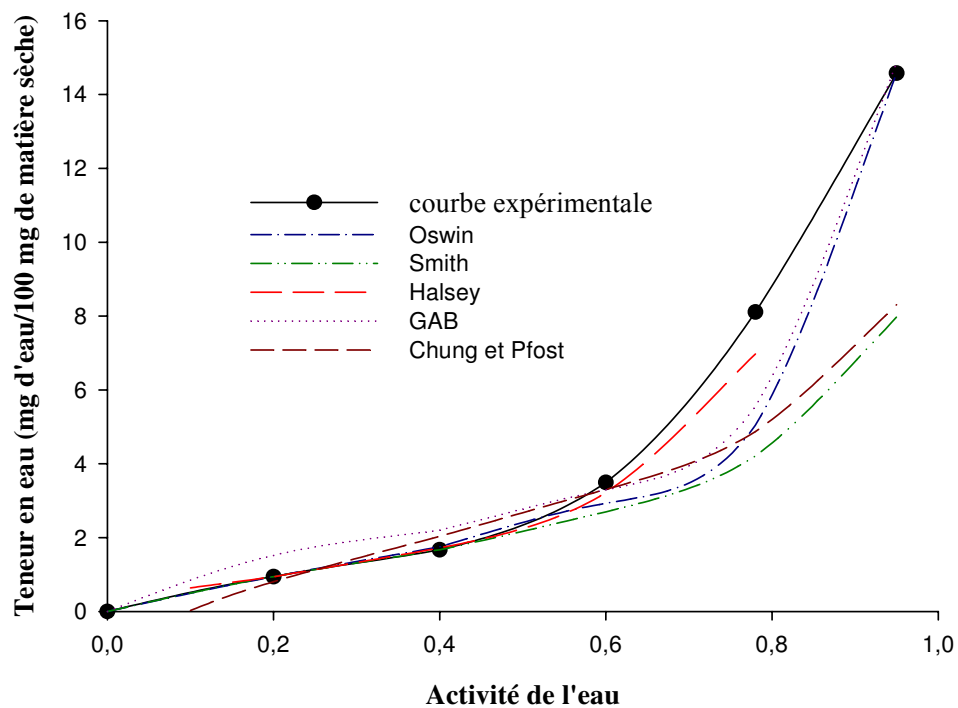


Figure 3: Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 55°C

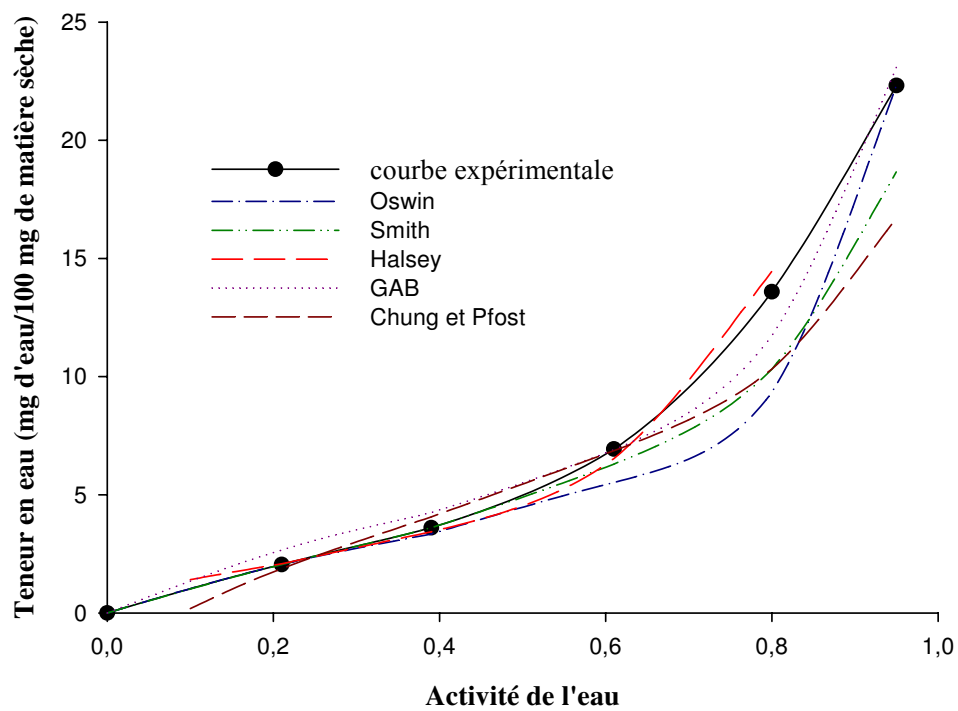


Figure 4: Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 35°C

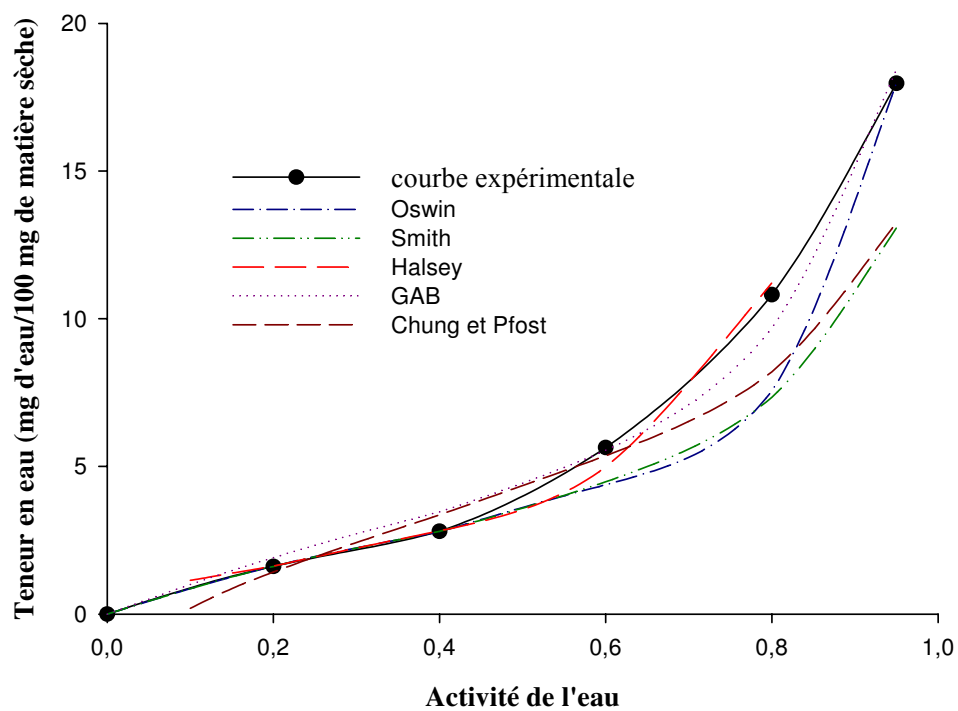


Figure 5: Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 45°C

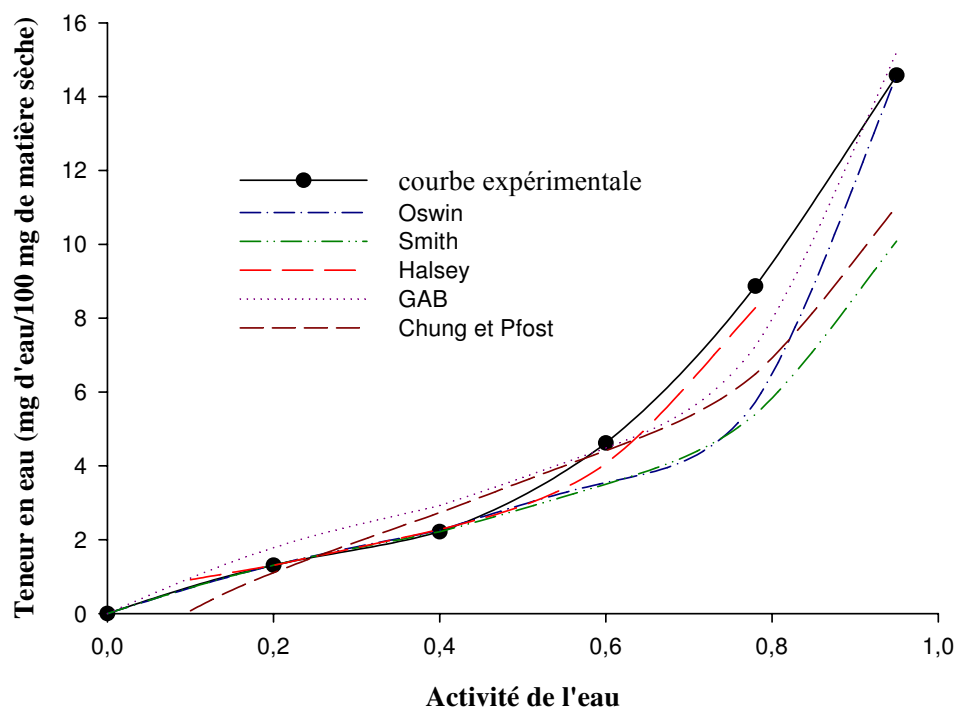


Figure 6: Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de l'amande de karité à 55°C

