

THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE EN COTUTELLEPour l'obtention des grades de
Doctorat en Sciences Biomédicales et Pharmaceutiques (Université de Liège)

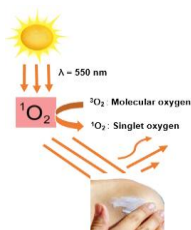
Et de

Docteur en Sciences Pharmaceutiques (Université Joseph Ki-Zerbo)**Spécialité : Chimie Analytique**

Présentée et soutenue par

Wendinmi Bertrand Florent GOUMBRI

Le 25/06/2026



**Contribution à la valorisation du beurre de karité extrait au
Burkina Faso :
Étude des propriétés physicochimiques et thermiques et
mise en évidence du potentiel photoprotecteur**

Promoteur ULiège, (Belgique)

Co-Promotrice ULiège, (Belgique)

Promoteur Cotutelle UJKZ, (Burkina Faso)

Prof. Roland **MARINI DJANG'EING'A**Prof. Sabine **DANTHINE**Prof. Touridomon Issa **SOMÉ****JURY**

Prof. Brigitte ÉVRARD	Université de Liège	Présidente
Prof. Rasmané SEMDÉ	Université Joseph Ki-Zerbo	Secrétaire
Prof. Achille YEMOA	Université Abomey-Calavi	Membre
Prof. Caroline STEVIGNY	Université Libre de Bruxelles	Membre
Prof. Sylvain OUÉDRAOGO	Institut de Recherches en Sciences de la Santé	Rapporteur
Prof. Philippe HUBERT	Université de Liège	Membre
Prof. Ange MOUTHYS-MICKALAD	Université de Liège	Membre
Prof. Michel FREDERICH	Université de Liège	Membre
Prof. Roland MARINI DJANG'EING'A	Université de Liège	Promoteur
Prof. Sabine DANTHINE	Université de Liège, Gembloux Agro BioTech	Co-Promotrice
Prof. Touridomon Issa SOMÉ	Université Joseph Ki-Zerbo	Promoteur Cotutelle

TABLE DES MATIÈRES

Dédicaces	VI
Remerciements	VII
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux	XII
Sigles et abréviations.....	XIV
Avant-propos.....	xvi
 INTRODUCTION.....	18
Objectifs de l'étude	25
 I - GÉNÉRALITÉS	27
I.1. Principales utilisations du beurre de karité	27
I.1.1. Utilisations traditionnelles.....	27
I.1.2. Utilisations dans les industries agroalimentaires et cosmétiques	28
I.1.2.1. Utilisations dans l'industrie agroalimentaire	29
I.1.2.2. Utilisations dans les industries cosmétiques/pharmaceutiques	30
I.1.3. Autres usages du beurre de karité.....	34
I.1.4. Synthèse des différentes utilisations du beurre de karité	38
I.2. Procédés d'extraction du beurre de karité.....	38
I.2.1. Extractions traditionnelles/artisanales.....	39
I.2.2. Extractions semi-industrielles et industrielles.....	39
I.3. Composition chimique du beurre de karité.....	49
I.3.1. Composition de la fraction saponifiable.....	49
I.3.1.1. Mono- et Di-glycérides.....	49
I.3.1.2. Triglycérides ou triacylglycérols	52
I.3.2. Composition de la fraction insaponifiable	56
I.3.2.1. Composés phénoliques	57
I.3.2.2. Composés terpéniques	60
I.3.2.3. Le karitène.....	62
I.4. Critères de qualité du beurre de karité selon le Codex Alimentarius	64
I.4.1. Paramètres influençant la composition physicochimique du beurre de karité	66
I.4.1.1. L'effet des facteurs intrinsèques sur la composition physicochimique	66
I.4.1.2. L'effet des facteurs extrinsèques sur la composition physicochimique.....	66
I.4.1.3. Les facteurs liés au produit brut fini	69
I.5. Notions de photoprotection	74
I.5.1. Rayonnement solaire et spectres électromagnétiques.....	74
I.5.2. Types de protection contre les rayonnements.....	78
I.5.2.1. Protection naturelle.....	78
I.5.2.2. Protection externe.....	79
 II - MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	85
II.1. Échantillons de beurre de karité soumis à l'expérimentation.....	85
II.2. Matériel chimique et biologique	88
II.3. Procédés d'extraction du beurre de karité	89
II.4. Caractérisations physicochimiques	90
II.4.1. Indices chimiques	90
II.4.2. Profil en acides gras.....	92

II.4.3. Teneur en kariténe.....	94
II.4.4. Caractérisations chimiques spécifiques	95
II.6. Caractérisations thermiques	98
II.6.1. Teneur en matière grasse solide.....	98
II.6.2. Analyse calorimétrique différentielle	99
II.7. Détermination des composés phénoliques et activité antioxydante du beurre de karité.....	99
II.7.1. Dosage des composés phénoliques totaux.....	100
II.7.2. Identification et quantification des composés phénoliques/polaires.....	101
II.7.3. Potentiel antioxydant <i>in vitro</i>	102
II.7.3.1. Choix du solvant de solubilisation du beurre brut.....	102
II.7.3.2. Test au DPPH.....	103
II.7.3.3. Test à l'ABTS	104
II.8. Évaluations du potentiel photoprotecteur du beurre de karité.....	105
II.8.1. Évaluation <i>in vitro</i> du facteur de protection solaire (FPS/SPF).....	105
II.8.1.1. Analyse comparée du facteur de protection solaire	105
II.8.1.2. Évaluation de la relation dose-réponse du facteur de protection solaire par ajouts dosés du kariténe.....	106
II.8.2. Évaluation du potentiel photoprotecteur selon les modèles expérimentaux.....	107
II.8.2.1. Mise au point de modèles expérimentaux acellulaire et cellulaire d'investigation.....	107
II.8.2.2. Évaluation du potentiel photoprotecteur sur modèle acellulaire (effet quenching de l'oxygène singulet).....	108
II.8.2.3. Évaluation du potentiel photoprotecteur sur modèle cellulaire.....	110
II.9. Analyses statistiques	112
III - RÉSULTATS	115
III.1. Procédés d'extraction du beurre de karité extrait au Burkina Faso	115
III.2. Caractéristiques chimiques du beurre de karité.....	122
III.2.1. Indices chimiques.....	122
III.2.2. Profil en acides gras	125
III.2.3. Teneur en kariténe	127
III.2.4. Composés organiques volatiles.....	131
III.2.5. Composition en stérols	134
III.3. Caractéristiques physiques du beurre de karité	Erreur ! Signet non défini.
III.3.1. Degré de coloration.....	135
III.3.2. Indice de jaunissement	137
III.4. Caractéristiques thermiques du beurre de karité	137
III.4.1. Teneur en matière grasse solide (SFC)	137
III.4.2. Analyses calorimétriques différentielles : fusion et cristallisation.....	141
III.5. Analyses multivariées des caractéristiques physicochimiques et thermiques du beurre de karité	149
III.6. Composés phénoliques et activité antioxydante du beurre de karité.....	153
III.6.1. Composés phénoliques totaux par colorimétrie	153
III.6.2. Identification et quantification des composés phénoliques	155
III.6.3. Potentiel antioxydant <i>in vitro</i>	159
III.6.3.1. Choix du solvant de solubilisation du beurre.....	159
III.6.3.2. Potentiel antioxydant du beurre de karité et de ses composés <i>in vitro</i>	160
III.7. Potentiel photoprotecteur du beurre de karité	162
III.7.1. Facteur de protection solaire <i>in vitro</i>.....	162

III.7.2. Mise en évidence du potentiel photoprotecteur selon les modèles expérimentaux.....	164
III.7.2.1. Évaluation <i>in vitro</i> du potentiel photoprotecteur par irradiation du Rose Bengal en milieu acellulaire	166
III.7.2.2. Évaluation du potentiel photoprotecteur sur modèle cellulaire.....	171
IV. DISCUSSION.....	177
IV.1. Caractéristiques physicochimiques et thermiques du beurre de karité.....	177
IV.1.1. Caractéristiques chimiques du beurre de karité.....	177
IV.1.1.1. Indices chimiques de qualité et teneur en kariténe.....	177
IV.1.1.2. Profil en acides gras - stérols - composés organiques volatiles	183
IV.1.2. Caractéristiques physiques et thermiques du beurre de karité.....	186
IV.2. Composés phénoliques et potentiel antioxydant.....	193
IV.2.1. Composés phénoliques	193
IV.2.2. Potentiel antioxydant.....	196
IV.3. Potentiel photoprotecteur	198
IV.3.1. Facteur de protection solaire <i>in vitro</i>	198
IV.3.2. Photoprotection en milieu acellulaire	200
IV.3.3. Photoprotection en milieu cellulaire	202
IV.3.3.1. Toxicité inhérente du beurre de karité brut sur les cellules HaCaT.....	202
IV.3.3.2. Effets photoprotecteurs des échantillons de beurres bruts et de leurs extraits polaires sur la production de $^1\text{O}_2$	202
IV.4. Discussion générale	204
IV.4.1. Caractéristiques physicochimiques et thermiques du beurre de karité en lien avec les procédés d'extraction.....	204
IV.4.2. Analyses en composantes principales.....	207
IV.4.3. Photoprotection.....	211
CONCLUSION	214
PERSPECTIVES.....	215
BIBLIOGRAPHIE	217
Annexe 1 : Aperçu sur les méthodes analytiques de dosage applicables aux corps gras	232
Annexe 2 : Grille de collecte de données	236
Annexe 3 : Modes opératoires normalisés	238
Annexe 4 : Certificat d'analyse Supelco 37 Component FAME Mix.....	243
Annexe 5 : Échantillonnage - Liste non exhaustive des producteurs, projets et associations, des centres et groupements œuvrant dans la filière karité du Burkina Faso.....	248
Annexes 6 : Diagrammes récapitulatifs des différentes étapes d'extraction du beurre de karité au Burkina Faso, cas des 32 procédés.....	249
Annexe 7 : Travaux inachevés	256
RÉSUMÉ	265
ABSTRACT	266
PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES	267
1. Communications orales	267
2. Posters	268
3. Articles scientifiques.....	269

*“Donnez à ceux que vous aimez des ailes pour voler,
des racines pour revenir, et des raisons de rester.”*

Dalai Lama

“Au milieu de toute difficulté, se trouve cachée une opportunité. Sachons la saisir.”

À ma maman Léonie, vous avez été pour moi un père et une mère, tout simplement une grâce Divine. Vous vous êtes sacrifiée pour nous, vos enfants ; je ne saurais vous dire merci. Dieu vous le rende au centuple. À travers vous, je rends un vibrant hommage à mon père Christophe, puisse-t-il trouver grâce aux yeux de Dieu. Ce travail, je vous le dédie. À mes frères et sœurs, j'ai toujours tiré le meilleur de vous, et cela réciproquement. Soyez grandement bénis. Je vous souhaite le meilleur.

À mon épouse Sylvie Corinne, toi qui as su me supporter, me comprendre et m'aimer tout ce temps. Merci pour ton amour et ton soutien. Puisse la bonté divine toujours demeurer en toi. À nos enfants, si mignons et adorables, je dédie ce travail. Puisse Dieu dans sa grande miséricorde vous bénir et vous guider sur le chemin du bonheur, de la prospérité, et qu'il vous accorde la santé.

Je n'oublie pas mes beaux-parents, Clément et Thérèse, ainsi que leurs enfants, que la grâce de Dieu toujours demeure sur vous.

Une mention spéciale à Safiatou TRAORÉ « *ma DC* », merci pour ton amitié et tes qualités humaines. Allah te comble de ses bienfaits. Sois-en remerciée.

À Ouéogo NIKIÉMA, Médard COULIBALY, Isaïe NYAMBA, Mohamed BÉLEM, Michel ZOUNDI, Hervé ZOMA, Nicodème BEREMWOUDOU, Emmanuel SAWADO, Basile NÉBIÉ, Céline KOBÉANÉ, merci pour l'exemplarité. Dieu vous bénisse.

À tout le personnel de l'IRSS-Ouaga, à Salfo OUEDRAOGO mon chef d'unité, ainsi que tout le personnel de U-PHARMA/IRSS, puisse Dieu vous combler de ses bienfaits. Merci pour votre belle amitié.

À mes amis, Alfred Kouakou KOUASSI, Fatou TRAORÉ, Patient CIZA, Christelle WAFFO et Adrien Banwitiya NTEKANGI merci pour les bons moments passés ensemble en Belgique, autour de l'intérêt commun, la thèse.

À tous mes ami(e)s, collègues (Lycée, Collège, Université) et anciens collaborateurs de service (DS/Gayéri, DCM/ANSSEAT), vous tous et toutes qui avez toujours été présents pour moi, qui avez sympathisé et entretenu de bonnes relations sociales et professionnelles avec moi, je dis merci du fond du cœur. Merci pour votre amitié, merci d'être parmi ceux et celles qui comptent pour moi.

Je pense à toutes ces personnes anonymes qui par engagement et dévouement, ont contribué à l'aboutissement de la présente thèse. Soyez-en grandement remercié.

À mon pays, le Burkina Faso, patrie de dignité et d'intégrité, je prie pour que la paix revienne, et que tous ensemble, fils et filles du même pays, nous portions haut les couleurs de notre nation, pour qu'elle rayonne et prospère.

Remerciements

L'aboutissement de cette thèse est le fruit d'un long, difficile et intense travail de recherche. J'exprime ainsi ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à ce résultat.

À mes promoteurs de thèse, les Professeurs Roland MARINI DJANG'EING'A (ULiège, Belgique) et Sabine DANTHINE (ULiège, Gembloux Agro BioTech, Belgique) ; le Professeur Touridomon Issa SOMÉ (Université Joseph Ki-Zerbo, Burkina Faso) ; je tiens à manifester toute ma reconnaissance et ma gratitude, pour votre patience, votre rigueur scientifique et vos conseils avisés, qui m'ont guidé, formaté et orienté tout au long de ce dur labeur. Du fond du cœur, merci pour votre bienveillance et votre soutien.

À toute l'équipe de comité de thèse ; les Professeurs Brigitte ÉVRARD (ULiège, Belgique), Roland MARINI DJANG'EING'A, Sabine DANTHINE, Touridomon Issa SOMÉ, Philippe HUBERT (ULiège, Belgique), Michel FRÉDÉRICH (ULiège, Belgique), Ange MOUTHYS-MICKALAD (ULiège, Belgique) et Rasmané SEMDÉ (Université Joseph Ki-Zerbo, Burkina Faso) ; pour m'avoir assisté, orienté, conseillé et supporté, je vous dis merci du fond du cœur. Ce travail n'aurait pas abouti sans votre engagement et détermination.

Aux Docteurs Olivia JANSEN (ULiège, Belgique) et Pierre-Yves SACRÉ (ULiège, Belgique), vous vous êtes portés volontaires pour m'aider, m'encadrer et me guider, je ne saurai vous dire assez merci. Merci pour vos qualités scientifiques, vos valeurs morales, et votre dévouement. Je vous souhaite le meilleur. Soyez grandement remerciés.

À toutes les équipes des laboratoires de recherche : le Professeur Christophe BLECKER (ULiège, Gembloux Agro BioTech, Belgique) et toute son équipe du laboratoire Science des Aliments et Formulation (SAF), les équipes de Chimie Organique, de Chimie Analytique (Gembloux Agro-Bio Tech) ; du Centre de l'Oxygène Recherche & Développement (CO₂RD), du Laboratoire de Chimie Analytique Pharmaceutique (LCAP), du Laboratoire de Pharmacognosie, en Belgique ; les équipes du Laboratoire de Toxicologie Environnement et Santé (LATES), du Laboratoire du

Développement du Médicament (LADME), du Centre de Formation, de Recherche et d'Expertises en Sciences du Médicament (CEA-CFOREM), ainsi que de la Direction du Contrôle des Médicaments et autres produits de santé (DCM/ANSSEAT), j'exprime chaleureusement ma gratitude et ma reconnaissance pour m'avoir accueilli, accepté et assisté. Votre assistance technique, votre qualité morale et votre passion à toujours relever les défis ont été une source de motivation pour moi.

Au Professeur Josias YAMÉOGO (Université Joseph Ki-Zerbo, Burkina Faso), au Docteur Abdoul Karim SAKIRA (Université Joseph Ki-Zerbo, Burkina Faso), et à Monsieur Soumaïla KONATÉ, merci du fond du cœur d'avoir été un soutien scientifique et moral tout au long de cette thèse. Un grand merci.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au peuple belge en général et à l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur-Coopération Internationale de la Fédération Wallonie-Bruxelles (ARES-CCI) en particulier, pour avoir contribué à la réalisation de ce travail. Merci de m'avoir accueilli et soutenu financièrement.

AUX MEMBRES DU JURY

Aux membres du jury externes, les Professeurs Achille YEMOA (Université Abomey-Calavi) et Caroline STEVIGNY (Université Libre de Bruxelles), ainsi que tous les membres du jury internes, les Professeurs Ange MOUTHYS-MICKALAD, Philippe HUBERT et Michel FRÉDÉRICH, j'exprime toute ma gratitude, vous qui avez accepté de donner de votre temps pour évaluer ce travail de thèse afin d'accroître sa qualité et sa portée scientifique. Soyez-en grandement remerciés. Merci pour votre disponibilité et votre engagement scientifique à m'accompagner à la finalisation de ce travail.

Je vous exprime toute ma reconnaissance et mes remerciements au Professeur Brigitte ÉVRARD, présidente du jury, pour l'honneur que vous me faites en présidant cette soutenance. Merci d'avoir contribué à rehausser la qualité de cette thèse.

Au Professeur Sylvain OUÉDRAOGO, rapporteur, j'exprime toute ma reconnaissance pour votre engagement à évaluer ce travail. La qualité de vos observations et recommandations a contribué à rehausser le niveau scientifique de ce travail.

Au Professeur Rasmané SEMDÉ, secrétaire, j'exprime toute ma gratitude pour l'intérêt que vous portez à cette thèse, à travers la qualité de vos analyses constructives et vos observations, qui ont permis d'enrichir davantage la présente thèse.

Liste des figures

Figure 1: Différentes parties du karité retrouvées au Burkina Faso, de la sous-espèce <i>Vitellaria paradoxa</i> paradoxa C.F. Gaertn.....	19
Figure 2: Distribution géographique des deux sous-espèces du karité (<i>Vitellaria paradoxa</i> subsp. <i>paradoxa</i> ; <i>V. paradoxa</i> subsp. <i>nilotica</i>) en Afrique au Sud du Sahara.....	21
Figure 3 : Différentes formes de fruits de karité.....	21
Figure 4: Produits finis de beurre de karité.....	23
Figure 5: Composition panoramique des différentes fractions majoritaires du beurre de karité brut	51
Figure 6: Formules chimiques du glycérol, des monoglycérides, des diglycérides et triglycérides.....	52
Figure 7: Structures chimiques de la quercétine et du kaempférol	58
Figure 8: Structure chimique de l'isoprène et classification des terpènes en fonction du nombre d'unités d'isoprène.	60
Figure 9: Illustration du spectre électromagnétique, de l'énergie du photon en lien avec sa longueur d'onde.	76
Figure 10: Mécanismes du vieillissement cutané induit par les UVB. Résumé des principales voies affectées par l'exposition chronique de la peau aux UVB et de leur impact sur l'apparence des tissus.	77
Figure 11: Spectres de rayonnements électromagnétiques et action des ROS et RNS sur la peau.....	78
Figure 12: Cartographie des sites de collecte des échantillons	86
Figure 13 : Réaction entre le DPPH• et un antioxydant pour former le DPPH.	104
Figure 14: Formation du radical stable ABTS à partir d'ABTS et de persulfate de potassium.	104
Figure 15 : Dispositif expérimental optimisé pour l'évaluation en milieu cellulaire et acellulaire de l'effet de l' ¹ O ₂ irradié par le Rose Bengal sur la viabilité cellulaire.	109
Figure 16 : Illustration du modèle cellulaire sur les cellules HaCaT, mettant en évidence les cellules sans Rose Bengal et les cellules avec Rose Bengal après irradiation à λ 550 nm.....	109
Figure 17 : Illustration du modèle ADPA : Après irradiation, l'ADPA réagit avec l'oxygène singulet pour former l'endoperoxyde (ADPAO ₂).	110
Figure 18: a) Dispositif de filtration à pompe de beurre de karité ; b) Tissu-filtre.....	118
Figure 19: a - b) Diagrammes des différentes étapes d'extraction du beurre de karité au Burkina Faso ; cas de 4 procédés	121
Figure 20: Exemple de chromatogramme des acides gras estérifiés et non estérifiés de l'échantillon lot ₁	126
Figure 21: Exemple de chromatogrammes des composés organiques volatiles de l'échantillon Yate ₁	131
Figure 22: Exemple de chromatogrammes des composés stéroliques de l'échantillon Yate ₁	134
Figure 23: Profils de teneur en matières grasses solides de tous les échantillons de beurre de karité brut obtenus par RMNp avec les méthodes en série et en parallèle.	140
Figure 24: Diversité des profils de cristallisation par ACD des échantillons de beurre de karité.	144
Figure 25: Diversité des profils de fusion par ACD des échantillons de beurre de karité	147
Figure 26 : Boxplots des variables avant la normalisation.....	150
Figure 27 : Boxplots des variables après la normalisation.....	150
Figure 28 : Projection des variables sur les deux premières composantes principales et contribution sur les deux premières composantes.	151
Figure 29 : Variance cumulée sur les dix premières dimensions	151
Figure 30: Projection des individus sur le plan factoriel des dimensions 1 et 2 selon leurs scores	153
Figure 31: Courbe d'étalonnage du pyrogallol par colorimétrie. La courbe du standard de référence a été utilisée pour calculer les teneurs en composés phénoliques. Les concentrations sont exprimées en équivalent pyrogallol.....	154

Figure 32: Courbe d'étalonnage de l'acide gallique. La courbe du standard de référence a été utilisée pour quantifier les composés phénoliques identifiés par CLHP. Les teneurs sont exprimées en GAE.....	155
Figure 33: Différents composés phénoliques par CLHP, d'extraits de beurre de karité.....	156
Figure 34: Chromatogrammes illustratifs des échantillons traditionnels et industriels, dont la séparation a été faite à 280 nm, mettant en évidence les pics non identifiés (C3-C6-C7 et surtout les trois pics C8-C9 et C10) et ceux identifiés	158
Figure 35: Absorbance comparative du beurre de karité brut dans l'éthanol a) et le cyclohexane b).....	159
Figure 36: Effet des composés du karité sur le DPPH et l'ABTS.	161
Figure 37: Représentation graphique du facteur de protection solaire in vitro (n = 3) des échantillons bruts de beurre de karité	162
Figure 38: Facteur de protection solaire kariténe dépendant. Les essais ont été réalisés en triplicat (n = 3)	164
Figure 39 : Influence des échantillons tests sur la production de P^1O_2 induite par l'ADPA, illustrant l'allure des spectres des échantillons Ioba2, kariténe et du TiO_2 en présence ou en absence de RB à T0 et T300s	168
Figure 40: Effets des échantillons bruts traditionnels et de leurs extraits polaires sur la production de P^1O_2 par photosensibilisation du RB.....	169
Figure 41: Effets des échantillons bruts industriels et de leurs extraits polaires sur la production de P^1O_2 par photosensibilisation du RB.....	170
Figure 42: Cytotoxicité sur cellules HaCaT du beurre de karité brut.	172
Figure 43: Effet des échantillons bruts en solution dans l'éthanol et de leurs extraits polaires par rapport au TiO_2 en solution dans le DMSO, sur la viabilité des cellules HaCaT.....	175
Figure 44: Structures chimiques du β -sitostérol a) et du cholestérol b).....	206

Liste des tableaux

Tableau 1: Critères de qualité physicochimique du beurre de karité non raffiné selon la norme NBF 01-005 (2006) et le Codex Alimentarius 2017	29
Tableau 2 : Synthèse des différentes propriétés pharmacologiques et thérapeutiques du beurre de karité brut	32
Tableau 3 : Principaux groupes chimiques d'intérêt du beurre de karité	36
Tableau 4 : Synthèse des procédés traditionnels ou artisanaux de production du beurre de karité selon la littérature	40
Tableau 5 : Synthèse des procédés améliorés ou semi-industriels de production du beurre de karité selon la littérature	46
Tableau 6: Représentation synthétique des différents composants majoritaires du beurre de karité brut ..	50
Tableau 7: Exemples d'acides gras saturés et insaturés avec leurs points de fusion correspondants.....	54
Tableau 8: Profil en acides gras saturés majoritaires du beurre et/ou d'extraits d'amandes.....	54
Tableau 9: Profil en acides gras mono-insaturés majoritaires du beurre et/ou d'extraits d'amandes	55
Tableau 10: Profil en acides gras polyinsaturés majoritaires du beurre et/ou d'extraits d'amandes	55
Tableau 11: Composition en acides gras du beurre de karité non raffiné déterminé par chromatographie gazeuse.....	55
Tableau 12: Exemples de composés insaponifiables du beurre de karité.....	57
Tableau 13: Classes de composés phénoliques provenant de sources naturelles	58
Tableau 14: Triterpènes du beurre de karité.....	62
Tableau 15: Caractéristiques physicochimiques du beurre de karité définies dans le Codex Alimentarius.	64
Tableau 16: Synthèse des caractéristiques physicochimiques et biochimiques du beurre de karité dans la littérature	65
Tableau 17 : Effets des différentes étapes de prétraitements impactant les caractéristiques du beurre de karité.....	71
Tableau 18 : Valeur de l'indice UV selon l'Organisation Mondiale de la Santé.....	77
Tableau 19 : Agents de protection solaire autorisés en tant qu'ingrédients actifs dans les produits répertoriés en Australie, selon la Commission européenne (CE) et aux USA (monographie de la Food and Drug Administration).	81
Tableau 20 : Répartition des échantillons de beurre de karité collectés au Burkina Faso en fonction de leur localité et des procédés d'extraction	87
Tableau 21 : Échantillons industriels de travail.....	88
Tableau 22 : Conditions chromatographiques d'analyse par GC/FID des acides gras.....	93
Tableau 23 : Matériel de recherche traditionnel et industriel, selon leur origine, sélectionné pour les essais de composés phénoliques, potentiel antioxydant, et capacité de photoprotection.....	100
Tableau 24 : Composition de la phase mobile en mode gradient	101
Tableau 25 : Pondération utilisée pour la détermination du facteur de protection solaire par spectrophotométrie.....	106
Tableau 26 : Répartition des échantillons de beurre de karité collectés au Burkina Faso en fonction de leur localité et des différents procédés d'extraction	117
Tableau 27: Différentes étapes des procédés d'extraction du beurre de karité du Burkina Faso	119
Tableau 28: Différentes étapes des procédés d'extraction du beurre de karité du Burkina Faso	120
Tableau 29: Indices chimique de qualité des cinq échantillons pilotes de beurre de karité	122
Tableau 30 : Indices chimique de qualité des échantillons (37) de beurre de karité collectés au Burkina Faso en lien avec leurs procédés d'extraction	124

Tableau 31: Profil des acides gras estérifiés et non estérifiés (en % de teneur) des échantillons pilotes de beurre de karité collectés au Burkina Faso.....	126
Tableau 32: Profil des acides gras majoritaires (%) des échantillons de beurre de karité en lien avec leurs procédés d'extraction	127
Tableau 33 : Calcul de l'indice d'iode par chromatographie gazeuse et de la teneur en karitène.....	129
Tableau 34 : Profil (% m/m) des composés organiques volatiles par échantillon de beurre de karité cibles	132
Tableau 35 : Profil en stérols (mg/kg) des échantillons cibles de beurre de karité du Burkina Faso.....	135
Tableau 36 : Degré de coloration selon le système (L* a* b*) et indice de jaunissement des formes brutes et fondues des échantillons de beurre de karité collectés au Burkina Faso	136
Tableau 37: Températures de transition des thermogrammes de fusion et de cristallisation du beurre de karité brut collectés au Burkina Faso.....	148
Tableau 38: Températures de fin de fusion (T _m) de l'ensemble des échantillons.....	149
Tableau 39 : Coefficient de corrélation entre les paramètres physicochimiques et thermiques du beurre de karité brut.....	152
Tableau 40 : Teneurs en polyphénols totaux par la méthode colorimétrique et concentration des échantillons testés. Les résultats ont été exprimés en moyenne $\pm$ écarts-types	154
Tableau 41: Concentration et temps de rétention des substances chimiques de référence utilisées dans la procédure analytique par CLHP	156
Tableau 42: Composés phénoliques dans les échantillons de beurre de karité brut originaire du Burkina Faso et dans les échantillons industriels.....	158
Tableau 43 : Coefficient de corrélation entre la capacité antioxydante (DPPH et ABTS) et la teneur en polyphénols totaux.....	160
Tableau 44 : Facteur de protection solaire in vitro des échantillons de beurre de karité originaire du Burkina Faso selon divers types de procédés d'extraction.....	163
Tableau 45 : Facteur de protection solaire in vitro (n = 3) de l'échantillon industriel par ajouts dosés du karitène	164
Tableau 46 : Résultats des essais selon les conditions expérimentales pour l'évaluation du potentiel photoprotecteur en milieux acellulaire et cellulaire	165
Tableau 47: Effets des échantillons bruts et de leurs extraits polaires sur la production de l' ¹ O ₂ par photosensibilisation du RB. Les valeurs d'absorbance à 400 nm montrent une décroissance de l'ADPA en fin de réaction (300 s) pour tous les échantillons test.....	167
Tableau 48: Classification des produits de protection solaire selon "European Commission and Cosmetics Europe" (Ex COLIPA).....	199
Tableau 49: Techniques analytiques mises en œuvre dans l'analyse des corps gras.....	232
Tableau 50 : Mode opératoire des mesures en mode série et parallèle de détermination du SFC.....	242

Sigles et abréviations

ABTS	Acide 3-éthylbenzothiazoline 6-sulfonique/3-ethylbenzothiazoline 6-sulfonic acid
ACD	Analyse calorimétrique différentielle
ACP	Analyse en composantes principales
ADN	Acide désoxyribonucléique
ADPA	Acide 9,10-anthracènedipropanoïque/Anthracène
AG	Acides gras
AGI	Acides gras insaturés
AGL/FFA	Acides gras libres/Free fatty acids
AGME/FAME	Acides gras méthyl esters/Fatty acid methyl esters
AGMI	Acides gras monoinsaturés
AGS	Acides gras saturés
AOCS	American oil chemists' society
AV/IA	Acid value/Indice d'acide
BK	Beurre de karité
CB	Cocoa butter/Beurre de cacao
CBE	Cocoa butter equivalent/Équivalent du beurre de k
CCM	Chromatographie sur couche mince
DAG	Diglycérides ou diacylglycérols
DMAPP	Dimethylallyl diphosphate/Diphosphate de diméthylallyle
DMSO	Diméthylsulfoxyde
DPPH	2,2-Diphényl-1-Picrylhydrazyl
EFA/AGE	Esterified fatty acids/Acides gras estérifiés
EHM	Méthoxycinnamate d'éthylhexyle
EtOH	Éthanol
FC	Réactif de Folin-Ciocalteu
GC	Gas chromatographie/Chromatographie en phase gazeuse
GC/FID	Chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme
GC/MS	Chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur de masse
GAE	Gallic acid equivalent/Équivalent acide gallique
HaCaT	Human keratinocyte cell line/Cellules humaines kératinocytes
HDL	High-Density Lipoprotein/Lipoprotéines de haute densité
Hf	Enthalpie de fusion
HPLC/CLHP	High performance liquid chromatography/Chromatographie liquid haute performance
INSD	Institut national de la statistique et de la démographie/Burkina Faso
IR	Rayonnement infrarouge
IV/IO	Iodine value/Indice d'iode
IUPAC	International union of pure and applied chemistry/Union internationale de chimie pure et appliquée
K	Coefficient spécifique d'extinction
LDL	Low-Density Lipoprotein/Lipoprotéines de basse densité
LQ/LOQ	Limite de quantification/Limit of quantification
MeOH	Méthanol

MTS	Métabolique Tetrazolium Solution/Solution métabolique de tétrazolium : 3-(4,5-diméthylthiazol-2-yl)-5-(3-carboxyméthoxyphényl)-2-(4-sulphophényl)-2H-tétrazolium
MVA	Mevalonate pathway/Acide mévalonique/Voie du Mévalonate
NEFA/AGNE	Non-esterified fatty acids/Acides gras non estérifiés
NIRS	Near-infrared spectroscopy/Spectroscopie proche infrarouge
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONG	Organisations non gouvernementales
$^1\text{O}_2$	Oxygène singulet
P	Processus ou procédé d'extraction du beurre de karité
PA	Principe actif
PGE	Pyrogallol equivalent/Equivalent pyrogallol
PTF	Partenaires techniques et financiers
PV	Peroxyde value/Indice de peroxyde
RB	Rose Bengal
RI	Refractive index/Indice de réfraction
RMNp	Résonance magnétique nucléaire basse résolution
ROS	Reactive oxygen species/Espèces réactives de l'oxygène
RP-HPLC	Reversed phase high performance liquid chromatography/Chromatographie liquide haute performance en phase inverse
Rt	Retention time/Temps de rétention
SCR	Substance chimique de référence
SFC	Solid fat content/Teneur en matière grasse solide
SPF/FPS	Sun protection factor/Facteur de protection solaire
SPME-GC/MS	Solid-Phase Microextraction coupled with Gas Chromatography-Mass Spectrometry/Chromatographie gazeuse/spectroscopie de masse par micro-extraction en phase solide couplé à un détecteur de masse
SV/IS	Saponification value/Indice de saponification
TAG	Triacylglycérols/Triglycérides
TiO ₂	Titanium dioxide
TPC/CPT	Total phenol content/Composés phénoliques totaux
UMC	Unsaponifiable matter content/Teneur en matières insaponifiables
UPF	Ultraviolet Protection Factor/Facteur de protection UV des tissus
USD	Dollar américain
UV (A, B, C)	Ultraviolet A, B, C
UVR	Ultraviolet radiation/Rayonnement ultraviolet
YI	Yellow index/Indice de jaunissement
ΔH	Ratio Enthalpie
ΔK	Variation du coefficient spécifique d'extinction

La présente thèse établit une analyse comparative de propriétés physicochimiques, biochimiques et thermiques des beurres de karité extraits selon divers types de procédés au Burkina Faso. Elle met ensuite l'accent sur l'étude des propriétés de photoprotection de ces beurres de karité. Il s'agit d'un sujet d'intérêt pour le Burkina Faso, dans un contexte de valorisation des ressources nationales. En effet, l'exportation du beurre de karité et des noix constitue une importante source de revenu pour l'économie du pays. Le beurre de karité brut est devenu un produit labellisé (Marque déposée) au Burkina Faso « Beurre de karité du Burkina Faso » et constitue une matière première de choix pour les industries agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques du fait de ses nombreuses propriétés.

Dans un contexte de défis sanitaires et économiques, une meilleure connaissance des propriétés du beurre de karité pourrait contribuer à améliorer les pratiques sur la production du beurre conformément aux standards internationaux, et partant à améliorer la source de revenus des producteurs locaux. Les vertus cosmétiques et pharmaceutiques revendiquées par le beurre brut peuvent permettre une meilleure prise en charge de certaines pathologies.

L'intérêt de cette thèse est de contribuer à une meilleure connaissance des propriétés du beurre de karité extrait par des méthodes traditionnelles au Burkina Faso, en vue de sa valorisation.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes promoteurs de thèse. Je veux nommer les Professeurs Roland MARINI DJANG'EING'A, Sabine DANTHINE et Touridomon Issa SOMÉ, toute l'équipe d'encadrement constituée des Professeurs Ange MOUTHYS-MICKALAD, Michel FRÉDERICH, Philippe HUBERT, Rasmané SEMDÉ et les Docteurs Olivia JANSEN et Pierre-Yves SACRÉ pour leurs engagements, leur disponibilité et leurs conseils tant scientifiques que pratiques. Ces conseils m'ont permis de parvenir aux résultats de recherches contenus dans ce document. Je veux en particulier rendre hommage à la présidente du comité de thèse, le Professeur Brigitte ÉVRARD, dont le dévouement a permis à ce travail de connaître une issue heureuse. Les remerciements vont également à l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur - Coopération Internationale de la Fédération Wallonie-Bruxelles (ARES-CCI). Merci pour votre accompagnement, vos enseignements et votre patience.

Merci à toutes ces bonnes volontés qui ont œuvré, chacune à sa manière, dans la discrétion et dans l'anonymat à l'aboutissement de ce travail.

Introduction ~ Objectifs

INTRODUCTION

Le karité (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn), espèce de la famille des Sapotaceæ, est un arbre qui pousse à l'état naturel dans toute une bande de l'Afrique au Sud du Sahara (figure 1). Exclusivement africaine, la « ceinture du karité » (figure 2) comprend seize pays et les principaux producteurs de noix et de beurre brut sont le Nigéria, le Mali, le Burkina Faso et le Ghana. Il existe deux sous-espèces, dont *Vitellaria paradoxa subsp. nilotica* qui pousse exclusivement en Afrique de l'Est et *Vitellaria paradoxa subsp. paradoxa*, retrouvée en Afrique de l'Ouest (Nahm et al. 2013).

Différents noms vernaculaires de l'arbre existent : en français (karité, arbre à beurre), en anglais (shea) et en mooré (taanga) pour l'arbre de karité. Les matières premières sont ainsi désignées : l'amande en français (zuundi en mooré), le beurre ou l'huile lorsque sous forme liquide en français (kaam en mooré). Les synonymes de la plante : *Butyrospermum parkii* (G. Don) Kotschy et *Butyrospermum paradoxa subsp. parkii* (G. Don) Hepper (Nicolas 2018).

Au Burkina Faso, l'aire de distribution (régions où le karité pousse) du karité couvre 70 % du territoire (François et al. 2009) avec un parc forestier couvrant 37 des 47 provinces du Burkina Faso. Parmi ces provinces, celles du Houet (Guiriko), du Ioba (Djôrô), du Nahouri (Nazinon), du Kadiogo (Kadiogo) et de la Sissili (Nando) représentent les zones à fort potentiel de karité (Badini, et al. 2011).

Anciennement connu sous le nom de *Butyrospermum paradoxum subsp. parkii* (G. Don) Hepper, l'arbre, à maturité, mesure entre 10 et 15 mètres de haut. Il s'agit d'un arbre centenaire, qui atteint sa maturité (âge adulte de l'arbre) après environ 30 ans et sa production de fruits s'étale sur une période de 50 à 100 ans. La floraison (début de la reproduction) pour les arbres poussant naturellement commence entre 15 et 20 ans (Masters et al. 2004), bien avant la période de maturité de l'arbre. Elle est de 5 ans pour les espèces greffées. La technique de greffage du karité offre l'avantage de réduire considérablement la période de maturité de l'arbre. Elle peut se faire selon la technique dite de « greffage en fente simple » ou de « greffage de côté dans l'aubier » (Yao et al. 2019). La période de floraison des arbres débute autour des mois de mai et juin et les fruits mûrissent quelques mois après, entre août et septembre de la même année. Il s'agit d'arbres sauvages qui poussent naturellement et les fruits murs tombent aux pieds des arbres, facilitant la pérennité de l'espèce. Ces fruits murs sont alors ramassés pour les besoins d'extraction du BK.