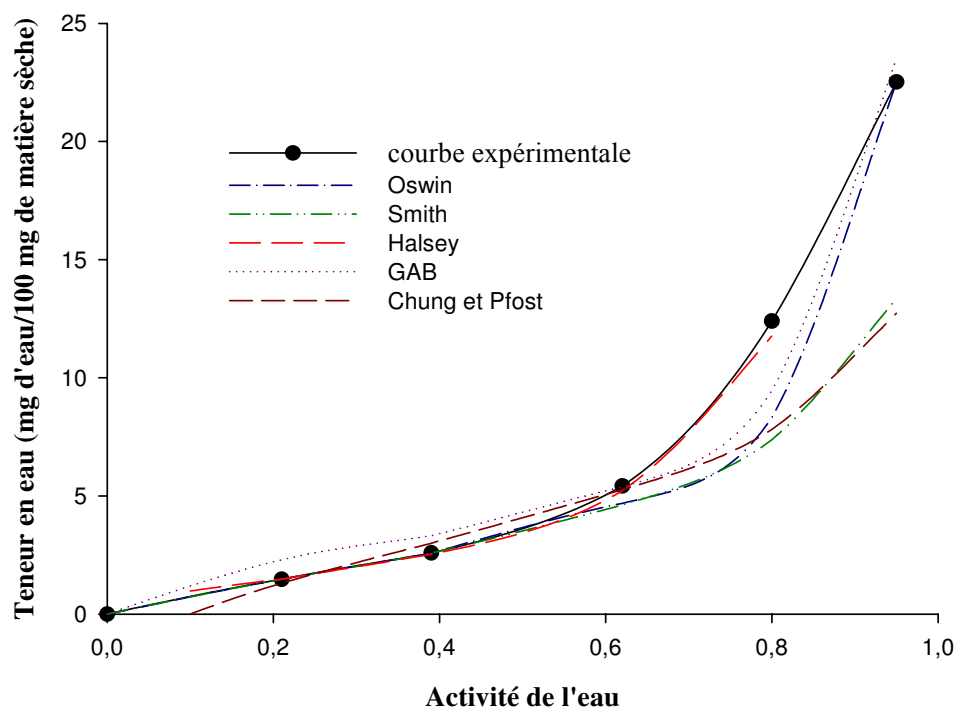


Figure 7: Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 35°C

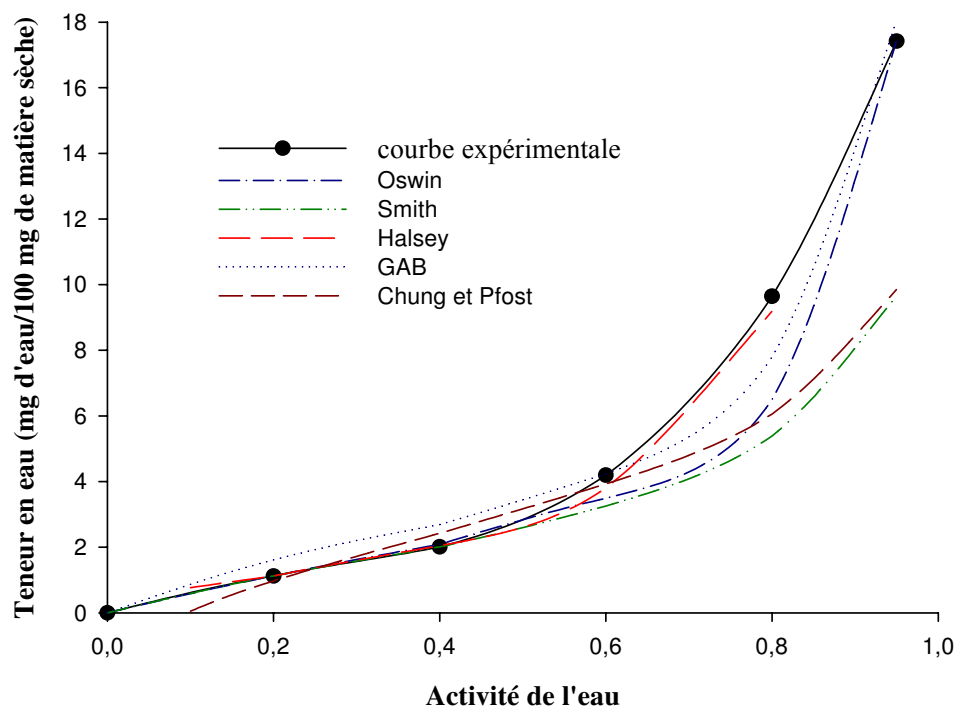


Figure 8: Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 45°C

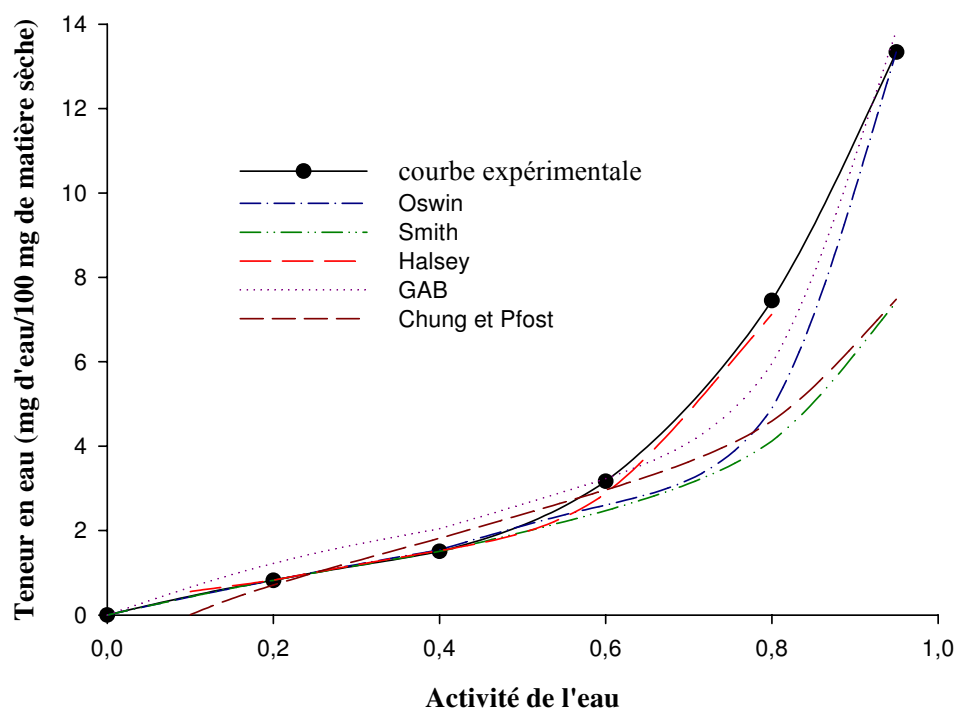


Figure 9: Les isothermes d'adsorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 55°C

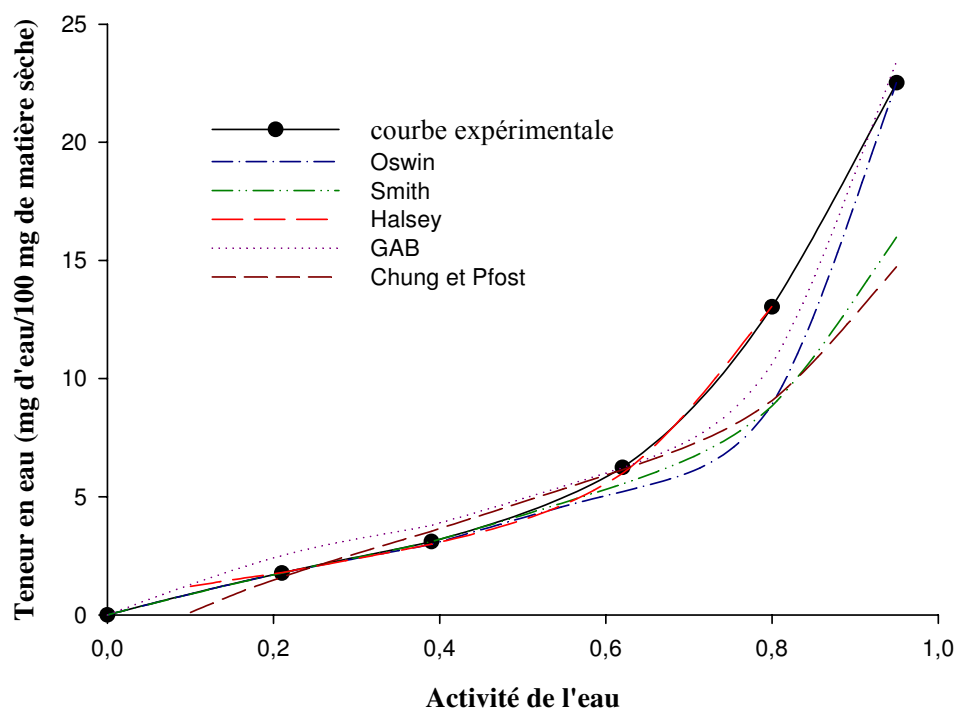


Figure 10: Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 35°C

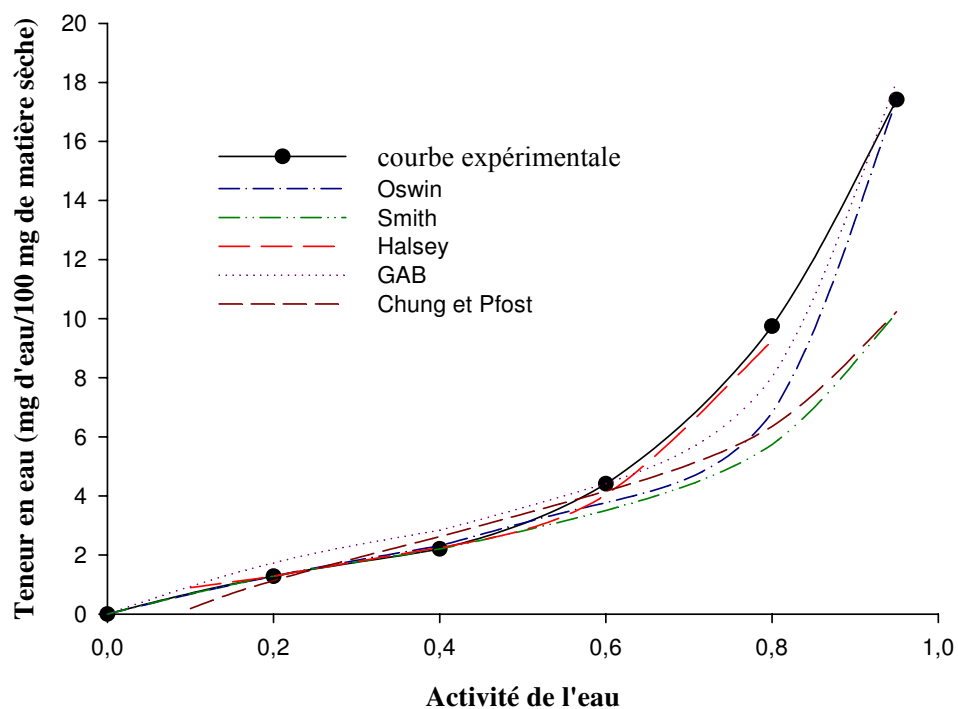


Figure 11: Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 45°C

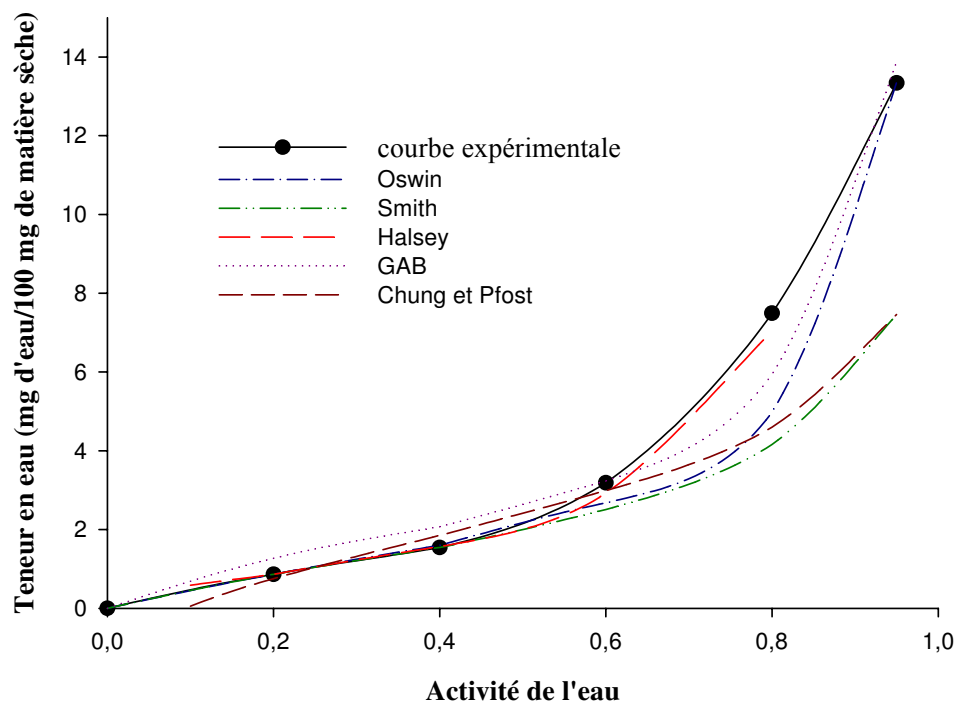


Figure 12: Les isothermes de désorption expérimentale et théorique de la pulpe de l'aiélé à 55°C