Figure 1: Différentes parties du karité retrouvées au Burkina Faso, de la sous-espèce *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn ; **a)** : Arbre sauvage de karité ; **b)** : Feuilles et fruits de karité ; **c)** : Fruits mûrs de karité ; **d)** : Noix de karité fraîchement dépulpées ; **e)** Amandes de karité fraîchement décortiquées.
Crédit photos : Bertrand Goumbri

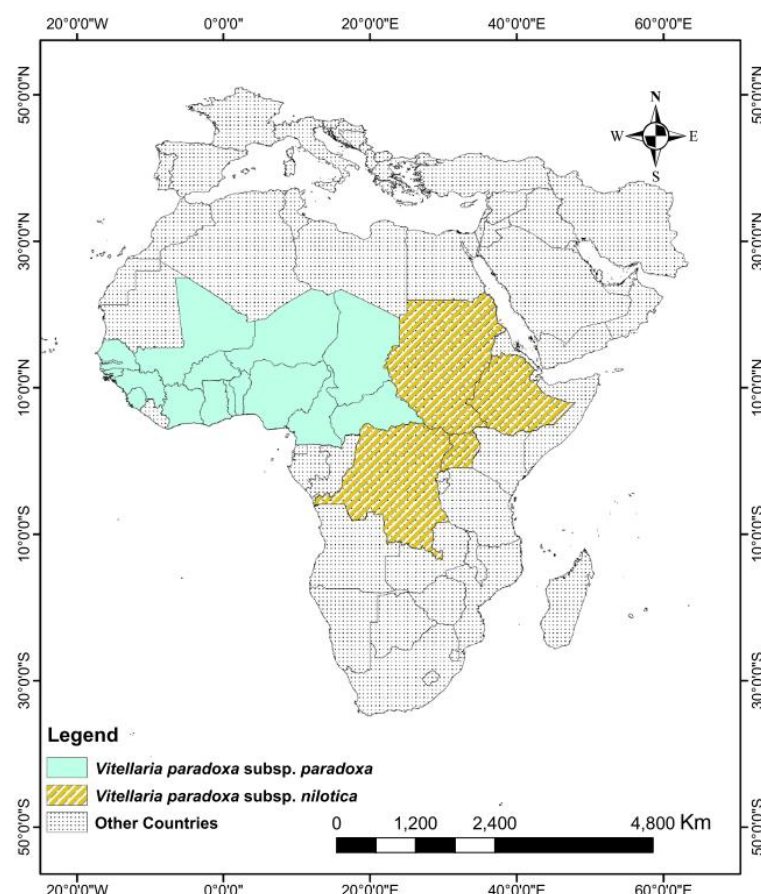


Figure 2: Distribution géographique des deux sous-espèces du karité (*Vitellaria paradoxa* subsp. *paradoxa* ; *V. paradoxa* subsp. *nilotica*) en Afrique au Sud du Sahara.
Source : Damian Tom-Dery cité par Tom-Dery et *al.* (2018)

Le fruit est une baie charnue et comestible renfermant une à deux amandes. Le mésocarpe (partie charnue) est riche en vitamines, en minéraux et aussi en protéines. Le fruit est également appelé karité comme le nom de l'arbre. Mûr, il tombe naturellement de l'arbre et se présente sous forme de baie charnue renfermant la noix. La noix peut avoir différentes formes : ovoïde, ellipsoïde, fusiforme ou arrondie, figure 3. Le fruit est de couleur verte, verdâtre ou encore vert-sombre (Kougblénou et *al.* 2012). Les amandes sont transformées selon divers types de procédés pour donner le «beurre de karité» (BK) (Honfo et *al.* 2014) qui est un corps gras à usage multiple, solide à température ambiante et qui fond autour de 40 °C pour donner une fraction liquide. La figure 4 illustre le BK dans différents conditionnements retrouvés sur la place au Burkina Faso et dans le monde. Les amandes de karité ont une teneur moyenne élevée en graisse, généralement entre 45 et 55 %, bien qu'elle puisse varier de moins de 25 % à plus de 60 % (Lovett 2015). Selon Honfo et *al.* (2014), cette teneur en matière grasse est comprise entre 17,4 et 59,1 g/100 g de poids sec. L'extraction de la matière grasse des amandes peut se

faire par des procédés mécaniques (pression à chaud, à froid), ou par extraction par un solvant (Goumbri et *al.* 2021).

Le BK est un corps gras d'origine végétale, traditionnellement utilisé depuis plusieurs siècles en Afrique et constitue un élément important de l'identité culturelle des peuples (Saussey 2011). Il s'agit d'un produit de grande consommation en Afrique subsaharienne, avec des parts de marché à l'international très importantes. Les corps gras sont des matières grasses d'origine végétale ou animale, composées principalement de lipides, insolubles dans l'eau mais solubles dans l'alcool ou l'éther. Ce sont donc des graisses et huiles qui jouent un rôle essentiel comme réserve d'énergie et comme constituant des membranes biologiques. Les corps gras sont majoritairement constitués de triglycérides qui sont des esters de glycérol et d'acides gras.

Il a été mis en place au Burkina Faso une filière karité appelée “Table filière karité (TFK)” dont le rôle est entre autres la promotion des bonnes pratiques de production et de commercialisation du BK. En effet, la TFK joue un rôle central de coordination et de représentation des acteurs de la filière karité. Elle contribue à structurer la filière, défendre les intérêts des producteurs, améliorer la qualité des produits et renforcer la compétitivité du BK sur les marchés nationaux et internationaux. Son objectif demeure donc l'amélioration de la chaîne de valeur du karité au Burkina Faso. Pour le Burkina Faso, c'est le quatrième produit d'exportation après l'or, le coton, la filière bétail/viande, avec des perspectives intéressantes pour le produit intérieur brut.



Figure 3 : Différentes formes de fruits de karité. Source : (Kouglénou et *al.* 2012)

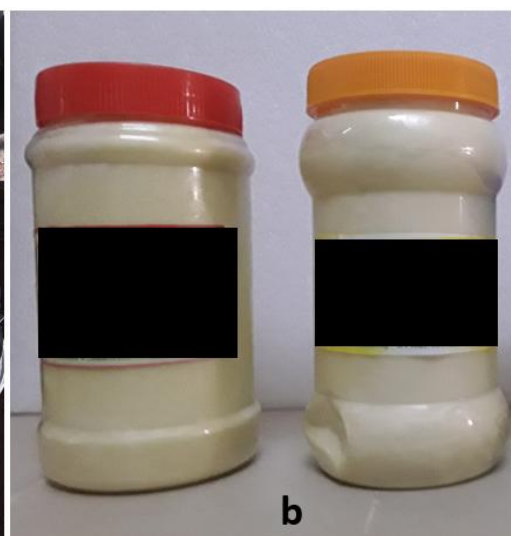




Figure 4: Produits finis de beurre de karité ; **a - g**) : Différents conditionnements du beurre de karité brut produit localement au Burkina Faso ; *Crédit photos : Bertrand Goumbri*. **h - i**) représentent du beurre de karité d'origine autre que le Burkina Faso (source : “La Savonnerie Bourbonnaise” et Total Improvement (2010)).

Le BK revêt une importance considérable pour le Burkina Faso sur le plan socio-économique. En effet, le BK constitue une identité culturelle pour les populations africaines, et surtout burkinabè, du fait de la place qu'il occupe dans la société. Il est traditionnellement utilisé comme huile de cuisson alimentaire, source d'énergie lumineuse, produit d'entretien pour le corps et le cuir chevelu, et actif thérapeutique pour la prise en charge de nombreuses pathologies. Sur le plan des techniques d'extraction, le BK est extrait selon des méthodes qui se transmettent de génération en génération, au sein d'un groupe ethnique, d'une communauté, ou au sein d'une même famille. Il s'agit d'une activité presque exclusivement réservée à la population féminine. Outre les utilisations traditionnelles, le BK peut être transformé sur place ou exporté. La transformation en produits finis locaux reste encore très marginale et concerne surtout la cosmétique, les produits de soins corporels et du cuir chevelu, ainsi que la savonnerie. Pour certains besoins d'exportation, le BK peine à satisfaire les critères de qualité pour certaines industries agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques. La valorisation du BK réside dans un premier temps dans la connaissance de sa composition physicochimique et thermique et de ses composés bioactifs en comparaison à la littérature.

Le BK tire en partie ses nombreuses propriétés thérapeutiques de sa composition en matières insaponifiables dont les composés terpéniques et les composés phénoliques, responsables entre autres des activités anti-inflammatoires, émollientes, hydratantes, antioxydantes (Alvarez and Rodríguez 2000; Akihisa, et al. 2010; Nahm et al. 2013). Sa teneur en matières insaponifiables

est élevée par rapport aux autres matières grasses (Thomas et *al.* 2015). Du point de vue de son utilisation, il est traditionnellement attribué au BK des propriétés de protection de la peau contre les rayons solaires, lesquels sont susceptibles de dommages corporels après une exposition prolongée (Jansen et *al.* 2013). En effet, l'exposition aux rayons UV est toxique pour la peau et les composés phénoliques sont décrits comme ayant des propriétés antioxydantes capables de lutter contre le stress oxydatif cutané.

La présente étude vise à explorer le potentiel photoprotecteur du beurre de karité dont on peut se demander les mécanismes d'action mis en œuvre, ainsi que les composés responsables. Cependant, la diversité des procédés d'extraction du beurre de karité brut en Afrique et son probable pouvoir de protection de la peau contre les rayons solaires soulèvent deux questions de recherche, dont :

- La première, y a-t-il une relation entre les procédés d'extraction et les propriétés physicochimiques et thermiques du beurre de karité du Burkina Faso ?
- La deuxième, existe-t-il réellement des propriétés photoprotectrices du beurre de karité tel que produit au Burkina Faso ? Si oui, par quel mécanisme probable ?

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif général de ce travail est de contribuer à une meilleure connaissance des propriétés du beurre de karité extrait par des méthodes traditionnelles au Burkina Faso.

Les objectifs spécifiques assignés à ce travail sont :

- (i) Évaluer les propriétés chimiques du beurre de karité du Burkina Faso en lien avec les procédés d'extraction ;
- (ii) Déterminer les propriétés physiques et thermiques du beurre de karité du Burkina Faso en lien avec les procédés d'extraction ;
- (iii) Étudier le potentiel photoprotecteur du beurre de karité.

Généralités

I - GÉNÉRALITÉS

I.1. Principales utilisations du beurre de karité

En Afrique, le BK reste le plus souvent à l'état brut, non raffiné (c'est-à-dire artisanalement fabriqué, sans subir de traitement chimique ou physique, conservant ainsi toutes ses propriétés naturelles), consommé comme tel par les populations locales, mais il est de plus en plus exporté par des filières bien organisées. Les exportations concernent aussi bien le produit fini brut que les noix et/ou les amandes de karité. La production du BK a connu ces dernières décennies une très forte croissance en raison de son utilisation dans les industries agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques. C'est donc dans les pays industrialisés que la transformation en produits finis est la plus développée.

I.1.1. Utilisations traditionnelles

L'aspect semi-solide à température ambiante permet une conservation, une utilisation et une application aisées du BK. Celui-ci est traditionnellement utilisé depuis plusieurs siècles pour différentes raisons. Dans l'alimentation, il est utilisé comme huile de cuisson ou comme huile de friture (Israel 2014; Lovett 2015).

Traditionnellement, en cosmétique, le BK est utilisé pour l'entretien de la peau et des cheveux tant pour les adultes que pour les bébés pour lesquels il peut être appliqué directement sans aucune transformation. En effet, le BK hydrate et nourrit le cuir chevelu, apporte brillance et souplesse aux cheveux (Israel 2014; Ayanlowo et *al.* 2022). Pendant la période de l'harmattan (partie de la saison sèche en Afrique de l'Ouest et centrale, où souffle un vent sec, poussiéreux et froid provenant du Sahara), ou durant les moments froids, le BK est utilisé comme baume à lèvres et comme émollient/adoucissant contre l'assèchement (Lovett 2015). Il s'agit d'un produit également utilisé dans la lutte préventive et/ou curative des rhinites allergiques et de la congestion nasale (Tella 1979; Nicolas 2018). Il facilite la cicatrisation après une circoncision lorsqu'il est appliqué sur la plaie (Goreja 2004). Les femmes enceintes l'utilisent également en application locale pour prévenir les vergetures de grossesse.

Le BK est également utilisé dans la fabrication du savon par le processus de saponification, soit à froid, soit à chaud (Ameh et *al.* 2013; Israel 2014; Boadu et *al.* 2017; Komlaga et *al.*

2019). Le savon à base de BK est utilisé pour ses propriétés hydratantes, nourrissantes, anti-inflammatoires et adoucissantes.

En médecine et pharmacopée traditionnelles, le BK peut être utilisé soit tel quel, soit comme véhicule ou excipient. Le beurre brut est utilisé seul pour ses propriétés antalgiques, émollientes et adoucissantes (Alander 2004). Selon Ezema et Ogujiofor (1992), le BK est utilisé pour soulager les ecchymoses et les douleurs rhumatismales. Du fait de ses propriétés anti-inflammatoires, émollientes et humectantes, le BK peut servir de base pour les pommades médicinales dans la prise en charge des affections liées à la peau (Nicolas 2018; Komlaga et al. 2019). C'est ainsi qu'il est fréquemment utilisé par les guérisseurs traditionnels comme véhicule pour l'administration de produits, dans le traitement du rhumatisme et des inflammations (Tella 1979). Par ailleurs, la prise en charge de la gale, les techniques de cicatrisation des plaies et le traitement du cordon ombilical des nouveau-nés font partie des principales pathologies qui font appel au BK (Ugwu-dike et Nambudiri 2021). Au total, les auteurs ont relevé l'utilisation du BK dans 24 dermatoses où il était le plus souvent utilisé en combinaison avec d'autres ingrédients dont le palmier à huile. Enfin, le BK est utilisé comme carburant sous forme de cire pour la fabrication de bougies utilisées pour l'éclairage des habitations (Saussey 2011; Lovett et Phillips 2018; Elsewedy et al. 2022).

I.1.2. Utilisations dans les industries agroalimentaires et cosmétiques

Le Burkina Faso est le deuxième exportateur d'amandes et de produits dérivés du karité juste après le Nigéria. Selon les données officielles de l'*Institut National de la Statistique et de la Démographie* (INSD), les exportations des amandes de karité sont passées de 148 504,0 tonnes en 2014 à 114 957,6 tonnes en 2018, pour un chiffre d'affaires de 41 666 910,20 USD à 39 840 572,61 USD, une baisse liée à différents facteurs dont la situation sécuritaire. Elles connaissent cependant un regain ces dernières années passant de 150 482,3 tonnes en 2019 à 212 607,9 tonnes en 2023 d'amandes de karité, correspondant à un chiffre d'affaires de 67 494 452,44 USD à 85 401 569,46 USD. Les exportations de beurre brut ont connu les tendances suivantes : entre 2014 et 2018 elles sont passées de 12 979,3 à 21 878,4 tonnes pour des valeurs monétaires de 10 455 339,64 USD à 21 454 276,75 USD respectivement. Cependant, entre 2019 et 2023 les exportations ont connu une baisse, passant de 20 053,1 à 12 215,5 tonnes pour des chiffres d'affaires de 32 278 561,12 USD à 20 451 023,54 USD respectivement. Toutefois, la contribution du chiffre d'affaires du BK reste importante pour l'économie burkinabè,

témoignant de l'importance de la filière karité pour le Burkina Faso et de son intérêt pour les industries agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques.

I.1.2.1. Utilisations dans l'industrie agroalimentaire

L'industrie agroalimentaire demeure le plus gros consommateur du BK avec environ 90 % de la production mondiale (Thioune et *al.* 2019). Cependant, les critères de qualité pour les industries agroalimentaires sont très contraignants pour les producteurs locaux africains, liés aux techniques d'extraction mises en œuvre et à la non-standardisation (Megnanou et Niamke 2015). Ainsi, les critères de qualité physicochimiques et biochimiques du BK brut tels que définis par la norme burkinabè NBF 01-005 : 2006 (Beurre de karité non raffiné : Spécifications) et le Codex Alimentarius sont définis dans le tableau 1 (Codex Alimentarius 2017; François 2018).

Tableau 1: Critères de qualité physicochimique du beurre de karité non raffiné selon la norme NBF 01-005 (2006) et le Codex Alimentarius 2017

Caractéristiques	Beurre de karité non raffiné					
	Grade 1 ^a		Grade 1 ^b		Grade 1 ^c	
	Teneur		Teneur		Teneur	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Teneur en eau (%)	-	0,05	0,06	0,2	0,3	2
Acide gras libres (%)	-	1	1,1	3	3,1	8
Indice de peroxyde (mEq/kg)	-	10	11	15	15,1	50
Impuretés (% m/m)	-	0,09	0,1	0,2	0,3	2

NBF 01-005 (2006) : Normes burkinabè pour le beurre de karité non raffiné, Ouagadougou, Burkina Faso.

Note :

- 1^a : première catégorie destinée aux industries cosmétiques et/ou pharmaceutiques et à la consommation directe ;
- 1^b : deuxième catégorie destinée aux industries agroalimentaires ;
- 1^c : troisième catégorie destinée aux savonneries et à la consommation directe après raffinage.

Pour des raisons technologiques, économiques et de disponibilité, des matières grasses, autres que le beurre de cacao (CB) dont le BK sont employées dans la fabrication des chocolats et des confiseries (Segman et *al.* 2012; Talbot 2015; Rodriguez-Negrette et *al.* 2019). En effet, la réglementation européenne de 2003 (*Directive 2000/36/CE*), a autorisé sept huiles/grasses végétales d'origine tropicale (seules ou en association) comme pouvant être utilisées dans le chocolat européen dont le BK (Parlement européen 2000). La *Food and Drug Administration* (FDA) des États-Unis d'Amérique (USA) considère également la fraction stéarine du BK comme comestible et pouvant être utilisée dans les enrobages ou les garnitures de confiserie (Lovett 2015). En raison de propriétés physicochimiques similaires à celles du CB (CBE-

Cocoa Butter Equivalent) (Segman et *al.* 2012; Talbot 2015), il contribue à améliorer la solidité et les propriétés de cristallisation du chocolat. L'utilisation du BK comme ingrédient dans la production de confiseries au chocolat offre également des avantages compétitifs aux produits finis, tels qu'une durée de conservation plus longue et une meilleure stabilité à la chaleur (Lovett 2015). Outre le chocolat, le BK brut ou fractionné (stéarine, oléine) connaît d'autres applications dans l'industrie agroalimentaire. On les retrouve aussi dans les margarines, les crèmes glacées, les graisses alimentaires, les garnitures pour fondants, les yaourts, les bouillons cubes et les pâtes feuilletées.

Il sert également de supplément nutritionnel lipidique destiné à la lutte contre la malnutrition en Afrique subsaharienne (Sloffer et *al.* 2017). Les suppléments nutritionnels à base de lipides sont utilisés pour prévenir et traiter tout type de malnutrition : aiguë, modérée ou sévère, l'une des principales causes de mortalité chez les enfants de moins de cinq ans dans les pays en voie de développement.

I.1.2.2. Utilisations dans les industries cosmétiques/pharmaceutiques

Les industries cosmétiques/pharmaceutiques des pays développés importent autant de noix de karité que de beurre brut provenant d'Afrique pour leurs besoins. L'industrie cosmétique est le deuxième importateur de noix de karité et de BK après l'industrie agroalimentaire. Ainsi, le marché des noix de karité et du beurre est en forte croissance en Afrique, du fait de l'intérêt croissant des demandes de produits cosmétiques dans le monde. La réglementation de la Commission européenne permet d'ailleurs à certains auteurs de classer le BK comme une matière première active cosmétique (Rancurel 2004). Le BK, aussi brut que raffiné, demeure un ingrédient de choix pour les industries cosmétiques et pharmaceutiques.

L'intérêt de l'industrie cosmétique pour le BK réside dans son caractère naturel et sa teneur élevée en fractions insaponifiables qui possède de puissantes propriétés anti-inflammatoires et antioxydantes (Maranz et Wiesman 2004). Au même titre que certaines graisses et huiles (olive, avocat, coco, palme,...), le BK peut être utilisé comme excipient en cosmétique et en médecine (Alvarez et Rodríguez 2000).

À l'instar de certaines huiles et graisses de spécialité, le BK contient du squalène autour de 8,94 mg/100 g d'huile (Kerrihard et Pegg 2015), mais en faible teneur comparativement à l'huile d'olive et aux noix du Brésil, dont les teneurs sont comprises entre 136 et 705 mg/100 g d'huile et 138 mg/100 g d'huile, respectivement. C'est le principal composant des lipides

polyinsaturés présents à la surface de la peau. Il présente certains avantages pour la peau en tant qu'émollient et composé antitumoral. Le BK contient majoritairement le lupéol, l' α -amyrine, la β -amyrine et le butyrospermol, comme composés triterpéniques. Ces triterpènes se présentent sous forme d'esters d'acétyle et de cinnamoyle et sont intéressants en tant qu'ingrédients actifs dans les formulations cosmétiques (Andersson et Alander 2015).

Les insaponifiables du BK (confère *I.3.2. Composition de la fraction insaponifiable*), composés bioactifs, sont responsables des propriétés biologiques (tableau 2), d'où leurs intérêts pour les industries cosmétiques et pharmaceutiques (Mbaiguinam et *al.* 2007; Megnanou et *al.* 2014). Les saponifiables (confère *I.3.1. Composition de la fraction saponifiable*), en majorité constitués de triglycérides ou triacylglycérols (TAG), représentent environ 90 % des composés du BK, auxquels on attribue des propriétés hydratantes et émoullientes. Comme les autres huiles et graisses végétales, le BK est principalement constitué de TAG, qui sont des esters de glycérol et d'AG (Andersson et Alander 2015). Les principaux TAG présents dans le BK sont constitués des AG majoritaires dont les acides stéarique, oléique, palmitique et linoléique (Codex Alimentarius 2017b). Ces AG forment les TAG saturés-insaturés-saturés, qui comprennent l'acide stéarique-acide oléique-acide stéarique, ou SOS, et l'acide stéarique-acide oléique-acide oléique, ou SOO, variant d'une sous-espèce à l'autre (Moharram et *al.* 2006).

En investiguant l'activité anti-inflammatoire de l'extrait méthanolique du BK en utilisant la lignée cellulaire de macrophages murins J774 induite par le lipopolysaccharide, Verma et *al.* (2012) ont observé une réduction significative dose-dépendante des taux d'oxyde nitrique, de facteur de nécrose tumorale- α (TNF- α), d'interleukines 1 β (IL-1 β) et -12 (IL-12). Cette activité serait due à une action inhibitrice de l'extrait méthanolique du BK sur l'expression de l'acide ribonucléique messager (ARNm), de l'oxyde nitrique synthase inductible (ou inducible nitric oxide synthase - iNOS), de la cyclooxygénase-2 (COX-2), du TNF- α , IL-1 β et IL-12 induits par le lipopolysaccharide. Outre ses propriétés anti-inflammatoires, le BK est dépourvu d'effet secondaire comme les réactions allergiques, après administration topique ou orale, dû au fait qu'il ne possède pas de protéines solubles pouvant se lier aux immunoglobulines E (Chawla et *al.* 2011). Cependant, toujours selon les auteurs, étant donné que le BK contient du latex (Paquot et *al.* 1952), de rares cas d'allergies ont été signalés pour les personnes sensibles au latex appelés syndrome latex-fruit (Deruaz et *al.* 2004). Le latex présent dans le BK peut donc être source d'intolérance rare pour certaines personnes. Il agirait comme agent protecteur contre les allergies cutanées causées par les rayons solaires (Tella 1979). En effet, les différents organes du karité contiennent du latex, qui se retrouve jusque dans la pulpe des fruits immatures

et dans l'amande. Pendant la maturation, le latex (partie de la matière insaponifiable) diminue considérablement dans la pulpe, tandis qu'il persiste et se concentre dans l'amande (Quainoo and Dugbatey 2016).

Les propriétés cicatrisantes du BK seraient en partie attribuables à la présence de l'allantoïne, une substance connue pour stimuler la croissance de tissus sains dans les plaies ulcéreuses (Warra 2011). Selon la plateforme de sélection de matériaux spécialisés, dont des ingrédients cosmétiques, *SpecialChem* (<https://cosmetics.specialchem.com/inci-ingredients/allantoin>), l'allantoïne est un agent hydratant et cicatrisant qui a la capacité d'éliminer les cellules mortes de la peau et de la rendre fraîche et éclatante. Elle est utilisée dans une variété de produits cosmétiques et de soins personnels en raison de ses nombreux avantages.

La fraction insaponifiable du BK est utilisée pour développer des traitements contre l'arthrite, l'eczéma, les lésions de l'herpès et pour faire baisser le taux de cholestérol (Nahm et al. 2013). Selon Antonio Alvarez et Luisa (2000), cette fraction aide la peau à rester jeune en stimulant les tissus et en l'aidant à produire son propre collagène. Compte tenu de la présence de vitamines et d'autres composés bioactifs contenues dans l'insaponifiable, le BK présente d'autres propriétés pharmacologiques.

Tableau 2 (1/2) : Synthèse des différentes propriétés pharmacologiques et thérapeutiques du beurre de karité brut

Indications/Activités thérapeutiques	Fractions/Molécules actives	Références
- Émollient pour : Peau, cheveux et cuir chevelu ; - Hydratant	Beurre brut, fraction oléique α -amyrine et lupéol	(Nahm et al. 2013) (Israel 2014) (Barel et al. 2014) (Nahm 2011) (Alander 2004) (Rogers et Jr 2009) (Dini et Laneri 2021)
- Prise en charge de : Xérose, Ichtyose, - Prévention et atténuation des vergetures ; - Amélioration de la cicatrisation des plaies ; - Anti-âge	Beurre brut	(Ayanlowo et al. 2022) (Alvarez et Rodríguez 2000a)
Anti-inflammatoire	Dérivés glycosilés et non glycosilés de l'acide oléanique ; composés phénoliques	(Zhang et al. 2014)

	Triterpènes acétates et cinnamates	(Akihisa, <i>et al.</i> 2010) (Nahm <i>et al.</i> 2013) (Lin <i>et al.</i> 2018) (Israel 2014) (Nahm 2011) (Maranz et Wiesman 2004) (Andersson et Alander 2015) (Lim <i>et al.</i> 2021)
	Extrait méthanolique du beurre de karité	(Verma <i>et al.</i> 2012)
Antioxydant	Insaponifiables (composés phénoliques et tocophérols surtout)	(Nahm <i>et al.</i> 2013) (Alvarez and Rodríguez 2000) (Morin et Pagès-Xatart-Parès 2012) (Maranz et Wiesman 2004) (Lin <i>et al.</i> 2018)

Tableau 2 (2/2): Synthèse des différentes propriétés pharmacologiques et thérapeutiques du beurre de karité brut

Indications/Activités thérapeutiques	Fractions/Molécules actives	Références
Anti-allergisant	Préparation pharmaceutique contenant au moins 5% de triterpènes (butyrospermol, lupeol, parkeol, germanicol, dammaradienol, 24-methylene-dammarenol, α , et β -amyrines)	(Weidner 2008)
Prise en charge de : Eczéma, arthrite, lésions de l'herpès	Beurre brut	(Belibi <i>et al.</i> 2006) (Nahm <i>et al.</i> 2013)
Prise en charge des : Plaies et brûlures	En émulsion dans du miel, sans additifs	(Semdé <i>et al.</i> 2019) (Barel <i>et al.</i> 2014) (Adegoke <i>et al.</i> 2024)
Prise en charge symptomatique de l'eczéma (hydratant)	Crème hydratante à base de beurre de karité	(Nisbet 2018)
Possible effet sur la régénération de la barrière cutanée	Beurre brut	(Lin <i>et al.</i> 2018) (Barel <i>et al.</i> 2014)
Absorption des rayons UV : Effet photoprotecteur	Triterpènes (esters d'acides cinnamiques principalement qui absorbent à 250-300 nm) ; tocophérols, rétinols et phytostérols	(Nahm <i>et al.</i> 2013) ; (Israel 2014) (Alvarez et Rodríguez 2000) (Nahm 2011) (Ayanlowo <i>et al.</i> 2022)
Effet anti-hypocholestérolémiant : Réduction du cholestérol total et diminution des LDL (« mauvais cholestérol »)	Acide gras stéarique	(Tholstrup <i>et al.</i> 1994)
Inhibition de la mélanogenèse dans les cellules de mélanome B16 induite par l'hormone α -	Dérivés de l'acide oléanique ; Pentane-2,4-diol glucosides, Composés phénoliques, Cyclitol	(Zhang <i>et al.</i> 2014)

mélanocytaire stimulante (α -MSH)

Activité anti-radicalaire (DPPH)	Composés phénoliques
Inhibition de l'induction de l'EBV-EA (<i>Epstein-Barr Virus Early Antigen</i>)	Dérivés de l'acide oléanique ; Flavonoïdes

Le BK aurait des effets restructurants sur l'épiderme, y compris sur les cheveux secs et fragiles, et serait un bon ingrédient actif contre les vergetures. Il permet également une activité sur la régénération cellulaire et la circulation capillaire, justifiant ainsi sa capacité à favoriser la cicatrisation des petites plaies, des ulcères cutanés, et à lutter contre le vieillissement de la peau. Le β -sitostérol, composé stérolique, a été décrit comme ayant des activités immuno-modulatrice, anti-inflammatoire, hypocholestérolémiante, anthelminthique et anti-mutagène (Nagaoka et *al.* 2001; Villaseñor et *al.* 2002; Prieto et *al.* 2006; Desai et *al.* 2009).

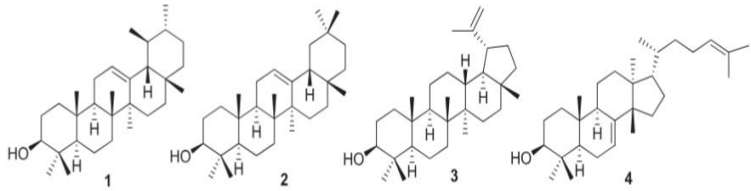
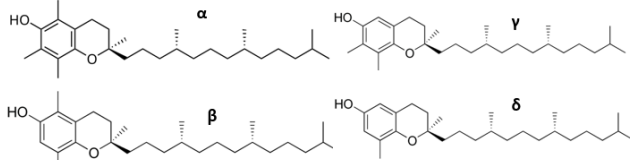
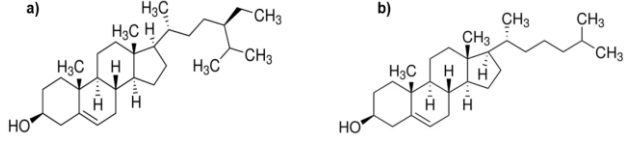
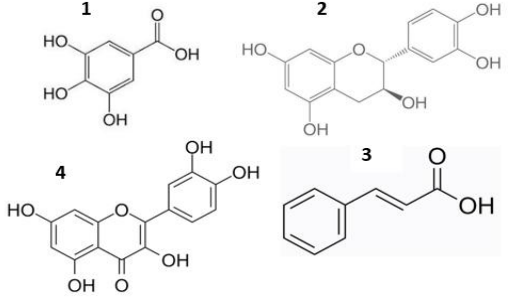
Certaines informations relatives à l'usage cosmétique du BK relèvent souvent de la littérature sans comité de relecture et restent à être confirmées ou infirmées par des expériences scientifiques. C'est ainsi que sur certains sites web (*afroculture.net* ; *huile.org* ; <https://fr.loccitane.com/ingredient-beurre-de-karite>) ou selon certains fabricants de renom de produits cosmétiques, le BK extrait artisanalement au Burkina Faso serait par exemple particulièrement riche en oméga-6 (acide gras linoléique) et en karitène. Selon la littérature, la teneur en oméga-6 varie entre 3 et 8 % (Mbaiguinam et *al.* 2007; Morin and Pagès-Xatart-Parès 2012). Ces éléments ont la capacité exceptionnelle de contribuer à hydrater, à nourrir et à renforcer la protection de la peau au quotidien. Le tableau 3 énumère les principaux composés d'intérêts du BK, responsables des activités thérapeutiques.

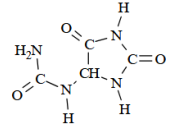
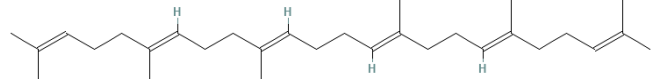
I.1.3. Autres usages du beurre de karité

Avec les glucides et les protéines, les lipides sont l'un des trois macronutriments essentiels à l'alimentation humaine. Les acides gras *trans* et les acides gras stéariques (AGS) sont impliqués dans l'augmentation du taux de cholestérol sanguin total (le rapport entre les lipoprotéines de basse densité (LDL) et les lipoprotéines de haute densité (HDL)), ce qui est lié aux maladies cardiovasculaires telles que les cardiopathies et les accidents vasculaires cérébraux. Cependant, certains auteurs ont démontré que l'AGS du BK n'augmenterait pas les concentrations de cholestérol par rapport aux autres AGS, car il est moins susceptible d'être

incorporé dans les esters de cholestérol et qu'il est associé à une réduction du cholestérol LDL (Mensink et *al.* 2003; Mensink 2005). Les graisses polyinsaturées sont le plus souvent présentées comme améliorant le taux de cholestérol dans le sang. Leurs avantages pour la santé seraient dus à des interactions mutuelles entre les AG oméga-3 (linoléniques) et oméga-6 (linoléiques) (Lovett 2015).

Tableau 3 : Principaux groupes chimiques d'intérêt du beurre de karité

Dénomination INCI : International Nomenclature of Cosmetic Ingredients /Nomenclature internationale des ingrédients cosmétiques : <i>Butyrospermum parkii</i> (<i>Vitellaria paradoxa</i>) Sources : (Lovett P. 2010), (Andersson et Alander 2015), (Kerrihard et Pegg 2015), (Verma et al. 2012), (Warra 2011), (Nahm 2011), (Israel 2014), (Barel et al. 2014), (Nahm et al. 2013), (Paquot et al. 1952)			
Groupe chimique	Structures chimiques	Propriétés	Utilisations potentielles
Alcools triterpéniques	 1) α-amyrin, 2) β-amyrin, 3) Lupéol, 4) Butyrospermol	• Activités anti-inflammatoires et anti-arthritiques • Inhibition des protéases • Esters cinnamiques absorbent les rayons UV • Teneur en insaponifiable 5-15 % • Principaux composés des insaponifiables	• Cosmétiques, nutraceutiques et produits pharmaceutiques • Soins de la peau : émollient, hydratant • Absorption des rayons UV
Vitamine E	 Tocophérols α, β, γ, δ	• Antioxydant naturel liposoluble • 200 mg/kg beurre (masse moyenne)	• Nutraceutiques • Stabilise les formulations et le beurre de karité non raffiné
Phytostérols	 a) β-sitostérol, b) cholestérol	• Réputé pour ses propriétés réductrices de cholestérol et anticancéreuses • < 1% des lipides totaux	• Nutraceutiques et Pharmaceutiques
Polyphénols	 1) acide gallique, 2) catéchine, 3) acide cinnamique, 4) quercétine	• Antioxydants naturels • Teneurs d'environ 0,4% de la poudre d'amande sèche	• Stabilise les formulations et le beurre de karité non raffiné • Nutraceutiques

Dénomination INCI : International Nomenclature of Cosmetic Ingredients /Nomenclature internationale des ingrédients cosmétiques : <i>Butyrospermum parkii</i> (<i>Vitellaria paradoxa</i>) Sources : (Lovett P. 2010), (Andersson et Alander 2015), (Kerrihard et Pegg 2015), (Verma et al. 2012), (Warra 2011), (Nahm 2011), (Israel 2014), (Barel et al. 2014), (Nahm et al. 2013), (Paquot et al. 1952)			
Groupe chimique	Structures chimiques	Propriétés	Utilisations potentielles
Allantoïne		• Stimule la croissance de tissus sains dans les plaies ulcéreuses	• Propriétés cicatrisantes • Agent hydratant
Squalène		• Principal composant des lipides polyinsaturés présents à la surface de la peau • 8,94 mg/100 g d'huile	• Émollient • Composé antitumoral
Latex	Mélange de composés (Paquot et al. 1952)	• Naturellement présent • Substance laiteuse composée principalement de terpènes (dont le karitène) et d'alcools triterpéniques • 1,5 % à 5 %	• Souplesse à la peau • Prévention des allergies au soleil • Contribuerait à la filtration des rayons UV

I.1.4. Synthèse des différentes utilisations du beurre de karité

Une synthèse des différentes utilisations du BK et de ses composantes montre que traditionnellement, le BK est utilisé comme *(i)* huile de cuisson ; *(ii)* source d'énergie lumineuse et comme *(iii)* ingrédient actif en médecine/pharmacopée traditionnelle.

En agroalimentaire, la fraction stéarique du BK est utilisée en *(i)* chocolaterie et confiserie comme agent solidifiant résistant à la chaleur ; *(ii)* dans la fabrication des margarines et des pâtes à tartiner comme agent solidifiant ; *(iii)* en boulangerie et dans la fabrication des biscuits comme agent de texture ; *(iv)* dans les émulsions Eau-Huile (sauces, crèmes, fourrages) comme agent structurant (renforcer la phase huileuse pour stabiliser la dispersion des gouttelettes d'eau).

La fraction oléine est utilisée comme *(i)* stabilisant dans les formulations alimentaires ; *(ii)* vecteur de nutriments liposolubles ; *(iii)* ingrédient dans les huiles et mélanges végétaux, par l'amélioration de la texture et de l'onctuosité des produits.

En cosmétique et en pharmaceutique, le BK est principalement utilisé comme *(i)* ingrédient actif dans la prise en charge des pathologies et *(ii)* excipient dans les formulations galéniques.

Le BK est également utilisé dans la fabrication des savons et des bougies.

I.2. Procédés d'extraction du beurre de karité

Le karité ne pousse qu'en Afrique Sub-Saharienne, dans la zone appelée "Ceinture du karité". Les techniques d'extraction du BK ont connu une évolution significative du fait de l'intérêt grandissant du produit fini dans les secteurs agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques. Les acteurs de la chaîne de karité se sont vite organisés en associations, groupements et faîtières, mutualisant leurs efforts afin d'améliorer leur production pour faire face à la demande croissante et aux exigences du marché. C'est ainsi qu'on note la mécanisation dans la chaîne de production du BK. On parle même d'organisations interprofessionnelles regroupant les acteurs de différents maillons (production, transformation, distribution), le pouvoir public, les Organisations Non Gouvernementales (ONG) et les partenaires techniques et financiers (PTF). Avant l'implication de ces ONG et autres PTF, les activités de transformation du karité étaient exclusivement artisanales avec des instruments rudimentaires et très pénibles pour les femmes. Ainsi, outre les procédés artisanaux ou traditionnels, divers autres procédés d'extraction ont vu

le jour, dont des semi-mécanisés, chimiques et/ou enzymatiques. Les différents procédés d'extraction du BK brut en Afrique ont fait l'objet d'une revue de la littérature dans le cadre de la présente thèse (Goumbri et *al.* 2021).

I.2.1. Extractions traditionnelles/artisanales

Est considéré comme procédé d'extraction artisanal/traditionnel tout procédé de transformation qui ne fait recours qu'au maximum à un seul équipement mécanisé ou motorisé, en l'occurrence le moulin pour la mouture des amandes. Sont donc décrits synthétiquement, et selon la littérature, différents types de procédés d'extractions traditionnelles/artisanales des amandes de karité en beurre (tableau 4).

I.2.2. Extractions semi-industrielles et industrielles

Est considérée comme procédé semi-mécanisé toute production qui a recours à au moins deux équipements mécanisés ou motorisés afin de faciliter la tâche, sans que cela ne soit une production en chaîne. Les procédés expérimentaux en laboratoire (extraction chimique, enzymatique, mécanique) en font partie. Le procédé est dit industriel lorsque toutes les étapes d'extraction sont maîtrisées, motorisées et/ou mécanisées et en chaîne. Cette technique, du fait de la rareté des données, n'est donc pas traitée dans cette revue de la littérature. De même, les procédés de raffinage et de fonctionnalisation n'y seront pas abordés. Le tableau 5 énumère différents types de procédés d'extraction du BK, en complément de ce qui avait été décrit dans la revue de la littérature (Goumbri et *al.* 2021).