ANNEXE 8 : Courbes de $-\ln(A_w)$ en fonction de $1/T$ pour le calcul des chaleurs de sorption

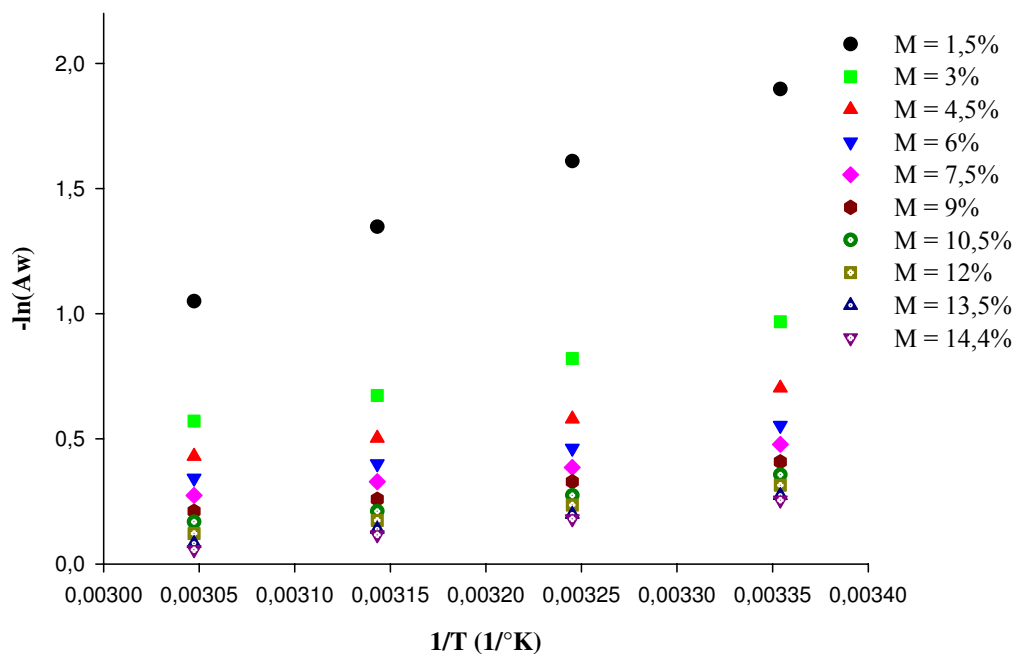


Figure 1: Courbes de $-\ln(A_w)$ en fonction de $1/T$ pour le calcul de la chaleur d'adsorption de l'amande de karité

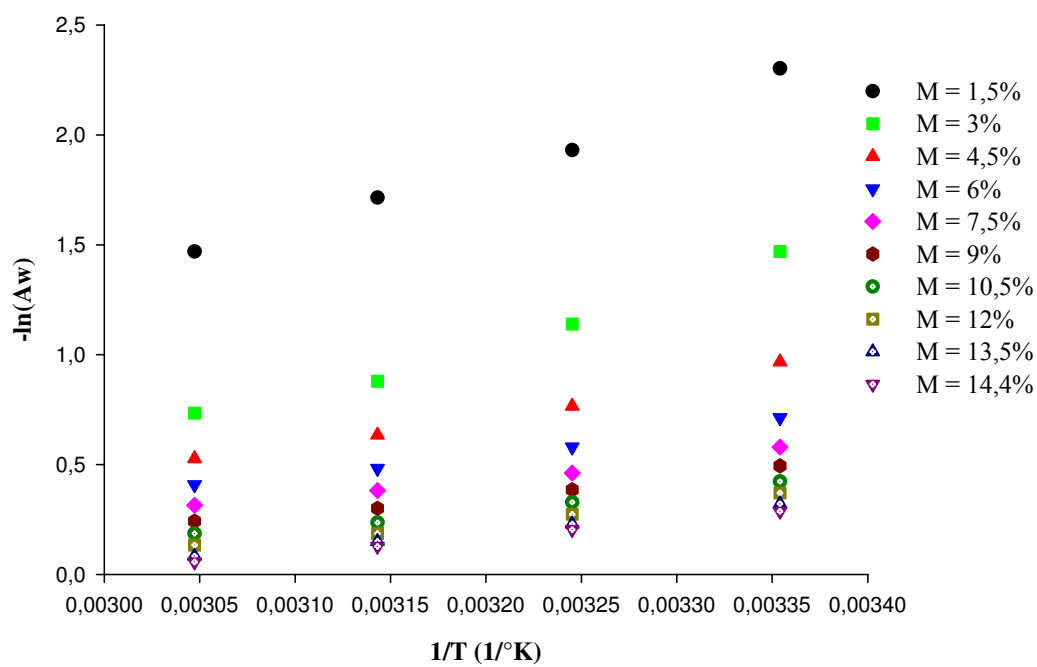


Figure 2: Courbes de $-\ln(A_w)$ en fonction de $1/T$ pour le calcul de la chaleur de désorption de l'amande de karité

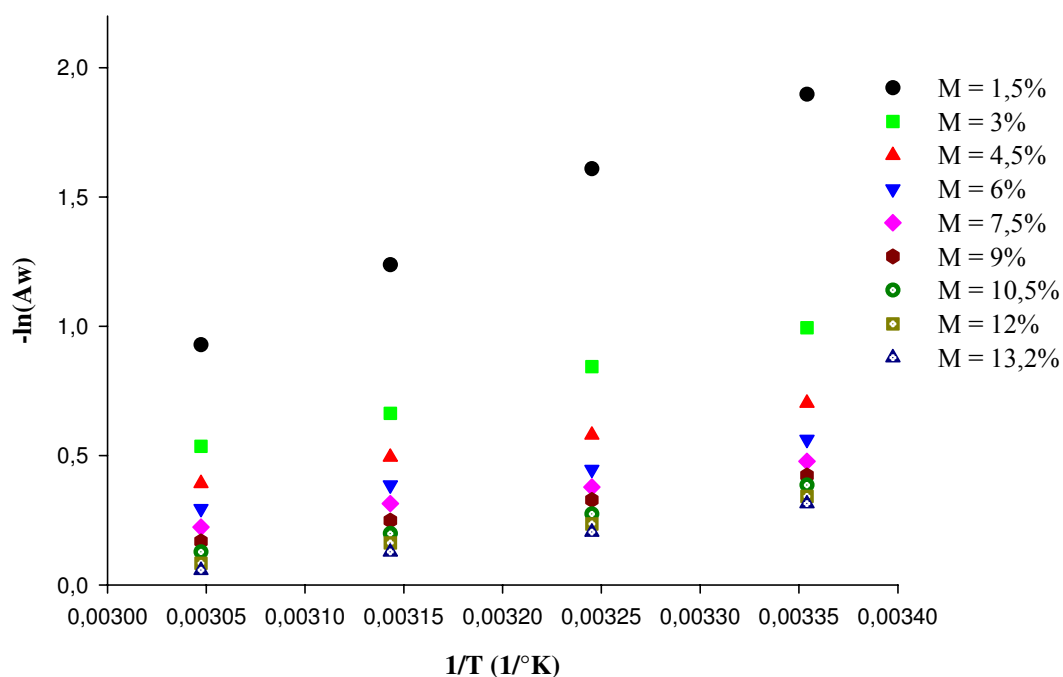


Figure 3: Courbes de $-\ln(A_w)$ en fonction de $1/T$ pour le calcul de la chaleur d'adsorption de la pulpe de l'aiélé

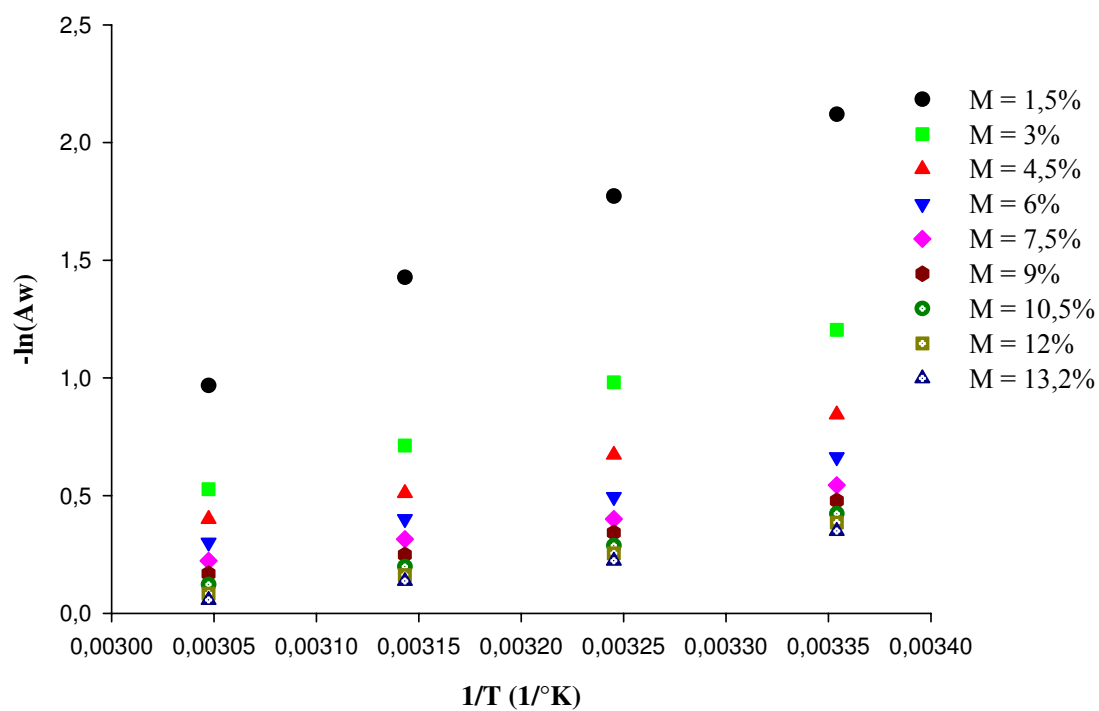


Figure 4: Courbes de $-\ln(A_w)$ en fonction de $1/T$ pour le calcul de la chaleur de désorption de la pulpe de l'aiélé