Tableau 4 (1/2) : Synthèse des procédés traditionnels ou artisanaux de production du beurre de karité selon la littérature

<i>Pays de l'étude</i>	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité brut				Références
	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'obtention des amandes</i>	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'extraction</i>	
Guinée Conakry	Ramassage (fruits)-Stockage (fosse)-Dépulpage-Lavage-Cuisson-Séchage-Décorticage (Amandes)	Enfouissement (1 semaine); Séchage (1 jour);	Fosse; Séchoir solaire	Cuisson pendant 45 min	Lavage des amandes- Séchage-Concassage-Chauffage 30 min-Moulinage-Barattage 1h36-Cuisson du beurre 1h30-Filtration	Séchage (20 min) ; Concassage (30 min) ; Moulinage (1 h 20)	Séchoir solaire ; concasseur ; moulin ; filtre de tissu en soie	Barattage	(Chemonics International Inc. 2006)
Cote d'Ivoire	Ramassage (fruits)-Cuisson-Dépulpage-Séchage-Stockage des noix-Décorticage (Amandes)-Stockage	Stockage des noix dans greniers ; stockage des amandes dans des sacs en jute	Greniers ; Mortier pour décorticage ; sacs en jute	Cuisson	Concassage des amandes-Torréfaction-Broyage-Malaxage-Surnageant A + Fonds-Malaxage-Surnageant B + Résidus-Surnageant A+B-Évaporation de l'eau-Beurre-Moulage-Reffroidissement-Découpage	Malaxage par addition d'eau;	Mortier pour concassage; meule	Barattage	(Coulibaly et al. 1994)
	Récolte (fruits)-Ébouillantage-Séchage-Stockage-Décorticage (Amandes)	Fruits frais ; séchage au soleil ou au four ; Stockage (au moins 1 an) : direct au four, ou greniers, ou étagères, ou sacs en jute	Four ; grenier, sacs en jute ; étagère ; mortier	Cuisson/stockage	Amandes-Concassage-Torréfaction-Broyage (mortier)-Broyage (meule)-Malaxage-Extraction/Chauffage	Chauffage jusqu'à obtention de l'huile	Mortier; meule	Chauffage ou cuisson	(Coulibaly et al. 1994)
	Récolte (fruits)-Séchage-Stockage-Décorticage (Amandes)	Fruits frais ; séchage au soleil ou au four ; Stockage (au moins 1 an) : direct au four, ou greniers, ou étagères, ou sacs en jute	Four ; grenier, sacs en jute ; étagère ; mortier	Séchage/stockage					
Cameroon	Noix de karité-Ébouillantage-Reffroidissement-Décorticage (Amandes)	—	—	Cuisson	Trempe des amandes-Pilage-Broyage à la meule-Barattage-Extraction phase grasse-Lavage-Séchage-Filtration	Possibilité de piler les amandes sans tremper	Meule; filtre	Barattage	(Nkouam 2007)
	Fruits de karité-Dépulpage-Noix-Décorticage (Amandes)-Séchage	—	—	Séchage	Torréfaction des amandes-Tri-Concassage-Cuisson-Ébullition-Récupération de l'huile-Évaporation	Cuisson avec feuilles de <i>Hymenocardia acida</i>	Mortier	Barattage	

<i>Pays de l'étude</i>	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité brut				Références
	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'obtention des amandes</i>	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'extraction</i>	
	Fruits-Dépulpage-Noix-Décorticage (Amandes)-Séchage	—	—	Séchage	Torréfaction des amandes-Broyage-Farine-Malaxage à l'eau-Beurre	—	—	Chauffage ou cuisson	(Nkouam 2007)
	Ramassage (fruits)-Dépulpage-Cuisson-Décorticage (Amandes)	—	—	—	Pilage des amandes-Broyage-Barattage-Recueil matière grasse-Lavage-Chauffage-Recueil du beurre-Conditionnement	Lavage à grande eau	—	Barattage	(César Kapseu 2009)
	Ramassage (fruits)-Lavage-Dépulpage-Cuisson-Décorticage (Amandes)	—	—	Cuisson	Trempe des amandes-Pilage-Laminage-Pâte fine-Barattage-Phase grasse-Lavage-Cuisson-Refroidissement-Décantation-Beurre	Trempe facultatif;	Pilon; meule	Barattage : procédé par voie humide	(Dandjoma et al. 2009)
		—	—		Pilage des amandes-Séchage-Torréfaction-Laminage-Pâte fine-Cuisson-Recueil du beurre-Beurre brut-Cuisson-Refroidissement-Décantation-Beurre	—	Pilon; meule	Chauffage : procédé par voie sèche	
Mali	Noix-Cuisson-Séchage-Décorticage (Amandes)-Fumage-Stockage	Cuisson de 20-60 min à 12 h ; séchage au soleil ; stockage dans un four traditionnel	—	Fumage/stockage	Concassage des amandes-Laminage-Barattage-Fusion-Récupération de l'huile-Beurre	—	Pilon	Barattage	(Nkouam 2007)
Sénégal	Ramassage (fruits)-Fermentation-Séchage-Ébouillantage ou fumage-Dépulpage-Séchage-Décorticage (Amandes)	Séchage au soleil ; décorticage par léger pilage, vannage puis concassage	Pilon, panier pour vannage	Fermentation/cuisson	Cuisson des amandes-Hydratation-Barattage-Lissage-Purification-Conditionnement-Stockage	Hydratation par l'eau tiède puis pétrissage ; barattage à l'eau chaude puis froide ; purification par ébullition puis récupération	—	Barattage	(Pages 2009)
Bénin	Ramassage (fruits)-Dépulpage-Fumage-Séchage (10 à 12 jours)-Décorticage (Amandes)-Tri-Séchage (5 jours)	Fruits frais ; 48 h de fumage ; séchage au soleil	—	Fumage	Lavage des amandes-Séchage-Concassage-Torréfaction-Pilage-Malaxage à l'eau-Lavage de la matière grasse-Chauffage-Beurre brut-Lavage-Déshydratation-	4h de séchage au soleil ; 45 à 50 min de torréfaction ; 45 à 60 min de chauffage ; 20 à	Pilon ; filtre	Chauffage ou cuisson	(Honfo et al. 2013)

<i>Pays de l'étude</i>	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité brut				Références
	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'obtention des amandes</i>	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'extraction</i>	
	Ramassage (fruits)- Dépulpage-Cuisson- Séchage (10 à 12 jours) -Décorticage (Amandes)-Tri-Séchage (5 jours)	Fruits frais ; 35 à 45 min de cuisson ; séchage au soleil	—	Cuisson	Décantation/filtrage- Refroidissement-Beurre	30 min de déshydratation ; 1 jour de refroidissement			

Tableau 4 (2/2) : Synthèse des procédés traditionnels ou artisanaux de production du beurre de karité selon la littérature

Pays de l'étude	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité				Références
	Etapes critiques	Conditions particulières	Moyen/Matériel /Equipement	Méthode d'obtention des amandes	Etapes critiques	Conditions particulières	Moyen/Matériel/Equipement	Méthode d'extraction	
Burkina Faso	Récolte (fruits)-Stockage (fosse)-Fumage-Stockage (greniers)	Enfouissement (quelques jours)	Fosse ; Four à bois pour fumage ; greniers	Fumage	Lavage des amandes-Tri-Séchage-Concassage-Torréfaction-Mouture-Barattage-Lavage du beurre-Purification/Décantation-Filtration	—	—	Barattage	(François et al. 2009)
	Récolte (fruits)-Stockage (fosse)	Enfouissement jusqu'à commercialisation ou utilisation	Fosse	Fermentation					
	—	—	—		Amandes-Lavage-Concassage-Torréfaction-Pilage-Mouture-Barattage-Émulsion corps gras-Lavage-Ébouillantage-Décantation-Beurre brut	Mouture et lavage à l'eau chaude ou froide	Pilon	Barattage	(Nkouam 2007)
	—	—	—	—	Amandes-Lavage-Fumage-Pilonnage-Laminage-Chauffage de la pâte-Beurre brut + résidus	Laminage : facultatif ; possibilité de récupération du beurre à partir des résidus après chauffage	Pilon	Chauffage ou cuisson	(Nkouam 2007)
	Ramassage (fruits)-Dépulpage-Séchage-Décorticage (Amandes)	—	—	—	Concassage des amandes-Torréfaction-Pilage-Laminage-Barattage-Recueil matière grasse-Chauffage-Recueil du beurre-Conditionnement	—	—	Barattage	(César Kapseu 2009)
	Ramassage (fruits)-Dépulpage-Séchage-Lavage-Tri-Cuisson-séchage-Tri-Conservation-Décorticage (Amandes)	Séchage au soleil 4 jours maximum ; cuisson à l'eau 100-120 min ;	Conservation dans panier ou canaris, ou sacs en jute, ou barriques, ou dans greniers	Cuisson/stockage	Nettoyage des amandes-Tri-Lavage-Séchage-Concassage-Torréfaction-Mouture/Pilage-Refroidissement de la pâte-Barattage-Décantation-Lavage de l'émulsion-Cuisson de l'émulsion-Refroidissement et recueil du beurre-Déshydratation du beurre-Refroidissement et recueil-Filtrage-Malaxage-Stockage	Laver plusieurs fois l'émulsion ; déshydratation du beurre par cuisson	Moulin ou pilon ; filtre	Barattage	(Parkouda 2015)
	Ramassage (fruits)-Stockage-Dépulpage-Séchage-Stockage des noix-Décorticage et	Séchage soit au soleil, soit au four (1 à 3 jours)	Four	Séchage	Concassage des amandes-Torréfaction-Mouture-Malaxage/Barattage-Lavage de l'émulsion-Cuisson-	Torréfaction dans un four ; mouture soit au moulin soit à la meule	Four; moulin ou meule	Barattage	(Bridier et Kombolo 2009)

Pays de l'étude	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité				Références
	Etapes critiques	Conditions particulières	Moyen/Matériel /Equipement	Méthode d'obtention des amandes	Etapes critiques	Conditions particulières	Moyen/Matéri el/Equipement	Méthode d'extraction	
	tri (Amandes)-Séchage				Décantation/filtration-Refroidissement-Conditionnement				
	Ramassage (fruits)-Stockage-Dépulpage-Ébouillantage-Séchage-Décorticage (Amandes)-Séchage et tri des amandes	Séchage au soleil environ 10 jours	—	Séchage					
	Ramassage (fruits)-Stockage-Dépulpage-Séchage/fumage des noix-Stockage-Décorticage et tri (Amandes)	Décorticage au mortier	Mortier	Séchage/fumage des noix	Concassage-Torréfaction-Mouture-Malaxage/Barattage-Lavage de l'émulsion-Cuisson-Décantation/Filtration-Refroidissement/malaxage-Conditionnement	Concassage et torréfaction non obligatoires ; mouture au moulin	Moulin ; filtre	Barattage	
	Ramassage (fruits)-Dépulpage-Cuisson-Essorage/refroidissem ent-Décorticage (Amandes)-Séchage-Stockage	Stockage des noix en tas dans les champs ; séchage au soleil	—	—	Lavage des amandes-Séchage-Concassage-Séchage-Pilage-Torréfaction-Mouture-Malaxage/Barattage-Emulsion-Lavages-Cuisson-Décantation-Surnageant + dépôt-Surnageant (Malaxage/refroidissement-Beurre) ; Dépôt (Hydratation-Cuisson-Décantation-Beurre)	Séchage au soleil ; mouture à la meule ; récupération du beurre par double cuisson ; fleurs de <i>Rumex acetosa</i> (oseilles) pour la clarification de l'huile	Meule ; pilon ; fleurs de <i>R. acetosa</i> ; filtre	Barattage	(Bréhima et al. 2007)
			—	—	Lavage des amandes-Séchage-Concassage-Torréfaction-Mouture-Malaxage/Barattage-Émulsion-Lavage-Cuisson/clarification-Décantation/filtration-Malaxage/refroidissement-Beurre				
	Ramassage (fruits)-Stockage-Dépulpage-Cuisson-Fumage-Stockage des noix-Décorticage et tri (Amandes)	Stockage des fruits par entassement ; stockage des noix dans les greniers	Greniers	Cuisson/Fumage	Concassage des amandes-Torréfaction-Mouture-Malaxage/Barattage-Lavage de l'émulsion-Cuisson-Décantation/filtration-Refroidissement-Conditionnement	—	Pilon; Filtre	Barattage	
	Ramassage (fruits)-Stockage-Dépulpage-Cuisson-Fumage-Stockage des noix-Décorticage et tri (Amandes)	Stockage des fruits par entassement ou par fermentation dans des jarres d'eau	Jarre	Cuisson/Fumage					

<i>Pays de l'étude</i>	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité				Références
	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'obtention des amandes</i>	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel/Equipement</i>	<i>Méthode d'extraction</i>	
	Ramassage (fruits)- Dépulpage-Tri des amandes	—	—	—	Concassage-Torréfaction-Mouture-Malaxage/Barattage-Emulsion-Lavage-Cuisson/clarification-Décantation/filtration-Malaxage/refroidissement-Beurre	Fleurs de Rumex acetosa (oseilles) pour la clarification de l'huile	Filtre ; fleurs de R. acetosa	Barattage	
		—	—	—	Lavage des amandes-Séchage-Concassage-Torréfaction-Mouture-Malaxage/Barattage-Émulsion-Lavage-Cuisson-Décantation/filtration-Malaxage/refroidissement-Beurre	Légèrement séché au soleil	Filtre		

Tableau 5 (1/2) : Synthèse des procédés améliorés ou semi-industriels de production du beurre de karité selon la littérature

<i>Pays de l'étude</i>	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité				Références
	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel/Equipement</i>	<i>Méthode d'obtention des amandes</i>	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'extraction</i>	
Cote d'Ivoire	Ramassage (fruits)-Cuisson-Dépulpage-Séchage-Stockage-Décorticage (Amandes)-Stockage	Séchage des noix au four et stockage au grenier ; stockage des amandes dans des sacs en jute	Four ; grenier ; mortier ; sacs en jute	Cuisson à l'eau	Concassage des amandes-Broyage-Torréfaction-Pressage-Refroidissement-Beurre-Découpage	Concassage et broyage au moulin	Moulin ; presse mécanique	Pression mécanique	(Bréhima et al. 2007)
	Récolte (fruits)-Ébouillantage-Séchage-Stockage-Décorticage (Amandes)	Fruits frais ; séchage au soleil ou au four ; Stockage (au moins 1 an) : direct au four, ou greniers, ou étagères, ou sacs en jute	Four ; grenier, sacs en jute ; étagère ; mortier	Cuisson/Stockage	Amandes-Concassage (moulin)-Torréfaction-Broyage (moulin)-Malaxage-Extraction/Chauffage	Chauffage jusqu'à obtention de l'huile	Moulin	Chauffage ou cuisson	(Diarrassouba et al. 2002)
	Récolte (fruits)-Séchage-Stockage-Décorticage (Amandes)	Fruits frais ; séchage au soleil ou au four ; Stockage (au moins 1 an) : direct au four, ou greniers, ou étagères, ou sacs en jute	Four ; grenier, sacs en jute ; étagère ; mortier	Séchage/stockage					
Cameroon	Ramassage (fruits)-Dépulpage-Séchage-Décorticage (Amandes)	Évite le séchage direct au soleil	Séchoir solaire indirect	Séchage	Broyage-Barattage-Recueil matière grasse-Lavage-Chauffage-Recueil du beurre-Conditionnement	Broyage par concassage au pilon	Moulin à meule; presse	Pression mécanique et motorisée	(César Kapseu 2009)
Ethiopie	Noix de karité-Tri-Dépulpage-Cuisson-Séchage solaire-Tri-Lavage-Séchage au laboratoire	Séchage solaire en 7 jours ; séchage dans les conditions de laboratoire ;	Armoire de stockage	Cuisson à l'eau	Broyage des amandes-Autoclavage-Pressage-Filtrage par centrifugation-Stockage	3-5 min de broyage ; autoclavage (95 °C, 2 Mpa, 0-30 min) ; pressage à 20 rpm ; centrifugation en 30 min ; stockage à -16 °C	Broyeur ; presse à vis électrique ; centrifugeuse	Pression à vis	(Gezahegn et al. 2016)

Tableau 5 (2/2) : Synthèse des procédés améliorés ou semi-industriels de production du beurre de karité selon la littérature

<i>Pays de l'étude</i>	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité				Références
	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel/ Equipement</i>	<i>Méthode d'obtention des amandes</i>	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel /Equipement</i>	<i>Méthode d'extraction</i>	
Burkina Faso	Récolte (fruits)-Tri-Dépulpage-(Noix)-Cuisson-Séchage-Décortilage-(Amandes)-Vannage-Séchage-Conditionnement	Fruits mûrs tombés	Groupement de femmes	Cuisson à l'eau bouillante 100 à 120 min-séchage à 60-70 °C	Concassage (Amandes)-Séchage-Torréfaction-Mouture-Malaxage-Refroidissement-Barattage-Beurre brut-Séparation-Lavage-Chauffage-Décantation-Séparation-Filtration-Beurre raffiné	—	Concasseur, torréfacteur, moulin ; presse manuelle ou hydraulique, baratte manuelle ou mécanisée ; filtre	Barattage (meilleure qualité) ou par pression	(Gezahegn et al. 2016)
	Ramassage (fruits)-Stockage-Dépulpage-(Noix)-Cuisson-Séchage-Décortilage (Amandes)	Ramassage dans les champs privés	Groupement de femmes	Cuisson	Tri (Amandes)-Lavage-Séchage-Tri-Concassage-Torréfaction-Mouture-Barattage-Lavage-Purification-Décantation-Filtrage-Beurre brut	—	Concasseur, torréfacteur, moulin	Barattage	(Badini et al. 2011)
	Récolte (fruits)-Stockage (fosse)-Dépulpage-Ébouillantage-Séchage solaire-Décortilage-Séchage (soleil ou four) - Stockage (sacs ou greniers)	Fruits mûrs tombés ; enfouissement (quelques jours)	Fosse; four; grenier ou sacs	Cuisson	Lavage des amandes-Tri-Séchage-Concassage-Torréfaction-Mouture-Barattage-Lavage du beurre-Purification/Décantation-Filtration	—	Concasseur, torréfacteur, moulin	Barattage	(François et al. 2009)
	—	—	—	—	Amandes-Lavage-Séchage-Concassage-Torréfaction-Pressage-Beurre brut + résidus-Ébouillantage-Décantation--Beurre brut	—	Presse	Presse mécanique	(Nkouam 2007)
	—	—	—	—	Amandes-Lavage-Concassage-Torréfaction-Pressage-Beurre brut-Filtration-Beurre brut filtré	Concassage et torréfaction sont facultatifs	Presse	Presse motorisée	

<i>Pays de l'étude</i>	Procédés de traitement des fruits de karité à l'amande en passant par les noix				Procédés d'extraction du beurre de karité				Références
	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel/Equipement</i>	<i>Méthode d'obtention des amandes</i>	<i>Etapes critiques</i>	<i>Conditions particulières</i>	<i>Moyen/Matériel/Equipement</i>	<i>Méthode d'extraction</i>	
	—	—	—	—	Amandes-Broyage-Tamisage-Cuisson-Pressage-Beurre	5 tamis successifs (5-4-2-1-0,5 mm) ; cuisson à 70 °C ; pression de 20 Mpa	Tamis; presse	Pression mécanique	(Yé et al. 2007)
	Noix de karité-Lavage-Ébouillantage-Tri-Séchage-Décorticage (Amandes)	—	—	—	Torréfaction-Concassage-Broyage-Chauffage-Pressage-Filtrage	Broyage par concassage au pilon	Moulin; presse; filtre	Pression mécanique	(Coulibaly et al. 2009)
		—	—	—	Torréfaction-Concassage-Broyage-Dilution-Chauffage-Centrifugation-Beurre clair et gris-Beurre gris-Chauffage-Centrifugation-Beurre	Dilution de plus de 50% à l'eau chaude ; centrifugation (5 à 30 min, accélération de plus de 1,293 g, température de plus de 90 °C)	Centrifugeuse expérimentale de 0-6000 rpm;	Centrifugation	

I.3. Composition chimique du beurre de karité

Le BK est un produit lipidique et selon la classification de Hennen en 1995 (Cuvelier et *al.* 2004), les lipides sont classés en 6 catégories de substances : les TAG, les glycérophospholipides, les sphingolipides, les terpénoïdes, les stérols et stéroïdes et enfin les AG. Le tableau 6 et la figure 5 établissent une composition synthétique, panoramique du BK brut et des extraits d'amandes.

Le BK est majoritairement constitué de composés saponifiables, à l'instar des corps gras d'origine naturelle. La fraction saponifiable, selon Stübiger et *al.* (2015), contient majoritairement des TAG de l'ordre de 77,7 % - 92,4 % ainsi que des diglycérides ou diacylglycérols (DAG) entre 7,6 % et 22,6 %. Selon Ollivier et *al.* (2015), les TAG représentent 90 à 98 % de la fraction lipidique des corps gras.

I.3.1. Composition de la fraction saponifiable

I.3.1.1. Mono- et Di-glycérides

Les glycérides sont les constituants majeurs des lipides, donc du BK. Ils sont constitués de glycérol et d'un AG (monoglycéride), deux AG (diglycérides) ou trois AG (triglycérides). Ce sont donc des esters (monoesters, diesters ou triesters) d'AG (figure 6). Les DAG affectent les propriétés de cristallisation selon Talbot et *al.*, (2014). Le DAG majoritairement présent dans la fraction saponifiable est le 1-stearoyl-3-oleoyl-glycerol (1,3-SO) selon Ray et *al.*, (2013). Les autres formes majoritaires sont le 1,2 DAG (0,1 %) et le 1,3 DAG (0,6 %). Selon Adhikari et Hu (2012), les DAG représentaient 8 % à 10 % de la fraction saponifiable, contre 7,6 % à 22,6 % selon Stübiger et *al.*, (2015). La composition qualitative et quantitative est donc fonction de la qualité du BK et du mode d'extraction.

Tableau 6: Représentation synthétique des différents composants majoritaires du beurre de karité brut

Fraction saponifiable								
Triglycérides		OOO	SOO	SOS	POS	POP	PLP	LOL
		SSS	OOP	PLL	PLS	PPS	AOO	LiLnLi
		OOL	SLL	PLO	ASO	SLO	LiLiLi	
Acides gras	Saturés	Laurique (C12:0)	Myristique (C14:0)	Palmitique (C16:0)	Stéarique (C18:0)	Arachidique (C20:0)	Pentadecanoïque (C15:0)	Heptadecanoïque (C17:0)
		Caprique (C10:0)	Cérotique (C26:0)	Béhenique (C22:0)	Lignocerique (C24:0)	Caproïque (C6:0)	Caprylique (C8:0)	
	Mono-insaturés	Palmitoléique (C16:1) n-7	Oléique (C18:1) n-9	Gadoléique (C20:1) n-9	Vaccénique (C18:1) n-7	Erucique (C22:1)		
	Poly-insaturés	Linoléique (C18:2) n-6	Linoléique (C18:3) n-3	Linoélaïdinique (C18:2) <i>cis, trans</i>				
Fraction insaponifiable								
Composés aliphatiques	Phénols	Acide gallique	Gallocatéchine	Epigallocatéchine	Epigallocatéchine	Gallocatéchine	Catéchine	Epicatéchine
		Epicatéchine gallate	Quercétine	<i>trans</i> -cinnamique	gallate	gallate		
Composés terpéniques	Phytostérols	α -spinasterol	Δ -7-stigmasterol	Δ -7-avenasterol	α -Sitosterol	β -sitosterol	Stigmasterol	Campesterol
		24-méthyl-cholest-7-enol	Taraxastérol					
	Tocophérols	α -Tocohérol	γ -Tocophérol	β -Tocophérol	δ -Tocophérol	Vitamine A		
	Alcools triterpéniques	α -amyrin (acetate et cinnamate)	β -amyrin (acetate et cinnamate)	Lupeol (acetate et cinnamate)	Butyrospermol (acetate et cinnamate)	Germanicol	Parkeol	24-méthylènelanost-9(11)-en-3-ol
		Dammaradienol	24-méthylènedammarenol	Taraxastérol	Ψ -taraxastérol	24-méthylène-24-dihydroparkeol	24-méthylèncycloartanol	

S = stéarique, Li = linoléique, O = oléique, P = palmitique, Ln = linolénique, A = arachidique, L = laurique

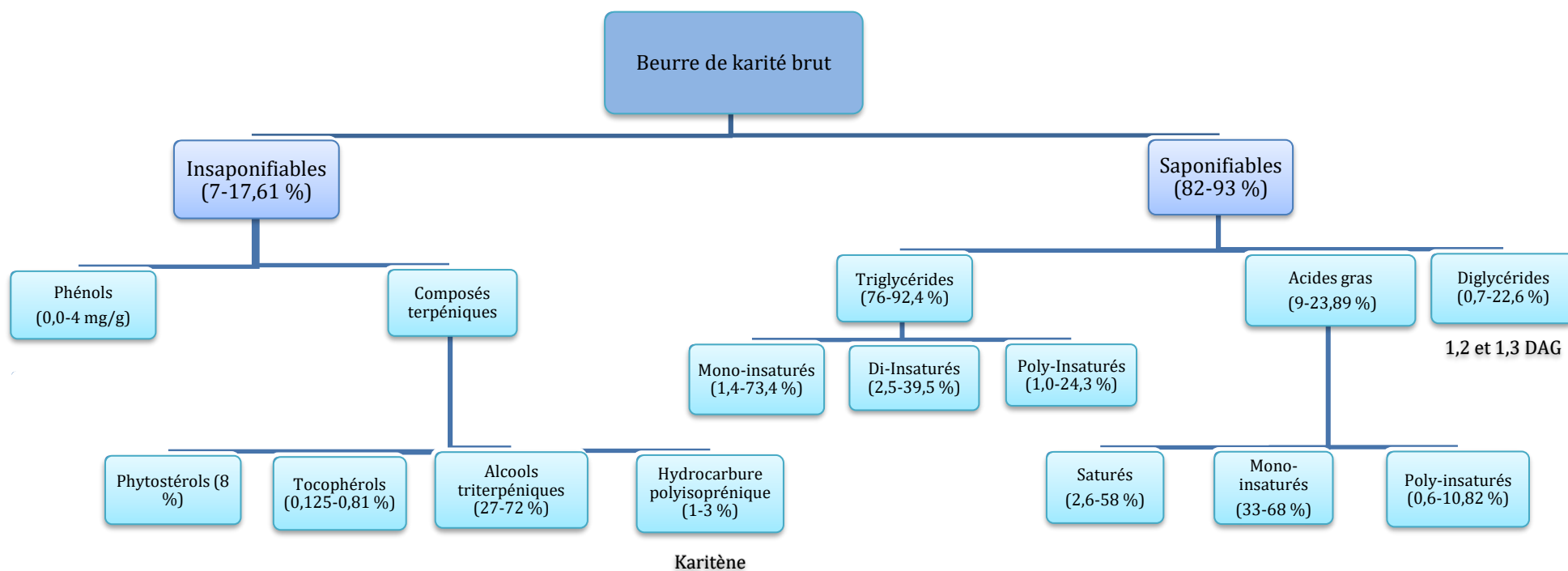


Figure 5: Composition panoramique des différentes fractions majoritaires du beurre de karité brut

Références : (Peers 1977); (Morin et Pagès-Xatart-Parès 2012); (Honfo et al. 2013); (Megnanou et al. 2007); (Maranz et Wiesman 2004); (Honfo et al. 2014); (Akihisa, et al. 2010); (Lipp et Anklam 1998); (Israel 2015); (Abagale et al. 2016); (Maranz et al. 2003); (Allal et al. 2013); (Talbot et al. 2014); (Ray et al. 2013); (Zhang et al. 2017); (Stübiger et al. 2015); (Kapseu et al. 2001); (Vincenzo et al. 2005); (Segman et al. 2012); (Alander 2004); (Badu et al. 2018); (Ajala et al. 2016); (Dubois et al. 2008); (Badu et al. 2018); (Jatto et al. 2010); (Davrieux et al. 2010); (JBL et al. 2010); (Rose-Monde Megnanou et al. 2014); (Nahm et al. 2013); (Alain Karleskind 1992); (Krist et al. 2006); (Alander 2004)

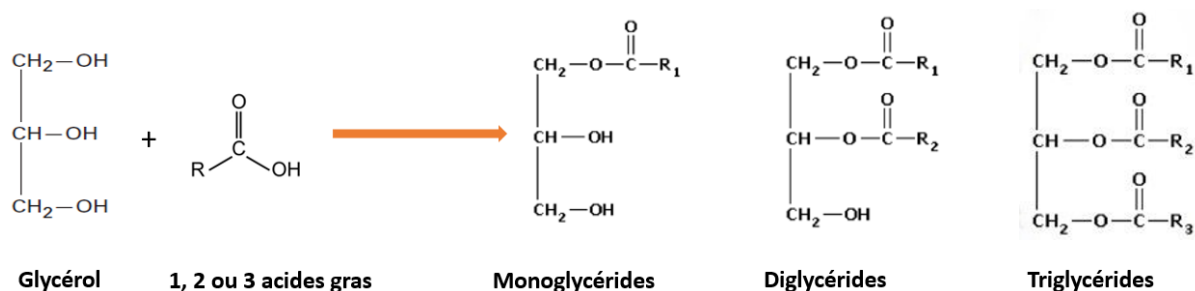


Figure 6: Formules chimiques du glycérol, des monoglycérides, des diglycérides et triglycérides

I.3.1.2. Triglycérides ou triacylgcérols

Les TAG sont des molécules très hydrophobes (Cuvelier et *al.* 2004) constituées d'un glycérol estérifié par trois AG. Le BK se compose d'environ 90 % ou plus de TAG et d'une fraction insaponifiable mineure (Nahm et *al.* 2013). Ainsi, les TAG les plus courants sont les SOS (acides stéarique-oléique-stéarique, représentant jusqu'à 40 % des TAG totaux), les SOO (acides stéarique-oléique-oléique, représentant jusqu'à 27 %), les POS (acides palmitique-oléique-stéarique), POP (acides palmiticooléique-palmitique) et OOO (acides oléique-oléique-oléique), avec des variations régionales (Nahm et *al.* 2013). Les TAG représentent environ 90 % des constituants du BK et des composés mineurs, les insaponifiables. Selon Akihisa et *al.* (2011), le BK provenant d'Afrique de l'Ouest est plus riche en SOS que celui d'Afrique de l'Est.

○ Acides gras

Les AG sont des acides carboxyliques à chaîne aliphatique hydrophobe, saturés (absence de double liaison) ou non saturés (présence d'une ou plusieurs doubles liaisons) (Cuvelier et *al.* 2004). Les acides gras saturés (AGS), de formule chimique générale CH₃-(CH₂)_n-COOH, sont dans la grande majorité retrouvés à l'état naturel à un nombre pair de carbones et à chaîne linéaire. Leur point de fusion augmente avec la longueur de la chaîne carbonée (tableau 7). Quant aux acides gras insaturés (AGI), ils sont monoinsaturés (CH₃-(CH₂)_x-CH=CH-(CH₂)_y-COOH) ou polyinsaturés, selon qu'ils portent 1 à 6 doubles liaisons. Sur la base de la formule générale des acides gras monoinsaturés (AGMI), plusieurs isomères peuvent exister en fonction de la position de la double liaison, mais aussi en fonction de la configuration *cis* ou *trans*, la configuration *cis* étant la plus importante sur le plan biologique.

Les AG ainsi que les TAG se retrouvent liés à de nombreuses propriétés physiques du BK. Les propriétés physiologiques et physicochimiques uniques des lipides sont fonction de leur composition en AG et de la structure de leur TAG. La présence des AG palmitiques et linoléiques est un bon indicateur de pureté. En effet, la pureté et la qualité des matières grasses peuvent être déterminées par le profil chimique de la fraction triglycéridique, donc des AG (Morin et Pagès-Xatart-Parès 2012). Parmi les AG majoritaires composant le BK, on retrouve les AG stéarique (C18 :0), oléique (C18 :1), palmitique (C16 :0) et linoléique (C18 :2) (Dubois et *al.* 2008; Nahm et *al.* 2013). Les AG stéariques et oléiques sont les formes majoritaires et représentent entre 40 et 45 % du total des AG (Nahm et *al.* 2013), d'où leur aspect semi-solide à température ambiante comparativement aux matières grasses végétales liquides dans les mêmes conditions (Nahm et *al.* 2013). Ainsi, la consistance d'un corps gras est fonction (i) de sa composition en AG, (ii) de sa structure triglycéridique influençant l'importance du polymorphisme à l'état solide et (iii) des conditions opératoires. Une teneur élevée en AG stéarique est responsable d'une consistance solide du BK, alors que celle en acide oléique est responsable d'une consistance semi-solide (Maranz et Wiesman 2004; Vincenzo et *al.* 2005).

La composition en AG et donc la structure triglycéridique influencent la stabilité oxydative des lipides (Morin et Pagès-Xatart-Parès 2012). Cette composition en AG et donc en TAG, varie considérablement selon plusieurs facteurs, dont principalement l'origine géographique, l'origine de la matière première, les variations climatiques, régionales (géographiques), morphologiques (Jatto et *al.* 2010; Badu et Awudza 2017) et selon la sous-espèce (Stübiger et *al.* 2015). Selon Davrieux et *al.* (2010), ces taux étaient compris entre 40 % et 45 % pour le beurre d'Afrique de l'Ouest et entre 29 % et 56 % pour celui d'Afrique de l'Est. Cependant, dans une étude réalisée sur le BK provenant de 17 sites dans 5 pays d'Afrique, dont le Sénégal, le Mali, le Burkina Faso, le Ghana et l'Ouganda, ce taux était de 85 % - 90 % (Allal et *al.* 2013).

Les tableaux 8, 9 et 10 ci-après rapportent d'autres variations en AG d'extraits d'amandes et de BK bruts selon différents auteurs.

Tableau 7: Exemples d'acides gras saturés et insaturés avec leurs points de fusion correspondants.
(<https://libretexts.org/> (22.1: Lipids))

Formule chimique	Dénomination	Point de fusion
Acides gras saturés		
CH ₃ -(CH ₂) ₁₀ -COOH	Acide laurique	45°C
CH ₃ -(CH ₂) ₁₂ -COOH	Acide myristique	55°C
CH ₃ -(CH ₂) ₁₄ -COOH	Acide palmitique	63°C
CH ₃ -(CH ₂) ₁₆ -COOH	Acide stéarique	69°C
CH ₃ -(CH ₂) ₁₈ -COOH	Acide arachidique	76°C
Acides gras insaturés		
CH ₃ -(CH ₂) ₅ CH=CH(CH ₂) ₇ -COOH	Acide palmitoléique	0°C
CH ₃ -(CH ₂) ₇ CH=CH(CH ₂) ₇ -COOH	Acide oléique	13°C
CH ₃ -(CH ₂) ₄ CH=CHCH ₂ CH=CH(CH ₂) ₇ -COOH	Acide linoléique	-5°C
CH ₃ -CH ₂ CH=CHCH ₂ CH=CHCH ₂ CH=CH(CH ₂) ₇ -COOH	Acide linolénique	-11°C
CH ₃ -(CH ₂) ₄ (CH=CHCH ₂) ₄ (CH ₂) ₂ -COOH	Acide arachidonique	-49°C

Tableau 8: Profil en acides gras saturés majoritaires du beurre et/ou d'extraits d'amandes

Acides gras saturés majoritaires du beurre de karité (% des AG totaux)						
References	Laurique C12:0	Myristique C14:0	Palmitique C16:0	Stéarique C18:0	Arachidique C20:0	Total
(Morin et Pagès-Xatart-Parès 2012)	< %	< 0,7%	3-5%	28-45%	< 1,5%	35%
(Dubois et al. 2008)			5,0%	41,0%	0,6%	46,5%
(Badu et al. 2018)			2,83±0,45%	47,14±0,74%	1,09±0,21%	51,06±0,40%
(Ugese et al. 2010)				45,1-49,7%		
(Jatto et al. 2010)	Traces	0,08%	3,5%	41,8%		46,0%
(Akihisa et al., 2010)			1,9-5%	28-56%	1,3-1,80%	
(Mbaiguinam et al. 2007)			5,03 ± 0,19 %	31,15 ± 0,24 %		
(Lipp et Anklam 1998)			4%	42%		
(Okullo et al. 2010)			6,52-8,12%	28,65-30,94%	0,65-0,90%	
(Honfo et al. 2014)			3,3-7,5	29,5-55,7	0,8-1,8	(g/100 g)

Tableau 9: Profil en acides gras mono-insaturés majoritaires du beurre et/ou d'extraits d'amandes

Acides gras mono-insaturés majoritaires du beurre de karité (% des AG totaux)				
References	Palmitoléique (C16:1)n-7	Oléique (C18:1)n-9	Gadoléique (C20:1)n-9	Vaccénique (C18:1)n-7
(Morin et Pagès-Xatart-Parès 2012)	< 0,3%	42-59%		
(Dubois et al. 2008)		48,0%	0,1%	
(Badu et al. 2018)		44,58±0,13%		
(Ugese et al. 2010)		37,2-43,4%		
(Jatto et al. 2010)		46,0%		
(Akihisa et al. 2010)		46,4%		0,4%
(Akihisa et al. 2010)		34-61%		
(Mbaiguinam et al. 2007)		53,93 ± 0,23%		
(JBL et al. 2010)		55,54-57,63%		
(Honfo et al. 2014)		37,2-60,7 (g/100 g de matière grasse)		

Tableau 10: Profil en acides gras polyinsaturés majoritaires du beurre et/ou d'extraits d'amandes

Acides gras polyinsaturés majoritaires du beurre de karité (% des AG totaux)			
Références	Linoléique (C18:2)n-6	α -linoléique (Linolénique) (C18:3)n-3	Total
(Morin et Pagès-Xatart-Parès 2012)	3-9%	< 1%	5%
(Dubois et al. 2008)	5,1%	0,3%	5,4%
(Badu et al. 2018)	4,20±0,12%		
(Jatto et al. 2010)	6,6%	1,3%	
(Akihisa, et al. 2010)	6,6%	0,3%	
(Davrieux et al. 2010)	3,22-13%	0,06-0,69%	
(Mbaiguinam et al. 2007)	7,98 ± 0,10%		
(JBL et al. 2010)	6,18-7,79%		
(Honfo et al. 2014)	4,3-8,0	0,2-1,7	g/100 g de matière grasse

Les critères de qualité du BK non raffiné tels que décrits dans le Codex Alimentarius (Codex Alimentarius 2017b) sont repris dans le tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11: Composition en acides gras du beurre de karité non raffiné déterminé par chromatographie gazeuse

Acides gras	Teneur (%)
Acide laurique	(C12:0) < 1
Acide myristique	(C14:0) < 0,7
Acide palmitique	(C16:0) 2-10
Acide palmitoléique	(C16:1) < 0,3
Acide stéarique	(C18:0) 25-50
Acide oléique	(C18:1) 32-62
Acide linoléique	(C18:2) 1-11
Acide linolénique	(C18:3) 1-11
Acide arachidonique	(C20:0) < 3,5

I.3.2. Composition de la fraction insaponifiable

On entend par insaponifiables des corps gras, l'ensemble des composés contenus dans cette matière grasse qui, après saponification de la matière grasse au moyen d'un hydroxyde alcalin, puis extraction au moyen de solvant et élimination de la fraction saponifiée, ne sont pas volatils dans l'eau dans les conditions opératoires (Fontanel 2013). C'est la fraction résiduelle insoluble dans l'eau, mais soluble dans les solvants organiques, après saponification.

Les insaponifiables sont un groupe important de produits chimiques à des taux élevés et très variables dans le BK en fonction de plusieurs facteurs. Contrairement aux autres huiles végétales, dont la teneur en insaponifiables est généralement comprise entre 0,5 et 2 %, le BK se distingue par sa forte teneur en matières insaponifiables, d'où son intérêt en cosmétique/pharmacie (tableau 12). La teneur en matières insaponifiables était comprise entre 1 et 19 % selon Lovett 2004; Lovett et *al.* (2006). Parmi les constituants, on a les phénols, les tocophérols et tocotriénols, les triterpènes, les stérols, les pigments et d'autres substances comme le karitène et l'allantoïne. Selon (Israel 2015; Maranz and Wiesman 2004), le BK était composé de 90% de fractions saponifiables et environ 10% d'insaponifiables, représentés par 65% de triterpènes alcools, 27% d'hydrocarbones, 8% de stérols et 0,81% de tocophérol.

Les propriétés reconnues aux insaponifiables sont également variées, combinant activités cosmétiques pour la peau et les cheveux, et activités thérapeutiques. Selon Alvarez et Rodríguez (2000), ces insaponifiables aident à garder la peau jeune en stimulant les tissus et en aidant la peau à produire son propre collagène. La couleur jaune de certains BK serait due à la présence de caroténoïdes, qui confèrent à celui-ci une résistance à l'oxydation (Megnanou et *al.* 2014).

Tableau 12: Exemples de composés insaponifiables du beurre de karité

Composés	Teneur	Propriétés	Références
Triterpènes (butyrospermol), phénols, stérols, karitène et allantoin	1-19%	Antioxydant dues aux tocophérols et aux catéchines	(Lovett et <i>al.</i> 2006)
Triterpènes cinnamates et acétates	2%-12% dans les extraits d'amandes de karité		(Akihisa, et <i>al.</i> 2010)
Tocopherol (125 mg g ⁻¹) : α -tocophérol, β -tocophérol, γ -tocophérol, δ -tocophérol,	7%		(Honfo et <i>al.</i> 2013)
Alcool triterpéniques, tocophérols, phénols, stérols	1,2%-17,6%	Antioxydant, anti-inflammatoire	(Honfo et <i>al.</i> 2014)
Phénols totaux (0,0575 $\pm$ 0,002 mg/g)	5,04% (extraction mécanique) 7,89% (extraction manuelle)		(Abagale et <i>al.</i> 2016)

I.3.2.1. Composés phénoliques

Les composés phénoliques sont un ensemble de substances complexes, très variables et donc difficiles à définir. Ils sont caractérisés par un élément structural fondamental, la présence d'au moins un noyau benzénique comportant au moins un groupe hydroxyle, libre ou engagé. Leur origine biosynthétique comporte deux grandes voies d'aromagenèse : la voie métabolique via l'acide shikimate, qui est la plus courante et la voie polyacétate, qui consiste en la condensation de molécules d'acétylcoenzyme A (Bruneton 2015), expliquant ainsi leur diversité structurale. On dénombre plus de 8000 composés phénoliques dans les plantes.