ANNEXE 9 : Valeurs estimées du nombre de sites d'adsorption (n), de la constante C et de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) et des constantes K et B en adsorption de l'amande de karité

Tableau 1 : Valeurs estimées du nombre de sites d'adsorption (n), de la constante C et de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q)

T (°C)	n		C		Q (cal/mol)		T (°C)	n		C		Q (cal/mol)	
	Ads	Dés	Ads	Dés	Ads	Dés		Ads	Dés	Ads	Dés	Ads	Dés
25	3,03	3,52	1,51	3,31	244,39	708,60	45	3,02	3,46	3,43	2,23	779,42	508,41
35	3,01	3,47	4,30	3,15	892,51	703,27	55	3,01	3,44	4,98	3,16	1046,73	749,77

Ads : adsorption ; Dés : désorption

Tableau 2 : Valeurs estimées des constantes K et B en adsorption

T (°C)	a	m	k	k ₁	b	b ₁	K	B	T (°C)	a	m	k	k ₁	b	b ₁	K	B
25	0,20	1,83	1,60	3,25			5,20		45	0,20	1,16	0,77	2,16			1,67	
	0,40	3,21	2,80	1,22			3,42			0,40	2,07	1,38	0,81			1,11	
	0,60	6,72	5,86	0,54	0,17	0,25	3,18	0,42		0,60	4,33	2,88	0,36	0,17	0,25	1,04	0,42
	0,80	15,57	13,59	0,20			2,76			0,80	9,96	6,62	0,13			0,89	
	0,95	27,94	24,38	0,04			1,04			0,95	17,97	11,95	0,03			0,34	
35	0,21	1,47	0,91	1,82			1,65		55	0,20	0,94	0,55	1,79			0,99	
	0,39	2,56	1,58	0,75			1,19			0,40	1,67	0,98	0,67			0,66	
	0,61	5,37	3,31	0,31	0,17	0,25	1,02	0,42		0,60	3,49	2,05	0,30	0,17	0,25	0,61	0,42
	0,80	12,30	7,58	0,12			0,91			0,78	8,11	4,76	0,13			0,60	
	0,95	22,31	13,76	0,03			0,35			0,95	14,58	8,55	0,02			0,20	

Les tableaux 3 et 4 présentent des exemples de valeurs de Q en adsorption et désorption dans les conditions d'activité de l'eau constante. A température et activité de l'eau constantes, la teneur en eau en désorption qui est supérieure à celle en adsorption donne également une énergie de surface supérieure à celle d'adsorption. Q augmente avec la teneur en eau et la température, mais avec la diminution de K. Par ailleurs, quelque soit le sens de sorption, Q augmente avec l'augmentation de la teneur en eau.

D'autre part, A teneur en eau et température constantes (tableaux 5 et 6), Q est toujours supérieure dans le sens de la désorption. On observe aussi que quelque soit le sens de sorption, Q est d'autant plus élevée que l'on se rapproche des faibles activités de l'eau.

Tableau 3 : Valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) en adsorption et en désorption en condition isobare

T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q	T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q
25	0,20	1,83	2,60	5,20	0,25	0,50	0,25	45	0,20	1,16	1,61	1,67	0,78	1,03	0,25
	0,20	3,21	4,58	5,20	0,65	0,90	0,25		0,20	2,07	2,80	1,67	1,22	1,45	0,23
	0,20	6,72	8,55	5,20	1,17	1,34	0,17		0,20	4,33	5,64	1,67	1,78	1,98	0,20
	0,20	15,57	17,10	5,20	1,77	1,84	0,07		0,20	9,96	10,81	1,67	2,42	2,48	0,06
	0,20	27,94	27,94	5,20	2,19	2,19	0,00		0,20	17,97	17,97	1,67	2,86	2,86	0,00
35	0,21	1,47	2,05	1,65	0,90	1,14	0,24	55	0,20	0,94	1,31	0,99	1,05	1,31	0,26
	0,21	2,56	3,60	1,65	1,30	1,55	0,25		0,20	1,67	2,22	0,99	1,50	1,72	0,22
	0,21	5,37	6,93	1,65	1,85	2,04	0,19		0,20	3,49	4,62	0,99	2,07	2,29	0,22
	0,21	12,30	13,58	1,65	2,46	2,53	0,07		0,20	8,11	8,87	0,99	2,73	2,80	0,07
	0,21	22,31	22,31	1,65	2,89	2,89	0,00		0,20	14,58	14,58	0,99	3,19	3,19	0,00

Diff Q = Q_{dés} - Q_{ads} en kcal/mol

Tableau 4 : Valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) en adsorption et en désorption en condition isobare

T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q	T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q
25	0,20	1,83	2,60	3,42	0,54	0,79	0,25	45	0,20	1,16	1,61	1,11	1,09	1,34	0,25
	0,20	3,21	4,58	3,42	0,95	1,20	0,25		0,20	2,07	2,80	1,11	1,53	1,76	0,23
	0,20	6,72	8,55	3,42	1,47	1,64	0,17		0,20	4,33	5,64	1,11	2,09	2,29	0,20
	0,20	15,57	17,10	3,42	2,07	2,14	0,07		0,20	9,96	10,81	1,11	2,72	2,78	0,06
	0,20	27,94	27,94	3,42	2,49	2,49	0,00		0,20	17,97	17,97	1,11	3,17	3,17	0,00
35	0,21	1,47	2,05	1,19	1,14	1,38	0,24	55	0,20	0,94	1,31	0,66	1,36	1,62	0,26
	0,21	2,56	3,60	1,19	1,54	1,79	0,25		0,20	1,67	2,22	0,66	1,82	2,04	0,22
	0,21	5,37	6,93	1,19	2,08	2,27	0,19		0,20	3,49	4,62	0,66	2,39	2,61	0,22
	0,21	12,30	13,58	1,19	2,69	2,76	0,07		0,20	8,11	8,87	0,66	3,05	3,12	0,07
	0,21	22,31	22,31	1,19	3,13	3,13	0,00		0,20	14,58	14,58	0,66	3,51	3,51	0,00

Diff Q = Q_{dés} - Q_{ads} en kcal/mol

Tableau 5 : Valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) en adsorption et en désorption en condition isostère

T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q	T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q
25	0,20	1,83	2,60	5,20	0,25	0,50	0,25	45	0,20	1,16	1,61	1,67	0,78	1,03	0,25
	0,40	1,83	2,60	5,20	-0,46	-0,21	0,25		0,40	1,16	1,61	1,67	0,03	0,28	0,25
	0,60	1,83	2,60	5,20	-1,03	-0,78	0,25		0,60	1,16	1,61	1,67	-0,58	-0,33	0,25
	0,80	1,83	2,60	5,20	-1,73	-1,48	0,25		0,80	1,16	1,61	1,67	-1,33	-1,08	0,25
	0,95	1,83	2,60	5,20	-2,85	-2,60	0,25		0,95	1,16	1,61	1,67	-2,52	-2,27	0,25
35	0,21	1,47	2,05	1,65	0,89	1,14	0,24	55	0,20	0,94	1,31	0,99	1,05	1,31	0,26
	0,39	1,47	2,05	1,65	0,25	0,49	0,24		0,40	0,94	1,31	0,99	0,28	0,54	0,26
	0,61	1,47	2,05	1,65	-0,41	-0,17	0,24		0,60	0,94	1,31	0,99	-0,36	-0,10	0,26
	0,80	1,47	2,05	1,65	-1,10	-0,86	0,24		0,78	0,94	1,31	0,99	-1,03	-0,77	0,26
	0,95	1,47	2,05	1,65	-2,25	-2,01	0,24		0,95	0,94	1,31	0,99	-2,35	-2,09	0,26

Diff Q = Q_{dés} - Q_{ads} en kcal/mol

Tableau 6 : Valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) en adsorption et en désorption en condition isostère

T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q	T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q
25	0,20	1,83	2,60	3,42	0,54	0,79	0,25	45	0,20	1,16	1,61	1,11	1,09	1,34	0,25
	0,40	1,83	2,60	3,42	-0,16	0,09	0,25		0,40	1,16	1,61	1,11	0,34	0,59	0,25
	0,60	1,83	2,60	3,42	-0,74	-0,49	0,25		0,60	1,16	1,61	1,11	-0,28	-0,03	0,25
	0,80	1,83	2,60	3,42	-1,44	-1,19	0,25		0,80	1,16	1,61	1,11	-1,03	-0,78	0,25
	0,95	1,83	2,60	3,42	-2,55	-2,30	0,25		0,95	1,16	1,61	1,11	-2,21	-1,96	0,25
35	0,21	1,47	2,05	1,19	1,14	1,38	0,24	55	0,20	0,94	1,31	0,66	1,36	1,62	0,26
	0,39	1,47	2,05	1,19	0,49	0,73	0,24		0,40	0,94	1,31	0,66	0,60	0,86	0,26
	0,61	1,47	2,05	1,19	-0,17	0,07	0,24		0,60	0,94	1,31	0,66	-0,04	0,22	0,26
	0,80	1,47	2,05	1,19	-0,87	-0,63	0,24		0,78	0,94	1,31	0,66	-0,71	-0,45	0,26
	0,95	1,47	2,05	1,19	-2,01	-1,77	0,24		0,95	0,94	1,31	0,66	-2,03	-1,77	0,26

Diff Q = Q_{dés} - Q_{ads} en kcal/mol

ANNEXE 10 : Tableau des différences de teneur en eau (désorption-adsorption) à l'équilibre lors du phénomène d'hystérésis

Tableau 1 : Cas de l'amande de karité

25°C		35°C		45°C		55°C	
dTE	Aw	dTE	Aw	dTE	Aw	dTE	Aw
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,76	0,20	0,58	0,21	0,46	0,20	0,36	0,20
1,37	0,40	1,04	0,39	0,73	0,40	0,55	0,40
1,83	0,60	1,56	0,61	1,31	0,60	1,12	0,60
1,53	0,80	1,28	0,80	0,85	0,80	0,76	0,78
0,00	0,95	0,00	0,95	0,00	0,95	0,00	0,95

dTE : différence de teneur en eau

Aw : activité de l'eau correspondante

Tableau 2 : Cas de la pulpe de l'aiélé

25°C		35°C		45°C		55°C	
dTE	Aw	dTE	Aw	dTE	Aw	dTE	Aw
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,38	0,20	0,30	0,21	0,16	0,20	0,04	0,20
0,84	0,40	0,52	0,39	0,20	0,40	0,04	0,40
1,36	0,60	0,82	0,61	0,22	0,60	0,02	0,60
1,48	0,80	0,64	0,80	0,10	0,80	0,04	0,78
0,00	0,95	0,00	0,95	0,00	0,95	0,00	0,95

dTE : différence de teneur en eau

Aw : activité de l'eau correspondante

ANNEXE 11 : Valeurs calculées des énergies de la boucle d'hystérésis

Tableau 1 : Cas de l'amande de karité

25°C						
Adsorption	Désorption		Ead	Edés	Dif Dés -Ads	Somme
TE% Ms/0	TE% Ms/0	aw				
0	0	0				
1,8322842	2,59573595	0,2	13,5289	28,7699384	15,2410384	
3,20649735	4,5807105	0,4	9,4316919	28,77	19,3383081	
6,71837541	8,55065961	0,6	6,8332909	28,77	21,9367091	
15,5744157	17,1013192	0,8	5,46582808	28,77	23,3041719	
27,9423341	27,9423341	0,95	4,99489214	28,77	23,7751079	
						103,595335
35°C						
Adsorption	Désorption		Ead	Edés	Dif Dés -Ads	
TE% Ms/0	TE% Ms/0	aw				
0	0	0				
1,46523697	2,04522661	0,21	16,3977345	28,7458985	12,3481641	
2,5641647	3,60204089	0,39	10,7222188	28,77	18,0477812	
5,37253557	6,92934985	0,61	7,42595733	28,77	21,3440427	
12,3018854	13,5839678	0,8	5,74548795	28,77	23,024512	
22,3143381	22,3143381	0,95	5,14528747	28,77	23,6247125	
						98,3892125
45°C						
Adsorption	Désorption		Ead	Edés	Dif Dés -Ads	
TE% Ms/0	TE% Ms/0	aw				
0	0	0				
1,157483	1,61438418	0,2	21,0668455	26,4638857	5,39704026	
2,07128536	2,80232725	0,4	12,3467509	28,7699934	16,4232426	
4,3253312	5,63511459	0,6	8,14053648	28,77	20,6294635	
9,96044578	10,813328	0,8	6,05580416	28,77	22,7141958	
17,9714465	17,9714465	0,95	5,3246987	28,77	23,4453013	
						88,6092435
55°C						
Adsorption	Désorption		Ead	Edés	Dif Dés -Ads	
TE% Ms/0	TE% Ms/0	aw				
0	0	0				
0,94151557	1,30597321	0,2	27,6800192	12,0626057	-15,6174135	
1,67043085	2,21711731	0,4	14,5842598	28,7662602	14,1820004	
3,49271905	4,61646344	0,6	9,01956199	28,77	19,750438	
8,1091825	8,86846925	0,78	6,425029	28,77	22,344971	
14,5783056	14,5783056	0,95	5,53788358	28,77	23,2321164	
						63,8921123

Ead : énergie d'adsorption ; Edés : énergie de désorption ; Dif : différence

Tableau 2 : Cas de la pulpe de l'aiélé

25°C							
Adsorption	Désorption		Ead	Edés	Dif Dés - Ads	Somme1	Inverse Somme 1
TE% Ms/0	TE% Ms/0	aw					
0	0	0					
1,91644112	2,29573676	0,2	17,545781	20,0094798	2,46369881		
3,35377197	4,19221496	0,41	10,715821	14,1198976	3,40407659		
7,02695079	8,38442992	0,61	8,1853243	10,8386074	2,6532831		
16,2897496	17,7670063	0,78	8,22956005	9,27598499	1,04642494		
29,2257271	29,2257271	0,95	8,50844549	8,76371621	0,25527072		
						9,82275416	10,1804441
35°C							
Adsorption	Désorption		Ead	Edés	Dif Dés - Ads		
TE% Ms/0	TE% Ms/0	aw					
0	0	0					
1,47069784	1,76881227	0,21	22,3128275	23,8417248	1,52889732		
2,58365837	3,10039004	0,39	13,1899682	16,5964681	3,40649987		
5,42568258	6,24052868	0,62	8,5706231	11,9247439	3,35412082		
12,4015602	13,0375376	0,8	8,11630044	9,76693734	1,6506369		
22,5175764	22,5175764	0,95	8,38704468	8,99789326	0,61084858		
						10,5510035	9,47777148
45°C							
Adsorption	Désorption		Ead	Edés	Dif Dés - Ads		
TE% Ms/0	TE% Ms/0	aw					
0	0	0					
1,12195973	1,27942776	0,2	25,2641722	29,3634338	4,09926165		
2,00771741	2,20455244	0,4	16,7640632	20,5521081	3,78804497		
4,19258635	4,40910489	0,6	9,41377023	13,7825156	4,36874534		
9,64491695	9,74333447	0,8	8,06775586	10,4124625	2,34470669		
17,419901	17,419901	0,95	8,26157	9,30253814	1,04096814		
						15,6417268	6,39315603
55°C							
Adsorption	Désorption		Ead	Edés	Dif Dés - Ads		
TE% Ms/0	TE% Ms/0	aw					
0	0	0					
0,82136705	0,86047977	0,2	13,3523851	33,2742588	19,9218736		
1,5058396	1,54495231	0,4	21,8964104	26,1055174	4,20910702		
3,16813006	3,18768642	0,6	11,1586422	16,3321088	5,17346666		
7,45097254	7,49008526	0,8	8,14098421	11,210457	3,06947276		
13,3374364	13,3374364	0,95	8,14256856	9,72486032	1,58229176		
						33,9562118	2,94496926

Ead : énergie d'adsorption ; Edés : énergie de désorption ; Dif : différence

ANNEXE 12 : Valeurs estimées du nombre de sites d'adsorption (n), de la constante C et de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) et des constantes K et B en adsorption de la pulpe de l'aiélé

Tableau 1 : Valeurs estimées du nombre de sites d'adsorption (n), de la constante C et de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q)

T (°C)	n		C		Q (cal/mol)		T (°C)	n		C		Q (cal/mol)	
	Ads	Dés	Ads	Dés	Ads	Dés		Ads	Dés	Ads	Dés	Ads	Dés
25	3,01	3,25	6,32	5,30	1092,38	987,54	45	3,02	3,17	3,02	3,56	698,28	802,23
35	3,00	3,24	4,28	3,94	889,98	839,42	55	2,96	3,01	2,97	3,37	709,87	791,55

Ads : adsorption ; Dés : désorption

Tableau 2 : Valeurs estimées des constantes K et B en adsorption

T (°C)	a	m	k	k ₁	b	b ₁	K	B	T (°C)	a	m	k	k ₁	b	b ₁	K	B
25	0,20	1,92	1,04	1,59			1,66		45	0,20	1,12	0,78	2,30			1,79	
	0,41	3,35	1,82	0,57			1,04			0,40	2,01	1,39	0,86			1,20	
	0,61	7,03	3,81	0,25	0,17	0,25	0,97	0,42		0,60	4,19	2,91	0,38	0,17	0,25	1,12	0,42
	0,78	16,29	8,83	0,11			0,99			0,80	9,65	6,69	0,14			0,96	
	0,95	29,23	15,85	0,02			0,33			0,95	17,42	12,08	0,03			0,37	
35	0,21	1,47	0,91	1,82			1,65		55	0,20	0,82	0,57	2,32			1,32	
	0,39	2,58	1,59	0,76			1,20			0,40	1,51	1,05	0,87			0,91	
	0,62	5,43	3,35	0,30	0,17	0,25	0,99	0,42		0,60	3,17	2,20	0,39	0,17	0,25	0,85	0,42
	0,80	12,40	7,64	0,12			0,92			0,78	7,45	5,16	0,16			0,84	
	0,95	22,52	13,88	0,03			0,35			0,95	13,34	9,24	0,03			0,28	

Les observations des tableaux 3, 4, 5 et 6 sont identiques à celles de l'amande de karité.

Tableau 3 : Valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) en adsorption et en désorption en condition isobare

T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q	T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q
25	0,20	1,92	2,3	1,66	1,09	1,22	0,13	45	0,20	1,12	1,28	1,79	0,70	0,80	0,10
	0,20	3,35	4,19	1,66	1,49	1,65	0,16		0,20	2,01	2,21	1,79	1,14	1,21	0,07
	0,20	7,03	8,38	1,66	2,02	2,14	0,12		0,20	4,19	4,41	1,79	1,70	1,74	0,04
	0,20	16,29	17,77	1,66	2,61	2,68	0,07		0,20	9,65	9,74	1,79	2,33	2,34	0,01
	0,20	29,23	29,23	1,66	3,03	3,03	0,00		0,20	17,42	17,42	1,79	2,79	2,79	0,00
35	0,21	1,47	1,77	1,65	0,89	1,03	0,14	55	0,20	0,82	0,86	1,32	0,71	0,75	0,04
	0,21	2,58	3,10	1,65	1,30	1,43	0,13		0,20	1,51	1,55	1,32	1,19	1,21	0,02
	0,21	5,43	6,24	1,65	1,85	1,95	0,10		0,20	3,17	3,19	1,32	1,76	1,77	0,01
	0,21	12,40	13,04	1,65	2,45	2,49	0,04		0,20	7,45	7,49	1,32	2,42	2,43	0,01
	0,21	22,52	22,52	1,65	2,90	2,90	0,00		0,20	13,34	13,34	1,32	2,88	2,88	0,00

Diff Q = Q_{dés} - Q_{ads} en kcal/mol

Tableau 4 : Valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) en adsorption et en désorption en condition isobare