Selon la structure, le nombre de noyaux aromatiques et selon les éléments structuraux qui lient ces noyaux, les polyphénols, encore appelés composés phénoliques, peuvent être classés ainsi qu'il suit dans le tableau 13 (Ajila et *al.* 2010).

Tableau 13: Classes de composés phénoliques provenant de sources naturelles

Classe	Structure
Phénols simples, Benzoquinones	C ₆
Acide hydroxybenzoïques	C ₆ -C ₁
Acides hydroxycinnamiques, Phénylpropanoïdes	C ₆ -C ₃
Naphthoquinones	C ₆ -C ₄
Xanthones	C ₆ -C ₁ -C ₆
Flavonoïdes, Isoflavonoïdes	C ₆ -C ₃ -C ₆
Lignans, Néolignans	(C ₆ -C ₃) ₂
Bioflavonoïdes	(C ₆ -C ₃ -C ₆) ₂
Lignine	(C ₆ -C ₃) _n
Tanins condensés	(C ₆ -C ₃ -C ₆) _n

○ *Acide phénolique*

Les acides phénoliques contiennent deux structures de carbone constitutives distinctes: structures hydroxycinnamiques et hydroxybenzoïques (Ajila et *al.* 2010). Les acides hydroxybenzoïques ont une structure commune en C₆-C₁ et comprennent les acides gallique, p-hydroxybenzoïque, protocatéchique, vanillique et syringique. Les acides hydroxycinnamiques, quant à eux, sont des composés aromatiques avec une chaîne latérale de trois carbones (C₆-C₃), les acides caféique, férulique, et p-coumarique étant les plus courants.

○ *Flavonoïdes*

Les flavonoïdes constituent le groupe le plus important des composés phénoliques, représentant plus de la moitié des 8000 composés phénoliques naturels. Il s'agit de composés de faible poids moléculaire composés de quinze atomes de carbone, disposés selon une configuration C₆-C₃-C₆ (figure 7). La structure du troisième noyau aromatique détermine la classe de flavonoïdes, à savoir les flavonols (quercétine, kaempférol, ...), les flavones (apigénine, ...), les flavanones, les flavanols (catéchines), les isoflavones, les flavanon-ols et les anthocyanidines.

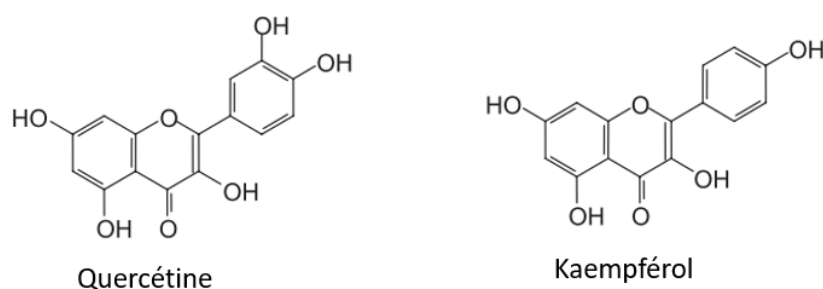


Figure 7: Structures chimiques de la quercétine et du kaempférol

Anthocyanes

Les anthocyanes constituent le groupe le plus important de pigments hydrosolubles du règne végétal et sont responsables de la plupart des couleurs rouges, bleues et violettes des fruits, légumes, fleurs et autres tissus végétaux (Ajila et *al.* 2010). Les anthocyanes sont des composés phénoliques du groupe des flavonoïdes.

○ Tanins

Les tanins sont des polyphénols qui se lient aux protéines, aux composés basiques, tels que les alcaloïdes ou les ions métalliques lourds dans une solution, les rendent insolubles et induisent une précipitation (Ajila et *al.* 2010). Ce sont des composés de poids moléculaire relativement élevé et constituent le troisième groupe important de composés phénoliques. Ils peuvent être subdivisés en tanins hydrolysables et condensés. Les tanins hydrolysables sont des esters de l'acide gallique (gallo- et ellagi-tannins), tandis que les tanins condensés sont des polymères de monomères de polyhydroxyflavon-3-ol. Les phlorotanins constituent un troisième groupe qui se compose entièrement de phloroglucinol.

○ Lignanes

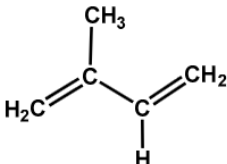
Les lignanes font partie des composés mineurs associés aux fibres alimentaires et pourvus d'effets physiologiques importants. Les lignanes sont un groupe de diphénols relativement simples, présents dans une grande variété d'aliments végétaux, principalement les graines oléagineuses, les céréales, les légumes, les fruits et les légumineuses.

Plusieurs auteurs ont mis en évidence la présence de composés phénoliques dans les produits dérivés du karité (amandes et beurre brut). Ainsi, Maranz et *al.* (2003) avaient mis en évidence dans le BK plusieurs composés phénoliques tels que : acide gallique (27 %, soit 1135 ppm), gallocatéchine (23 %, soit 986 ppm), épigallocatéchine (16 %), épigallocatéchine gallate (13 %), gallocatéchine gallate (7 %), catéchine, épicateéchine, épicateéchine gallate (3 % chacun), quercétine (0,1 %) représentant environ 4000 ppm de la fraction non saponifiable du BK (Allal et *al.* 2013). Les auteurs Maranz et Wiesman (2004) ont rapporté plus tard que le BK extrait à l'hexane contenait entre 35 et 915 ppm, avec une moyenne de 97 ppm (% du poids sec de l'extrait) de phénols totaux. Ils ont noté une variation des composés phénoliques en fonction de l'origine géographique, signe d'une adaptation (Akihisa et *al.* 2011) aux conditions environnementales ; les teneurs en polyphénols étant plus élevées dans les régions chaudes et sèches et plus faibles dans les régions où le climat est plus doux.

I.3.2.2. Composés terpéniques

Les terpénoïdes, tout comme les polyphénols, sont classés parmi les substances secondaires importantes du métabolisme chez les végétaux. Les différentes classes de composés terpéniques sont les terpènes ou monoterpènes (C₁₀) - les sesquiterpènes (C₁₅) - les diterpènes (C₂₀) - les triterpènes (C₃₀) - les tétraterpènes (C₄₀) - les polyterpènes (C₄₀₀₀). Ces classes sont complétées par les hémiterpènes (C₅), les sesterterpènes (C₂₅), et les sesquarterpènes (C₃₅) (figure 8).

Historiquement, le diméthylallyl diphosphate (DMAPP) et l'isopentényl diphosphate (IPP) sont connus pour être les deux précurseurs universels communs de tous les terpénoïdes, lesquels sont dérivés des deux voies biosynthétiques naturelles (les voies du mévalonate et du méthylérythritol phosphate). Récemment, (Couillaud et *al.* 2021) ont décrit une nouvelle voie robuste à deux enzymes permettant d'obtenir du DMAPP et de l'IPP à partir de leurs deux alcools correspondants, l'alcool diméthylallylique et l'isopenténol.



ISOPRENE

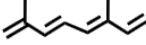
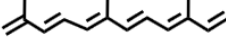
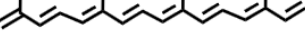
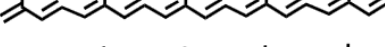
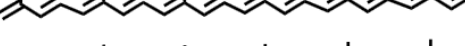
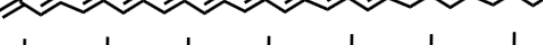
CLASSIFICATION	CARBON ATOMS (Isoprene Units)	CHEMICAL STRUCTURE
Hemiterpenes	5 (1)	
Monoterpenes	10 (2)	
Sesquiterpenes	15 (3)	
Diterpenes	20 (4)	
Sesterterpenes	25 (5)	
Triterpenes	30 (6)	
Sesquarterpenes	35 (7)	
Tetraterpenes	40 (8)	

Figure 8: Structure chimique de l'isoprène et classification des terpènes en fonction du nombre d'unités d'isoprène. Source : (Mosquera et *al.* 2021)

○ *Les phytostérols*

Dans le règne végétal, les stérols sont retrouvés sous le nom de « phytostérols », dont les plus importants sont le β -sitostérol et le stigmastérol (Cuvelier et *al.* 2004). Divers phytostérols, tels que : α -spinasterol, Δ -7-stigmasterol, Δ -7-avenasterol, β -sitosterol, stigmasterol, campesterol et 24-méthyl-cholest-7-enol ont été mis en évidence (Peers 1977; Njoku, Eneh, Ononogbu, et Michael 2000; Nahm et *al.* 2013). Selon Krist et *al.* (2006), les formes majoritairement présentes dans le BK étaient le campésterol, le stigmastérol, l' α -sitostéro et l' α -spinastérol.

○ *Les tocophérols*

Les tocophérols ou vitamine E, sont reconnus pour leurs propriétés antioxydantes, avec l' α -tocophérol comme étant la forme la plus biologiquement active. Selon Maranz and Wiesman 2004; Davrieux et *al.* (2010), la teneur en tocophérol du BK était fortement influencée par l'origine et le climat avec des valeurs plus importantes dans les pays plus chauds et secs. L' α -tocophérol était la forme la plus abondante, représentant environ 64 % des tocophérols totaux.

○ *Les triterpènes*

Les triterpènes (hydrocarbures insaturés), de la famille des terpènes, sont des substances en C_{30} qui résultent de la condensation de six molécules d'isoprène (hydrocarbure saturé). Le tableau 14 résume quelques données de la littérature sur les triterpènes.

Tableau 14: Triterpènes du beurre de karité

Composés	Références	
Germanicol (9%) ; parkéol (1%) ; 24-méthylènelanost-9(11)-en-3-ol (1,2%) ; dammaradiénol (0,7%) ; 24-méthylènedammarenol (0,7%)	(Peers 1977)	
α -amyrine, β -amyrine, lupéol, butyrospermol	Formes majoritaires : 3,69-12,57%	(Vincenzo et al. 2005)
α -amyrin, β -amyrin, lupeol, butyrospermol, ψ -taraxasterol, taraxasterol, parkeol, 24-methylene-24-dihydroparkeol, 24-methylenecycloartanol, dammaradiénol, et 24-methyl-enedammarenol	22-72% des insaponifiables	(Akihisa, et al., 2010)
α -amyrine acétate et cinnamate, β -amyrine acétate et cinnamate, lupéol acétate et cinnamate, butyrospermol acétate et cinnamate	(Akihisa et al. 2011)	
α -amyrine (26,5% ; 27,6-54,6% ; 40-50%) ; butyrospermol (25,0% ; 12,3-26% ; 15-25%) ; lupéol (21,7% ; 16-22,60 ; 10-20%) ; β -amyrine (10,2% ; 7,1-10,60% ; 5-10%)	(Nahm et al. 2013; Peers 1977)	
15 triterpènes acides et glycosides de type oléane ; 2 glucosides stéroïdes ; 2 pentane-2,4-diol glucosides ; 7 composés phénoliques ; 3 sucres.	Dans des extraits méthanoliques d'amandes de karité	(Zhang et al. 2014)

I.3.2.3. Le karitène

Selon Pradain J. (1949), le karitène, dénomination attribuée à une fraction de l'insaponifiable du BK, qualifié de "matière poisseuse" qui reste collée contre les parois après saponification (Paquot et al. 1952), donc difficile à éliminer. Étant donné qu'il n'existe pas de définition universellement admise du terme karitène, nous allons, dans cette étude, reprendre les éléments pertinents de la littérature afin de comprendre la nature de ce composé. Il s'agit d'un hydrocarbure dont la formule chimique $C_{32}H_{56}$ a été développée depuis les travaux de Hopkins et Young en 1931 et par Bauer K.H. and Umbach G. (1932) par analyse élémentaire et par cryoscopie. Il s'agit de la formule généralement acceptée. Le karitène y est décrit comme proche de l'illipène isolé en 1922 par Kobayashi à partir du beurre d'illipé (ou suif de Bornéo) qui est une matière grasse végétale issue de la pression à froid des noix de *Shorea stenoptera*. Selon cette étude, la température de fusion du karitène est de 64 °C. Il est facilement soluble dans le chloroforme et ne possède aucune déviation polarimétrique. Le karitène comprend cinq liaisons éthyléniques, d'où la valeur élevée de son indice d'iode : 287 (Pradain J. 1949).

Zhang et *al.* (2026) ont décrit le karitène comme un mélange d'hydrocarbures polyisopréniques, similaire au caoutchouc de haut poids moléculaire, dont la teneur en insaponifiables est comprise entre 1 et 3 %. Dans le même ordre d'idées, selon Guichard et *al.* 1997; Thomas et *al.* (2015), le karitène serait un terpénoïde, plus précisément un hydrocarbure similaire au caoutchouc, de formule chimique $(C_3H_8)_n$, avec une température de fusion de 63 °C, à des taux de l'ordre de 2 - 10 % de l'insaponifiable. Selon Nahm et *al.* (2013), le karitène est le principal hydrocarbure présent dans le BK, dont la teneur est comprise entre 17 et 27 % ou entre 2 et 5 % de la fraction insaponifiable. Selon Alander (2004), la teneur de l'hydrocarbure isoprénique de haut poids moléculaire est fonction du procédé d'extraction mis en œuvre, et varie entre 2 et 5 %. En référence à Paquot et *al.* (1952), le fractionnement de l'insaponifiable a permis d'obtenir différents précipités et des résidus, dont des hydrocarbures dénommés karitène :

Un premier précipité appelé karitène A ou brut à une teneur d'environ 1,5 % du beurre initial. Il représente 76 % des karitènes, et de formule $(C_5H_8)_n$, avec n de l'ordre de 180 ;

Le karitène B résulte de l'oxydation du karitène A. Il représenterait 2 % des karitènes (Lebert 2005). Un deuxième précipité qui donne deux fractions, les karitènes C et D. Le karitène A se présente sous forme de cristaux blancs dont la température de fusion est comprise entre 63 et 64 °C. Sa solubilité est très variable : très soluble dans le chloroforme, le tétrachlorure de carbone, le benzène à froid, et dans l'éther sulfurique à chaud. Il est peu soluble dans l'éther sulfurique à froid et dans l'éther de pétrole, insoluble dans l'alcool éthylique et l'acétone. Selon Lebert (2005), le karitène C de formule chimique $C_{10}H_{2n}O_n$ avec n= 8, 9 ou 10, représenterait 11 % du total. Le karitène D, quant à lui, représenterait également 11 %, de formule chimique $C_{10}H_{2n}O_n$ avec n = 8 ou 9.

La formule chimique proposée par Paquot et *al.* (1952), c'est-à-dire $(C_5H_8)_n$, avec n de l'ordre de 180, est différente de celle proposée par Bauer K.H. and Umbach G. 1932; Heilbron I. M. et *al.* 1934 : $(C_5H_8)_{20-21}$. En outre, selon Paquot et *al.* (1952), le BK brut contiendrait environ 1,5 % de latex (dont le karitène) et 4,4 % d'alcools terpéniques, donc 5,9 % d'insaponifiables. Notons cependant que des informations différentes existent sur le karitène, comme par exemple ces informations tirées du site Web d'un laboratoire d'analyses chimiques (<https://yeswelab.fr/>) qui propose des techniques de dosage du karitène par HPLC et par spectrophotométrie UV-vis visant à déterminer sa teneur dans les extraits, beurres végétaux ou formulations cosmétiques. Selon ce laboratoire, le karitène serait un caroténoïde naturel, dérivé d'une structure polyénique (chaîne de carbones avec doubles liaisons conjuguées) présent dans le beurre de karité, dont la

formule chimique n'est pas unique. Il s'agit d'un mélange de pigments caroténoïdes responsables de la couleur jaune du beurre de karité. La formule chimique du karitène serait donc proche de celle des caroténoïdes (bêta-carotène : $C_{40}H_{56}$).

Le karitène est un composé particulier, dont la littérature est manquante. Il est doté de propriétés intéressantes pour les industries cosmétiques et pharmaceutiques, mais pour l'industrie agroalimentaire, le karitène pose des problèmes de stabilité et de valorisation en chocolaterie. Le karitène, au vu de la littérature, serait un hydrocarbure polyisoprénique (composé terpénique) dont la formule chimique reste à élucider.

I.4. Critères de qualité du beurre de karité selon le Codex Alimentarius

Selon la nature du BK, les caractéristiques physicochimiques peuvent varier. Le tableau 15 présente les caractéristiques physicochimiques du BK non raffiné selon le Codex Alimentarius.

Tableau 15: Caractéristiques physicochimiques du beurre de karité définies dans le Codex Alimentarius

Paramètres	Intervalle
Densité relative ($x=20^{\circ}\text{C}$)	0,91-0,98
Densité ($x=40^{\circ}\text{C}$)	0,89-0,93
Indice de saponification (mg KOH/g beurre)	160-195
Indice d'iode (g I_2 /100g)	30-75
Teneur en insaponifiables (% m/m)	1- 9
Indice de réfraction à 44°C	1,4620-1,4650
Point de fusion ($^{\circ}\text{C}$)	35-40

Le tableau 16, quant à lui, énumère les principales caractéristiques physicochimiques du BK telles que décrites dans la littérature.

Tableau 16: Synthèse des caractéristiques physicochimiques et biochimiques du beurre de karité dans la littérature

Propriétés	Auteurs																	
	(Ajala et <i>al.</i> 2016)	(Honfo et <i>al.</i> 2013)		(Megnanou et Dioph 2008)		(Chukwu et Adgidzi 2008)	(Honfo et <i>al.</i> 2012)		(Honfo et <i>al.</i> 2014)		(Megnanou et <i>al.</i> 2007)		(Megnanou et Niamke 2015)		(Abagale et <i>al.</i> 2016)		(Megnanou et <i>al.</i> 2014)	
	Moy	Min	Max	Min	Max	Moy	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Densité relative (40°C)	0,908	-	-	-	-	0,906	-	-	0,90	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Viscosité ((1) mm².s⁻¹ 40°C), (2) mPas à 40°C	30,68 (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73,66±0,20	96,00±0,20	-	-	86,78±0,39 (2)	130,10±5,02 (2)
Point de fusion (°C)	33	32	48	34,6±0,5	35,9±0,5	27	-	-	25	45	33,0±0,10	35,9±0,5	-	-	-	-	-	-
Acides gras libres (%)	9	1,3±0,0	2,1±0,1	-	-	-	-	-	1,0	10,7	-	-	-	-	3,383±0,05	6,334±0,01	-	-
Indice de peroxydes ((1) mg/100g); (2) meqO₂/kg	29,5 (1)	4,7±0,2 (2)	8,2±0,1 (2)	14,70±0,47 (2)	30,88±0,55 (2)	12,85 (2)	9,41±0,8 (2)	11,76±2,3 (2)	0,5 (2)	29,5 (2)	2,79±0,05 (2)	30,88±0,55 (2)	0,960±0,001 (2)	1,010±0,001 (2)	3,96±0,06 (2)	7,08±0,13 (2)	-	-
Indice acide (mgKOH/g)	21,85	-	-	12,80±0,30	17,32±0,24	3,825	4,10±1,6	6,01±1,2	0,0	21,2	10,51±0,55	17,32±0,24	0,140±0,001	0,280±0,001	-	-	-	-
Indice d'iode ((1) g I₂/100g), (2) mg I₂/100g	21,43 (1)	46,8±0,3 (2)	55,2±0,5 (2)	28,53±0,75 (1)	31,42±0,9 (1)	43,27 (2)	48,30±1,3 (2)	50,26±1,2 (2)	21,68 (2)	89,5 (2)	28,53±0,75 (2)	43,23±0,15 (2)	52,64±0,20 (1)	53,06±0,20 (1)	-	-	-	-
Indice de saponification (mgKOH/g)	167,4	-	-	168,80±1,10	204,08±1,10	196,9	186,43±2,6	193,74±6,0	132,0	207,5	168,80±1,10	204,08±1,10	-	-	-	-	-	-
pH à 25°C	6,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,50±0,3	6,78±0,3	-	-	5,39±0,01	6,69±0,01
Taux d'humidité (%)	-	1,5±0,1	2,0±0,2	3,36±0,02	14,50±0,0	1,37	-	-	-	-	0,15±0,01	14,50±0,01	-	-	0,177±0,04	0,542±0,19	-	-
Impuretés insolubles (%)	-	-	-	5,78±0,72	6,60±0,70	-	-	-	0	3,5	-	-	-	-	0,1496±0,03	1,1996±0,55	-	-
Gravité spécifique (40°C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,87±0,01	0,92±0,01	-	-	0,88±0,0	0,92±0,0
Indice de réfraction (40°C)	-	1,467±0,0	1,469±0,0	1,463±0,01	1,464±0,01	1,452	-	-	1,45	1,5	1,463±0,01	1,466±0,00	1,453±0,0	1,454±0,0	-	-	1,464±0,0	1,464±0,0

I.4.1. Paramètres influençant la composition physicochimique du beurre de karité

Selon Obibuzor (2013), la qualité physicochimique des matières grasses d'origine végétale, dont le BK, est fonction de plusieurs facteurs, dont :

I.4.1.1. L'effet des facteurs intrinsèques sur la composition physicochimique

Les facteurs internes à la matière première comme la provenance, le type d'espèce et le matériel génétique (Lovett 2004) ont une influence sur la composition physicochimique du BK. L'influence de la qualité des amandes sur la qualité physicochimique du BK a été mise en évidence par Obibuzor (2013). En effet, le processus de germination de l'amande pendant 9 jours modifie significativement ses constituants ainsi que la qualité du produit fini. La teneur en lipides par exemple a varié de 48,87 % à 51,52 %, respectivement pour des amandes germées et non germées. Quant aux indices chimiques, la teneur en acides gras libres (AGL/FFA) et l'indice de peroxyde (IP/PV) ont été respectivement multipliés par 7 et par 81. L'étude a également noté une diminution de la teneur en AG linoléique (C18 :2) du BK issu des amandes germées par rapport aux amandes non germées, passant de $3,65 \pm 0,03$ % à $5,34 \pm 0,04$ %.

I.4.1.2. L'effet des facteurs extrinsèques sur la composition physicochimique

Les facteurs extrinsèques à la matière première comme la méthode de prétraitement appliquée, les facteurs édaphiques (c'est-à-dire les facteurs liés aux caractéristiques physicochimiques et biologiques du sol), les facteurs climatiques/environnementaux, les conditions de stockage de la matière première et les conditions phytosanitaires ; influencent également la composition physicochimique du BK.

En effet, en fonction des conditions climatiques, comme en période de forte humidité par exemple (avec un risque de prolifération de champignons, altérant ainsi la qualité microbiologique des amandes), ou de faible ensoleillement, les amandes peuvent être mal séchées, augmentant ainsi l'acidité du beurre et favorisant la formation de peroxydes. Aussi, les périodes de forte température et une humidité résiduelle supérieure à 65 % exposent les fruits à coque à un large éventail d'infections par des moisissures (Aculey, et *al.* 2012) qui contribuent à réduire la qualité des amandes, donc du produit fini.

Quant au pré-traitement, le séchage au soleil par exemple, lorsque non maîtrisé, peut être source de détérioration des composés d'intérêt du BK (Womeni et *al.* 1997). De même, la taille des amandes concassées, qui, lorsque trop fine, augmente la surface de contact enzymes-substrat et avec l'air, accélérant ainsi la dégradation chimique (oxydation) du beurre (Womeni et *al.* 2007). Aussi, selon Bup et *al.* (2011), la cuisson, le trempage à l'eau et le séchage des amandes de karité ont montré un effet sur le rendement d'extraction et les constituants mineurs du BK, donc sur la qualité du produit fini. Ces différents prétraitements ont affecté de manière significative la qualité du beurre. Le rendement d'extraction après trempage des amandes (> 55 %) était supérieur à celui obtenu sans trempage des amandes, mais comparable au rendement obtenu après digestion enzymatique des amandes (50 - 55 %) (Tano-Debrah Kwaku and Ohta 1994). En effet, selon les auteurs, le trempage à l'eau des amandes fragilise les membranes, contribuant ainsi à augmenter le rendement d'extraction de l'huile. Cependant, leur séchage a impacté négativement et de façon significative la teneur en tocophérols (53 % - 68 %) du BK, par rapport au prétraitement sans séchage des amandes (α -tocophérols > 80 %). Selon une étude expérimentale d'optimisation du rendement d'extraction du BK par presse uniaxiale spécialement instrumentée, les paramètres tels que la pression appliquée au broyat (20 MPa), la finesse de la mouture (broyat le plus fin, entre $0,5 \text{ mm} < \varnothing < 5 \text{ mm}$) et la température d'extraction (90 °C), ont permis d'obtenir de meilleurs résultats sans altérer les caractéristiques du BK (Yé et *al.* 2007). Les paramètres opératoires tels que l'épaisseur des amandes de karité, la température de friture, le ratio en poids amandes/beurre et la durée de la friture ont été optimisés afin d'améliorer la composition et la teneur en matières insaponifiables (UMC) (Womeni et *al.* 2006). Les paramètres optimaux étaient ainsi définis : durée de friture des amandes de 2 à 8 min, épaisseur des amandes concassées de moins de 8 mm, température de friture inférieure à 150 °C, avec un rapport m/m (amandes/beurre) de 0,035 à 0,060. L'impact du séchage traditionnel au soleil, des amandes concassées, sur la qualité physicochimique du BK brut a été évalué par les mêmes auteurs un an plus tard (Womeni et *al.* 2007). Le meilleur rendement d'extraction a nécessité des amandes concassées ayant une teneur en eau résiduelle de 10 % à 15 %. Les conditions optimales telles que décrites étaient une exposition de 5 à 8 jours au soleil, d'amandes de plus de 2 mm d'épaisseur. Cependant, les auteurs ont souligné que le concassage des amandes aidait à une évaporation de l'eau, mais était responsable d'une augmentation de la teneur en AGL et d'une diminution de l'UMC. Aussi, une longue exposition au soleil était responsable d'une augmentation de l'IP.

Quant au profil en AG, Bup *et al.* (2011) ont montré dans leur étude que tous les échantillons de BK issus de la cuisson des amandes ont révélé la présence d'au moins un acide galédonique, béhénique ou stéridonique. Ces AG ne sont pas spécifiques au BK et non indiqués en nutrition humaine. Ces résultats montrent que le processus de cuisson des amandes nécessite une maîtrise approfondie afin d'optimiser la qualité du beurre. Ces conditions optimales ont ainsi été définies selon Bup *et al.* (2012): un temps de cuisson de 95 - 120 min, une température de cuisson de 75 - 90 °C et une taille des amandes concassées de 40 - 45 mm. Ces conditions optimales ont donné les réponses suivantes : une teneur en eau de 51,97 % de poids sec, une teneur en huile extraite de 47,47 %, une teneur en AGL de 2,76 % et un IP de 3,87 meq/kg. Cependant, selon Tame *et al.* (2015), les paramètres permettant d'optimiser la qualité chimique du BK (IA/AGL, IO, IP, IS, UMC) sont un temps de chauffage court des noix de karité (30 ou 60 min d'ébullition et de torréfaction).

Selon Megnanou et Niamke (2013), les réactions d'oxydation et d'hydrolyse peuvent être induites par l'oxygène de l'air, les rayons du soleil ou toute autre source de chaleur. Dans leur étude expérimentale conduite en Côte d'Ivoire, les auteurs ont déterminé les conditions optimales pour obtenir du BK de qualité conforme aux normes internationales en vigueur. Ainsi, la durée et le mode de séchage, la qualité de l'amande et le temps de torréfaction ont été optimisés. Les résultats ont montré que l'IP a augmenté de manière continue (de $2,79 \pm 0,05$ mEqO₂/kg à $10,30 \pm 0,05$ mEqO₂/kg) de la première semaine à la quatrième semaine de séchage au soleil, tandis que l'UMC a diminué (de $17,60 \pm 0,05$ % à $1,55 \pm 0,05$ %). Ils ont noté une élévation des IP et IA après cinq minutes de torréfaction. Aussi, selon cette étude, le BK conservé dans un emballage stérile était exempt de germes, comparé à d'autres types d'emballages. En outre, le procédé d'extraction (P) tenant compte de toutes ces conditions optimales a conduit à du BK dont la teneur en eau (0,15 %), l'IA (11,94 mg KOH/g), l'IP ($2,79 \pm 0,05$ mEqO₂/kg), l'IS ($196,10 \pm 0,15$ mg KOH/g), l'indice de réfraction - RI - ($1,465 \pm 0,005$) et le point de fusion ($35,0 \pm 0,1$ °C) étaient conformes aux exigences en vigueur. En outre, il était exempt de métaux lourds et de germes, et son UMC était élevé ($17,61 \pm 0,25$ %). Cependant, les paramètres physiques tels que la température de torréfaction des amandes (140, 160 et 180 °C) et la technique d'extraction du BK n'ont pas montré de différence significative entre les paramètres comme le point de fusion, le point de fumée, la densité et la RI (Akingbala *et al.* 2006). Dans cette étude, les auteurs ont montré que les rendements d'extraction augmentaient avec la température de torréfaction des noix. Cependant, l'augmentation du rendement en beurre due à l'augmentation de la température de torréfaction des amandes s'était

accompagnée d'une diminution de la qualité du beurre en raison de l'augmentation de la teneur en AGL et en IP. Une étude expérimentale conduite par Honfo et *al.* (2017) a permis d'établir l'effet simultané de la torréfaction des amandes concassées, en particulier la durée et la température de torréfaction, sur la qualité du produit fini. Pour ce qui concerne les composés organiques volatiles, le BK issu d'amandes torréfiées a révélé la présence de 58 composés, contre 27 composés dans le beurre provenant d'amandes non torréfiées. Une torréfaction à 171 °C pendant 15 min représentait les conditions optimales ayant permis d'obtenir une teneur en matière grasse de 49 % des amandes, un rendement en beurre de 32 %, une teneur en AGL de 1,2 % et un IP de 3,2 meqO₂/kg. Ce temps de torréfaction optimal était sensiblement plus court que la pratique réelle.

I.4.1.3. Les facteurs liés au produit brut fini

Différents facteurs liés au traitement du produit fini, aux conditions de conservation et de stockage et au mode d'extraction peuvent impacter la qualité du BK (Goumbri et *al.* 2021). Le traitement thermique des lipides favorise la formation de produits d'oxydation lipidique (lipid oxidation products), qui sont susceptibles d'avoir des effets potentiellement néfastes sur la santé humaine (Zhuang et *al.* 2022). Une faible teneur en eau est préférable pour la qualité du BK, car une teneur élevée en eau peut entraîner une dégradation du beurre (hydrolytique et oxydative) (Nahm 2011). En améliorant les conditions expérimentales de l'extraction par presse à vis du BK, Yonas et *al.* (2016) ont déterminé les paramètres optimaux pour un meilleur rendement d'extraction : une teneur en eau de 9 g/100 g, une température de matrice de 65 °C et une durée de conditionnement de 30 min.

Outre les critères de qualité décrits, les conditions de stockage du BK constituent également des contraintes essentielles de qualité. La durée de stockage et le type de matériaux d'emballage utilisés influencent la qualité microbiologique et physicochimique des produits (Honfo et *al.* 2011). Ainsi, selon les résultats de leur étude, après 2 mois de stockage, la teneur en eau du beurre était restée constante (5 %), tandis que l'IA avait augmenté de 3,3 à 5,4 mg KOH/g, l'IP de 8,1 à 10,1 meqO₂/kg et l'IO avait baissé de 48,8 à 46,2 mgI₂/100 g. Ces résultats obtenus étaient indépendants des matériaux traditionnels de stockage utilisés (panier traditionnel tressé et recouvert de sacs de jute, récipient en plastique avec couvercle, récipient en aluminium recouvert d'un sachet en plastique, sac en plastique et calebasse avec couvercle). Le panier recouvert d'un sac de jute était le moins efficace pour garantir la qualité du beurre pendant le

stockage, tandis que les conditionnements et les sacs en plastique semblaient être les meilleurs matériaux d'emballage. Ce résultat met en évidence la problématique de la contamination alimentaire par les hydrocarbures d'huiles minérales (mineral oil hydrocarbons - MOH) qui sont des composés chimiques dérivés du pétrole brut, pouvant contaminer les aliments de diverses façons : contamination agricole, environnementale, par les emballages, etc. (AGRINFO 2025). Les sacs de jute sont des sources potentielles d'huiles minérales, donc de contamination par les MOH, qui sont de deux formes : les hydrocarbures aromatiques d'huiles minérales (mineral oil aromatic hydrocarbons - MOAH) et les hydrocarbures saturés d'huiles minérales (mineral oil saturated hydrocarbons - MOSH). Une bonne maîtrise de ces conditions aboutit inévitablement à un produit fini de qualité désirée (grade 1^a, 1^b ou 1^c) (Lovett 2004). Néanmoins, pour les producteurs africains, les critères de qualité pharmaceutique/cosmétique et/ou agroalimentaire sont difficiles à atteindre du fait de la non-maîtrise des procédés d'extraction.

Du point de vue du rendement d'extraction du BK de la méthode traditionnelle, il était de 20 - 35 % et consommait beaucoup d'énergie fossile et de ressources humaines (Addaquay 2004). Ce rendement est inférieur à celui obtenu par les méthodes semi-mécanisées (40 %) et automatisées industrielles (42 % - 50 %), puis à celui par extraction enzymatique (43 %) (Ajala et al. 2015). L'extraction traditionnelle après trempage des noix augmenterait le rendement d'extraction à 55 % par fragilisation des membranes (Tano-Debrah Kwaku and Ohta 1994). Le rendement par micro-ondes assistée (88 %) était parmi les plus importants (Nde Bup et al. 2016). Quant à l'extraction par solvant, le rendement est de 66 %, avec comme inconvénient, l'augmentation de l'acidité (Ixtaina et al. 2011). De même, l'extraction au CO₂ supercritique présente un rendement de l'ordre de 39,5 %, mais avec une augmentation de l'acidité (19,88 et 23,07 %) et une diminution de l'indice d'iode (22,57 et 37,66 g/100 g) (Nkouam et al. 2007). Le barattage augmenterait de son côté le rendement par rapport à l'extraction par presse (Qu et al. 2007).

Le tableau 17 présente de manière synthétique l'impact des différentes étapes d'extraction et de prétraitement sur les paramètres chimiques de qualité du BK.

En annexe 1 sont énumérées différentes méthodes analytiques de dosage applicables aux corps gras, qui décrivent les techniques de caractérisation des AG, des TAG, des stérols, des polyphénols, des alcools triterpéniques et aliphatiques ainsi que du profil du beurre.

Tableau 17 : Effets des différentes étapes de prétraitements impactant les caractéristiques du beurre de karité

Étapes	Paramètres impactés	Conséquences	Auteurs
Cuisson des amandes suivie d'un séchage au soleil	Teneur en acides gras libres	Augmentation de 6%	(Honfo et <i>al.</i> 2013)
	Taux de matière grasse	Augmentation (environ 41 %)	
	Teneur en eau	Augmentation (environ 2 %)	
	Matières insaponifiables	Augmentation (environ 7 %)	
	Indice de peroxyde	Augmentation (environ 8 meq.O ₂ .kg ⁻¹)	
	Indice d'iode	Augmentation (environ 53 mg I ₂ 100. g ⁻¹)	
Friture des amandes (alternative à la cuisson) concassées d'une épaisseur inférieure à 8 mm et frits pendant 2 à 8 minutes à 150 °C	Teneur en matières insaponifiables.	Augmentation	(Ibanga et <i>al.</i> 2015) (Womeni, Parmentier, et <i>al.</i> 2007)
Séchage suivi d'une friture des amandes concassées d'une épaisseur inférieure à 8 mm et frits pendant 4 à 6 min entre 140 et 180 °C	Indice d'acide	Diminution	(Hilaire Macaire Womeni et <i>al.</i> 2006)
Amandes concassées à une épaisseur inférieure à 6 mm + séchage solaire en moins d'une journée	Beurre	Meilleure qualité	(Womeni, Linder, et <i>al.</i> 2007) (Womeni, Parmentier, et <i>al.</i> 2007) (Dandjoma et <i>al.</i> 2009)
Épaisseur supérieure à 16 mm, quelle que soit la durée de séchage	Teneur en acides gras libres	Augmentation	
Cuisson des amandes à la vapeur, une alternative au séchage au soleil	Indice d'acide	Diminution d'environ 5 % par rapport à 9 % pour le séchage au soleil	(Mbaiguinam et <i>al.</i> 2007)
Les amandes d'une épaisseur supérieure à 10 mm et séchées au soleil pendant plus de 5 jours	Indice de peroxyde	Augmentation	(Womeni, Parmentier, et <i>al.</i> 2007)
Séchage prolongé des amandes au soleil	Indice de peroxyde	Augmentation	
	Stabilité	Baisse	
Trempe à l'eau des noix	Indices chimiques de qualité	Sous standards	(Bup et <i>al.</i> 2011)
Séchage au soleil (lent, non uniforme) des noix et des amandes	Teneur en eau	Augmentation	(César Kapseu 2009)
	Indice d'acide	Augmentation	
	Oxydation	Augmentation	
Séchage au soleil (optimale de 8 jours) des amandes concassées d'épaisseur de plus de 16 mm	Indice d'acide	Diminution	(Womeni, Parmentier, et <i>al.</i> 2007)

Étapes	Paramètres impactés	Conséquences	Auteurs
Torréfaction non maîtrisée des amandes	Composition en acides gras	Impacte la composition en acides gras par thermolyse des triacylglycérols	
Séchoir électrique et solaire des noix et amandes	Teneur en eau et qualité du produit fini	Réduction de la durée de séchage, Séchage homogène : Meilleure qualité de beurre	(Womeni, Linder, et <i>al.</i> 2007) (Womeni, Parmentier, et <i>al.</i> 2007) (Dandjoma et <i>al.</i> 2009)
Barattage à l'eau froide au début, puis ajout d'eau tiède vers la fin	Teneur en acides gras libres ; teneur en eau	Augmentation de la teneur en acides gras libres et de la teneur en eau ;	(Qu et <i>al.</i> 2007)
Conditionnement du produit fini	Panier traditionnel tissé recouvert de sacs en jute ; récipient en plastique avec son couvercle ; récipient en aluminium recouvert d'un sac en plastique ; sac en plastique et cales avec son couvercle	Le panier recouvert de sacs en jute s'est avéré moins efficace pour préserver les qualités microbiologiques et physicochimiques du beurre après un mois de stockage.	(Honfo et <i>al.</i> 2011)
Conditions optimales d'extraction du beurre	Séchage des noix pendant une semaine maximum afin d'éviter la formation de moisissures, l'augmentation de l'indice de peroxyde et la diminution de la teneur en matières insaponifiables ; Choix des amandes non moisies ; Torréfaction des amandes par portions de 500 g à une température comprise entre 120 et 150 °C pendant 5 min maximum (l'acidité et l'indice de peroxyde augmentent rapidement après 5 min de torréfaction)	Beurre de grade agroalimentaire	(Rose-Monde Megnanou and Niamke 2013)
Cuisson de l'émulsion à une température ≥ 100 °C en ≥ 30 min et filtration à chaud à 60 °C	Qualité microbiologique : contamination par <i>Pseudomonas</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Aspergillus</i> , ou <i>Candida</i>	Meilleure qualité microbiologique	(Oyedele et <i>al.</i> 2020)
Séchage et friture des amandes broyées (< 12 mm) à > 140 °C pendant 6 min	Teneur en eau des amandes	Diminution de la teneur en eau	(Womeni et <i>al.</i> 2004)

Étapes	Paramètres impactés	Conséquences	Auteurs
Torréfaction des amandes à 106 °C pendant 120 min suivie d'une cuisson de l'émulsion pendant 90 min	Rendement d'extraction, indice de peroxyde, teneur en acides gras libres, teneur en matières insaponifiables	Amélioration du rendement d'extraction (de 7,65 % à 25,26 %), Diminution de l'indice de peroxyde (de 12,8 à 5,4 meq.O ₂ .kg ⁻¹), Diminution de teneur en acides gras libres (de 25,78 à 16,12 %) ; Diminution de teneur en matières insaponifiables (de 2,52 à 26,71 %)	(Nurah and Julius 2018)

I.5. Notions de photoprotection

I.5.1. Rayonnement solaire et spectres électromagnétiques

En s'appuyant sur les concepts de photoprotection des pays développés et compte tenu de la particularité de sa population (diversité ethnique) et de son climat (diversité climatique : équatorial, tropical de savane, semi-aride, subtropical, tropical atlantique), la société brésilienne de dermatologie a élaboré le consensus brésilien sur la photoprotection. Ainsi, les rayonnements électromagnétiques sont classés selon la longueur ou la fréquence de propagation de l'onde (Brazilian Society of Dermatology 2014). Le spectre électromagnétique est subdivisé par ordre décroissant de longueur d'onde (i) ondes radio, (ii) micro-ondes, (iii) ondes infrarouges (IR), (iv) lumière visible, (v) ultraviolet (UV), (vi) rayons X et (vii) rayons gamma. Les radiations IR, visibles et UV constituent la quasi-totalité du rayonnement solaire. En général, le rayonnement solaire atteignant l'atmosphère terrestre est essentiellement composé de :

- **Rayonnement ultraviolet (UVR)**, caractérisé par des radiations de longueur d'onde comprise entre 100 et 400 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Il représente environ 10 % du rayonnement solaire total atteignant l'atmosphère, mais subit une forte atténuation lorsqu'il atteint la surface terrestre. Les UVR sont responsables d'une série d'effets photochimiques et photobiologiques importants. Parmi ces UVR qui atteignent la surface de la terre, on a les UVB (290 - 320 nm) et UVA (320 - 400 nm). Les UVA peuvent être subdivisés en UVA I (340 - 400 nm) ou UVA lointains et UVA II (320 - 340 nm) ou UVA proches (Barel et *al.* 2014).
- **Rayonnement visible**, de longueur d'onde entre 400 et 780 nm, représente environ 40 % du rayonnement du soleil, et se définit comme tout rayonnement capable de provoquer une sensation visuelle. Le rayonnement visible subit moins d'atténuation lors de la traversée de l'atmosphère terrestre.
- **Rayonnement infrarouge (IR)**, caractérisé par une large bande dont les longueurs d'onde sont comprises entre 360 nm et 830 nm (la limite inférieure se situe généralement entre 360 nm et 400 nm, tandis que la limite supérieure se situe entre 760 et 830 nm), représentant 50 % du rayonnement solaire. Le rayonnement infrarouge est fortement absorbé par la vapeur d'eau et le gaz carbonique présents en quantités significatives dans l'atmosphère, et est donc intimement lié aux changements climatiques.