T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q	T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q
25	0,20	1,92	2,3	1,04	1,42	1,55	0,13	45	0,20	1,12	1,28	1,20	1,00	1,10	0,10
	0,20	3,35	4,19	1,04	1,82	1,98	0,16		0,20	2,01	2,21	1,20	1,44	1,51	0,07
	0,20	7,03	8,38	1,04	2,35	2,47	0,12		0,20	4,19	4,41	1,20	2,00	2,04	0,04
	0,20	16,29	17,77	1,04	2,94	3,01	0,07		0,20	9,65	9,74	1,20	2,63	2,64	0,01
	0,20	29,23	29,23	1,04	3,36	3,36	0,00		0,20	17,42	17,42	1,20	3,09	3,09	0,00
35	0,21	1,47	1,77	1,20	1,12	1,26	0,14	55	0,20	0,82	0,86	0,91	1,00	1,04	0,04
	0,21	2,58	3,10	1,20	1,54	1,67	0,13		0,20	1,51	1,55	0,91	1,47	1,49	0,02
	0,21	5,43	6,24	1,20	2,08	2,18	0,10		0,20	3,17	3,19	0,91	2,05	2,06	0,01
	0,21	12,40	13,04	1,20	2,69	2,73	0,04		0,20	7,45	7,49	0,91	2,71	2,72	0,01
	0,21	22,52	22,52	1,20	3,13	3,13	0,00		0,20	13,34	13,34	0,91	3,17	3,17	0,00

Diff Q = Q_{dés} - Q_{ads} en kcal/mol

Tableau 5 : Valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) en adsorption et en désorption en condition isostère

T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q	T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q
25	0,20	1,92	2,3	1,66	1,09	1,22	0,13	45	0,20	1,12	1,28	1,79	0,70	0,80	0,10
	0,41	1,92	2,3	1,66	0,36	0,49	0,13		0,40	1,12	1,28	1,79	-0,05	0,05	0,10
	0,61	1,92	2,3	1,66	-0,21	-0,08	0,13		0,60	1,12	1,28	1,79	-0,66	-0,56	0,10
	0,78	1,92	2,3	1,66	-0,80	-0,67	0,13		0,80	1,12	1,28	1,79	-1,41	-1,31	0,10
	0,95	1,92	2,3	1,66	-1,99	-1,86	0,13		0,95	1,12	1,28	1,79	-2,60	-2,50	0,10
35	0,21	1,47	1,77	1,65	0,89	1,03	0,14	55	0,20	0,82	0,86	1,32	0,71	0,75	0,04
	0,39	1,47	1,77	1,65	0,24	0,38	0,14		0,40	0,82	0,86	1,32	-0,05	-0,01	0,04
	0,62	1,47	1,77	1,65	-0,44	-0,30	0,14		0,60	0,82	0,86	1,32	-0,69	-0,65	0,04
	0,80	1,47	1,77	1,65	-1,10	-0,96	0,14		0,78	0,82	0,86	1,32	-1,36	-1,32	0,04
	0,95	1,47	1,77	1,65	-2,25	-2,11	0,14		0,95	0,82	0,86	1,32	-2,66	-2,62	0,04

Diff Q = Q_{dés} - Q_{ads} en kcal/mol

Tableau 6 : Valeurs de l'énergie d'attraction intermoléculaire de la monocouche (Q) en adsorption et en désorption en condition isostère

T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q	T (°C)	a	m _{ads}	m _{dés}	K	Q _{ads} (kcal/mol)	Q _{dés} (kcal/mol)	Diff Q
25	0,20	1,92	2,3	1,04	1,42	1,55	0,13	45	0,20	1,12	1,28	1,20	1,00	1,10	0,10
	0,41	1,92	2,3	1,04	0,70	0,82	0,13		0,40	1,12	1,28	1,20	0,25	0,35	0,10
	0,61	1,92	2,3	1,04	0,12	0,25	0,13		0,60	1,12	1,28	1,20	-0,36	-0,26	0,10
	0,78	1,92	2,3	1,04	-0,46	-0,33	0,13		0,80	1,12	1,28	1,20	-1,11	-1,01	0,10
	0,95	1,92	2,3	1,04	-1,66	-1,53	0,13		0,95	1,12	1,28	1,20	-2,29	-2,19	0,10
35	0,21	1,47	1,77	1,20	1,12	1,26	0,14	55	0,20	0,82	0,86	0,91	1,00	1,04	0,04
	0,39	1,47	1,77	1,20	0,47	0,61	0,14		0,40	0,82	0,86	0,91	0,23	0,27	0,04
	0,62	1,47	1,77	1,20	-0,21	-0,07	0,14		0,60	0,82	0,86	0,91	-0,40	-0,36	0,04
	0,80	1,47	1,77	1,20	-0,87	-0,73	0,14		0,78	0,82	0,86	0,91	-1,07	-1,03	0,04
	0,95	1,47	1,77	1,20	-2,02	-1,88	0,14		0,95	0,82	0,86	0,91	-2,37	-2,33	0,04

Diff Q = Q_{dés} - Q_{ads} en kcal/mol

ANNEXE 13 : Valeurs des teneurs en eau des échantillons séchés pour extraction**Tableau 1:** Valeurs de teneur en eau des amandes de karité séchées pour l'extraction

Durée (mois)	En salle	Congélateur
0	7,14 ± 0,48	
1	5,29 ± 1,36	4,11 ± 0,42
2	5,64 ± 0,31	3,27 ± 1,08
3	3,82 ± 0,92	4,33 ± 1,21
4	3,95 ± 1,05	5,96 ± 0,01
5	6,29 ± 1,41	5,40 ± 0,17
12	3,26 ± 0,99	3,99 ± 0,43
24	3,26 ± 1,45	4,92 ± 0,99

Tableau 2: Valeurs de teneur en eau des pulpes de l'aiélé séchées pour l'extraction

Durée (mois)	En salle	Congélateur
0	7,88 ± 0,90	
1	6,79 ± 1,68	5,90 ± 0,33
2	5,25 ± 0,79	3,46 ± 1,00
3	3,24 ± 0,30	4,38 ± 1,73
4	4,73 ± 0,53	4,83 ± 0,39
5	6,57 ± 0,69	5,86 ± 0,39
12	4,69 ± 1,08	4,95 ± 0,99
24	4,45 ± 0,77	4,67 ± 0,68

ANNEXE 14 : Exemple de courbe d'extraction de lipides par le CO₂ supercritique

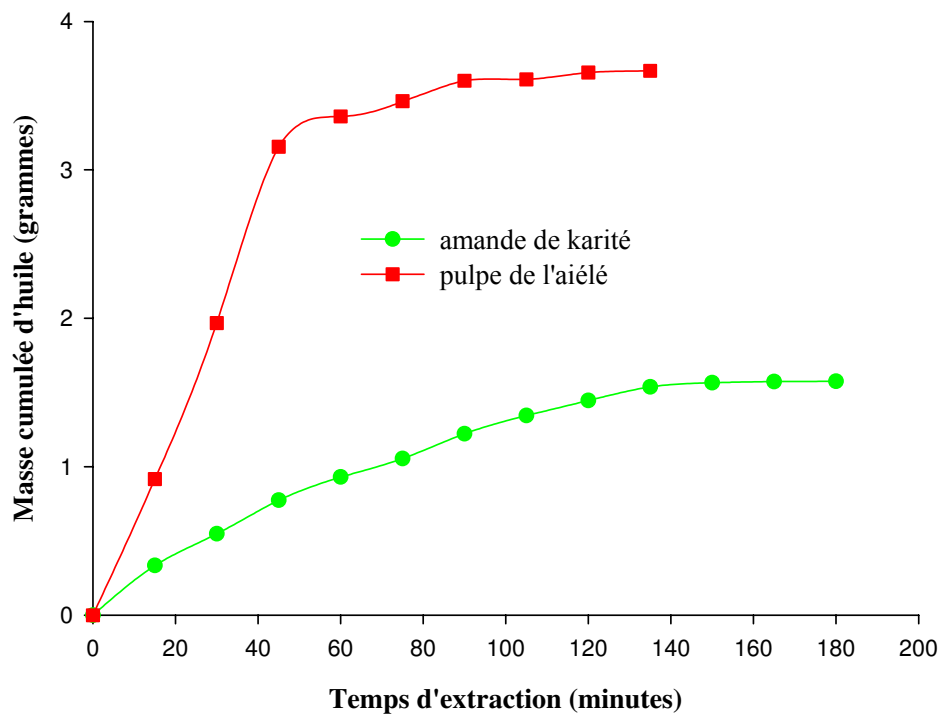


Figure 1 : Courbe d'extraction des lipides des échantillons stockés à -33°C pendant un mois

ANNEXE 15 : Fiche de saisie des données expérimentales

Data Table

ID: bensebia	Run No: 6	Measured: 14/12/04 10:58
File: GILLES	Rec. No: 5	Analy sed: 14/12/04 10:59
Path: C:\SIZERS\DATA\CAROLE\	Source: Measured	

Background Measured: Mar 14 Dec 2004 10:53
Sample Measured: Mar 14 Dec 2004 10:58
Range: 1000 mm Beam: 0.50 mm Sampler: MS65
Centre Detector Reading: (11744) 10483 Obscuration: 10.7 %
Triggers: Internal Experiment, Internal Sweep Sample Sweeps: 1563
Killed Data Channels: Low 0; High 0 Configuration File: SIZER

No	B' Ground	Signal	Data	No	B' Ground	Signal	Data
1	301.30	689.30	388.00	17	4.53	251.34	247.30
2	58.80	500.97	445.32	18	4.80	180.90	176.61
3	27.72	477.85	453.11	19	4.51	119.96	115.93
4	21.22	531.36	512.42	20	4.10	82.33	78.67
5	18.57	571.81	555.23	21	4.04	57.57	53.97
6	15.45	601.76	587.98	22	3.13	41.50	38.70
7	12.58	623.70	612.47	23	3.58	29.99	26.80
8	10.79	670.69	661.06	24	2.70	21.61	19.20
9	9.59	669.31	660.75	25	2.83	16.44	13.91
10	8.42	675.81	668.30	26	2.47	12.27	10.06
11	7.46	641.57	634.91	27	2.38	9.32	7.20
12	8.02	616.57	609.41	28	2.04	7.09	5.27
13	5.21	539.89	535.24	29	1.87	5.44	3.77
14	5.71	494.28	489.18	30	1.78	4.31	2.72
15	5.44	407.45	402.59	31	1.40	3.35	2.10
16	4.24	335.96	332.18	32	1.19	2.57	1.51

ANNEXE 16 : Rendements d'extraction

Tableau 1 : Rendements d'extraction à l'hexane du beurre des amandes de karité en fonction de la durée et du mode de stockage