Dans le cas spécifique des rayons UV, les termes UVA (entre 315 et 400 nm), UVB (entre 280 et 315 nm) et UVC (entre 100 et 280 nm) ont été introduits en 1930 par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) en raison des différents effets photobiologiques de ces bandes spectrales. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé - OMS - (<https://www.who.int/fr/news-room/questions-and-answers/item/radiation-the-known-health-effects-of-ultraviolet-radiation>), les longueurs d'onde UVA représentent environ 98 % de la gamme UV. Elles ont une longueur d'onde supérieure à celle de l'UVB, dégagent donc moins d'énergie (figure 9), pénètrent profondément les couches de la peau (jusqu'à environ 1000 µm) et de l'œil, pouvant toucher le derme et l'hypoderme et donc le tissu conjonctif et les vaisseaux sanguins, responsables d'une perte progressive d'élasticité et d'un vieillissement prématuré cutané. La figure 9 illustre une décroissance exponentielle de l'énergie en fonction de la longueur d'onde : plus la longueur d'onde est élevée, plus l'énergie liée est faible. Les UVA sont responsables des changements d'une pigmentation de la peau appelés bronzage surtout chez les personnes de type caucasien. Ils entraînent surtout des réactions photo-oxydatives diverses, sur l'acide désoxyribonucléique (ADN) aboutissant à un effet mutagène indirect et immunosuppresseur (Lacour et Béani 2007). Dans l'œil, une petite partie des UVA traverse la cornée et le cristallin, atteignant donc la rétine, pouvant ainsi entraîner des lésions de la rétine et des complications à long terme.

Les rayons UVB peuvent pénétrer la peau jusqu'à une profondeur d'environ 160 - 180 µm et sont la composante la plus dangereuse de la lumière du soleil. Ils représentent 2 - 5 % des UV et sont principalement responsables des coups de soleil, de l'augmentation assez sensible du risque de cancer de la peau. Ils agissent directement sur l'ADN par la création de photo-produits, pouvant entraîner des mutations, et sont principalement responsables d'une variété de maladies de la peau, y compris des cancers autres que le mélanome. Ils semblent provoquer une immunosuppression plus facilement que les UVA.

Ils sont en effet capables de traverser l'épiderme et d'atteindre le derme supérieur où ils interagissent avec les chromophores cellulaires, entraînant des lésions de l'ADN et un stress oxydatif accru, comme illustré dans les figures 10 et 11 (Cavinato et *al.* 2017; Ghazi 2022). Dans l'œil, contrairement aux UVA, les UVB sont complètement absorbés par la cornée et le cristallin au niveau oculaire.

Les UVC sont potentiellement plus phototoxiques, dégagent beaucoup d'énergie et sont plus mutagènes par nature (Nichols et Katiyar 2011). Le rayonnement UVC peut pénétrer dans la peau à une profondeur d'environ 60 à 80 µm et peut endommager les molécules d'ADN

(Nichols et Katiyar 2011). Cependant, la majeure partie des UVC émanant du soleil sont presque intégralement absorbés par la couche d'ozone et par l'oxygène présent dans l'atmosphère, avant d'arriver à la surface terrestre.

L'indice ultraviolet (UVI) ou *Ultraviolet Index*, est une échelle de valeurs recommandée par l'OMS ([https://www.who.int/fr/news-room/questions-and-answers/item/radiation-the-ultraviolet-\(uv\)-index](https://www.who.int/fr/news-room/questions-and-answers/item/radiation-the-ultraviolet-(uv)-index)), liée à l'intensité du rayonnement UV qui induit l'apparition d'un érythème cutané (tableau 18). Cet indice qui est une mesure de l'intensité du rayonnement UV va de 1 à 11, correspondant à des niveaux de risque, ainsi qu'aux recommandations associées. L'indice 1 représente l'exposition la plus faible tandis que le 11+ est susceptible de provoquer des dommages à la peau et aux yeux. Elle permet d'informer la population sur les risques liés à une exposition excessive au soleil.

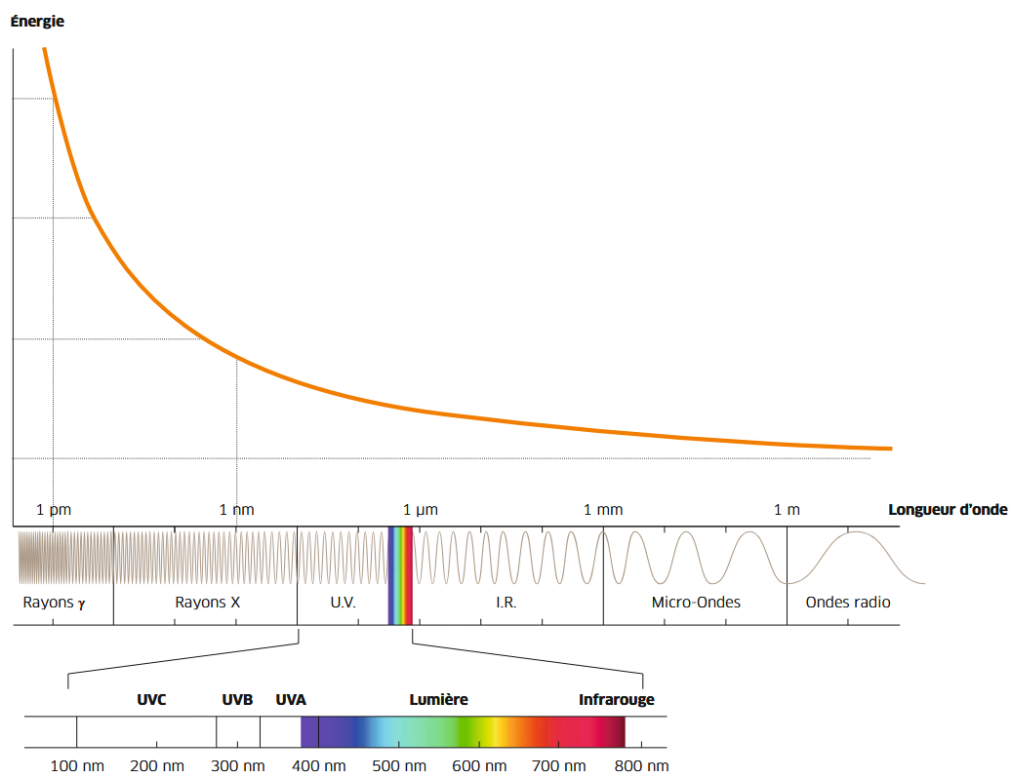


Figure 9: Illustration du spectre électromagnétique, de l'énergie du photon en lien avec sa longueur d'onde.

Auteurs : (Brissinger et Deniel 2022)

Tableau 18 : Valeur de l'indice UV selon l'Organisation Mondiale de la Santé*

Indice UV	Niveau de risque	Couleur	Protection(s) recommandée(s)
1 - 2	Faible		Port de lunettes de soleil en cas de journées ensoleillées.
3 - 5	Modéré		Se couvrir et porter un chapeau et des lunettes de soleil. Appliquer un écran solaire de protection moyenne (indice de protection de 15 à 29), surtout pour une exposition à l'extérieur pendant plus de trente minutes. Rechercher l'ombre aux alentours de midi, quand le soleil est au zénith.
6 - 7	Elevé		Réduire l'exposition entre 11 h et 17 h. Appliquer un écran solaire de haute protection (indice de 30 à 50). Porter un chapeau et des lunettes de soleil, et se placer à l'ombre.
8 - 10	Très élevé		Se protéger, sinon la peau sera endommagée et peut brûler. S'exposer au soleil peut être dangereux entre 11 h et 17 h ; la recherche de l'ombre est donc importante. Privilégier le port de vêtements longs, d'un chapeau et de lunettes de soleil, ainsi que l'application d'un écran solaire de très haute protection (indice +50).
11 +	Extrême		Se protéger la peau, sinon elle sera endommagée et peut brûler en quelques minutes. Toute exposition au soleil est dangereuse, et en cas de sortie il faut se couvrir absolument (chapeau, lunettes de soleil, application d'un écran solaire de très haute protection d'indice +50).

* : Adapté selon l'OMS ([https://www.who.int/fr/news-room/questions-and-answers/item/radiation-the-ultraviolet-\(uv\)-index](https://www.who.int/fr/news-room/questions-and-answers/item/radiation-the-ultraviolet-(uv)-index))

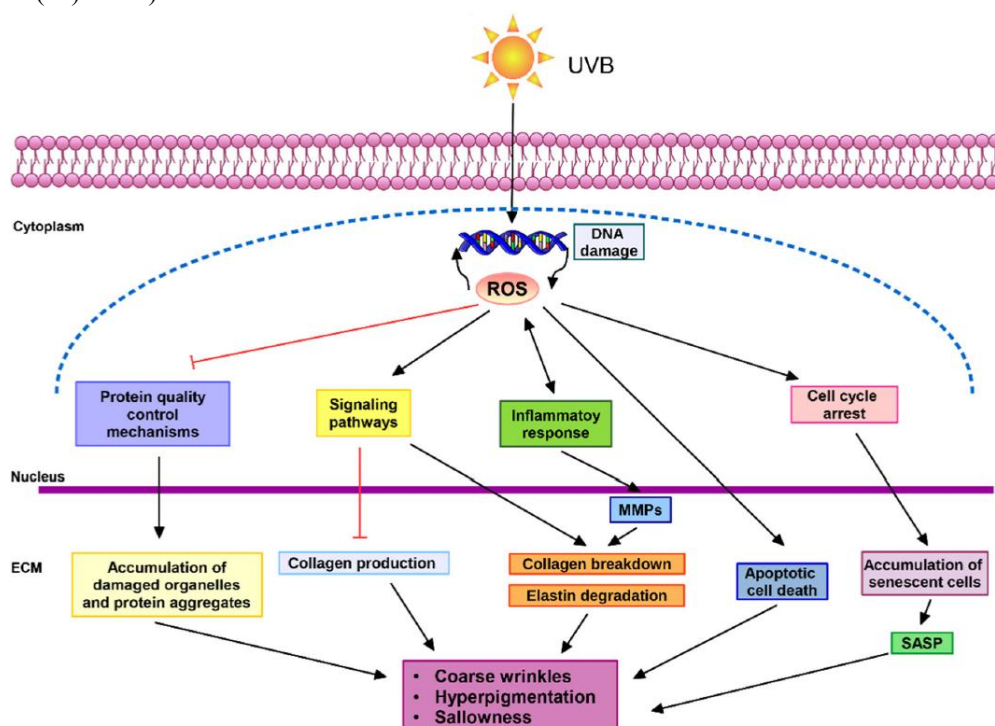
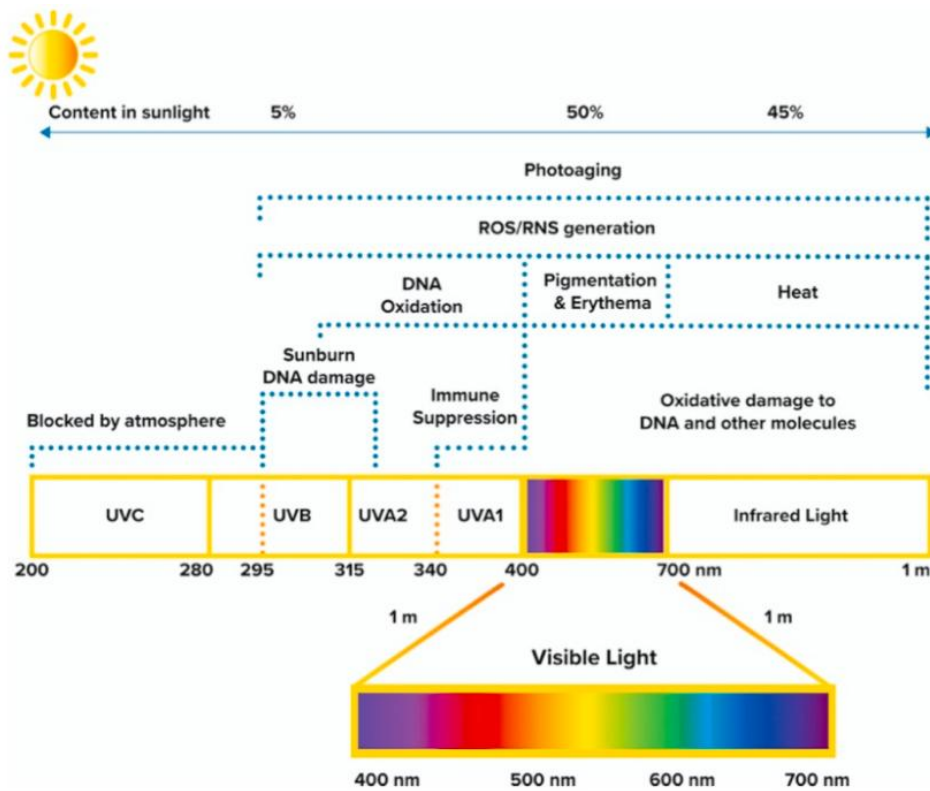


Figure 10: Mécanismes du vieillissement cutané induit par les UVB. Résumé des principales voies affectées par l'exposition chronique de la peau aux UVB et de leur impact sur l'apparence des tissus. Auteurs : (Cavinato et *al.* 2017)



RNS : reactive nitrogen species (espèces réactives de l'azote), ROS : reactive oxygen species

Figure 11: Spectres de rayonnements électromagnétiques et action des ROS et RNS sur la peau.

Auteur : (Ghazi 2022)

I.5.2. Types de protection contre les rayonnements

La photoprotection pourrait être comprise comme un groupe de mesures visant à réduire l'exposition au soleil et à prévenir le développement de maladies aiguës et chroniques (Brazilian Society of Dermatology 2014). On peut citer la photoprotection naturelle et la photoprotection externe selon Lacour et Béani (2007).

I.5.2.1. Protection naturelle

La photoprotection naturelle est mise en œuvre par la couche cornée, la pigmentation mélanique et les mécanismes de réparation cellulaire.

- ✓ Le mécanisme de photoprotection de la couche cornée se fait selon trois mécanismes : la réflexion (surtout pour le spectre visible et l'infrarouge), la diffraction, et l'absorption des radiations lumineuses.

- ✓ La mélanine absorbe plus de 90 % des rayons UV atteignant la couche cornée. Elle agit par diffraction, absorption des photons et joue un rôle tampon des radicaux libres formés dans les kératinocytes par absorption de certains photons (Lacour et Béani 2007).
- ✓ Quant aux mécanismes de réparation cellulaire, l'absorption des photons par les molécules dites chromophores, est responsable de modifications de l'état énergétique moléculaire conduisant à un état instable. Cet état instable lorsqu'il est désactivé par transfert d'énergie à l'oxygène fondamental du milieu, passe à un état activé, les espèces réactives de l'oxygène (ROS), qui sont agressives pour les lipides membranaires, l'ADN et les protéines. Les ROS induites par les UV comprennent l'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et les radicaux superoxydes ($\text{O}_2^{\cdot-}$). Les dommages causés par les ROS à l'ADN, aux protéines et aux membranes cellulaires sont considérés comme la pierre angulaire de la mutagenèse due aux UVA. Cependant, les dommages induits par les ROS peuvent également être causés par les UVB (Jansen et al. 2013). Plusieurs systèmes de réparation cellulaire existent :
 - la **photoréactivation** à travers la photolyase (enzyme) qui se fixe aux photolésions en absorbant la lumière visible puis catalyse la transformation du dimère à l'état antérieur de monomère ;
 - le **mécanisme d'excision-réparation**, qui consiste à réparer des lésions de bases mineures et du système de réparation par excision de nucléotides qui excise et répare des lésions entraînant des distorsions dans la molécule d'ADN ;
 - la **réparation post-répllicative** pendant la réplication.

I.5.2.2. Protection externe

La **photoprotection externe** consiste essentiellement à lutter contre la pénétration du rayonnement solaire dans les cellules cibles, par divers moyens que sont les vêtements et les produits de protection solaire. La protection vestimentaire se fait à travers un style vestimentaire adapté pouvant procurer un filtre optique très efficace contre la pénétration des rayons UV. Il est donc défini un facteur de protection UV des tissus (UPF), qui est fonction du tissage, du type de fibres, de la couleur, du degré d'humidité, du degré d'étirement et d'usure. Sont connus comme protecteurs, les tissus à base de serge de coton, de soie, de polyester

réfléchissant. L'UPF peut ainsi varier de 2 pour une robe en polyester à plus de 1000 pour un Jean®.

Un produit de protection solaire est composé de molécules agissant contre la pénétration de la lumière, d'un excipient et éventuellement d'additifs variés. Les filtres et les écrans sont les deux types de molécules actives utilisées dans les produits de protection solaire. Les filtres sont des substances chimiques de synthèse agissant comme chromophores par absorption de l'énergie lumineuse. Deux types de filtres sont à distinguer (voir tableau 19) : les filtres à spectre étroit, n'absorbant que les UVB et les filtres à large spectre, absorbant jusqu'aux UVA. Les écrans sont des solides (poudres) inertes qui réfléchissent et diffusent les rayonnements électromagnétiques. Elles sont faites de petites particules de 180 - 250 μm de dioxyde de titane (TiO_2), d'oxyde de zinc (ZnO), d'oxyde de fer (Fe_2O_3), d'oxyde de magnésium (MgO), ou de talc (Lacour et Béani 2007).

Tableau 19 : Agents de protection solaire autorisés en tant qu'ingrédients actifs dans les produits répertoriés en Australie, selon la Commission européenne (CE) et aux USA (monographie de la Food and Drug Administration).
Auteurs : (Lautenschlager et *al.* 2007)

	Synonyms, abbreviations, and trade names	Maximum concentration	Permitted in
UVB filters			
PABA derivatives			
4-Aminobenzoic acid	PABA	5%, * 15%†‡	EC, USA, AUS
Padimate O	2-Ethylhexyl 4-dimethylaminobenzoate, octyldimethyl PABA, ED-PABA (OD-PABA)	8%	EC, USA, AUS
Ethoxylated ethyl 4-benzoic acid	PEG-PABA, Uvinul P25, Unipabol U17	10%	EC, AUS
2,4,6-Triamino-1-(p-carbo-2'-ethylhexyl-1'-oxy)-1,3,5-triazine	Octyl triazone, ethylhexyl triazone, ET, Uvinul T150	5%	EC, AUS
Cinnamates			
Ethylhexyl methoxycinnamate	Octyl methoxycinnamate, EMC, (OMC), Escalol 557, Eusolex 2292, Neo Heliopan AV, Parsol, MCX	7.5†-10%*‡	EC, USA, AUS
Cinoxate	2-Ethoxyethyl p-methoxycinnamate	3†-6%‡	USA, AUS
Isopenteryl-4-methoxycinnamate	Isoamyl 4-methoxycinnamate, IMC, Neo Heliopan E1000	10%	EC, AUS
Salicylates			
2-Ethylhexyl salicylate	Octyl salicylate, octisalate, ES, (OS), Escalol 587, Neo Heliopan OS	5%	EC, USA, AUS
Homosalate	Homomethyl salicylate, HMS	10*-15%†‡	EC, USA, AUS
Trolamine salicylate	Triethanolamine salicylate	12%	USA, AUS
Camphors			
Benzylidene camphor sulfonic acid	BCSA, Mexoryl SD-20, Unisol-S22	6%	EC
Polymer of N-[(2 and 4)-(2-oxoborn-3-ylidene) methyl] benzyl] acrylamide	Polyacrylamidomethyl benzylidene camphor, PBC, Mexoryl SW	6%	EC
N,N,N-Trimethyl-4-(2-oxoborn-3-ylidenemethyl)anilinium methyl sulphate	Camphor benzalkonium methosulfate, CBM, Mexoryl SK	6%	EC, AUS
3-(4'-Methylbenzylidene)-d-1 camphor	4-Methylbenzylidene camphor, MBC, Eusolex 6300, Neo Heliopan MBC	4%	EC, AUS
3-Benzylidene camphor	3-Benzylidene camphor, BC, Mexoryl SD-20, Unisol-S-22	2%	EC
Others			
2-cyano-3,3-diphenyl acrylic acid	2-ethyl hexyl ester, octocrylene, 2-ethylhexyl-2-cyano-3,3 diphenylacrylate, Eusolex OCR, Neo Heliopan 303	10%	EC, USA, AUS
2-Phenylbenzimidazole-5-sulfonic acid and its potassium, sodium and triethanolamine salts	Phenylbenzimidazole sulfonic acid, PBSA, ensulizole, Eusolex 232, Neo Heliopan Hydro, Parsol HS	4†‡-8%*	EC, USA, AUS
UVA filters			
Benzophenones			
Benzophenone-3S	Oxybenzone, BENZ-3, Eusolex 4360, Neo Heliopan BB, Uvinul M40, Escalol 567, UVAsorb MET/C	6†-10%*‡	EC, USA, AUS
2-Hydroxy-4-methoxybenzophenone-5-sulfonic acidS	Sulisobenzonone, BENZ-4, UVAsorb S5, Escalol 577, Uvinul MS 40	5*-10%†‡	EC, USA, AUS
2-Hydroxy-4-methoxybenzophenone-5-sulfonic sodium saltS	Benzophenone-5, BENZ-5, sulisobenzonone sodium	5*-10%†‡	EC, USA, AUS
Dioxybenzone	Benzophenone-8	3%	USA, AUS
Others			
Menthyl anthranilate	Methyl-2-aminobenzoate, meradimate	5%	USA, AUS
1-(4-tert-butylphenyl)-3(4-methoxyphenyl)propane-1,3-dione	Butyl methoxy dibenzoylmethane, avobenzonone, BMDBM, Parsol 1789, Eusolex 9020	3†-5%*‡	EC, USA, AUS
2,2'-Methylene-bis-6-(2H-benzotriazol-2-yl)-4-(tetramethyl-butyl)-1,1,3,3-phenolS	Methylene bis-benzotriazolyl tetramethylbutylphenol, MBBT, Tinosorb M	10%	EC, AUS
Phenol,2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4-methyl-6-[2-methyl-3-[1,3,3,3-tetramethyl-1-[(trimethylsilyl)oxy]disiloxanyl]propyl]S	Drometrizole trisiloxane, DTS, Mexoryl XL	15%	EC, AUS
2,2'-(1,4-Phenylene)bis-(1-H-benzimidazole-4,6-disulfonic acid, monosodium saltS	Disodium phenyl dibenzimidazole tetrasulfonate, bisimidazylate, DPDT, Neoheliopan AP	10%	EC, AUS
Terephthalylidene dicamphor sulfonic acid	Ecamsule, TDSA, Mexoryl SX	10%	EC, USA, AUS
4,4-((6-((1,1-dimethylethyl)amino)carbonyl)phenyl)amino)-1,3,5-triazine-2,4-diyl(diimino)bis-,bis(2-ethylhexyl)ester	Diethylhexyl butamido triazone, DBT, UVAsorb HEB	10%	EC
Dimethico-diethylbenzalmalonateS	DDBM, Parsol SLX	10%	EC, AUS
(1,3,5)-Triazine-2,4-bis((4-(2-ethyl-hexyloxy)-2-hydroxy-phenyl)-6-(4-methoxyphenyl)S	Bis-ethylhexyloxyphenol methoxyphenol triazine, bemotrizinol, BEMT, Tinosorb S	10%	EC, AUS
Inorganic absorbers			
Titanium dioxideS [Au: OK?]		25%	EC, USA, AUS
Zinc oxideS [Au: OK?]		25%† — no limit‡	EC, USA, AUS (not explicitly listed in ref 63)

EC=European Community, AUS=Australia. *List of permitted ultraviolet filters in the Council Directive of the European Committee.⁶³ †Ultraviolet filters listed in the US Food and Drug Administration monograph.⁶⁴ ‡Ultraviolet filters listed in the Australian regulatory guidelines for over-the-counter medicines (ARGOM) by the Therapeutic Goods Administration, Aug 18, 2006.⁶⁵ ¶Approved July 21, 2006. §UVA and UVB filter.

Parmi les agents photoprotecteurs systémiques, on peut citer les caroténoïdes, les polyphénols, et autres composés naturels (Jansen et *al.* 2013). Les auteurs ont conclu que de nombreux filtres UV courants possèdent d'importantes propriétés anti-inflammatoires. Beaucoup de composés naturels aux propriétés antioxydantes sont décrits comme étant des agents photoprotecteurs,

parmi lesquels on a les rétinoïdes (vitamine A), la vitamine C (L-acide ascorbique), la vitamine E (tocophérols et tocotriénols), les polyphénols, etc. Les polyphénols sont bien connus dans la littérature pour leurs propriétés antioxydante, anti-inflammatoire, immuno-modulatrice, et anticarcinogénique (Nichols et Katiyar 2011; Afaq et Katiyar 2012). Présents dans le BK, les flavonoïdes constituent un groupe de polyphénols qui absorbent de manière significative les rayons UVA-UVB en raison de leur structure moléculaire et de leurs doubles liaisons (José et *al.* 2016). L'activité antioxydante des polyphénols est due à leurs interactions *in vitro* et *in vivo* avec les ions métalliques, qui sont la principale cause de la génération de ROS (le superoxyde, le peroxyde d'hydrogène, le radical hydroxyle, et l'oxygène singulet) qui jouent un rôle important dans l'apparition du stress oxydatif, des dommages sur l'ADN et dans la mort cellulaire (Afaq et Katiyar 2012). Certains polyphénols, comme le catéchol et le gallol, sont connus comme étant d'efficaces chélateurs d'ions métalliques. Cependant, selon certains auteurs (Saewan et Jimtaisong 2015; Ghazi 2022), les flavonoïdes agissent par absorption des rayons UV, par une action antioxydante directe et indirecte en piégeant les ROS générés après une irradiation UV, par un effet anti-inflammatoire en contribuant à la réduction de l'inflammation causée par l'irradiation, par des actions immunomodulatrices, et par la protection et la réparation de l'ADN. La quercétine est l'un des composés antioxydants les plus puissants (Donglikar et Deore 2016). Elle a des propriétés photoprotectrices et agirait en protégeant les systèmes antioxydants de la peau (glutathion peroxydase, glutathion réductase, catalase et superoxyde dismutase) et en prévenant la peroxydation des liposomes induite par les rayons UVC. Une autre revue de la littérature avait également décrit certains composés phénoliques, l'acide caféïque, l'acide ferulique, la p-coumarine, comme ayant des applications cosmétiques, en tant qu'antioxydants, anti-âge, photoprotecteurs. Ils absorberaient dans le domaine UVB, entre 280 et 320 nm (Morocho-Jácome et *al.* 2021).

C'est pour se protéger contre le risque causé par les rayonnements solaires que des produits dermatologiques dénommés crèmes solaires sont utilisés pour la peau. Ils peuvent contenir des agents renforçant la protection, comme les filtres solaires et les écrans. Toutefois, la crème devrait être répartie de façon uniforme sur la peau pour une meilleure protection. L'efficacité des crèmes solaires contre les rayons UVB peut être mesurée par la détermination du facteur de protection solaire (FPS ou sun protection factor - SPF) *in vitro*. Plus la valeur FPS est élevée, plus la crème solaire a la capacité de protéger la peau contre les rayons UVB. Ainsi, la protection est faible lorsque le FPS est compris entre 6 et 10. Elle est dite modérée à élevée lorsque le FPS est compris entre 15 et 30. À partir de 50, le FPS est dit très élevé et la protection

est maximale (Official Journal of the European Union 2006; Padera 2011). Le FPS est ainsi défini comme étant la dose d'UVR nécessaire pour produire une dose érythémale minimale (DEM) sur une peau protégée après application de 2 mg/cm² de produit, divisée par l'UVR nécessaire pour produire une DEM sur une peau non protégée. En d'autres termes, elle mesure l'efficacité d'un produit solaire à protéger la peau contre les rayons UVB, responsables des coups de soleil, équation (1).

$$FPS = \frac{\text{Dose érythémale minimale sur une peau protégée par un écran solaire}}{\text{Dose érythémale minimale sur peau non protégée}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Matériel et Méthodes

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II.1. Échantillon de beurre de karité soumis à l'expérimentation

Les caractérisations physicochimiques et thermiques du beurre de karité (BK) brut ont nécessité, dans un premier temps, une étude à petite échelle, avec cinq échantillons pilotes de commodité (échantillons lot₁ à lot₅) achetés de façon aléatoire sur la place du marché à Ouagadougou (Burkina Faso). Ces échantillons ont été simplement codifiés en lot_n (n correspondant au n^{ième} échantillon acheté) en référence au manque d'information sur leur procédé d'extraction et leur site d'extraction. Ces échantillons ont été directement achetés auprès de revendeurs (1 kg de beurre brut par lot), fondus à l'étuve puis reconditionnés dans des flacons en bouteilles ambrés et stockés au réfrigérateur à environ +4 °C. La collecte ne prenait pas en compte les techniques d'extraction associées.

Par la suite, la collecte de données à plus ou moins grande échelle a été faite et a concerné 37 échantillons de BK fraîchement produits. Ces échantillons ont été collectés dans 13 des 17 régions du Burkina Faso (voir figure 12, tableau 20) et des informations sur les procédés d'extraction mis en œuvre ont été recueillies. Une grille de collecte de données (voir annexe 2) a servi d'outil de collecte. Seuls 5 échantillons ont été collectés sans leurs procédés d'extraction suite à des refus. Les échantillons ont été directement achetés sur site auprès des producteurs locaux (1 kg de beurre brut par producteur). Ils ont été ensuite conservés dans des glacières pour assurer une bonne qualité durant le transport, puis acheminés aux laboratoires pour y être reconditionnés après fusion à l'étuve à 50 °C. Le reconditionnement a été effectué dans différents flacons ambrés puis conservés à +4 °C pour les besoins des analyses.

Les échantillons ont tous été codifiés en fonction de l'origine (province de provenance) et du nombre (n^{ième}) d'échantillons collectés dans la même province (tableau 20). En effet, à titre d'exemple, l'échantillon Kadi₁ est issu de la province du Kadiogo et constitue le premier échantillon collecté. L'échantillon Kadi₂ est, quant à lui, le deuxième de la même province. Le code prend en compte les trois premières lettres du nom de la province, « Kadi » comme « Kadiogo ».

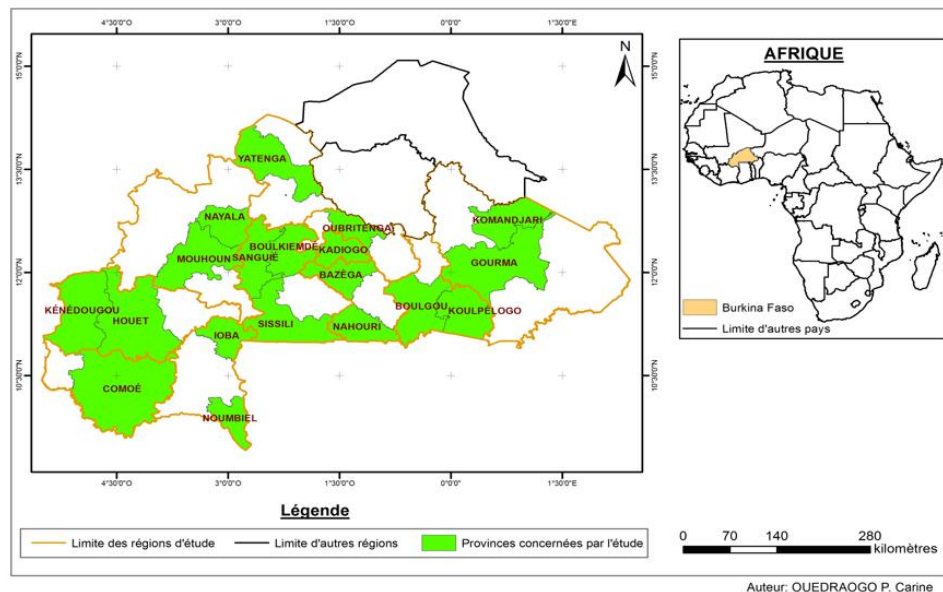


Figure 12: Cartographie des sites de collecte des échantillons. (Source : BNDT 2015 (“Institut Géographique du Burkina Faso”))

À ces échantillons de BK traditionnels collectés au Burkina Faso, des échantillons industriels de beurre de karité ont été gracieusement acquis au laboratoire Science des Aliments et Formulation (ULiège, Gembloux Agro BioTech, Belgique) à titre de comparateurs et d'échantillons de référence, comme consignés dans le tableau 21. Ces échantillons serviront pour certaines analyses spécifiques.

Tableau 20 : Répartition des échantillons de beurre de karité collectés au Burkina Faso en fonction de leur localité et des procédés d'extraction

N°	Région	Province	Site de collecte	Echantillon	Type du procédé d'extraction	
2	Nando	Boulkiemdé	Koumlela	<i>Boul₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
35		Sissili	Boura	<i>Siss₁</i>	Trempage des noix-Séchage au four	P ₃
36		Sissili	Léo	<i>Siss₂(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
34		Sanguié	Réo	<i>Sang₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
15	Djôrô	Ioba	Dano	<i>Ioba₁</i>	Cuisson de la pâte	P ₂
16				<i>Ioba₂</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
32		Noumbiel	Legmoin	<i>Noum₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
17	Kadiogo	Kadiogo	Ouagadougou	<i>Kadi₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
18				<i>Kadi₂</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
19				<i>Kadi₃(a)</i>	Procédé inconnu	P inconnu
20				<i>Kadi₄(a)</i>	Procédé inconnu	P inconnu
21				<i>Kadi₅(a)</i>	Procédé inconnu	P inconnu
22				<i>Kadi₆(a)</i>	Procédé inconnu	P inconnu
4	Tannounyan	Comoé	Banfora	<i>Como₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
5		Comoé	Banfora	<i>Como₂</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
6		Comoé	Banfora	<i>Como₃(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
7		Comoé	Noumoudara	<i>Como₄</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
1	Nazinon	Bazèga	Diamkité	<i>Baze₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
28		Nahouri	Pô	<i>Naho₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
29		Nahouri	Pô	<i>Naho₂(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
30		Nahouri	Pô	<i>Naho₃(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
9	Guiriko	Houet	Bobo-Dioulasso	<i>Houe₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
10		Houet	Bobo-Dioulasso	<i>Houe₂(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
11		Houet	Péni	<i>Houe₃</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
12		Houet	Toussiana	<i>Houe₄</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
23		Kénédougou	Orodara	<i>Kene₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
13		Houet	Bobo-Dioulasso	<i>Houe₅(b)</i>	Cuisson de la pâte	P ₂
14				<i>Houe₆(a)</i>	Procédé inconnu	P inconnu
33	Oubri	Oubritenga	Ziniaré	<i>Oubr₁</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
25	Nakambé	Koulpélogo	Ouargaye	<i>Koul₁</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
3		Boulgou	Tenkodogo	<i>Boulg₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
26		Koulpélogo	Ouargaye	<i>Koul₂</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
37	Yaadga	Yatenga	Ouahigouya	<i>Yate₁</i>	Trempage des noix-Séchage au soleil-Cuisson de la pâte-Pas de barattage	P ₄
8	Goulmou	Gourma	Fada N'Gourma	<i>Gour₁(b)</i>	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁
24	Sirba	Komondjari	Gayéri	<i>Komo₁</i>	Cuisson de la pâte	P ₂
27	Bankui	Mouhoun	Massala	<i>Mouh₁</i>	Trempage des noix-Séchage au four	P ₃
31	Sourou	Nayala	Toma	<i>Naya₁</i>	Trempage des noix-Séchage au four-Cuisson de la pâte	P ₅

(a) : Échantillons dont le procédé d'extraction est inconnu ; (b) Procédé semi-mécanisé. Les numéros des échantillons ont été attribués par ordre alphabétique ;
P : procédé d'extraction du beurre de karité

Tableau 21 : Échantillons industriels de travail

N°	Échantillon	Source
1	Raffiné et appauvri en karitène (Degom)	IOI Loders Croklaan, The Netherlands
2	Brut industriel (Brut ind.)	IOI Loders Croklaan, The Netherlands
3	Raffiné industriel (Raffiné)	IOI Loders Croklaan, The Netherlands
4	Extrait enrichi en karitène (Karitène)	IOI Loders Croklaan, The Netherlands

II.2. Matériel chimique et biologique

○ *Indices chimiques et profil en acides gras*

Des solvants de grade analytique, des réactifs et substances chimiques de référence ont été utilisés pour le dosage des indices chimiques. L'isooctane et l'éther de pétrole ont été achetés auprès de Carlo Erba® (Paris, France) ; l'éthanol 95 %, le diéthyl éther, l'hydroxyde de potassium, l'acide acétique, l'hydroxyde de sodium, le méthanol, le sulfate de sodium et le sodium dodecyl sulfate proviennent de VWR Prolabo Chemicals® (Louvain, Belgique). Le sodium thiosulfate, le chlorure de sodium, le n-heptane, l'acide sulfurique, le trichlorométhane et le réactif de Wijs sont originaires de Merck® (Darmstadt, Allemagne). Le réactif Boron trifluoride-méthanol solution (BF₃-MeOH 14%) provient de Sigma-Aldrich, Suisse. L'acide hydrochlorique (Fisher Scientific, Bruxelles, Belgique) et le standard utilisé pour la détermination du profil en acides gras « Mix Supelco 37 Component » proviennent de Merck® KGaA (Darmstadt, Allemagne).

○ *Analyses exploratoires spécifiques : Composés organiques volatils – Stérols – Composés phénoliques totaux – Identification et dosage des polyphénols – Activité antioxydante*

Le dimethyl sulfoxide (DMSO), le 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), la solution de 2'-7'-dichlorofluoréscéine, le réactif de silylation (mélange de bistriméthylsilyltrifluoroacétamide avec 1% de triméthylchlorosilane (SILYL-991) = BSTFA-TMCS) et le 9,10-Anthracenedipropoic acid (ADPA) proviennent du fabricant Merck® (Darmstadt, Germany). L'acide 3-éthylbenzothiazoline 6-sulfonique (ABTS) provenait de Fluka (filiale de Sigma-Aldrich®, Saint Louis, MA, États-Unis). Le réactif phosphomolybdotungstique (réactif de Folin-Ciocalteu - FC), le méthanol et l'éthanol provenaient de VWR Chemicals (Louvain, Belgique). Les substances chimiques de référence comme l'acide cinnamique, la catechine et leurs analogues provenaient d'Extrasynthese® (Genay Cedex, France). L'acide gallique a été

acheté chez Sigma Aldrich® (Buchs, Suisse). La bétuline provient de ROTICHRON®~CHR (Filiale de Carl ROTH, Lauterbourg, France) ; le cholestérol est fourni par Sigma-Aldrich Chemie GmbH (Eschenstrasse, Allemagne). La pyridine anhydre provient de Thermo Scientific Alfa Aesar (France).

○ *Matériel biologique pour les essais de photoprotection sur modèles expérimentaux*

Les kératinocytes (lignée cellulaire HaCaT) provenaient de ATCC (Rockville, MD, États-Unis) cultivés sur des plaques à 96 puits (passages 39 à 45) dans le milieu aseptique *Dulbecco Modified Eagle* (DMEM) supplémenté avec 10 % de sérum fœtal bovin (*fetal bovine serum* - FBS) et des antibiotiques (pénicilline 100 U/mL et streptomycine 0,10 mg/mL). Les cellules (10 000 cellules/puits) ont été incubées à 37 °C, sous atmosphère humidifiée à 5 % de CO₂ à l'étuve (Im et al. 2017; Cui et al. 2021).

○ *Matériel chimique pour les essais de photoprotection sur modèles expérimentaux*

L'oxyde de titane (IV), nanopoudre, granulométrie < 100 nm (BET), ≥ 97 %, provenait de Sigma-Aldrich (St Louis, États-Unis). La solution *Hank's Balanced Salt Solution* (HBSS), le tampon *Phosphate Buffered Saline* (PBS) et le pyrogallol, substance chimique de référence, provenaient tous de Sigma Aldrich® (Steinheim, Allemagne). Le 3-(4,5-diméthylthiazol-2-yl)-5-(3-carboxyméthoxyphényl)-2-(4-sulfophényl)-2H-tétrazolium (MTS) a été acheté auprès de Promega Corporation (Madison, États-Unis). Le diméthylsulfoxyde (DMSO) et l'acide 9,10-anthracènedipropanoïque (ADPA) ont été obtenus auprès de Merck (Darmstadt, Allemagne). Le méthanol et l'éthanol provenaient de VWR Chemicals® (Louvain, Belgique).

II.3. Procédés d'extraction du beurre de karité

Au vu de la diversité des procédés collectés, ils seront dans leur totalité analysés en fonction des 6 étapes majeures pouvant impacter la qualité du produit fini, comme décrit dans la revue de la littérature (Goumbri et al. 2021). Cette analyse a pour but de regrouper les procédés d'extraction par similarité en tenant compte des différentes étapes, d'analyser les facteurs pouvant impacter négativement la qualité du produit fini et de faire des recommandations d'optimisation des étapes des procédés d'extraction.

II.4. Caractérisations physicochimiques

II.4.1. Indices chimiques

La détermination des indices chimiques a été faite selon des méthodes normalisées tirées de l'American Oil Chemists' Society - AOCS - (AOCS Official methods 2009) et de l'International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC - (IUPAC 2.201 1992). En effet, le dosage des indices chimiques des corps gras fait référence aux méthodes normalisées dans le but d'obtenir des résultats fiables, comparables et reconnus internationalement. Ces méthodes sont utilisées par l'industrie agroalimentaire et les laboratoires de contrôle qualité car elles servent de références officielles dans les normes alimentaires, comme les standards du Codex Alimentarius. Étant donné qu'il s'agit de caractérisations dans un but de comparaison aux valeurs de référence normalisées internationales, les méthodes AOCS et IUPAC sont donc mieux indiquées.

La détermination des indices chimiques a nécessité l'ensemble des échantillons de BK traditionnels collectés (42 au total). Tous les essais ont été conduits en triplicat ($n = 3$, c'est-à-dire 3 prélèvements à partir de l'échantillon de départ), avec la détermination de la moyenne et de l'écart-type. Les détails des monographies sont donnés en annexe 3.

○ *Détermination de la teneur en matières insaponifiables*

La détermination de la teneur en matières insaponifiables [Unsaponifiable matter content - UMC] a été faite conformément à la monographie AOCS Ca 6a-40. La matière insaponifiable comprend les substances fréquemment dissoutes dans les graisses et l'huile et qui ne peuvent pas être saponifiées par le traitement habituel à la soude, mais qui sont solubles dans les solvants organiques.

○ *Détermination de l'indice de saponification*

La détermination de l'indice de saponification (IS) a été faite conformément à la monographie AOCS Cd 3-25. L'indice de saponification est la quantité d'alcali nécessaire pour saponifier une quantité définie d'échantillon test. Il est exprimé en nombre de mg de KOH requis pour saponifier 1 g d'échantillon test.

- *Détermination de l'indice de peroxyde*

La détermination de l'indice de peroxyde (IP) a été faite conformément à la monographie AOCS Cd 3-25. L'indice de peroxyde est le nombre qui exprime en milliéquivalents d'oxygène actif la quantité de peroxyde contenue dans 1000 g de substance.

- *Détermination de l'indice d'iode par Wijs*

La détermination de l'indice d'iode par Wijs (IO/Wijs) a été faite conformément à la monographie AOCS Tg 1a-64. L'indice d'iode est une mesure de l'insaturation des acides gras (AG) et est exprimé en nombre de g d'iode absorbés par 100 g d'échantillon d'essai (% d'iode absorbé).

- *Calcul de l'indice d'iode par chromatographie gazeuse (GC) :*

L'indice d'iode par GC a été calculé selon la formule décrite dans la monographie AOCS Cd 1c-85.

- *Détermination de l'indice d'acide*

L'indice d'acide (IA) est le nombre de milligrammes de potasse nécessaire pour la neutralisation de l'acidité de 1 g de corps gras. L'indice d'acidité a été déterminé conformément à la méthode de l'IUPAC (IUPAC 2.201 1992).

- *Détermination de la teneur en acides gras libres*

L'acidité (teneur en acides gras libres, AGL) est le pourcentage d'acides gras libres exprimé conventionnellement selon la nature du corps gras. La teneur en acides gras libres a été calculée en considérant l'acide oléique, conformément à la monographie AOCS Ca 5a-40, sachant que la masse moléculaire de KOH est de 56,1 g/mole.

- *Détermination de l'indice de réfraction*

L'indice de réfraction (RI) a été déterminé selon la monographie AOCS Tp 1a-64 à l'aide d'un réfractomètre RM40 (Mettler Toledo).

- *Détermination du coefficient d'extinction spécifique et sa variation*

Le coefficient d'extinction spécifique ($K_{\lambda 232\text{nm}}$ et $K_{\lambda 268\text{nm}}$), ainsi que la variation du coefficient d'extinction spécifique (ΔK) ont été déterminés conformément à la monographie AOCS Ch 5-91. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible (Victoria, USA).

II. 4.2. Profil en acides gras

La détermination du profil en acides gras a été faite selon deux méthodes différentes, l'une utilisant les 5 échantillons préliminaires, et la seconde a été conduite avec les 37 échantillons traditionnels plus l'échantillon industriel de référence Degom.

Échantillons préliminaires (5) : La détermination du profil en AG a été effectuée par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme (GC/FID - Trace_1300_1310, GC Ultra, Thermo Scientific) sur colonne capillaire (Yi et *al.* 2006). Ces analyses ont été effectuées au Laboratoire de Chimie analytique de Gembloux Agro-BioTech conformément à un protocole expérimental validé en interne. La méthodologie utilisée donne l'avantage de séparer les acides gras estérifiés (AGE) (Esterified Fatty Acids methyl esters – EFA, acides gras liés au glycérol) des acides gras non estérifiés (AGNE) (Non-Esterified Fatty acids methyl esters – NEFA, acides gras non liés au glycérol). Deux cents (200) μL de beurre fondu sont placés dans un tube de 10 mL dans lequel on ajoute 2 mL d'une solution de 0,4 M KOH/Méthanol. Le tout est agité à l'aide d'un agitateur de type Vortex[®] pendant 30 s, puis laissé au repos à température ambiante pendant 10 min. Le mélange est ensuite extrait deux (2) fois par 2 mL d'hexane dans une ampoule à décanter et agité de nouveau pendant 30 s. Les fractions hexaniques contenant les AGE (fraction de 4 mL) des différents tubes ont été collectées, de même que la fraction méthanolique qui contient les AGNE (2 mL).

Pour le dosage des AGE, la fraction hexanique est séchée sous gaz azote (N_2 (g)), lavée avec environ 3 mL d'eau distillée, puis agitée pendant 30 s. La phase hexanique est ensuite transférée dans un tube, filtrée sur du coton avec une couche de Na_2SO_4 . La solution est ensuite séchée sous azote, reprise avec 200 μL d'hexane puis diluée au 1/20 et mise en flacons pour les analyses.

Pour le dosage des AGNE la fraction aqueuse est transférée dans un tube auquel on ajoute 2 mL de H_2SO_4 5 % dans le méthanol. Le mélange est chauffé à 70 °C pendant 30 min sous agitation, puis laissé ensuite agir 30 min à la température ambiante. Le mélange est ensuite extrait 2 fois par 2 mL d'hexane dans une ampoule à décanter et agité pendant 30 s. La solution est ensuite séchée sous azote, reprise avec 200 μL d'hexane puis diluée au 1/20 et conditionnée en flacons pour les analyses.

Les substances chimiques de référence constituées d'un mélange commercial d'acides gras méthyl esters - AGME - (fatty acid methyl ester - FAME 37), puis d'un standard interne, C15:0 (100 ppm dans du trichlorométhane (CHCl₃) ; 10 µL de volume à injecter) ont été utilisées pour l'identification et la quantification des AG. Les conditions chromatographiques sont ainsi définies (tableau 22) : (i) une température de contrôle fixée à 260 °C; (ii) un débit de division (split flow) de 10,0 mL/min; (iii) un volume d'injection de 10 µL ; (iv) temps d'analyse (run time) de 60,00 min ; (v) une colonne capillaire de type Stabilwax continuée de polyéthylène glycol de 0,25 µm de taille et d'une longueur de 30 m et 0,25 mm de diamètre interne; (vi) une température maximum de la colonne à 260 °C; (vii) une température du détecteur à ionisation de flamme (Flame ionisation detector - FID) à 260 °C avec l'hélium comme gaz vecteur.

Tableau 22 : Conditions chromatographiques d'analyse par GC/FID des acides gras

Temps (min)	Taux de chauffage du four (°C/min)	Température cible (°C)	Temps de maintien (min)
0,000	-		
1,000	0,0	60	1,00
25,000	5,0	180	0,00
60,000	3,0	255	10,00
60,000	Fin de l'analyse		

37 échantillons de BK traditionnels :

En plus des 37 échantillons traditionnels, la détermination du profil en AG a concerné l'échantillon industriel de BK dégommé, « Degom », utilisé afin d'établir une analyse comparative du profil en AG.

Une chromatographie en phase gazeuse (Agilent 6890 GC, USA), équipée d'un détecteur à ionisation de flamme (GC-FID, USA), a été utilisée pour déterminer le profil des AG. Les AGME (AOCS Ce2-66) ont été préparés conformément aux méthodes officielles et aux pratiques recommandées de l'AOCS (AOCS Official methods 2009). Les analyses ont été effectuées au Burkina Faso, à l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'environnement, de l'alimentation, du travail et des produits de santé (ANSSEAT, ex Laboratoire national de santé publique - LNSP). Le BK (100 - 250 mg) a été dilué dans 4 mL de NaOH 0,5 M, auxquels on a ajouté 4 mL de n-heptane dans le mélange, puis 5 mL de BF₃-méthanol 14 % à travers le condensateur, et le mélange a été porté à ébullition pendant 1 min. Ensuite, 20 mL de NaCl saturé ont été ajoutés, puis le mélange a été agité vigoureusement pendant 30 s. Un (1) mL du surnageant (AGME) a été mélangé au n-heptane à une concentration finale de 1/10 (v/v),

conformément au protocole optimisé de l'AOCS (Ce 1-62). Les conditions chromatographiques étaient ainsi définies : (i) une température de contrôle fixée à 270 °C pour la colonne, 260 °C pour l'injecteur, et 300 °C pour le détecteur à ionisation de flamme (Flame ionisation detector - FID) avec l'azote comme gaz vecteur; (ii) un débit de division (split flow) de 86 mL/min; (iii) un volume d'injection de 1 µL; (iv) un temps d'analyse (run time) de 60,00 min ; (v) une colonne capillaire DB-23 de 60 m de long, 0,25 mm de diamètre interne et 0,25 µm de taille. Pour l'identification des AG, les substances chimiques de référence « FAME Mix Supelco 37 Component », achetées auprès de Sigma Aldrich (Darmstadt, Allemagne), ont été utilisées, dont le certificat d'analyse est fourni en annexe 4. Les analyses ont été réalisées en triplicat ($n = 3$, c'est-à-dire 3 prélèvements à partir de l'échantillon de départ), avec la détermination de la moyenne et de l'écart-type.

II.4.3. Teneur en karitène

La teneur en karitène a été estimée de façon indirecte. En effet, il a été établi qu'il existe une corrélation entre la valeur de l'indice d'iode déterminée par titrage (cf. II.4. Caractérisations chimiques, Détermination de l'indice d'iode par Wijs) et la valeur calculée (cf. II.4. Caractérisations chimiques, Indice d'iode déduit par chromatographie gazeuse). Cette corrélation a été établie par *V. Gibon* et vérifiée à l'aide de mesures effectuées par HPLC à l'ITERG selon une méthode interne propre à l'ITERG (*S. Danthine, Communication personnelle*). La détermination de la teneur a concerné l'ensemble des échantillons, y compris l'échantillon industriel Degom, et a été effectuée en triplicat ($n = 3$, c'est-à-dire 3 prélèvements à partir de l'échantillon de départ), avec détermination de la moyenne et de l'écart-type.

Remarque :

À la suite des analyses chimiques portant sur l'ensemble des échantillons collectés, des analyses spécifiques à visée exploratoire ont également été réalisées afin d'explorer certaines composantes du BK. Ces analyses ont concerné la détermination des composés organiques volatiles, la composition en stérols, la composition en polyphénols et l'activité antioxydante. Les deux dernières évaluations ont été faites en prélude à l'évaluation du potentiel photoprotecteur. Des échantillons ont donc été sélectionnés pour la mise en œuvre de ses propriétés.

II.4.4. Composés organiques volatiles

La détermination des composés organiques volatiles n'a pas concerné tous les 37 échantillons. Il s'agit d'établir un aperçu de la composition en composés organiques volatiles potentiels dans le BK brut du Burkina Faso. À cet effet, sur la base des caractéristiques organoleptiques, quatre échantillons parmi les plus odorants ont été sélectionnés afin de réaliser cette analyse. Il s'agit des échantillons Houe₁ (P₁ - région du Guiriko), Kadi₂ (P₁ - région du Kadiogo), Oubr₁ (P₁ - région d'Oubri), et Yate₁ (P₄ - région du Yaadga) qui avaient une plus forte odeur caractéristique du BK.

L'investigation des composés organiques volatiles a été conduite par chromatographie gazeuse/spectroscopie de masse par micro-extraction en phase solide (SPME-GC/MS) avec une chaîne Agilent® 7890 A GC-System et Agilent® Triple-Axis Detector 5975C. L'échantillonnage a été réalisé conformément à la méthode décrite par Bail *et al.* (2009). Une prise d'essai de 1 g d'échantillon a été conditionnée dans un flacon SPME fermé avec septum pour la pré-extraction pendant 2 h à 30 °C. Un blanc analytique constitué par un flacon vide a été effectué. Les conditions analytiques de la micro-extraction étaient les suivantes : (i) une incubation à 30 °C pendant 120 min ; (ii) une agitation pendant 10 s suivie d'une interruption de 1 s et une vitesse d'agitation de 250 rpm. L'extraction a été faite pendant 120,00 min et le temps de désorption est fixé à 120 s.

Les conditions analytiques de la chromatographie en phase gazeuse étaient ainsi définies : (i) une température de contrôle fixée à 260 °C pour la colonne et l'injecteur; (ii) un débit de division (split flow) de 24 mL/min; (iii) un rapport de division (split ratio) de 20 : 1 ; (iv) une colonne polaire VF-WAX ms de 30 m de long, 250 µm de diamètre interne et 0,25 µm de taille; (v) une température du four ainsi programmée à 260 °C : 35 °C pendant 2 min, puis une rampe de 5 °C/min à 260 °C pendant 5 min, des temps d'équilibre de 0,5 min, avec un temps d'analyse (run time) de 52 min ; (vi) après l'analyse (post run), le système reste à 250 °C pendant 5 min; (vii) le gaz vecteur était l'hélium avec un débit total (total Flow) de 28 mL/min.

Les conditions analytiques pour le détecteur de masse (MS) étaient les suivantes : (i) le mode d'ionisation par impact électronique (EI), avec une plage m/z de 35,0 - 550,0 ; (ii) une température de la source à 230 °C avec un maximum de 250 °C ; (iii) une température du quadripôle à 150 °C avec un maximum de 200 °C ; (iv) une acquisition en mode scan. L'identification des composés volatiles a été faite à partir de la « Mass Spectral Library 600K »

encore appelée « librairie pal600k », par comparaison des temps de rétention et de la masse spectrale.

II.4.5. Composition en stérols

Au même titre que l'analyse sur la composition en composés organiques volatiles, la détermination du profil en stérols n'a pas porté sur tous les 37 échantillons. Il s'agissait également d'établir un aperçu de la composition en stérols potentiels dans le BK brut extrait au Burkina Faso. À cet effet, sept (07) échantillons ont été sélectionnés afin de représenter les différents procédés d'extraction, ainsi que leurs origines. Il s'est agi des échantillons Gour₁ (P₁ - région de Goulmou), Houe₅ (P₂ - région du Guiriko), Kadi₅ (P non collecté - région du Kadiogo), Ioba₁ (P₂ - région du Djôrô), Ioba₂ (P₁ - région du Djôrô), Siss₁ (P₃ - région du Nando), et Yate₁ (P₄ - région du Yaadga).

Les profils analytiques des stérols ont été obtenus par chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme (GC/FID), à l'aide d'un système Trace_1300_1310 GC Ultra (Thermo Scientific), conformément au protocole interne optimisé du Laboratoire de Chimie organique de Gembloux Agro-Bio-Tech (ULiège) (COI/T.20/Doc. No30/Rev.2 2017). L'analyse chromatographique a consisté en :

La saponification, pour laquelle 1,0 g de beurre fondu a été pesé et transféré dans un ballon de 150 mL, puis saponifié par ajout de 50 mL de solution d'hydroxyde de potassium 2 M dans le méthanol, tout en homogénéisant. L'ensemble a été chauffé à reflux pendant 30 min à 80 °C. Après refroidissement à température ambiante, 1,0 mL de bétuline (0,05 mg/mL) a été ajouté comme étalon interne, suivi de 50 mL d'eau MilliQ[®] avec agitation.

Après saponification, la phase hydroalcoolique a été extraite à l'éther diéthylique par épuisement (3 x 50 mL) dans une ampoule à décanter. La phase organique a ensuite été rincée avec de l'eau MilliQ[®] (3 x 50 mL), puis filtrée sur sulfate de sodium anhydre. L'extrait a été évaporé à sec au rotavapor et le résidu dissous dans 1,0 mL de chloroforme.

À la suite de l'extraction, les stérols et les diols triterpéniques (alcools triterpéniques possédant deux fonctions hydroxyles, présents dans la fraction insaponifiable et pouvant interférer dans l'analyse des stérols) ont été séparés par CCM. L'éluant utilisé était un mélange hexane/éther éthylique (65 : 35 v/v). Les plaques ont été préparées à partir de 45 g de silice 60G suspendue dans 130 mL d'eau MilliQ[®] (épaisseur : 0,5 mm). La solution de matières insaponifiables (100

μL) a été appliquée à six (6) reprises sur une bande étroite et de façon uniforme à l'extrémité inférieure de la plaque. Des spots de référence (cholestérol/bétuline 0,05 mg/mL) ont été déposés aux extrémités, de part et d'autre des spots tests. Après élution, les plaques ont été séchées sous hotte, puis révélées sous lumière UV après pulvérisation avec une solution de 2'-7'-dichlorofluorescéine 0,2 % dans l'éthanol.

Les bandes d'intérêts ont ensuite été soigneusement récupérées, puis extraits au chloroforme (solvant très apolaire, capable de solubiliser les stérols) par épuisement (3 x 5 mL) tout en agitant. La phase organique est ensuite évaporée à sec.

L'étape de dérivation (silylation) a consisté à ajouter 50 μL du réactif de silylation (mélange de bistriméthylsilyltrifluoroacétamide avec 1% de triméthylchlorosilane (SILYL-991) = BSTFA-TMCS) et 50 μL de pyridine anhydre à la phase organique. Le mélange est ensuite homogénéisé et gardé au bain-marie pendant 30 min à 90 °C. À l'issue du temps requis, la solution est évaporée sous azote, puis 200 μL d'hexane sont ajoutés au résidu sec, et le tout est mis en flacon pour analyse.

Les conditions analytiques de la chromatographie en phase gazeuse étaient ainsi définies : (i) une température de contrôle fixée à 300 °C pour l'injecteur; (ii) un débit de division (split flow) de 20 mL/min; (iii) un volume d'injection de 1 μL; (iv) une colonne capillaire Optima 5MS de 30 m de long, 0,25 mm de diamètre interne, 0,25 μm épaisseur; (v) une température du four ainsi programmée : température initiale à 60 °C maintenue pendant 1 min, puis des rampes de 30 °C/min jusqu'à 290 °C maintenue pendant 22 min, 30°C/min jusqu'à 320 °C maintenue pendant 1 min; (vi) un temps d'analyse (run time) de 34,67 min; (vii) une température de la flamme à 330 °C, avec l'hélium comme gaz vecteur au débit de 1,1 mL/min; (viii) un débit des gaz ainsi programmé: air (350 mL/min), hydrogène (35 mL/min) et azote (30 mL/min). L'acquisition des données s'est faite à 50 Hz.

II.4.6. Degré de coloration

Les analyses ont porté sur l'ensemble des échantillons (37 + 5). L'échantillon industriel Degom a servi de comparateur. Deux formes de BK (le beurre brut à température ambiante et sa forme fondue à l'étuve) ont été évaluées pour leur couleur et leur indice de jaunissement. Toutes les analyses ont été conduites en triplicat ($n = 3$, c'est-à-dire 3 prélèvements à partir de l'échantillon de départ), avec la détermination de la moyenne et de l'écart-type.

La détermination de la couleur a été faite selon le système de couleur CIE Lab (L^* a^* b^*) à l'aide d'un colorimètre (Color Flex. HunterLab EZ model 45/0 LAV ; Kruiskebe associates laboratory, Elscolab, Belgium). Dans un premier temps, le beurre brut collecté a été utilisé sans traitement préalable. Avant la lecture, le beurre a été stocké dans un réfrigérateur à ± 4 °C et maintenu à température ambiante pendant environ 30 min. Chaque échantillon a ensuite été fondu à l'étuve et maintenu à $+40$ °C avant l'analyse pour obtenir une forme liquide. L'échantillon est ensuite transféré dans une cellule en verre et les analyses ont été effectuées en différents points de chaque disque selon le système de couleurs Lovibond L^* (blanc à noir), a^* (rouge à vert), b^* (jaune à bleu).

II.4.7. Indice de jaunissement

La détermination de l'indice de jaunissement (YI) a été optimisée selon la méthode décrite par Pagliarini et *al.* (1990) qui est utilisée pour évaluer la couleur du lait. Par extrapolation, étant donné que le lait et le BK sont deux matrices dans la même gamme de couleur, cette formule a donc été employée pour évaluer YI du BK selon l'équation (2) comme suit :

$$\text{Indice de jaunissement (YI)} = 142,86 \text{ b/L (Eq. 2)}$$

Avec b = valeur de la couleur jaune à bleue ; L = valeur de la couleur blanche à noire

II.5. Caractérisations thermiques

Les caractérisations thermiques ont porté sur la détermination de la teneur en matière grasse solide et sur l'analyse calorimétrique différentielle par détermination des profils de fusion et de cristallisation. Les analyses ont été effectuées en duplicat ($n = 2$) par échantillon et les valeurs moyennes $\pm$ écarts-types ont été enregistrées. Elles ont concerné l'ensemble des échantillons avec l'échantillon industriel Degom comme comparateur. Les modes opératoires sont décrits en détail en annexe 3.

II.5.1. Profil de fusion par RMNp

La détermination du profil de fusion du BK a été effectuée par les méthodes en série et en parallèle conformément à la monographie (IUPAC 2.150) (a) non tempérée et (b) tempérée (IUPAC 1987) en utilisant un spectromètre de résonance magnétique nucléaire pulsée - RMNp

(Minispec-mq20, Bruker®, Karlsruhe, Allemagne). Il s'agit de la détermination de la teneur en matière grasse solide (ou solid fat content - SFC).

II.5.2. Profil de fusion et de cristallisation par ACD

Les mesures des profils de fusion et de cristallisation du BK ont été effectuées par analyse calorimétrique différentielle (ACD ou Differential scanning calorimetry - DSC) selon la méthode (AOCS Cj 1-94) (AOCS Official methods 2009), à l'aide d'une DSC Q2000® (TA instruments, Newcastle, USA) équipée d'un système de refroidissement. Les prises d'essai étaient comprises entre 4 et 6 mg et ont été scellées hermétiquement dans une capsule (Tzero Aluminium Hermetic). La capsule vide a été utilisée comme référence. Les caractéristiques suivantes ont été déterminées : (i) le profil de fusion, (ii) le profil de cristallisation et (iii) l'enthalpie de fusion. Le traitement des courbes ACD a été fait grâce au logiciel TA, Universal TA Analysis V4.5 A.

II.6. Détermination des composés phénoliques et activité antioxydante du beurre de karité

En prélude à l'investigation du potentiel photoprotecteur du BK, il a été procédé à la détermination de la composition qualitative et quantitative des composés phénoliques du BK et à l'évaluation du pouvoir antioxydant. Un choix de sept échantillons de beurres bruts traditionnels a été effectué, afin de sélectionner des matériaux de meilleure qualité physicochimique, représentatifs des différents procédés d'extraction identifiés. En plus de ces échantillons, les trois échantillons industriels (Brut ind., Raffiné et Kariténe) mentionnés dans le tableau 21 ont été pris en compte pour la comparaison (tableau 23). Les beurres bruts et leurs fractions polaires correspondantes (extraits utilisés pour doser les composés phénoliques totaux par colorimétrie) ont constitué les deux matrices pour les évaluations du pouvoir antioxydant et du potentiel photoprotecteur.

Tableau 23 : Matériel de recherche traditionnel et industriel, selon leur origine, sélectionné pour les essais de composés phénoliques, potentiel antioxydant, et capacité de photoprotection

Échantillon	Provenance/Procédé d'extraction
Houe ₅ *	Bobo-Dioulasso (Guiriko)/P ₂
Ioba ₁ *	Dano (Djôrô)/P ₂
Ioba ₂ *	Dano (Djôrô)/P ₁
Kadi ₅ *	Ouagadougou (Kadiogo)/P. inconnu (non collecté)
Naya ₁ *	Toma (Sourou)/P ₅
Siss ₁ *	Boura (Nando)/P ₃
Yate ₁ *	Ouahigouya (Yaadga)/P ₄
Brtu ind.	IOI Loders Croklaan, The Netherlands
Raffiné	IOI Loders Croklaan, The Netherlands
Kariténe	IOI Loders Croklaan, The Netherlands

* Beurre de karité brut traditionnel originaire du Burkina Faso

II.6.1. Dosage des composés phénoliques totaux

La détermination de la teneur en composés phénoliques totaux (TPT/total phenol content - TPC) a été réalisée par analyse colorimétrique avec le réactif de Folin-Ciocalteu (Maranz *et al.* 2003; Ainsworth et Gillespie 2007). Pour l'extraction des composés phénoliques, 500 mg de beurre brut ont été pesés et dissous dans 5 mL d'hexane (solvant de solubilisation des matières grasses). Un mélange aqueux de méthanol (60 : 40 v/v) a été préparé et l'extraction a été réalisée trois fois successivement avec 2 mL du mélange. La solution a été agitée à chaque fois pendant 2 min avant l'extraction. À la fin, la solution méthanolique combinée a été évaporée à sec à 40 °C au Multivapor[®] P-6 de Buchi. Le résidu sec est ensuite dissous dans 1 mL de méthanol pour le dosage colorimétrique et l'analyse par chromatographie liquide haute performance. Dans une fiole jaugée de 5 mL, une partie aliquote de 200 µL a été mélangée à 125 µL de FC et 2,5 mL d'eau de qualité MilliQ[®]. Pour éviter l'oxydation des phénols par l'air, 1 mL de carbonate de sodium saturé décahydraté a été ajouté après environ 3 min, puis le mélange est homogénéisé. Le mélange a été ensuite complété au volume avec l'alcali. Après 1 h d'incubation, l'absorbance a été mesurée à 730 nm par rapport à un blanc avec un spectrophotomètre UV-vis à double faisceau Hitachi[®] U-2910 (Hitachi Group Companies). La quantification a nécessité un étalonnage spectrophotométrique avec un étalon de référence, le pyrogallol. Une solution étalon à 0,25 mg/mL de pyrogallol dans de l'eau MilliQ[®] a été préparée et des dilutions ont été effectuées pour obtenir respectivement 0,502; 1,255; 2,51 et 5,02 µg/mL. La TPT a été exprimée en équivalent pyrogallol (PGE) à l'aide de l'équation de la droite de régression. Les analyses ont été effectuées en triplicat ($n = 3$, c'est-à-dire 3

prélèvements à partir de l'échantillon de départ), avec la détermination de la moyenne et de l'écart-type.

II.6.2. Identification et quantification des composés phénoliques/polaires

L'identification et la quantification des composés polaires ont été réalisées par chromatographie liquide haute performance (CLHP/HPLC) (Agilent Technologies 1290 Infinity II, USA) équipée d'un détecteur à barrette de diodes (1290 DAD), selon une méthode interne, optimisée au Laboratoire de Pharmacognosie (LPG - Département de Pharmacie, Université de Liège, Belgique). Une partie aliquote de la solution polaire méthanol, précédemment obtenue, est filtrée à l'aide d'un filtre 0,45 µm.

Les conditions analytiques de la chromatographie liquide étaient ainsi définies: (i) une température maintenue à 30,0 °C pour la colonne Luna PFP (Phenomenex®) de 250 mm de longueur, 5 µm de taille particulaire et 4,6 mm de diamètre intérieur ; (ii) un débit de 1,0 mL/min; (iii) un volume d'injection de 10,0 µL; (iv) les chromatogrammes ont été acquis à 210 - 235 - 254 - 280 - 330 et 350 nm, et le spectre UV (de 190,0 à 400,1 nm) a également été enregistré pour les composés détectés; (v) l'acquisition des spectres a été faite à 280 nm à l'aide du détecteur DAD. L'identification a été faite à partir des temps de rétention (Rt) des échantillons testés par rapport aux substances chimiques de référence (SCR), et en combinant les spectres UV de la base de données interne. La quantification a été faite en utilisant une SCR, l'acide gallique, et les résultats ont été exprimés en équivalent acide gallique (GAE). La phase mobile était composée d'acétonitrile et d'acide formique aqueux à 0,1 % à pH 2,5, voir tableau 24.

Tableau 24 : Composition de la phase mobile en mode gradient

Temps (min)	Acétonitrile (%)	Acide formique 0,1 (%)
0	15	85
15	18	82
25	23	77
37	30	70
42	40	60
52	50	50
57	80	20
62	100	0
72	100	0

II.6.3. Détermination du potentiel antioxydant *in vitro*

○ *Choix du solvant de solubilisation du beurre brut*

Le choix du solvant pour la solubilisation du beurre brut a été fait entre le cyclohexane, un solvant apolaire dans lequel le BK est hautement soluble, et l'éthanol, solvant d'intérêt pour la cosmétique du fait de sa tolérance. Le but était donc d'établir une analyse comparative du beurre brut en solution dans l'éthanol (solution éthanolique) et dans le cyclohexane (solution hexanique) afin de choisir le solvant non cytotoxique qui offrirait la meilleure solubilité pour les composés d'intérêt dans l'échantillon brut.

La solution éthanolique a été préparée en dissolvant 1,0 g de l'échantillon fondu dans 100 mL du solvant approprié (éthanolique ou hexanique) dans une fiole jaugée. La solution est mélangée pendant 5 min et filtrée à travers un filtre de 0,45 µm. Pour la mesure de l'absorbance, une partie aliquote de 1,0 mL est ensuite transférée dans une fiole jaugée de 10 mL, puis le volume a été ajusté avec le solvant approprié. L'absorbance de l'échantillon en solution est ensuite mesurée en triplicat à une longueur d'onde comprise entre 280 et 400 nm (domaine UVA-B) à l'aide d'un spectrophotomètre (Diode array, Agilent 8453, Agilent (Hewlett-Packard®), Wald Bronn, Allemagne)).

Afin d'évaluer la capacité antioxydante du BK, le beurre solubilisé a été utilisé à différentes concentrations et dilué dans le solvant approprié. L'efficacité des échantillons de BK a été déterminée en mesurant par spectrophotométrie la cinétique de la décoloration par piégeage des radicaux libres DPPH et des cations radicaux ABTS⁺ (Etsè et *al.* 2021; Degotte et *al.* 2023). La quantification du potentiel antioxydant des matières grasses fait très souvent référence à deux modèles *in vitro* très utilisés : le test DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) et le test ABTS (2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)). Ces tests spectrophotométriques, bien que complémentaires, sont différents dans leurs mécanismes réactionnels, leur sensibilité, les conditions expérimentales (pH du milieu), l'adaptation aux matrices lipidiques (Rumpf et *al.* 2023). Selon ces auteurs, le pH de travail indiqué pour le DPPH est de 5 à 9, et celui de l'ABTS de 3 à 9. Selon Abramovic̃ et *al.* (2018) en solvants polaires (méthanol, éthanol), le mécanisme de transfert d'électron prédomine pour le test DPPH. Cependant, selon Rumpf et *al.* (2023), le test ABTS est plus universel car le radical est soluble dans l'eau et les solvants organiques, présentant donc l'avantage d'évaluer à la fois les antioxydants hydrophiles et lipophiles.

Pour la mise en œuvre des tests, deux contrôles ont été réalisés : un contrôle ABTS/DPPH (100 µL DPPH/ABTS) et un contrôle solvant avec 2 µL de méthanol + 98 µL DPPH/ABTS. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un lecteur de microplaques à 96 puits (Thermo Labsystem, Vantaa, Finlande), en triplicat ($n = 3$), avec la détermination de la moyenne et de l'écart-type.

II.6.3.1. Test au DPPH

Le radical libre DPPH (couleur violette en solution) est réduit en DPPH-H (couleur jaune clair) par un composé donneur de proton ayant des propriétés anti-radicalaires (figure 13, (Xiao et *al.* 2020)). Une solution test de 0,26 mg/mL de DPPH dans du méthanol absolu a été préparée et homogénéisée pendant 30 min dans un flacon ambré. Des dilutions ont été faites afin d'obtenir une valeur d'absorbance d'environ 0,75 à 510 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Agilent 8453, Agilent Deutschland GmbH). Pour le dosage, une concentration connue de l'échantillon test a été ajoutée à la solution de travail DPPH (volume final de 100 µL) dans la plaque de 96 puits, puis l'absorbance a été immédiatement mesurée.

Avant une nouvelle mesure, la plaque est incubée pendant 60 min à l'abri de la lumière. Au cours de la réaction et en présence d'un radical libre DPPH°, un proton du composé antioxydant de l'échantillon est transféré au radical libre, le transformant en DPPH stable. On note une décroissance de l'absorbance jusqu'à ce que l'antioxydant donneur d'hydrogène soit épuisé. Afin d'obtenir davantage de données pour l'analyse statistique, la mesure de l'absorbance a été effectuée à 510 nm à l'aide d'un spectrophotomètre Multiskan Ascent (Thermo Labsystem, Vantaa, Finlande). Le pourcentage d'inhibition du DPPH (I %) a été calculé selon l'équation (3) :

$$I \% = \frac{A_{\text{blanc}} - A_{\text{échantillon}}}{A_{\text{blanc}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

A_{blanc} = absorbance du contrôle solvant ; $A_{\text{échantillon}}$ = absorbance de l'échantillon test.

Toutefois, conformément aux lignes directrices visant à estimer avec précision la CE₅₀ (Sebaugh 2011), cette valeur n'a pas pu être calculée car la plupart des échantillons n'ont pas fait l'objet de mesures suffisantes pour pouvoir la déterminer correctement.

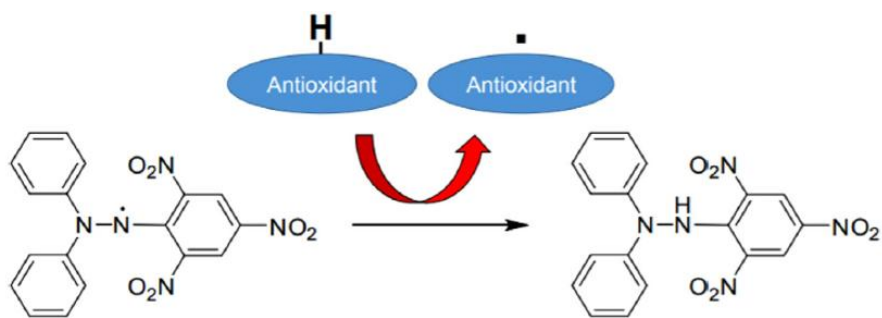


Figure 13 : Réaction entre le DPPH• et un antioxydant pour former le DPPH.

II.6.3.2. Test à l'ABTS

Le mode opératoire du test à l'ABTS était similaire à celui du test au DPPH. L'oxydation de l'ABTS par le persulfate de sodium (ou par le potassium persulfate) génère un mono-cation radicalaire, l'ABTS^{•+}, qui sera réduit en présence d'antioxydant donneur d'électrons/d'hydrogène (Xiao et *al.* 2020), voir figure 14. Dans notre cas, du persulfate de sodium aqueux (4,6 mg/mL) a été mélangé v/v à une solution aqueuse d'ABTS (26,5 mg/mL). Le mélange a ensuite été stocké pendant une nuit dans l'obscurité dans le but d'obtenir une solution de couleur foncée. La solution de travail a été préparée en diluant la solution stock avec du méthanol pour obtenir une valeur d'absorbance comprise entre 0,70 et 0,80 à 734 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Agilent 8453, Agilent Deutschland GmbH). En présence d'un antioxydant potentiel, le cation radicalaire ABTS^{•+} est transformé en sa forme stable, l'ABTS, en décolorant la solution qui passe du bleu/vert à une couleur neutre. Pour évaluer la capacité de réduction de l'ABTS par l'échantillon test, on mesure l'absorbance à 740 nm après 60 min. Le pourcentage d'inhibition (I %) a été calculé de la même manière que pour le test au DPPH selon l'équation (3).

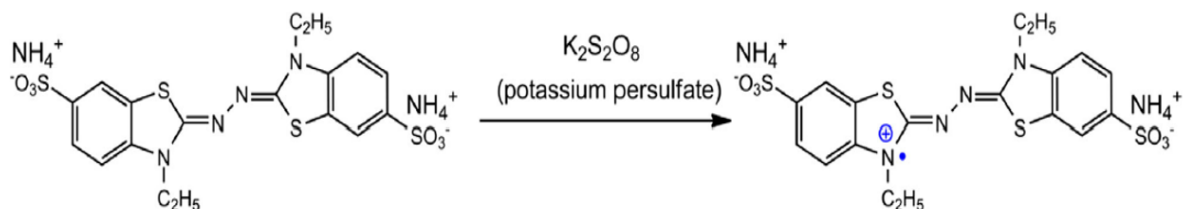


Figure 14: Formation du radical stable ABTS à partir d'ABTS et de persulfate de potassium.

II.7. Évaluations du potentiel photoprotecteur du beurre de karité

II.7.1. Évaluation *in vitro* du facteur de protection solaire (FPS/SPF)

L'évaluation du FPS a porté d'une part sur les 37 échantillons bruts de BK collectés en lien avec leurs procédés d'extraction, et d'autre part sur les échantillons industriels Degom et sur l'extrait enrichi en karitène (Karitène). L'échantillon Degom a servi de comparateur au BK brut, puis aux expérimentations par ajouts dosés du karitène afin d'évaluer l'effet potentiel de ce dernier sur le FPS du beurre. Toutes les mesures ont été effectuées en triplicat ($n = 3$), avec la détermination de la moyenne et de l'écart-type.

II.7.1.1. Analyse comparée du facteur de protection solaire

Préparation des échantillons : Deux parties aliquotes par échantillon (37 échantillons bruts + 1 échantillon industriel Degom) ont été préparées ; l'une a été conservée dans l'obscurité (mode "nuit") et l'autre a été directement exposée au rayonnement solaire (mode "soleil"). La préparation des échantillons a été optimisée selon la méthode décrite par Fonseca et Rafaela (2016): 10 mg/mL de beurre fondu ont été solubilisés dans l'éthanol (à la concentration finale de 5 mg/mL), dégazés pendant 5 min dans un bain ultrason puis filtrés à travers du papier filtre Whatman 0,45 μ m. Chaque échantillon en mode « nuit » et « soleil » est distinctement préparé pour les besoins de l'analyse et l'opération est ensuite répétée hebdomadairement, pendant 5 semaines. Les échantillons ont été conservés à ± 4 °C pour les besoins de l'analyse.