Durée de stockage (mois)	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
Avant stockage	49,67 ± 0,52 ^{bc}	49,67 ± 0,52 ^a
1	46,20 ± 0,56 ^d	44,88 ± 1,40 ^b
2	47,22 ± 0,94 ^{cd}	43,41 ± 2,16 ^b
3	50,91 ± 0,54 ^{ab}	43,72 ± 0,50 ^b
4	51,19 ± 0,43 ^{ab}	42,14 ± 0,01 ^b
5	52,74 ± 1,80 ^a	44,06 ± 0,48 ^b
12	53,15 ± 0,41 ^a	53,77 ± 3,03 ^a
24	47,25 ± 1,00 ^{cd}	49,91 ± 1,22 ^a

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 2 : Analyse statistique des rendements d'extraction à l'hexane des huiles des pulpes des fruits de l'aïélé en fonction des durées de stockage

Durée (mois)	Rendement d'extraction (%)
0	48,01 ± 1,16 ^a
1	45,01 ± 0,67 ^{ab}
2	44,75 ± 1,75 ^{ab}
3	44,27 ± 0,74 ^{abc}
4	43,10 ± 0,25 ^{bc}
5	44,14 ± 0,53 ^{abc}
12	40,18 ± 1,98 ^{cd}
24	38,24 ± 3,21 ^d

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

Tableau 3 : Rendements d'extraction à l'hexane des huiles des pulpes des fruits de l'ailé en fonction de la durée et du mode de stockage

Durée de stockage (mois)	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
Avant stockage	48,07 ± 1,84 ^a	48,07 ± 1,84 ^a
1	46,34 ± 0,69 ^a	43,68 ± 0,14 ^{ab}
2	47,78 ± 0,32 ^a	41,73 ± 2,45 ^b
3	45,48 ± 0,12 ^{ab}	43,06 ± 1,11 ^{ab}
4	42,61 ± 0,22 ^c	43,60 ± 0,16 ^{ab}
5	43,01 ± 0,28 ^{bc}	45,28 ± 0,16 ^{ab}
12	35,84 ± 0,44 ^d	44,52 ± 0,80 ^{ab}
24	32,23 ± 1,72 ^e	44,25 ± 3,54 ^{ab}

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 4 : Rendements d'extraction au CO₂ supercritique du beurre de karité en fonction de la durée et du mode de stockage

	DS (mois)	Qm (g/h)	TE (min)	Rdt (%)
T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	1	917	135	28,11 ± 0,50 ^c
	12	864	150	39,57 ± 0,34 ^a
	24	831	165	34,84 ± 0,40 ^b
T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%	1	749	180	17,43 ± 0,35 ^c
	12	994	150	38,47 ± 0,41 ^a
	24	945	180	34,18 ± 0,60 ^b

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement ; **DS** : durée de stockage ; **Qm** : débit moyen de CO₂ ; **TE** : temps d'extraction ; **Rdt** : taux d'extraction ; * les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur la colonne et pour chaque mode de stockage ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

Tableau 5 : Rendements d'extraction au CO₂ supercritique de l'huile de l'aiélé en fonction de la durée et du mode de stockage

	DS (mois)	Qm (g/h)	TE (min)	Rdt (%)
T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	1	690	180	26,22 ± 0,23 ^a
	12	825	180	20,81 ± 0,12 ^b
	24	1098	120	16,10 ± 0,41 ^c
T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%	1	837	135	39,81 ± 0,76 ^a
	12	1107	150	40,45 ± 0,44 ^a
	24	637	180	25,66 ± 0,36 ^b

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement ; **DS** : durée de stockage ; **Qm** : débit moyen de CO₂ ; **TE** : temps d'extraction ; **Rdt** : taux d'extraction ; * les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur la colonne et pour chaque mode de stockage ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

ANNEXE 17 : Valeurs des indices d'acides

Tableau 1 : Valeurs des indices d'acide des beurres de karité extraits à l'hexane

Durée (mois)	Indice d'acide	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
0	6,66 ± 0,04 ^f	6,66 ± 0,04 ^c
1	11,46 ± 0,04 ^e	6,84 ± 0,04 ^c
2	12,34 ± 0,16 ^{de}	6,31 ± 0,11 ^c
3	13,66 ± 0,08 ^{cd}	6,74 ± 0,06 ^c
4	13,77 ± 0,02 ^{cd}	6,54 ± 0,06 ^c
5	14,11 ± 0,11 ^c	6,43 ± 0,11 ^c
12	16,46 ± 1,14 ^b	8,82 ± 0,75 ^b
24	18,80 ± 0,73 ^a	16,04 ± 0,13 ^a

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 2 : Valeurs des indices d'acide des beurres de karité extraits au CO₂ supercritique

Durée (mois)	Indice d'acide	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
1	56,77 ± 5,22 ^c	19,88 ± 0,56 ^b
12	85,63 ± 3,44 ^b	21,22 ± 0,38 ^b
24	128,15 ± 2,41 ^a	23,07 ± 0,39 ^a

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 3 : Valeurs des indices d'acide des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane

Durée (mois)	Indice d'acide	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
0	3,12 ± 0,05 ^e	3,12 ± 0,05 ^e
1	66,21 ± 0,04 ^d	5,06 ± 0,12 ^c
2	82,54 ± 0,11 ^c	4,96 ± 0,11 ^c
3	85,71 ± 2,06 ^c	4,11 ± 0,06 ^d
4	85,19 ± 2,23 ^c	4,81 ± 0,06 ^c
5	82,58 ± 0,83 ^c	5,25 ± 0,03 ^c
12	113,89 ± 0,84 ^b	14,50 ± 0,53 ^b
24	120,81 ± 2,98 ^a	15,33 ± 0,14 ^a

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement 3°C

Tableau 4 : Valeurs des indices d'acide des huiles de l'aiélé extraites au CO₂ supercritique

Durée (mois)	Indice d'acide	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
1	102,63 ± 0,98 ^c	19,01 ± 0,09 ^b
12	113,75 ± 0,56 ^b	19,44 ± 0,29 ^a
24	124,60 ± 0,91 ^a	20,17 ± 0,83 ^a

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

ANNEXE 18 : Valeurs des indices d'iodes

Tableau 1 : Valeurs des indices d'iode des beurres de karité extraits à l'hexane

Durée (mois)	Indice d'iode	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
0	77,59 ± 0,05 ^a	77,59 ± 0,05 ^a
1	75,19 ± 0,34 ^b	62,59 ± 1,83 ^b
2	67,68 ± 0,37 ^c	61,36 ± 2,04 ^{bc}
3	62,43 ± 0,07 ^c	58,67 ± 1,93 ^{cd}
4	64,42 ± 0,25 ^d	57,29 ± 0,38 ^d
5	56,93 ± 0,31 ^f	57,23 ± 0,42 ^d
12	45,59 ± 0,77 ^g	43,40 ± 0,40 ^e
24	44,41 ± 1,05 ^g	32,06 ± 0,90 ^f

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 2 : Résultats de l'analyse statistique des indices d'iode des beurres de karité extraits au CO₂ supercritique

Durée (mois)	Indice d'iode
1	38,07 ± 0,34 ^a
12	28,98 ± 0,64 ^b
24	22,12 ± 0,44 ^c

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

Tableau 3 : Valeurs des indices d'iode des beurres de karité extraits au CO₂ supercritique

Durée (mois)	Indice d'iode	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
1	38,48 ± 0,51 ^a	37,66 ± 0,40 ^a
12	27,74 ± 0,65 ^b	30,23 ± 0,31 ^b
24	21,68 ± 0,68 ^c	22,57 ± 0,54 ^c

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 4 : Valeurs des indices d'iode des huiles de l'aiélé extraites à l'hexane

Durée (mois)	Indice d'iode	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
0	100,43 ± 0,11 ^a	100,43 ± 0,11 ^a
1	96,98 ± 0,52 ^a	95,09 ± 0,79 ^b
2	85,42 ± 0,06 ^b	90,26 ± 1,30 ^c
3	73,30 ± 3,97 ^c	74,16 ± 0,07 ^d
4	64,20 ± 0,03 ^d	73,53 ± 0,08 ^d
5	62,43 ± 0,14 ^d	63,43 ± 0,07 ^e
12	38,19 ± 0,37 ^e	54,71 ± 3,01 ^f
24	28,44 ± 1,88 ^f	29,07 ± 0,78 ^g

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 5 : Valeurs des indices d'iode des huiles de l'aiélé extraites au CO₂ supercritique

Durée (mois)	Indice d'iode	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
1	43,30 ± 0,45 ^a	60,17 ± 0,39 ^a
12	34,42 ± 0,55 ^b	33,58 ± 0,14 ^b
24	27,12 ± 0,11 ^c	29,10 ± 0,90 ^c

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

ANNEXE 19: Caractéristiques de l'hexane et du CO₂ supercritique

Tableau 1: Quelques caractéristiques de l'hexane et du CO₂ supercritique

Caractéristiques	Hexane	CO ₂ supercritique
Chaleur latente de vaporisation à 20°C	69 calories	
Sélectivité	Faible	Elevée
Toxicité	Très toxique	Non toxique
Densité	0,68 g/cm ³	
Stabilité	Bonne	Très bonne
Point d'ébullition	68-70°C	
Point de fusion	-94°C	
Point d'éclair	-22°C	
Température d'inflammation	240°C	
Viscosité dynamique à 20°C (mPa.s)	0,31	
Forme ou état	Liquide incolore	Supercritique
Solubilité dans l'eau (20°C)	Presque insoluble	
Température du point critique		31,1°C*
Pression du point critique		73,8 bars*
Masse volumique (g/cm ³)	1*	0,6*
Diffusion (cm ² /s)	5.10 ⁻⁶ *	10 ⁻³ *
Viscosité (g/cm ¹ s ¹)	10 ⁻² *	10 ⁻⁴ *

* : Wolfgang *et al.* (1993)

Wolfgang S., Dierk Knittel, Eckhard Schollmeyer, 1993. *Dyeing of textiles in supercritical carbon dioxide*. Textile Res. J. 63(3), 135-142.