Analyses spectrophotométriques et détermination du FPS : Après la préparation des échantillons, les absorbances ont été immédiatement lues sur une gamme de longueurs d'onde comprise entre 290 et 320 nm, dans la gamme des UVB et ce, toutes les 5 nm, à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible Agilent 8453, équipé d'une cellule de quartz de 1 cm. Les FPS *in vitro* ont été calculés selon la méthode développée par Sayre et *al.*, (1979), équation (4), en utilisant la relation entre l'effet érythémogène (dose de rayonnement suffisante pour provoquer généralement un érythème) et l'intensité du rayonnement à chaque longueur d'onde, ($EE \times I$) (tableau 25).

$$FPS \text{ par spectrophotométrie} = CF \times \sum_{290}^{320} EE(\lambda) \times I(\lambda) \times Abs(\lambda) \quad (Eq. 4)$$

Avec CF = 10 (facteur de correction) ; EE (λ) = Effet érythémogène d'un rayonnement de longueur d'onde λ ; I(λ) = Intensité de la lumière solaire de longueur d'onde λ ; Abs(λ) = Valeur spectrophotométrique pour l'absorbance de la longueur d'onde λ par une solution de la préparation.

Tableau 25 : Pondération utilisée pour la détermination du facteur de protection solaire par spectrophotométrie

λ (nm)	EE (λ) x I(λ)
290	0,0150
295	0,0817
300	0,2874
305	0,3278
310	0,1864
315	0,0839
320	0,0180
-	1,0000

II.7.1.2. Évaluation de la relation dose-réponse du facteur de protection solaire par ajouts dosés du karitène

Afin d'évaluer l'effet potentiel du karitène sur le FPS du BK, des expérimentations ont été conduites par ajouts dosés du karitène dans du beurre Degom. La méthode consistait à ajouter des quantités connues croissantes de karitène à quatre prises d'essai de l'échantillon Degom de quantité connue. La première prise d'essai ne contenait pas l'analyte karitène. Au total, cinq parties aliquotes ont donc été constituées, contenant chacune une fraction de l'échantillon Degom et une fraction de l'échantillon de référence karitène, pour une masse totale de 2,50 g. Le matériel brut non fondu a servi pour les prises d'essai. Le mélange a ensuite été fondu à l'étuve à environ 50 °C, homogénéisé, puis laissé à température ambiante, juste avant les analyses. Pour les parties aliquotes, les concentrations finales de karitène, en solution dans l'échantillon Degom, étaient de 0,5 %, 1,0 %, 2,0 % et 2,5 %. La détermination du FPS a été faite conformément à la méthodologie précédemment décrite.

II.7.2. Évaluation du potentiel photoprotecteur selon les modèles expérimentaux

Afin d'évaluer *in vitro* et en milieu cellulaire le potentiel photoprotecteur du BK, des modèles expérimentaux ont été optimisés avec pour objectif dans un premier temps de vérifier la viabilité des modèles, puis dans un second temps, de les appliquer au BK dans les conditions expérimentales. En milieu cellulaire, les investigations ont utilisé les lignées cellulaires kératinocytes (Human keratinocytes - HaCaT cell line) et le solvant de solubilisation (éthanol ou cyclohexane). Le matériel d'étude était celui décrit au tableau 23, c'est-à-dire sept échantillons de beurres bruts, trois échantillons de beurres industriels, auxquels ont été pris en compte leurs extraits polaires.

II.7.2.1. Mise au point de modèles expérimentaux acellulaire et cellulaire d'investigation

Dans le but d'effectuer une analyse comparative des effets des beurres bruts et leurs extraits polaires sur un modèle UVR-like, utilisant la photosensibilisation du Rose Bengal (RB), deux dispositifs expérimentaux ont été mis en œuvre et optimisés (figure 15 : Dispositif expérimental pour la détermination de l'effet *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ selon le test ADPA sur modèle acellulaire, figure 16 : Dispositif expérimental pour la mise en évidence de l'effet photoprotecteur direct sur modèle cellulaire, par le test MTS). Il s'agit de deux modèles expérimentaux : un modèle acellulaire pour investiguer l'effet *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ sur le système ADPA + RB et un modèle cellulaire pour mettre en évidence l'effet photoprotecteur direct contre la phototoxicité des cellules HaCaT induite par l'irradiation du RB photosensibilisé (mesure de la viabilité cellulaire par le test MTS).

Une mise au point des conditions expérimentales a été faite afin de ne retenir que les conditions optimales pour les essais en milieu cellulaire. Les conditions initiales ont consisté à réaliser des essais en faisant varier certaines conditions, dont :

- (i) La durée de la préincubation des plaques à l'étuve (37 °C, 5 % CO₂) contenant les cellules traitées : entre 5 min et 90 min ;
- (ii) La durée du préchauffage de la lampe (source lumineuse d'irradiation) avant l'irradiation des plaques contenant les cellules traitées : entre 10 min et 60 min ;

- (iii) La durée d'irradiation des plaques** contenant les cellules traitées : entre 15 min et 120 min ;
- (iv) L'irradiation des plaques avec** (contact indirect cellules-lumière) **ou sans le couvercle** (contact direct cellules-lumière) ;
- (v) La durée de l'incubation des plaques à l'étuve** (37 °C, 5 % CO₂) contenant les cellules traitées : entre 24 h, 48 h et en « overnight » ;
- (vi) La distance entre les plaques contenant les cellules traitées et la source lumineuse**, au moment de l'irradiation : entre 7 cm et 30 cm ;
- (vii) Les niveaux de concentration des échantillons tests** en solution pour les essais en **milieu acellulaire** étaient de (4,44 ; 22,22 ; 44,44) µg/mL pour le beurre brut et entre 0,003 et 0,369 ppm GAE pour les fractions polaires ;
- (viii) Les niveaux de concentration des échantillons tests** en solution pour les essais en **milieu cellulaire** étaient de 1000 à 2000 µg/mL.

La mise au point des conditions expérimentales avait pour but de déterminer les paramètres optimaux permettant d'obtenir une viabilité cellulaire réversible et reproductible, lorsque les cellules traitées sont soumises à l'irradiation.

II.7.2.2. Évaluation du potentiel photoprotecteur sur modèle acellulaire (effet quenching de l'oxygène singulet)

L'effet *quenching* a été évalué en ajoutant du RB à la solution d'ADPA avant l'irradiation à 550 nm. Les absorbances ont été enregistrées toutes les 30 s, pendant 300 s à la longueur d'onde de 400 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Agilent 8453, Agilent Technologies® Deutschland GmbH). Dans le système ADPA, lorsqu'il est irradié à 550 nm, le RB passe dans un état excité, réagit avec l'oxygène fondamental du milieu (³O₂) pour donner de l'¹O₂, suivi de la consommation de l'ADPA à 400 nm, par la formation d'endoperoxydes.

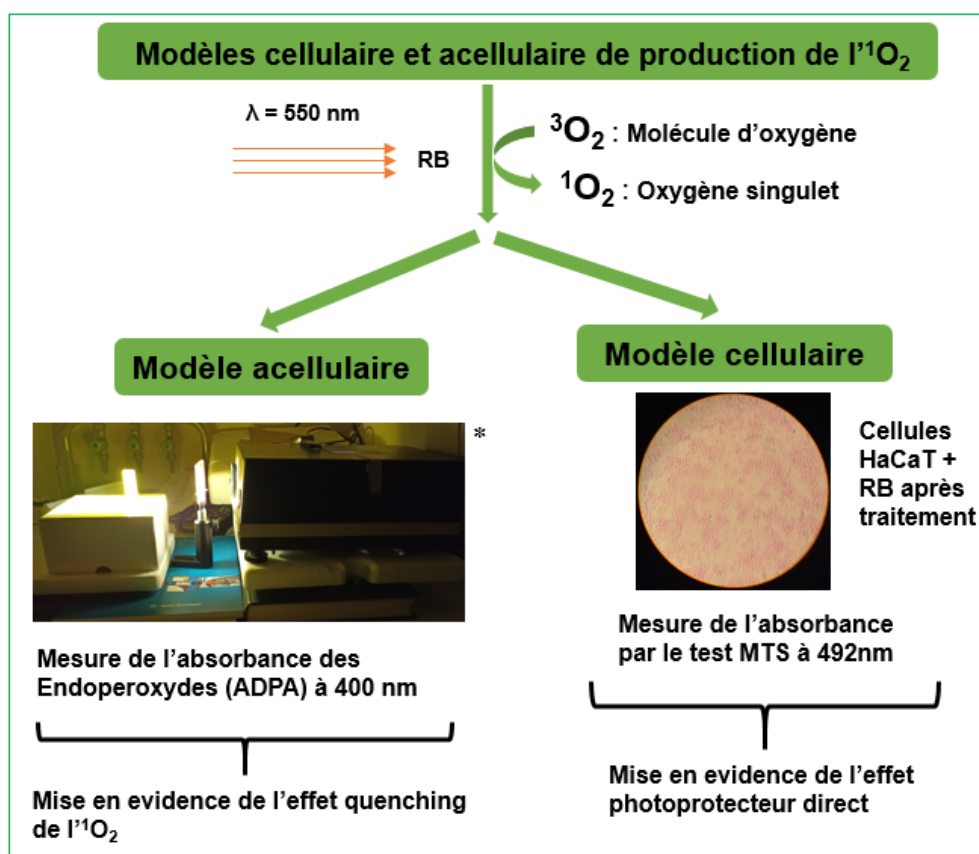


Figure 15 : Dispositif expérimental optimisé pour l'évaluation en milieu cellulaire et acellulaire de l'effet de l' $^1\text{O}_2$ irradié par le Rose Bengal sur la viabilité cellulaire. L'irradiation a lieu à la λ de 550 nm afin de générer l' $^1\text{O}_2$. * : Dispositif expérimental pour la détermination de l'effet *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ selon le test ADPA sur modèle acellulaire

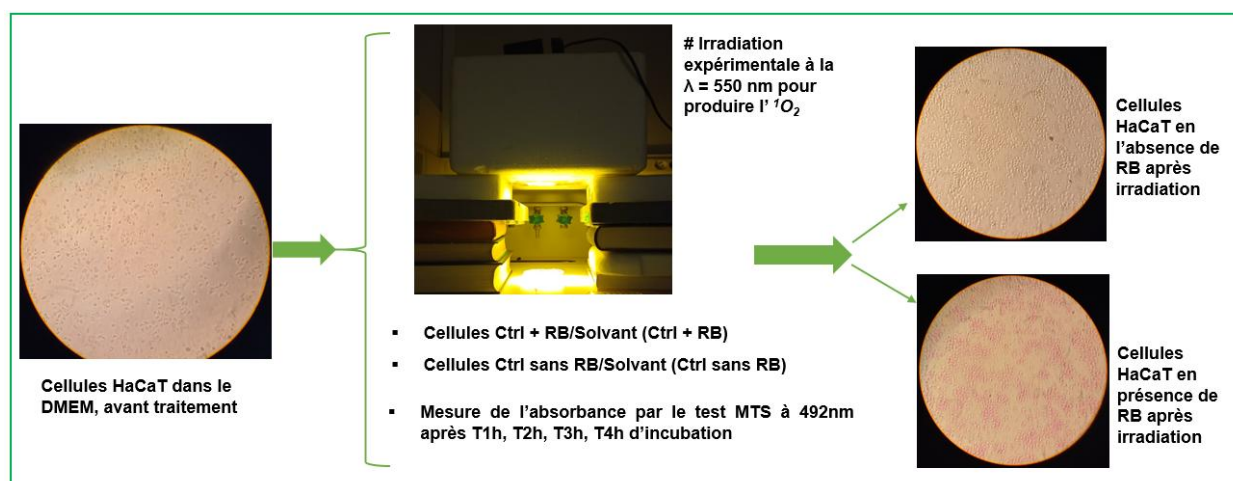


Figure 16 : Illustration du modèle cellulaire sur les cellules HaCaT, mettant en évidence les cellules sans Rose Bengal et les cellules avec Rose Bengal après irradiation à λ 550 nm. # : Dispositif expérimental pour la mise en évidence de l'effet photoprotecteur direct sur un modèle cellulaire, par le test MTS. Les analyses ont été réalisées en triplicat ($n = 6$) sur deux jours indépendants ($N = 2$). Les valeurs ont été enregistrées pour trois puits par échantillon ; $p < 0,01$ par rapport au contrôle

Préparation de la solution expérimentale de travail: Huit (8) mg d'ADPA ont été pesés et mélangés à 12 mL de tampon phosphate à pH 7,0. L'oxygène singulet a été ensuite généré suite à la photosensibilisation du RB par la lumière visible provenant d'une source lumineuse (Pradovit® RA 150, Leitz Wetzlar, Allemagne), équipée d'un filtre (Schot O'Neill®, Allemagne), qui est utilisé pour sélectionner une longueur d'onde d'irradiation spécifique à 550 nm (Deby-Dupont et *al.* 1998). Les mesures ont été enregistrées à l'aide d'un spectrophotomètre UV en l'absence d'éclairage. Un échantillon dans une cellule de quartz contenant le mélange (RB + ADPA) a été irradié par le projecteur lumineux à λ 550 nm à température ambiante, puis immédiatement transféré au spectrophotomètre pour la mesure de l'absorbance toutes les 30 s et ce, durant 300 s. Avant chaque nouvelle expérience, le tampon phosphate à pH 7,0 a été utilisé comme blanc analytique. L'ADPA réagit avec l' $^1\text{O}_2$ pour former des endoperoxydes (figure 17), entraînant donc une diminution de la concentration de l'ADPA en solution. Ce phénomène se traduit par une décroissance de l'absorbance lorsque mesurée à 400 nm.

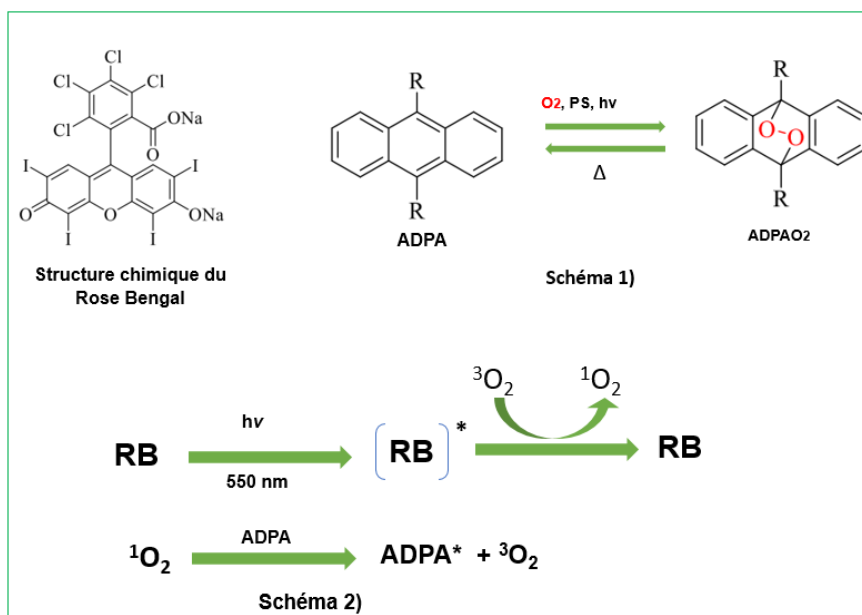


Figure 17 : Illustration du modèle ADPA : Après irradiation, l'ADPA réagit avec l'oxygène singulet pour former l'endoperoxyde (ADPAO₂). Le (Rose Bengal) * est une espèce réactive produite après l'irradiation du Rose Bengal. Les schémas (1 et 2) illustrent la mise en évidence de l'oxygène singulet avec le Rose Bengal

II.7.2.3. Évaluation du potentiel photoprotecteur sur modèle cellulaire

Dans un premier temps, l'effet intrinsèque des échantillons bruts sur les cellules HaCaT a été évalué afin d'exclure toute toxicité intrinsèque potentielle. Par la suite, des concentrations

croissantes (0,1; 1,0; 10 et 100 µg/mL) des échantillons bruts en solution (solution éthanolique précédemment justifiée) ont été testées afin d'évaluer la phototoxicité des cellules HaCaT induite par le RB (Khalil et Shebaby 2017; Wright et *al.* 2017). Le TiO₂ a été utilisé comme contrôle positif à titre de comparaison avec les échantillons tests.

Préparation des solutions (solution DMSO) : Pour la préparation de la suspension aqueuse de TiO₂ à 1 % m/v, les particules de TiO₂ (nanopoudre) ont été mises en suspension dans du DMSO puis dispersées à l'aide d'un bain à ultrasons pendant 90 s à 5 s d'intervalle. Afin de déterminer les effets photoprotecteurs de la fraction polaire de beurre, le résidu sec issu de l'extraction a été dissous dans 1,0 mL de DMSO, contrairement à la solution polaire méthanolique décrite dans la *Partie 1, 3.6.1. Méthode pour le dosage des composés phénoliques totaux*.

Les analyses ont par la suite été effectuées à l'aide d'un lecteur de microplaques à 96 puits Multiskan Ascent spectrophotometer (Thermo Labsystem®, Vantaa, Finland), en triplicat sur deux essais indépendants. Avant chaque expérience, des solutions fraîchement préparées, des solutions éthanoliques (solubilisation du beurre brut), des solutions DMSO (solubilisation de la fraction polaire du beurre brut) et des solutions mères de TiO₂ (dans du DMSO), ont été préparées et des dilutions ont été réalisées avec les solutions appropriées. Le DMSO a servi de solvant pour les extraits polaires afin d'éviter la cytotoxicité du méthanol sur les cellules HaCaT. Les cellules HaCaT ont été immédiatement traitées pour chaque expérience selon la méthode décrite par Xue et *al.* 2010; Wright et *al.* (2017).

a) Évaluation de la toxicité intrinsèque du beurre brut

L'effet du beurre brut sur la viabilité des cellules HaCaT (cytotoxicité) a été évalué par le test MTS sur 24 h et 48 h. Le test MTS a servi à mesurer la viabilité cellulaire après T₀, T_{2h} et T_{3h}. Les cellules ont été lavées avec un tampon HBSS avant d'être mises en contact avec les solutions test à différentes concentrations. Dans chacun des 96 puits contenant 100 µL de cellules kératinocytes dans le tampon, 2 µL de l'échantillon test ont été ajoutés.

b) Investigation de l'effet photoprotecteur après traitement des cellules HaCaT suivi de l'irradiation du Rose Bengal

L'effet des échantillons tests (beurre brut et extraits polaires) sur le modèle UVR-like à 550 nm a été étudié à différentes concentrations par dilution des solutions mères. L'objectif du présent

test était d'induire une phototoxicité cellulaire, mais réversible en présence des échantillons tests. Le TiO₂ a été utilisé comme contrôle positif à la concentration de 0,02 à 0,04 µg/mL et de 0,2 à 10 µg/mL pour les tests sur les fractions polaires et des beurres bruts. Il a donc servi de référence pour comparer les résultats des tests effectués sur les différents échantillons. Les deux expériences ont été conduites et les résultats rapportés en fonction des contrôles solvants en présence du RB à la concentration respective de 2 % pour le DMSO et l'éthanol.

c) Photoprotection induite par l'oxygène singulet

La production de l'¹O₂ après irradiation UV de solutions aqueuses contenant une solution aqueuse de RB à la concentration finale de 10⁻⁵ M a été évaluée par spectroscopie (spectrophotomètre UV-visible Agilent 8453) au moyen du test MTS. Comme pour l'essai de toxicité intrinsèque, 2 µL de chaque solution d'essai (solution éthanolique à différentes concentrations) ont été ajoutés à 100 µL de cellules HaCaT (10 000 cellules/puits) en présence ou en l'absence de 2 µL du photosensibilisateur RB et comparés au contrôle solvant (contrôle DMSO). La plaque de 96 puits est ensuite recouverte, incubée pendant 10 min à 37 °C, 5 % de CO₂, puis irradiée à 550 nm pendant 30 min selon la procédure expérimentale décrite précédemment (figures 15 et 16). Après l'irradiation, les cellules ont été lavées deux fois avec du tampon HBSS, puis immédiatement remises en solution dans du tampon frais (100 µL/puits). Pour la mesure de la viabilité cellulaire, 10 µL de MTS ont été ajoutés à chaque puits et l'absorbance a été immédiatement mesurée à 492 nm à l'aide d'un spectrophotomètre Multiskan Ascent[®]. Les mesures de viabilité cellulaire ont été effectuées après chaque temps d'incubation (1 h, 2 h, 3 h et 4 h) à 37 °C. Un contrôle normal (HaCaT + RB) et un contrôle solvant (éthanol/DMSO) ont été effectués pour déterminer la phototoxicité cellulaire. Dans la même plaque de 96 puits, des contrôles sans RB ont été effectués dans les mêmes conditions.

II.8. Analyses statistiques

L'analyse de la variance a été utilisée pour déterminer l'effet des procédés d'extraction sur les caractéristiques de qualité du BK. Le logiciel RStudio[®] (version 2023.06.1; Free Software Foundation, Inc) a été utilisé pour effectuer des analyses multivariées, l'analyse en composantes principales, les tests de Student, puis l'ANOVA. La relation entre les caractéristiques thermiques et les propriétés chimiques a été déterminée par le test de Pearson.

Les analyses statistiques des résultats du facteur de protection solaire ainsi que des essais de photoprotection solaire en milieu acellulaire et cellulaire ont également été effectuées à l'aide du logiciel RStudio® avec $p < 0,05$ comme seuil de significativité pour les tests de Student, le test de Pearson et l'ANOVA.

Résultats

III - RÉSULTATS

III.1. Procédés d'extraction du beurre de karité extrait au Burkina Faso

La collecte des données a permis de recueillir 32 procédés d'extraction dont les différentes étapes diffèrent les unes des autres. Les connaissances et les attitudes sur les techniques d'extraction traditionnelles du BK répondent à des savoir-faire ancestraux, transmis de génération en génération. Sont décrites en annexe 5 la liste des producteurs de BK ayant servi à la collecte. Comme indiqué précédemment, 5 cas de refus de collaboration ont été constatés, tous originaires de la région du Kadiogo (la capitale Ouagadougou). On note une diversité de procédés d'extraction, reflétant les réalités locales, les cultures et traditions, et surtout des savoir-faire locaux, transmis de génération en génération. Parmi les différents procédés d'extraction (tableau 26), six étapes majeures ont été identifiées, pouvant avoir une influence sur la qualité chimique du produit fini. Ce sont notamment :

(i) le mode d'obtention et de traitement des fruits de karité, qui prend en compte le ramassage des fruits mûrs tombés des arbres, l'achat des noix et le trempage des fruits dans l'eau. Dans cette première étape, le ramassage des fruits mûrs tombés des arbres était la pratique la plus répandue, suivie de l'achat des noix. Certaines pratiques consistaient à tremper les noix dans l'eau, facilitant ainsi le décortilage.

(ii) le mode de traitement des noix de karité, avec les sous-étapes telles que le tri, le lavage, le séchage (au soleil ou au four), la cuisson et le décortilage des noix. Après l'acquisition des noix, elles étaient le plus souvent triées et lavées après l'étape de dépulpage, chez 19 des 32 producteurs. La majorité des producteurs faisaient bouillir les noix (22/32), avant l'étape de décortilage, et suivie du séchage au soleil (22/32). Seulement 2 producteurs pratiquaient le séchage au four traditionnel après avoir séché au soleil les noix.

(iii) le mode de traitement des amandes de karité, dont le tri, le lavage, le séchage (au soleil ou au four), le concassage et la torréfaction des amandes. La torréfaction des amandes concassées était la pratique la plus répandue, retrouvée chez 29 des 32 producteurs. Généralement, les amandes sont triées et lavées après le décortilage, avant d'être séchées au soleil. On note une variabilité dans le traitement des noix et des amandes, qui ont une influence sur la qualité et les caractéristiques du beurre obtenu.

(iv) **le mode de traitement de la pâte**, dont le barattage manuel de la pâte à l'eau est une étape importante et la plus répandue, comme indiquée dans la littérature (Goumbri et al. 2021), suivi parfois de la cuisson, influençant ainsi directement la qualité de l'émulsion obtenue. Dans notre étude, un seul producteur a déclaré torréfier la pâte ; il s'agit de l'échantillon Sang₁. Le barattage est essentiel pour obtenir une émulsion huileuse qui sera transformée en beurre brut. Il consistait à malaxer mécaniquement de façon centrifuge la pâte obtenue, par ajout d'eau tiède ou froide (Pages 2009; Gouyahali et al. 2012).

(v) **le mode de traitement de l'émulsion**, avec des sous-étapes comme le lavage, la cuisson, le filtrage, le malaxage et parfois une double cuisson de l'émulsion. Après avoir recueilli l'émulsion, les producteurs dans leur majorité y ajoutaient de l'eau permettant d'éliminer certains résidus, puis suivait l'étape de cuisson de l'émulsion (25/32 des cas). Une cuisson supplémentaire de l'émulsion intervenait également (16/32) avec pour objectif de réduire la teneur en eau.

(vi) **le mode d'obtention du produit final**, le beurre de karité, incluant le filtrage du beurre liquide et son malaxage avant conditionnement. Filtrer le beurre liquide avant son conditionnement est une étape ultime pour éliminer au maximum les impuretés insolubles. Cependant, dans notre étude, seulement 22 des 32 producteurs ont déclaré respecter cette étape. Aussi, trois (3) des producteurs mélangeaient de façon homogène le beurre avant son conditionnement, permettant d'obtenir du beurre beaucoup plus homogène.

Les étapes critiques susmentionnées sont essentielles pour garantir la qualité physicochimique du produit final: texture, pureté et caractéristiques chimiques de qualité du BK.

Sur la base des 6 étapes majeures, les différentes techniques d'extraction ont été regroupées par similitude, ce qui donne 5 procédés différents :

- ✓ Procédé 1 (P₁): Barattage-cuisson de l'émulsion,
- ✓ Procédé 2 (P₂): Cuisson de la pâte,
- ✓ Procédé 3 (P₃): Trempage des noix - séchage au four,
- ✓ Procédé 4 (P₄): Trempage des noix - séchage au soleil - cuisson de la pâte,
- ✓ Procédé 5 (P₅): Trempage des noix - séchage au four - cuisson de la pâte.

Tableau 26 : Répartition des échantillons de beurre de karité collectés au Burkina Faso en fonction de leur localité et des différents procédés d'extraction

Total des échantillons de beurre de karité collectés	37
Total des échantillons de beurre de karité collectés avec leurs procédés d'extraction	32
Étapes majeures des procédés d'extraction	Nombre
Mode d'obtention et de traitement des fruits de karité ou des noix	
Ramassage des fruits mûrs tombés des arbres	27
Achat des noix	13
Trempage des fruits dans l'eau	4
Cuisson après dépulpage ou achat des noix	22
Mode de traitement des noix de karité	
Tri et lavage des noix après dépulpage	19
Séchage au soleil des noix après dépulpage ou achat	7
Séchage au soleil après cuisson des noix	22
Séchage au soleil après décortilage et trempage des noix	3
Séchage au four traditionnel après séchage au soleil des noix	2
Tri-lavage-séchage après décortilage, cuisson des noix	12
Mode de traitement des amandes de karité	
Tri et lavage des amandes après décortilage	15
Séchage au soleil des amandes après tri et lavage	11
Séchage des amandes au four traditionnel après décortilage	2
Séchage au soleil des amandes après concassage	1
Torréfaction après concassage des amandes	29
Mode de traitement de la pâte	
Torréfaction de la pâte après mouture	1
Malaxage de la pâte après mouture	3
Barattage de la pâte à l'eau	30
Cuisson de la pâte après barattage	3
Cuisson de la pâte sans barattage	2
Mode de traitement de l'émulsion	
Lavages à l'eau de l'émulsion	23
Cuisson de l'émulsion	25
Filtrage de l'émulsion	8
Malaxage de l'émulsion	3
Double cuisson de l'émulsion	16
Mode d'obtention du produit final, beurre de karité	
Filtrage du beurre liquide	22
Malaxage du beurre liquide	3

La figure 18 illustre la technique de filtration du BK rencontré chez un des producteurs. Il s'agit d'un dispositif de filtre à pompe (figure 18a), avec un filtre-tissu (figure 18b) pour la filtration du produit final.



Figure 18: a) Dispositif de filtration à pompe de beurre de karité ; b) Tissu-filtre.
Crédit photos : Bertrand Gombri

Les tableaux 27 et 28 décrivent ainsi quantitativement les différentes étapes et sous-étapes critiques d'extraction. Quant au mode de traitement de la pâte, les résultats ont montré que le barattage de la pâte à l'eau était le procédé le plus populaire, utilisé dans 30 des 32 procédés. La figure 19 illustre dans les moindres détails les étapes de quelques procédés d'extraction sous forme de logigramme. Les annexes 6 reprennent les diagrammes de production de tous les 32 procédés d'extraction regroupés de sorte à faire ressortir les ressemblances et les dissemblances entre plusieurs procédés.

Tableau 27: Différentes étapes des procédés d'extraction du beurre de karité du Burkina Faso

Étapes du process		Process1															
		Kadi ₂	Boul ₁	Oubr ₁	Como ₂	Gour ₁	Ioba ₂	Koul ₁	Baze ₁	Naho ₁	Boul _g ₁	Koul ₂	Como ₃	Houe ₁	Houe ₂	Houe ₃	Houe ₄
 Fruits de karité	Ramassage						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Tri et/ou lavage						X			X	X						
	Dépulpage manuel						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Trempage à l'eau																
	Séchage au soleil						X										
 Traitement des noix	Achat des noix	X	X	X	X	X			X		X		X				
	Tri et/ou lavage	X	X	X		X	X		X		X		X	X	X	X	X
	Séchage au soleil	X	X			X			X								
	Cuisson						X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
	Séchage au soleil						X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
	Décorticage	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
	Séchage au soleil			X	X												
	Séchage au four																
	Tri et/ou lavage + Décorticage												X X	X X	X X	X X	X X
 Traitement des amandes	Tri et lavage		X	X	X			X		X	X	X	X				
	Séchage au soleil			X				X		X	X	X	X				
	Séchage au four																
	Concassage	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Séchage au soleil							X									
 Traitement de la pâte	Torréfaction	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Refroidissement																
	Mouture																
	Torréfaction																
	Malaxage					X											
 Traitement de l'émulsion	Barattage à l' eau	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Cuisson pâte																
	Lavages/hydratation	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Cuisson émulsion		X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Filtrer		X	X		X						X					
 Beurre brut	Lavages																
	Refroidissement		X				X		X				X				
	Hydratation							X	X								
	Malaxer							X	X								
	Refroidissement							X	X								
 Beurre brut	Cuisson/déshydratatio					X		X	X	X	X	X					
	Décanner/Refroidir		X						X	X	X	X	X				
	Filtrer					X	X		X	X	X	X					
	Malaxer			X	X	X		X	X		X	X		X	X	X	X
	Filtrer	X						X						X	X	X	X
 Beurre brut	Conditionner	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tableau 28: Différentes étapes des procédés d'extraction du beurre de karité du Burkina Faso (Suite)

Étapes du process		Process1									Process2			Process3		Process4	Process5
		Kene ₁	Noum ₁	Como ₁	Como ₄	Siss ₂	Sang ₁	Kadi ₁	Naho ₂	Naho ₃	Houe ₅	Komo ₁	Ioba ₁	Mouh ₁	Siss ₁	Yate ₁	Naya ₁
	Ramassage	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Tri et/ou lavage			x	x				x		x						
	Dépulpage manuel	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x		
	Trempage à l'eau													x	x	x	x
	Séchage au soleil				x												
	Achat des noix					x		x		x			x		x		
	Tri et/ou lavage	x	x			x	x	x		x							x
	Séchage au soleil									x			x				x
	Cuisson	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x			x	x	
	Séchage au soleil	x	x	x	x	x	x	x	x			x				x	
	Décorticage		x	x	x	x	x	x		x		x				x	
	Séchage au soleil										x			x	x		
	Séchage au four													x			x
	Tri et/ou lavage + Décorticage	x	x			x			x	x	x		x				x
	Tri et lavage			x	x		x	x			x			x	x		
	Séchage au soleil			x	x			x			x				x		
	Séchage au four													x			x
	Concassage	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
	Séchage au soleil																
	Torréfaction	x									x						
	Malaxage						x										
	Barattage à l' eau	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x
	Cuisson pâte										x	x	x			x	x
	Lavages/hydratation	x	x		x	x	x	x	x	x			x	x	x		
	Cuisson émulsion	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x			x	x
	Filtrer		x					x			x		x				
	Lavages													x			
	Refroidissement			x				x		x	x						
	Hydratation				x	x		x	x	x	x						
	Malaxage			x				x									
	Refroidissement				x											x	x
	Cuisson/déshydratatio			x	x	x	x	x	x	x	x			x	x		
	Décanter/Refroidir				x			x						x			
	Filtrer			x	x		x				x						
	Malaxer	x		x	x	x	x		x	x				x	x		
	Filtrer	x				x			x	x					x		
	Conditionner	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

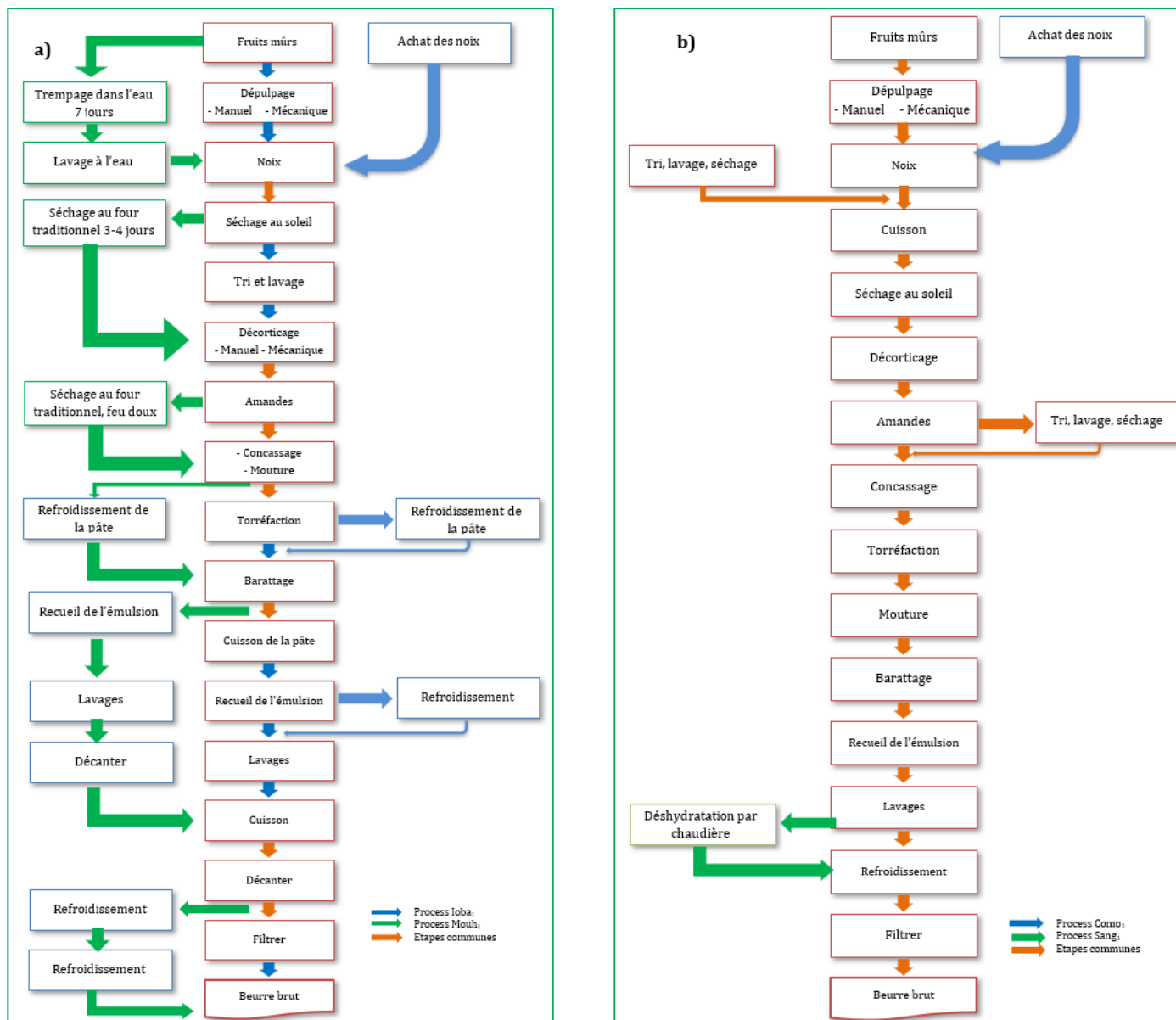


Figure 19: a - b) Diagrammes des différentes étapes d'extraction du beurre de karité au Burkina Faso ; cas de 4 procédés

De façon générale, les différentes étapes d'extraction du BK brut recensées au Burkina Faso s'inscrivaient dans la même logique que dans les autres pays africains producteurs, tels que décrits par Goumbri et *al.* (2021).

III.2. Caractéristiques physicochimiques du beurre de karité

III.2.1. Indices chimiques

Les résultats des différentes analyses chimiques ont été distinctement présentés pour les échantillons pilotes et les 37 échantillons collectés en lien avec leurs procédés d'extraction. Tous les résultats ont été rapportés en valeurs moyennes accompagnées des écarts-types et des intervalles de confiance de 95 %. Le tableau 29 présente les résultats pour les 5 échantillons.

Tableau 29: Indices chimique de qualité des cinq échantillons pilotes de beurre de karité

Échantillons	IA (mgKOH/g)	AGL (%)	IS (mgKOH/g)	IO par Wijs (gI ₂ /100g)	IO par GC (gI ₂ /100g)	IP (meqO ₂ /kg)	UMC (% m/m)	Kariténe (% m/m)
Lot ₁	7,6±0,1	3,8±0,1	123,8±1,1	62,5±0,5	53.0	9,3±0,1	7,2±1,3	3,2±1,3
Lot ₂	6,0±0,1	3,0±0,1	120,4±7,5	63,5±0,1	50.5	9,3±0,1	8,6±2,4	4,4±2,4
Lot ₃	8,3±0,2	4,2±0,1	131,5±2,5	60,6±0,5	-	7,2±1,8	13,5±0,2	-
Lot ₄	4,5±0,2	2,3±0,1	125,1±3.0	63,1±0,5	51.9	8,2±1,8	11,5±0,1	3,7±0,1
Lot ₅	7,4±0,2	3,7±0,1	123,8±8,6	63,1±0,3	52.7	6,2±0,1	12,8±0,6	3,5±0,6

Légende : IA : Indice d'acide ; AGL : Acides gras libres ; IS : Indice de saponification ; IO : Indice d'iode ; IP : Indice de peroxyde ; UMC : Teneur en matières insaponifiables. Les analyses ont été réalisées en triplicat ($n = 3$) et les valeurs moyennes $\pm$ écarts-types ont été reportées.

Selon la classification établie par le Codex Alimentarius (voir tableau 1), les teneurs en IP de tous les 5 lots d'échantillons étaient dans les limites prescrites pour le beurre de première catégorie (0 - 10 meqO₂/kg), tandis que pour l'AGL, seuls les lot₂ et lot₄ satisfont aux critères de deuxième catégorie (1,1 - 3) %. Quant à l'IS, toutes les valeurs obtenues étaient inférieures à la limite inférieure (160 - 195) mgKOH/g telle que définie dans le Codex Alimentarius dans le tableau 15. Les valeurs de l'IO et de l'UMC étaient toutes comprises dans les limites prescrites.

Le tableau 30 présente les résultats physicochimiques des 37 échantillons. Les résultats de l'AGL étaient compris entre $1,1 \pm 0,1$ % et $9,7 \pm 0,1$ %, respectivement pour Houe₃ (P₁) et Yate₁ (P₄). Les échantillons Kadi₅ (P non collecté) et Naya₁ (P₅) avaient les IP les plus faibles ($4,6 \pm 0,1$ meqO₂/kg) et les plus élevés ($44,5 \pm 0,2$ meqO₂/kg) respectivement. Tout comme les résultats obtenus pour les échantillons pilotes, les valeurs de l'IS étaient inférieures à la limite

définie par le Codex Alimentarius. De même, les résultats de l'IO et de l'UMC étaient tous compris dans les limites prescrites. L'indice d'iode était compris entre $(54,0 \pm 0,7)$ gI₂/100 g - $(65,5 \pm 0,3)$ gI₂/100g pour Oubr₁ et Houe₄ et l'UMC entre $(3,0 \pm 1,0)$ % - $(12,0 \pm 0,1)$ %, respectivement pour les échantillons Siss₂ et Koul₁. Tous ces échantillons relevaient du P₁. Quant à la RI, mesurée à 20 °C, les valeurs étaient comprises entre 1,4070 et 1,472, respectivement pour Komo₁ (P₂) et Kadi₃ (P non collecté). Ces valeurs étaient différentes de celles définies par le Codex Alimentarius qui sont comprises entre 1,4620 et 1,4650.