ANNEXE 20 : Données texturales sur l'amande de karité

Tableau 1: Valeurs de la dureté de l'amande de karité stockée

Durée (mois)	Dureté (N)	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
0	170,55 ± 24,67 ^d	170,55 ± 24,67 ^a
1	236,81 ± 34,30 ^{cd}	79,77 ± 2,04 ^b
2	285,26 ± 15,28 ^{bcd}	91,44 ± 5,63 ^b
3	258,64 ± 29,14 ^{cd}	98,46 ± 4,63 ^b
4	424,26 ± 61,94 ^b	44,73 ± 2,05 ^c
5	328,20 ± 22,59 ^{bc}	97,09 ± 2,98 ^b
12	723,06 ± 73,93 ^a	72,68 ± 4,23 ^{bc}
24	710,16 ± 90,43 ^a	83,88 ± 4,87 ^b

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 2: Valeurs de teneur en eau des amandes de karité en stockage

Durée (mois)	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
0	61,56 ± 0,23	
1	57,41 ± 2,78	59,72 ± 1,12
2	40,38 ± 2,82	45,36 ± 0,93
3	16,88 ± 0,85	44,37 ± 0,46
4	13,72 ± 1,07	45,68 ± 0,31
5	12,31 ± 0,38	52,65 ± 1,93
12	6,61 ± 0,48	58,05 ± 0,99
24	5,59 ± 0,07	48,17 ± 0,62

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

ANNEXE 21 : Données texturales sur la pulpe de l'aiélé

Tableau 1: Valeurs de la dureté de la pulpe de l'aiélé stockée

Durée (mois)	Dureté (N)	
	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
0	120,08 ± 22,64 ^d	120,08 ± 22,64 ^a
1	402,51 ± 68,27 ^{cd}	15,08 ± 1,63 ^b
2	647,84 ± 179,89 ^{bc}	22,28 ± 2,52 ^b
3	431,51 ± 99,49 ^{cd}	15,91 ± 1,03 ^b
4	608,28 ± 34,57 ^{bc}	16,90 ± 0,87 ^b
5	838,78 ± 151,39 ^b	19,93 ± 1,46 ^b
12	1438,58 ± 152,70 ^a	20,53 ± 0,89 ^b
24	919,55 ± 199,70 ^b	21,01 ± 0,63 ^b

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque colonne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 2: Valeurs de la masticabilité de la pulpe de l'aiélé stockée

Masticabilité (J)	
T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
166,08 ± 18,84 ^a	13,22 ± 3,81 ^b

* les résultats ayant les mêmes lettres en exposant sur chaque ligne ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

Tableau 3: Valeurs de teneur en eau de la pulpe de l'aiélé en stockage

Durée (mois)	T=18 ± 2°C, Hr= 38 ± 3%	T=-33 ± 3°C, Hr= 37 ± 2%
0	55,21 ± 0,19	
1	33,76 ± 4,43	50,30 ± 1,47
2	8,38 ± 0,67	43,19 ± 0,25
3	8,77 ± 0,17	43,04 ± 0,39
4	8,36 ± 0,42	44,21 ± 0,99
5	8,04 ± 0,11	45,00 ± 0,71
12	9,02 ± 1,23	47,57 ± 1,87
24	9,75 ± 0,56	45,21 ± 0,24

T : température ; Hr : humidité relative de l'environnement

ANNEXE 22 : Etude des corrélations

I. Amande de karité

L'étude de la corrélation entre les paramètres texturaux des amandes et de caractérisation des beurres extraits à l'hexane est présentée dans le tableau 1. On observe, en général, que la dureté des amandes est inversement proportionnelle teneur en eau des amandes mais proportionnelle à l'indice d'acide des beurres. Ceci indique que plus l'amande est dure, plus sa teneur en eau est faible et l'indice d'acide du beurre à extraire est élevé. La même observation est faite dans le cas de l'extraction du beurre de karité au CO₂ supercritique (tableau 2).

Tableau 1 : Les corrélations entre les paramètres de l'amande de karité et du beurre extrait à l'hexane

	Dureté	Teneur en eau	Rendement d'extraction	Indice d'acide
Teneur en eau	-0,9359*			
Rendement d'extraction	0,1385 ^{ns}	-0,1833 ^{ns}		
Indice d'acide	0,6958*	-0,8007*	0,1505 ^{ns}	
Indice d'iode	-0,1252 ^{ns}	0,3629 ^{ns}	-0,5222*	-0,5054*

* indique une corrélation significative entre les paramètres à $p < 0,05$; ns = non significatif

Tableau 2 : Les corrélations entre les paramètres de l'amande de karité et du beurre extrait au CO₂ supercritique

	Dureté	Teneur en eau	Rendement d'extraction	Indice d'acide
Teneur en eau	-0,9359*			
Rendement d'extraction	0,2240 ^{ns}	-0,2180 ^{ns}		
Indice d'acide	0,9092*	-0,8787*	0,1918 ^{ns}	
Indice d'iode	-0,4372 ^{ns}	0,6225*	-0,3706 ^{ns}	-0,4341 ^{ns}

* indique une corrélation significative entre les paramètres à $p < 0,05$; ns = non significatif

II. Pulpe de l'ailé

Le tableau 3 donne les corrélations entre les différents paramètres de la pulpe et de l'huile extraite à l'hexane des fruits de l'ailé. Il en ressort que la dureté des pulpes est inversement proportionnelle à leur teneur en eau, mais proportionnelle à leur indice d'acide et leur masticabilité. Ceci indique que plus la pulpe est dure, plus la teneur en eau est faible, l'indice d'acide de l'huile élevé et il faut de l'énergie pour la mâcher. Ceci confirme que plus la pulpe est élastique plus elle est absorbable. En ce qui concerne ces corrélations dans le cas de l'extraction au CO₂ supercritique (tableau 4), les observations sont identiques à celles faites dans le cas de l'extraction à l'hexane.

Tableau 3 : Corrélations entre les paramètres de la pulpe des fruits de l'ailé et de huile extraite à l'hexane

	Cohésivité	Dureté (1)	Elasticité	Teneur en eau	Rdt ext	Indice d'acide
Dureté (1)	0,5554*					
Elasticité	-0,6087*	-0,7331*				
Teneur en eau	-0,7151*	-0,9153*	0,8734*			
Masticabilité	0,5542*	0,9629*	-0,6648*	-0,8658*		
Rdt ext	-0,4296 ^{ns}	-0,7328*	0,6085*	0,7445*		
Indice d'acide	0,7242*	0,8940*	-0,8875*	-0,9923*	-0,7460*	
Indice d'iode	-0,1068 ^{ns}	-0,1963 ^{ns}	0,0929 ^{ns}	0,2232 ^{ns}	0,4477 ^{ns}	-0,2262 ^{ns}

* indique une corrélation significative entre les paramètres à $p < 0,05$; ns = non significatif ; Rdt : rendement ; ext : extraction

Tableau 4 : Corrélations entre les paramètres de la pulpe des fruits de l'ailé et de huile extraite au CO₂ supercritique

	Cohésivité	Dureté (1)	Elasticité	Teneur en eau	Rdt ext	Indice d'acide
Dureté (1)	0,5554*					
Elasticité	-0,6087*	-0,7331*				
Teneur en eau	-0,7151*	-0,9153*	0,8734*			
Masticabilité	0,5542*	0,9629*	-0,6648*	- 0,8658*		
Rdt ext	-0,7985*	-0,7139*	0,6506*	0,8579*		
Indice d'acide	0,7284*	0,8334*	-0,8910*	- 0,9580*	-0,8217*	
Indice d'iode	-0,3536 ^{ns}	-0,3395 ^{ns}	0,3394 ^{ns}	0,4528 ^{ns}	0,6092*	-0,3269 ^{ns}

* indique une corrélation significative entre les paramètres à $p < 0,05$; ns = non significatif ; Rdt : rendement ; ext : extraction

PUBLICATIONS DANS LES REVUES A COMITE DE LECTURE

- 1- Kapseu C., **Nkouam G. B.**, Tchiégang C., Jannot Y., Nganhou J., 2005. Stockage des céréales et des oléagineux : un savoir faire traditionnel à valoriser. *Cameroon Journal of Ethnobotany*, vol 1, N°1, 108-114.
- 2- César Kapseu, **Gilles Bernard Nkouam**, Michel Dirand, Danielle Barth, Laurent Perrin, Clergé Tchiégang, 2006. Water vapour isotherms of sheanut kernels (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.). *Journal of Food Technology*, 4 (4), 235-241.
- 3- **Gilles Bernard Nkouam**, César Kapseu, Danielle Barth, Michel Dirand, Jean Bosco Tchatchueng, 2007. Oil extraction from sheanut kernel (*Vitellaria paradoxa* Gaertn) and *canarium* pulp (*Canarium schweinfurthii* Engl.) using supercritical CO₂ and hexane: a comparative study. Accepté pour publication dans *Research Journal of Applied Sciences*, avril 2007.

COMMUNICATIONS AU COURS DES SEMINAIRES INTERNATIONAUX

- 1- César Kapseu, **Gilles Bernard Nkouam**, Danielle Barth, Michel Parmentier, Michel Dirand, 2004. Isotherms of sheanut (*Butyrospermum Parkii* (G. Don) Kotschy) and *Canarium Schweinfurthii* Engl. fruits. 3rd Euro Fed Lipid Congress on Oils, Fats and Lipids in a changing world, Edinburg, 5-8 september 2004.
- 2- César Kapseu, **Gilles Bernard Nkouam**, Clergé Tchiégang, Danielle Barth, Michel Dirand, 2004. Préservation of some sub-saharan African foodstuffs. CIGR International Conference, Beijing, 11-14 october 2004.
- 3- **Gilles Bernard Nkouam**, César Kapseu, Danielle Barth, Michel Dirand, Jean Bosco Tchatchueng, 2006. Etude comparative de l'extraction des lipides de l'amande de karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn) et de la pulpe de l'aïele (*Canarium schweinfurthii* Engl.) au CO₂ supercritique et à l'hexane. 5^{ème} séminaire international sur la valorisation du safoutier (*Dacryodes edulis*) et autres oléagineux non conventionnels, Franceville (Gabon), 20-24 novembre 2006.
- 4- **G. B. Nkouam**, C. Kapseu, D. Barth, M. Dirand, J. B. Tchatchueng, 2007. Oil extraction from sheanut kernel (*Vitellaria paradoxa* Gaertn) and *Canarium* pulp (*Canarium schweinfurthii* Engl.) using supercritical CO₂. 5th Euro Fed Lipid Congress on Oils, Fats and Lipids: From Science to Applications, Gothenburg, 16-19 September 2007. Accepté pour communication, avril 2007.

AUTORISATION DE SOUTENANCE SIGNEE PAR LE PRESIDENT DE L'INPL

INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE

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

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Michel ROQUES, Professeur, Université de Pau, Pau

Monsieur Jean NGANHOU, Professeur, ENSP, Université de Yaoundé I, Cameroun

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

Monsieur NKOUM Gilles Bernard

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

**"Conservation des fruits du karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) et de l'aiélé (*Canarium
schweinfurthii* Engl.) : isothermes de sorption d'eau et extraction des matières grasses
des fruits stockés"**

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

en vue de l'obtention du titre de :

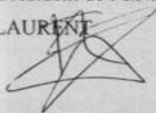
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « Génie des procédés et des produits »

Fait à Vandœuvre, le 04 septembre 2007

Le Président de l'I.N.P.L.,

F. LAURENT



TEL. 33/03.83.59.59.59
FAX. 33/03.83.59.59.55