Tableau 30 : Indices chimique de qualité des échantillons (37) de beurre de karité collectés au Burkina Faso en lien avec leurs procédés d'extraction

Échantillon	IP (meqO ₂ /kg)	AGL (%)	IO par Wijs (g/100g)	IO par GC (g/100g)	UMC (% m/m)	IS (mgKOH/g)	Kariténe (% m/m)	K _{λ232 nm}	K _{λ268 nm}	ΔK	RI (20°C)
Baze ₁	14,5±0,1	1,5±0,1	58,8±0,1	53,6	5,9±2,6	120,1±0,1	1,74	0,759±0,034	4,004±0,004	0,122	1,4715
Boul ₁	19,6±6,9	3,0±0,1	55,2±0,9	53,5	8,3±0,1	115,1±2,4	0,59	1,057±0,117	4,440±0,082	0,123	1,4708
Boulg ₁	14,7±0,1	1,7±0,1	59,3±0,2	54,3	8,5±1,2	118,6±3,0	1,70	0,835±0,001	4,222±0,025	0,124	1,4715
Como ₁	14,8±0,2	2,9±0,1	56,5±0,2	53,9	5,7±1,4	122,1±1,0	0,87	0,740±0,012	3,431±0,008	0,099	1,4700
Como ₂	22,1±3,4	6,1±0,1	55,4±0,3	53,9	3,9±0,1	120,9±0,1	0,49	0,612±0,001	2,916±0,016	0,084	1,4691
Como ₃	19,9±0,1	5,0±0,1	55,9±0,2	52,7	5,2±0,2	120,8±0,1	1,05	0,828±0,042	3,623±0,034	0,100	1,4696
Como ₄	42,2±3,8	6,3± 0,1	55,4±0,1	54,3	5,1±0,3	116,4±0,3	0,37	1,051±0,090	4,111±0,104	0,105	1,4702
Gour ₁	9,9±0,1	3,9±0,1	61,5±0,9	54,3	7,6±0,1	119,4±1,1	2,41	0,810±0,009	3,845±0,025	0,112	1,4710
Houe ₁	9,9±0,1	3,5±0,1	58,4±0,2	54,8	6,4±1,3	115,7±3,5	1,20	1,077±0,007	4,821±0,009	0,139	1,4714
Houe ₂	41,9±3,0	2,1±0,1	58,3±0,7	53,9	4,8±0,1	84,9± 0,1	1,48	1,186±0,138	4,970±0,137	0,136	1,4711
Houe ₃	19,8±6,9	1,1±0,1	57,4±0,7	53,9	5,8±0,1	117,1±0,3	1,16	0,769±0,029	3,137±0,064	0,088	1,4700
Houe ₄	12,3±3,5	4,9±0,1	65,5±0,3	64,2	5,2±0,1	115,0±5,6	0,47	0,783±0,030	3,305±0,032	0,083	1,4703
Houe ₅	14,5±0,1	4,5±0,1	60,2±0,4	55,6	6,9±0,9	119,1±3,0	1,55	1,182±0,012	5,028±0,014	0,131	1,4710
Houe ₆	9,9±0,1	5,0±0,1	57,3±0,8	54,8	3,7±0,2	117,6±2,9	0,86	0,874±0,074	3,570±0,054	0,097	1,4699
Ioba ₁	14,9±0,1	3,6±0,1	58,2±0,2	54,0	6,9±0,1	117,8±0,5	1,40	0,719±0,015	3,785±0,006	0,111	1,4710
Ioba ₂	7,4±3,5	2,1±0,1	57,1±0,6	53,0	6,8±1,4	119,9±0,3	1,38	0,672±0,004	3,669±0,025	0,105	1,4707
Kadi ₁	9,9±0,1	5,3±0,1	60,2±0,3	52,6	7,0±0,1	119,9±2,6	2,54	0,645±0,025	3,500±0,067	0,104	1,4703
Kadi ₂	9,9±0,1	8,2±0,1	55,2±0,5	54,2	7,0±0,1	113,6±4,4	0,36	1,227±0,133	5,384±0,085	0,148	1,4704
Kadi ₃	22,3±3,3	4,3±0,1	58,7±0,3	53,0	6,9±0,3	119,5±2,0	1,91	0,941±0,023	4,200±0,031	0,122	1,4720
Kadi ₄	6,1±1,7	2,7±0,1	56,5±1,2	53,8	7,9±0,1	117,2±0,9	0,93	1,244±0,006	5,685±0,040	0,201	1,4710
Kadi ₅	4,6±0,1	2,5±0,1	58,8±0,5	54,7	6,0±0,1	116,7±2,9	1,38	1,131±0,193	3,534±0,204	0,159	1,4701
Kadi ₆	19,7± 0,1	4,1±0,1	57,8±0,1	54,4	6,0±1,8	121,1±0,1	1,14	1,188±0,037	5,480±0,117	0,149	1,4719
Kene ₁	27,1±3,5	6,0±0,4	58,2±0,6	55,4	3,0±1,0	118,6±3,1	0,94	0,751±0,070	3,034±0,055	0,091	1,4694
Komo ₁	34,3±0,1	2,8±0,1	56,9±0,7	53,2	5,6±0,1	120,4±0,1	1,21	0,765±0,008	3,745±0,032	0,109	1,4070
Koul ₁	22,1±3,5	2,4±0,1	58,0±0,1	53,8	12,0±0,1	120,2±0,4	1,41	1,012±0,027	4,699±0,022	0,136	1,4718
Koul ₂	31,89±3,5	2,5±0,1	61,5±0,2	55,7	6,6±0,8	117,8±3,3	1,97	0,797±0,011	4,088±0,014	0,134	1,4713
Mouh ₁	37,0±3,4	1,1±0,1	57,7±0,4	54,6	9,3±0,1	111,3±4,3	1,05	0,998±0,037	3,652±0,032	0,100	1,4704
Naho ₁	24,4±0,2	3,0±0,2	60,0±0,2	54,4	7,4±0,1	122,3±0,3	1,89	1,024±0,110	4,352±0,094	0,122	1,4711
Naho ₂	9,8±0,1	2,2±0,1	56,4±0,8	53,7	7,6±0,1	122,0±0,1	0,91	0,911±0,016	4,155±0,017	0,118	1,4710
Naho ₃	14,8±0,1	3,1±0,1	60,1±0,7	55,2	8,0±0,1	118,7±0,1	1,67	1,337±0,137	4,776±0,117	0,130	1,4709
Naya ₁	44,5±0,2	2,6±0,1	58,9±0,7	53,5	7,9±0,1	105,0±0,9	1,80	0,938±0,045	4,384±0,014	0,127	1,4714
Noum ₁	24,8±0,1	2,4±0,1	54,8±0,2	53,1	5,4±0,1	116,3±0,1	0,57	0,677±0,040	3,392±0,019	0,097	1,4702
Oubr ₁	20,0±0,1	2,0±0,1	54,0±0,7	52,9	5,6±0,1	119,1±2,5	0,39	1,093±0,006	4,567±0,011	0,119	1,4701
Sang ₁	29,5±0,1	2,5±0,1	55,9±0,9	53,8	6,7±0,7	119,6±0,7	0,73	0,823±0,078	3,910±0,036	0,114	1,4709
Siss ₁	14,9±0,1	3,1±0,1	61,3±0,1	53,1	9,5±0,1	119,2±0,7	2,76	1,213±0,012	4,802±0,031	0,136	1,4707
Siss ₂	14,8±0,1	7,0±0,1	56,2±0,3	50,5	3,0±1,0	118,0±1,8	1,90	0,794±0,065	3,831±0,078	0,111	1,4707
Yate ₁	12,2±3,4	9,7±0,1	58,5±0,5	54,9	7,6±0,1	120,6±1,0	1,23	0,775±0,013	3,712±0,008	0,105	1,4709

Note : IP : Indice de peroxyde ; AGL : Acides gras libres ; IO : Indice d'iode ; UMC : Teneur en matières insaponifiables ; IS : Indice de saponification ; RI : Indice de réfraction.

Les analyses ont été faites en triplicat ($n = 3$) et les valeurs moyennes ± écarts-types ont été reportées.

III. 2.2. Profil en acides gras

Le dosage des AG pour les 5 échantillons pilotes selon la méthode décrite par Yi et *al.* (2006), méthode interne de dosage au Laboratoire de Chimie analytique de Gembloux Agro-BioTech, n'a pas été totalement concluant. Les difficultés rencontrées pour certains échantillons pourraient être dues à la méthode qui est spécifique aux dosages des AG en milieu biologique (plasma sanguin) qui a nécessité une centrifugation préalable pour séparer le plasma des concentrés de globules rouges. En effet, la technique d'estérification n'a pas permis d'identifier et de doser les AGE du lot₃ et les AGNE des lot₃ et lot₄. Néanmoins, les analyses ont permis de mettre en évidence pour le reste des échantillons deux formes d'AG majoritaires. L'ensemble des résultats est consigné dans le tableau 31. Les AG étaient ainsi identifiés et quantifiés en AG stéarique - AGS - C18:0 (38,8-41,8) %, (21,0-38,0) %, et AG oléiques - AGO - C18:1 (41,3-43,0) %, (30,4-43,5) %, respectivement pour les formes estérifiées et non estérifiées. Ces résultats confirment le fait que les formes d'AG non estérifiées sont les formes majoritaires du BK. Toutefois, deux composés n'ont pas pu être identifiés conformément à la méthode d'identification (substance chimique de référence) utilisée. La figure 20 illustre deux exemples de chromatogrammes obtenus pour les formes estérifiées et non estérifiées de l'échantillon lot₁.

La détermination du profil en AG des 37 échantillons a nécessité une méthode normalisée de l'AOCs. Les résultats ont mis en évidence, comme précédemment, les deux formes d'AG majoritaires et les profils des AG ont été rapportés dans le tableau 32. La teneur en AG stéarique était comprise entre $(33,9 \pm 0,1) \%$ et $(47,2 \pm 0,2) \%$, respectivement pour Houe₄ (Procédé P₁ - Origine : province du Houet) et Siss₂ (Procédé P₁ - Origine : province de la Sissili), contre $(40,8 \pm 0,2) \%$ et $(51,0 \pm 0,03) \%$ pour l'AG oléique, respectivement pour Siss₂ et Houe₄. Ces résultats satisfont aux spécifications décrites dans le Codex Alimentarius (tableau 11), lequel donne la composition en AG du BK non raffiné déterminée par chromatographie en phase gazeuse. Les teneurs en AG stéarique et AG oléique pour l'échantillon Degom étaient comprises entre $(42,1 \pm 0,1) \%$ et $(44,7 \pm 0,1) \%$ respectivement. Les conditions expérimentales pour l'acquisition des données ont été décrites au paragraphe « II.4.2. Profil en acides gras ».

Tableau 31: Profil des acides gras estérifiés et non estérifiés (en % de teneur) des échantillons pilotes de beurre de karité collectés au Burkina Faso

AGE	Lot ₁ (%)	Lot ₂ (%)	Lot ₄ (%)	Lot ₅ (%)	AGNE	Lot ₁ (%)	Lot ₂ (%)	Lot ₅ (%)
C6:0	1,6	2,3	2,1	1,2	C6:0	3,7	1,8	8,6
C10:0	1,4	3,9	2,9	2,0	C10:0	6,4	2,3	17,2
C12:0	1,5	4,6	3,6	2,3	C12:0	8,5	2,8	23,1
C15:0	0,0	0,1	0,0	0,0	C15:0	0,0	0,0	-
C16:0	3,4	3,4	3,4	3,5	C16:0	4,1	4,2	2,8
C16:1	0,0	0,0	0,0	0,0	C16:1	0,0	0,0	-
C17:0	0,1	0,1	0,1	0,1	C17:0	0,1	0,1	-
C18:0	41,0	38,8	39,9	41,8	C18:0	31,1	38,0	21,0
C18:1	43,0	41,3	42,1	41,9	C18:1	41,1	43,5	30,4
C18:2	5,7	5,4	5,6	5,8	C18:2	7,2	7,3	4,1
C20:0	0,0	-	-	-	C20:1	0,2	0,2	0,2
C20:1	0,1	0,1	0,1	0,1	C18:3	0,8	1,0	0,8
C18:3	1,3	1,2	1,3	1,4	C21:0	0,1	0,2	-
C21:0	0,2	0,2	0,2	0,2	C20:4	0,0	0,1	-
C20:4	0,1	0,1	0,1	0,1	C24:0	0,0	-	-
C24:0	0,0	0,1	-	-	C24:1	-	0,1	-
C24:1	0,1	-	0,1	0,1	Non identifié	0,2	0,1	0,1
Non identifié	0,3	0,5	0,3	0,4	Non identifié	0,2	0,1	0,3
Non identifié	0,2	0,3	0,3	0,3				

AGE : Acides gras estérifiés ; AGNE : Acides gras non estérifiés

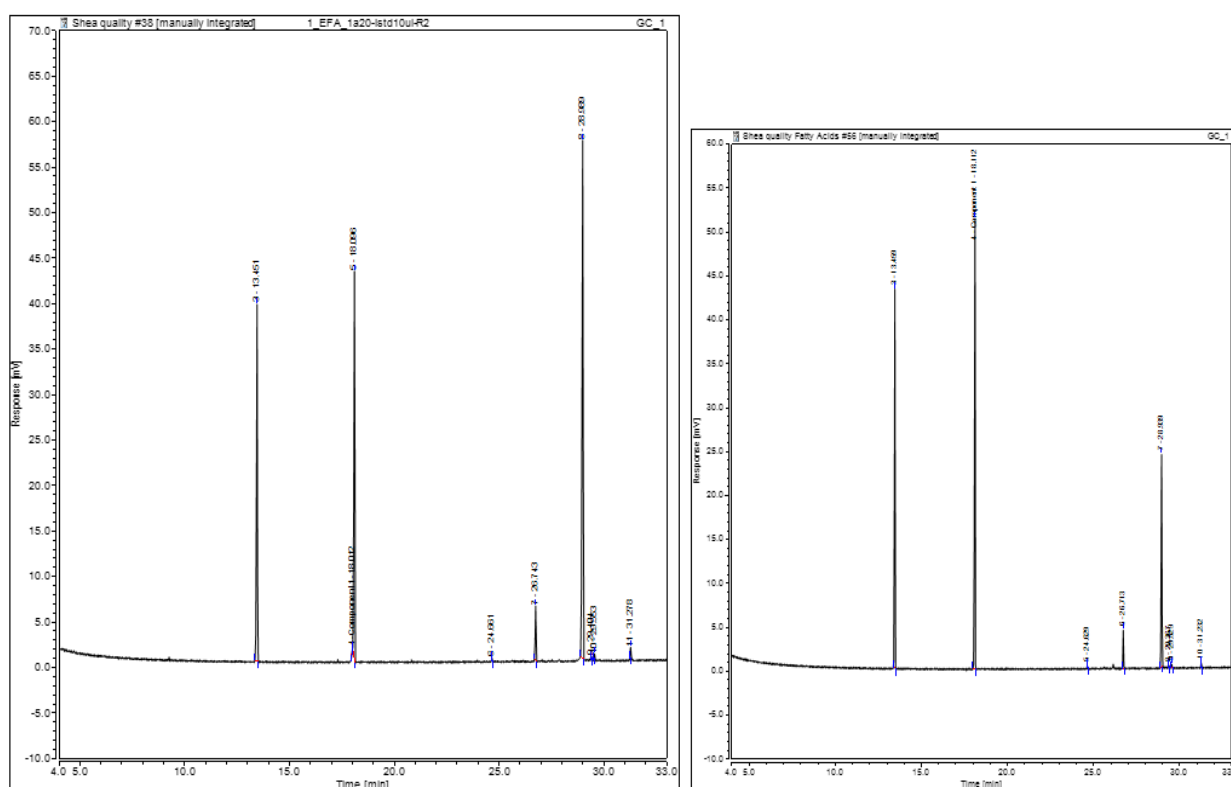


Figure 20: Exemple de chromatogramme des acides gras estérifiés et non estérifiés de l'échantillon lot1.

Tableau 32: Profil des acides gras majoritaires (%) des échantillons de beurre de karité en lien avec leurs procédés d'extraction

Échantillon	Acide palmitique (C16:0)	Acide stearique (C18:0)	Acide oléique (C18:1)	Acide linoléique (C18:2)	Acide gadoléique (C20:1)
Baze ₁	3,3±0,1	43,5±0,1	44,4±0,1	5,9±0,1	1,6±0,1
Boul ₁	3,3±0,1	44,0±0,1	44,0±0,1	6,0±0,1	1,6±0,1
Boulg ₁	3,6±0,1	43,8±0,1	43,2±0,1	6,9±0,1	1,7±0,1
Como ₁	3,4±0,1	43,4±0,1	44,9±0,1	6,1±0,1	1,4±0,1
Como ₂	3,2±0,1	43,4±0,1	44,7±0,1	6,0±0,1	1,6±0,1
Como ₃	3,2±0,1	44,8±0,1	43,9±0,1	5,8±0,1	1,6±0,1
Como ₄	3,2±0,1	43,0±0,1	45,0±0,1	6,1±0,1	1,5±0,1
Gour ₁	3,6±0,1	42,7±0,1	45,2±0,1	6,0±0,1	1,3±0,1
Houe ₁	3,1±0,1	43,1±0,1	44,9±0,1	6,4±0,1	1,6±0,1
Houe ₂	3,3±0,1	43,4±0,1	44,9±0,1	5,9±0,1	1,5±0,1
Houe ₃	3,3±0,1	43,3±0,1	44,9±0,1	5,9±0,1	1,5±0,1
Houe ₄	3,7±0,1	33,9±0,1	51,0±0,1	8,4±0,1	1,2±0,1
Houe ₅	3,2±0,1	41,9±0,1	45,8±0,1	6,5±0,1	1,5±0,1
Houe ₆	3,3±0,1	42,3±0,1	45,8±0,1	6,0±0,1	1,5±0,1
Ioba ₁	3,5±0,1	43,4±0,1	44,3±0,1	6,2±0,1	1,5±0,1
Ioba ₂	3,2±0,1	44,8±0,1	43,6±0,1	6,1±0,1	1,6±0,1
Kadi ₁	3,1±0,1	45,1±0,1	43,4±0,1	5,8±0,1	1,6±0,1
Kadi ₂	3,2±0,1	43,5±0,1	44,4±0,1	6,2±0,1	1,6±0,1
Kadi ₃	3,2±0,1	44,4±0,1	44,1±0,1	5,9±0,1	1,6±0,1
Kadi ₄	3,4±0,1	43,6±0,1	44,1±0,1	6,2±0,1	1,6±0,1
Kadi ₅	3,3±0,1	42,5±0,1	44,8±0,1	6,3±0,1	1,6±0,1
Kadi ₆	3,3±0,1	43,0±0,1	44,7±0,1	6,3±0,1	1,5±0,1
Kene ₁	3,2±0,1	42,0±0,1	46,5±0,1	5,9±0,1	1,4±0,1
Komo ₁	3,3±0,1	44,0±0,1	44,6±0,1	5,8±0,1	1,5±0,1
Koul ₁	3,6±0,1	43,2±0,1	44,8±0,1	5,9±0,1	1,6±0,1
Koul ₂	3,3±0,1	41,7±0,1	46,3±0,1	6,2±0,1	1,4±0,1
Mouh ₁	3,4±0,3	42,7±0,1	45,3±0,2	6,2±0,1	1,4±0,1
Naho ₁	3,4±0,1	43,3±0,1	45,0±0,1	6,3±0,1	1,5±0,1
Naho ₂	3,5±0,1	43,5±0,1	44,6±0,1	6,1±0,1	1,5±0,1
Naho ₃	3,3±0,1	42,6±0,1	45,4±0,1	6,5±0,1	1,5±0,1
Naya ₁	3,6±0,1	43,2±0,1	44,6±0,1	6,0±0,1	1,5±0,1
Noum ₁	3,4±0,1	44,6±0,1	42,9±0,1	6,4±0,1	1,6±0,1
Oubr ₁	3,2±0,1	44,7±0,1	44,0±0,1	5,9±0,1	1,5±0,1
Sang ₁	3,4±0,1	43,6±0,1	44,2±0,1	6,1±0,1	1,6±0,1
Siss ₁	3,5±0,1	44,3±0,1	43,5±0,1	6,2±0,1	1,7±0,1
Siss ₂	3,4±0,1	47,2±0,2	40,8±0,2	6,1±0,1	1,5±0,1
Yate ₁	3,6±0,1	42,6±0,1	45,0±0,1	6,4±0,1	1,6±0,1
Degom	4,6±0,1	42,1±0,1	44,7±0,1	6,0±0,1	1,5±0,1

Les analyses ont été effectuées en triplicat ($n = 3$) par échantillon et les valeurs moyennes $\pm$ écarts-types ont été reportées.

III.2.3. Teneur en karitène

Le calcul de la teneur en karitène a nécessité, dans un premier temps, le calcul de la valeur de l'IO par GC selon les méthodes normalisées de l'AOCs. Les résultats ont été résumés dans les tableaux 29 et 30, respectivement pour les cinq et les trente-sept échantillons. Le tableau 33

présente les calculs ayant abouti à la déduction d'une part de l'IO par GC et, d'autre part, à la teneur en karitène pour les 37 échantillons.

Les résultats ont montré que l'IO par GC pour l'ensemble des échantillons était dans les limites définies par le Codex Alimentarius, entre 50,5 et 53,0 g/100g pour les 5 échantillons, et entre 50,5 et 64,2 g/100g pour les 37 échantillons. Quant à l'échantillon industriel Degom, l'IO par GC était de 53,68 g/100g. La teneur en karitène calculée était comprise entre 3,18 - 4,35 % m/m, et entre 0,36 % m/m ($Kadi_2 - P_1$) et 2,76 % ($Siss_1 - P_3$) respectivement pour les 5 et 37 échantillons. L'échantillon industriel Degom avait une teneur en karitène de 0,31 % m/m.

Tableau 33 (1/2): Calcul de l'indice d'iode par chromatographie gazeuse et de la teneur en karitène (% m/m de l'insaponifiable)

	C14:1	C16:1	C18:1	C18:2	C18:3	C20:1	C18:3	C20:3	C24:1	IO/GC	IO/Wijs	Karitène % m/m
MW acide gras	240,38	254,430	282,480	280,480	278,480	310,540	292,46	320,510	366,648			
I	2	2	2	4	6	2	6	6	2			
I MW 126.9045	253,809	253,809	253,809	507,618	761,427	253,809	761,427	761,427	253,809			
Facteur acide gras	0,94709	1,002447	1,112963	0,552541	0,365734	1,223518	0,384095	0,420933	1,444582			
Baze ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	44,38	5,93	0,15	1,57	0,3200	0,160	0,130			
Baze ₁	0,00	0,00	39,88	10,73	0,41	1,28	0,83	0,38	0,09	53,60	58,77	1,74
Boul ₁ (% acide gras)	0,12	0,00	44,02	5,98	0,15	1,62	0,3000	0,160	0,110			
Boul ₁	0,13	0,00	39,55	10,82	0,41	1,32	0,78	0,38	0,08	53,47	55,22	0,59
Boulg ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	43,19	6,88	0,14	1,68	0,3000	0,200	0,000			
Boulg ₁	0,00	0,00	38,81	12,45	0,38	1,37	0,78	0,48	0,00	54,27	59,29	1,70
Como ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	44,87	6,10	0,13	1,44	0,2500	0,160	0,000			
Como ₁	0,00	0,00	40,32	11,04	0,36	1,18	0,65	0,38	0,00	53,92	56,51	0,87
Como ₂ (% acide gras)	0,00	0,00	44,71	6,03	0,13	1,55	0,3000	0,150	0,110			
Como ₂	0,00	0,00	40,17	10,91	0,36	1,27	0,78	0,36	0,08	53,92	55,39	0,49
Como ₃ (% acide gras)	0,00	0,00	43,93	5,84	0,13	1,57	0,2700	0,150	0,000			
Como ₃	0,00	0,00	39,47	10,57	0,36	1,28	0,70	0,36	0,00	52,74	55,86	1,05
Como ₄ (% acide gras)	0,00	0,00	44,98	6,10	0,14	1,52	0,2900	0,150	0,120			
Como ₄	0,00	0,00	40,41	11,04	0,38	1,24	0,76	0,36	0,08	54,27	55,37	0,37
Gour ₁ (% acide gras)	0,19	0,00	45,24	6,02	0,15	1,32	0,28	0,1300	0,100			
Gour ₁	0,20	0,00	40,65	10,90	0,41	1,08	0,73	0,31	0,07	54,34	61,47	2,41
Houe ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	44,87	6,40	0,17	1,58	0,2900	0,150	0,100			
Houe ₁	0,00	0,00	40,32	11,58	0,46	1,29	0,76	0,36	0,07	54,84	58,38	1,20
Houe ₂ (% acide gras)	0,00	0,00	44,86	5,93	0,14	1,49	0,3300	0,150	0,110			
Houe ₂	0,00	0,00	40,31	10,73	0,38	1,22	0,86	0,36	0,08	53,93	58,31	1,48
Houe ₃ (% acide gras)	0,07	0,00	44,94	5,92	0,13	1,50	0,3000	0,140	0,100			
Houe ₃	0,07	0,00	40,38	10,71	0,36	1,23	0,78	0,33	0,07	53,93	57,37	1,16
Houe ₄ (% acide gras)	0,00	0,00	51,00	8,43	0,24	1,18	0,4700	0,110	0,000			
Houe ₄	0,00	0,00	45,82	15,26	0,66	0,96	1,22	0,26	0,00	64,19	65,52	0,47
Houe ₅ (% acide gras)	0,00	0,00	45,80	6,48	0,16	1,46	0,2800	0,150	0,000			
Houe ₅	0,00	0,00	41,15	11,73	0,44	1,19	0,73	0,36	0,00	55,60	60,15	1,55
Houe ₆ (% acide gras)	0,00	0,00	45,75	6,01	0,13	1,52	0,3000	0,150	0,120			
Houe ₆	0,00	0,00	41,11	10,88	0,36	1,24	0,78	0,36	0,08	54,80	57,33	0,86
Ioba ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	44,29	6,20	0,15	1,52	0,3500	0,150	0,130			
Ioba ₁	0,00	0,00	39,79	11,22	0,41	1,24	0,91	0,36	0,09	54,03	58,17	1,40
Ioba ₂ (% acide gras)	0,00	0,00	43,56	6,05	0,14	1,62	0,2700	0,160	0,110			
Ioba ₂	0,00	0,00	39,14	10,95	0,38	1,32	0,70	0,38	0,08	52,95	57,06	1,38
Kadi ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	43,37	5,84	0,15	1,63	0,3500	0,160	0,100			
Kadi ₁	0,00	0,00	38,97	10,57	0,41	1,33	0,91	0,38	0,07	52,64	60,21	2,54
Kadi ₂ (% acide gras)	0,00	0,00	44,44	6,20	0,16	1,62	0,3100	0,150	0,110			
Kadi ₂	0,00	0,00	39,93	11,22	0,44	1,32	0,81	0,36	0,08	54,15	55,23	0,36

Tableau 33 (2/2) : Calcul de l'indice d'iode par chromatographie gazeuse et de la teneur en karitène (% m/m de l'insaponifiable) (suite)

	C14:1	C16:1	C18:1	C18:2	C18:3	C20:1	C18:3	C20:3	C24:1	IO/GC	IO/Wijs	Karitène % m/m
Kadi ₃ (% acide gras)	0,00	0,00	44,05	5,87	0,13	1,56	0,2600	0,170	0,120			
Kadi ₃	0,00	0,00	39,58	10,62	0,36	1,28	0,68	0,40	0,08	53,00	58,68	1,91
Kadi ₄ (% acide gras)	0,00	0,00	44,11	6,17	0,14	1,64	0,3000	0,160	0,140			
Kadi ₄	0,00	0,00	39,63	11,17	0,38	1,34	0,78	0,38	0,10	53,78	56,54	0,93
Kadi ₅ (% acide gras)	0,00	0,00	44,84	6,34	0,14	1,55	0,3100	0,160	0,120			
Kadi ₅	0,00	0,00	40,29	11,47	0,38	1,27	0,81	0,38	0,08	54,68	58,76	1,38
Kadi ₆ (% acide gras)	0,00	0,00	44,67	6,29	0,16	1,54	0,2800	0,150	0,120			
Kadi ₆	0,00	0,00	40,14	11,38	0,44	1,26	0,73	0,36	0,08	54,38	57,76	1,14
Kene ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	46,74	5,90	0,14	1,38	0,3400	0,130	0,070			
Kene ₁	0,00	0,00	42,00	10,68	0,38	1,13	0,89	0,31	0,05	55,43	58,21	0,94
Komo ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	44,58	5,84	0,13	1,48	0,2300	0,160	0,110			
Komo ₁	0,00	0,00	40,06	10,57	0,36	1,21	0,60	0,38	0,08	53,24	56,85	1,21
Koul ₁ (% acide gras)	0,15	0,00	44,78	5,85	0,14	1,55	0,2700	0,170	0,130			
Koul ₁	0,16	0,00	40,23	10,59	0,38	1,27	0,70	0,40	0,09	53,83	58,00	1,41
Koul ₂ (% acide gras)	0,00	0,00	46,32	6,24	0,14	1,43	0,3100	0,160	0,120			
Koul ₂	0,00	0,00	41,62	11,29	0,38	1,17	0,81	0,38	0,08	55,73	61,54	1,97
Mouh ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	45,28	6,16	0,15	1,42	0,3200	0,130	0,090			
Mouh ₁	0,00	0,00	40,68	11,15	0,41	1,16	0,83	0,31	0,06	54,61	57,70	1,05
Naho ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	45,04	6,25	0,16	1,45	0,2500	0,140	0,000			
Naho ₁	0,00	0,00	40,47	11,31	0,44	1,19	0,65	0,33	0,00	54,39	59,97	1,89
Naho ₂ (% acide gras)	0,00	0,00	44,64	6,07	0,13	1,50	0,2700	0,150	0,000			
Naho ₂	0,00	0,00	40,11	10,99	0,36	1,23	0,70	0,36	0,00	53,74	56,43	0,91
Naho ₃ (% acide gras)	0,00	0,00	45,42	6,48	0,16	1,45	0,2700	0,140	0,000			
Naho ₃	0,00	0,00	40,81	11,73	0,44	1,19	0,70	0,33	0,00	55,20	60,12	1,67
Naya ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	44,61	5,98	0,15	1,46	0,2600	0,150	0,000			
Naya ₁	0,00	0,00	40,08	10,82	0,41	1,19	0,68	0,36	0,00	53,54	58,88	1,80
Noum ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	42,88	6,37	0,14	1,60	0,3400	0,160	0,110			
Noum ₁	0,00	0,00	38,53	11,53	0,38	1,31	0,89	0,38	0,08	53,09	54,79	0,57
Oubr ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	43,96	5,91	0,15	1,50	0,2600	0,150	0,000			
Oubr ₁	0,00	0,00	39,50	10,70	0,41	1,23	0,68	0,36	0,00	52,86	54,04	0,39
Sang ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	44,19	6,14	0,14	1,64	0,2800	0,170	0,120			
Sang ₁	0,00	0,00	39,70	11,11	0,38	1,34	0,73	0,40	0,08	53,76	55,93	0,73
Siss ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	43,46	6,19	0,14	1,70	0,2700	0,170	0,000			
Siss ₁	0,00	0,00	39,05	11,20	0,38	1,39	0,70	0,40	0,00	53,13	61,34	2,76
Siss ₂ (% acide gras)	0,10	0,00	40,78	6,06	0,14	1,49	0,2700	0,150	0,110			
Siss ₂	0,11	0,00	36,64	10,97	0,38	1,22	0,70	0,36	0,08	50,45	56,15	1,90
Yate ₁ (% acide gras)	0,00	0,00	44,99	6,38	0,16	1,62	0,2900	0,160	0,000			
Yate ₁	0,00	0,00	40,42	11,55	0,44	1,32	0,76	0,38	0,00	54,87	58,50	1,23
Degom (% acide gras)	0,00	0,00	44,67	5,97	0,11	1,49	0,3	0,150	0,120			
Degom	0,00	0,00	40,14	10,80	0,30	1,22	0,78	0,36	0,08	53,68	54,61	0,31

IO/GC : Indice d'iode déduit par GC ; IO/Wijs : Indice d'iode obtenu par titrimétrie

III.2.4. Composés organiques volatiles

Au total, 80 composés ont été identifiés pour l'ensemble des 4 échantillons testés (tableau 34). Pour l'échantillon Houe₁, 47 composés ont été identifiés, dont les composés majeurs (exprimés en fonction des composés volatils totaux, % m/m) étaient la n-hexane (8,88 %), l'heptane 2,2,4,6,6-pentaméthyl-(5,21 %), le dl-limonène (5,81 %), l'acide acétique (13,22 %), le guaiacol (3,09 %) et le phénol (5,28 %). Pour l'échantillon Kadi₂, 33 composés ont été identifiés, avec comme formes majoritaires, l'hexane (8,06 %), le pentanal (16,11 %), le n-hexanal (4,99 %), le dl-limonene (15,82 %), et l'acide acétique (20,14 %). Trente-cinq (35) composés volatiles ont été identifiés pour l'échantillon Oubr₁, dont les composés majoritairement présents étaient l'éthylcaproate (8,85 %), l'acide acétique (8,34 %), l'acide butanoïque (14,27 %), l'acide pentanoïque (14,01 %), l'acide hexanoïque (23,66 %). L'échantillon Yate₁ comptait 26 composés différents (figure 21), parmi lesquels l'éthylcaproate (2,36 %), l'acide acétique (2,56 %), l'acide propanoïque (2,29 %), l'acide butanoïque (18,34 %), l'acide pentanoïque (30,85 %) et l'acide hexanoïque (29,78 %). Les conditions expérimentales pour l'acquisition des données ont été décrites au paragraphe II.4.4. Composés organiques volatiles.

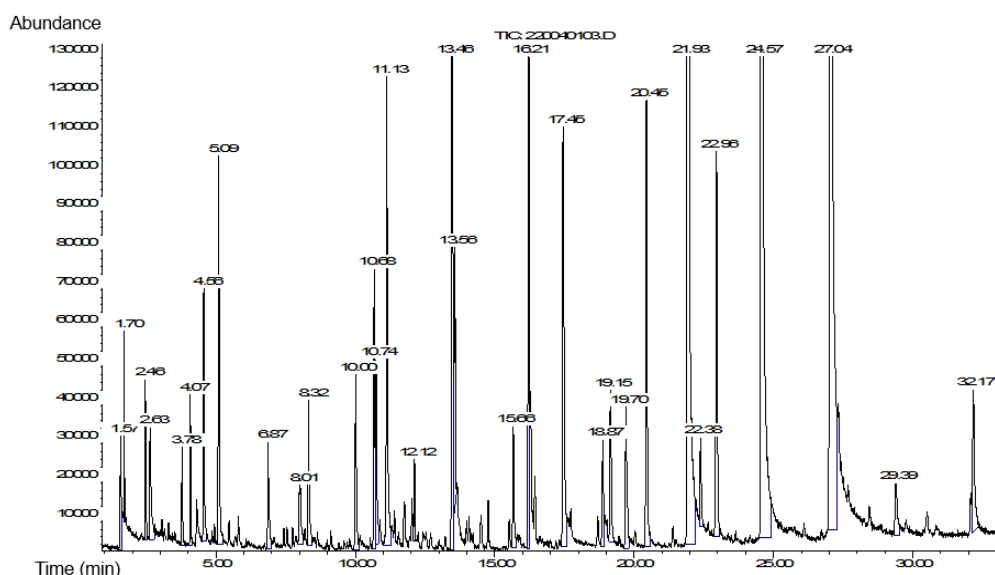


Figure 21: Exemple de chromatogrammes des composés organiques volatiles de l'échantillon Yate₁.

Tableau 34 (1/2) : Profil (% m/m) des composés organiques volatiles par échantillon de beurre de karité cibles

N°	Composés	Rt (min)	CAS	Houe ₁ (%)	Oubr ₁ (%)	Kadi ₂ (%)	Yate ₁ (%)
1	Hexane (CAS) \$\$\$\$ n-Hexane \$\$\$\$ Skellysolve B \$\$\$\$ n-C ₆ H ₁₄ \$\$\$\$ Esani \$\$\$\$ Heksan	1,705	000110-54-3	8,88%	0,86%	8,06%	0,36%
2	1-Pentene. 2-methyl- \$\$\$\$ 2-Methyl-1-pentene \$\$\$\$ 4-Methyl-4-pentene	1,776	000763-29-1	0,34%	-	-	-
3	Hexane. 3-methyl- \$\$\$\$ 2-Ethylpentane \$\$\$\$ 3-Methylhexane	1,829	000589-34-4	-	-	0,60%	-
4	Heptane (CAS) \$\$\$\$ n-Heptane \$\$\$\$ Skellysolve c \$\$\$\$ Heptyl hydride \$\$\$\$ Dipropylmethane	1,894	000142-82-5	-	-	1,57%	-
5	Heptane. 4-methyl- \$\$\$\$ 4-Methylheptane \$\$\$\$ (n-C ₃ H ₇) ₂ CHCH ₃	2,135	000589-53-7	0,58%	-	0,48%	-
6	Octane (CAS) \$\$\$\$ n-Octane \$\$\$\$ Octane (DOT) \$\$\$\$ Isooctane \$\$\$\$ n-C ₈ H ₁₈ \$\$\$\$ Oktan	2,329	000111-65-9	-	-	0,88%	-
7	Acetone	2,458	000067-64-1	-	-	-	0,50%
8	Cyclotrisiloxane. hexamethyl- (CAS) \$\$\$\$ 1.1.3.3.5.5-Hexamethyl-Cyclohexasiloxane	2,629	000541-05-9	0,57%	-	-	0,66%
9	Octane. 4-methyl-	2,805	002216-34-4	0,52%	-	0,51%	-
10	Furan. 3-methyl- (CAS) \$\$\$\$ 3-Methylfuran	2,964	000930-27-8	0,19%	-	-	-
11	2,4-Dimethyl-1-heptene	3,052	019549-87-2	1,46%	-	1,79%	-
12	Acetic acid. ethyl ester (CAS) \$\$\$\$ Acetic acid ethyl ester (CAS) \$\$\$\$ Ethyl acetate	3,152	000141-78-6	0,53%	-	-	-
13	Methylene Chloride	3,776	000075-09-2	3,25%	0,72%	3,20%	0,34%
14	Benzene	3,882	000071-43-2	0,49%	-	1,07%	-
15	Heptane. 2.2.4.6.6-pentamethyl-	4,076	013475-82-6	5,21%	-	-	0,50%
16	Cyclotetrasiloxane. octamethyl- (CAS)	4,305	000556-67-2	0,58%	-	-	-
17	Pentanal (CAS) \$\$\$\$ n-Pentanal \$\$\$\$ n-Valeraldehyde \$\$\$\$ Valeral \$\$\$\$ Valeraldehyde	4,552	000110-62-3	11,56%	1,19%	16,11%	0,92%
18	.alpha.-Pinene \$\$\$\$ Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene. 2.6.6-trimethyl- \$\$\$\$ 2-Pinene	5,346	000080-56-8	-	-	0,70%	-
19	Chloroform \$\$\$\$ Methane. trichloro- (CAS) \$\$\$\$ R 20 \$\$\$\$ Freon 20 \$\$\$\$ Trichloroform	5,458	000067-66-3	1,17%	-	1,36%	-
20	Butanoic acid. ethyl ester	5,793	000105-54-4	-	0,32%	-	-
21	Benzene. methyl- (CAS) \$\$\$\$ Toluene \$\$\$\$ CP 25 \$\$\$\$ Methylbenzene \$\$\$\$ Toluol	5,823	000108-88-3	3,15%	-	1,79%	-
22	Ethane. 1.2-dichloro- (CAS) \$\$\$\$ Ethylene chloride \$\$\$\$ EDC \$\$\$\$ 1.2-Dichloroethane	6,57	000107-06-2	-	-	0,67%	-
23	Hexanal (CAS) \$\$\$\$ n-Hexanal \$\$\$\$ Hexaldehyde \$\$\$\$ Caproaldehyde \$\$\$\$ Capronaldehyde	6,887	000066-25-1	3,55%	0,54%	4,99%	0,55%
24	.beta.-Pinene \$\$\$\$ Bicyclo[3.1.1]heptane. 6.6-dimethyl-2-methylene-	7,411	000127-91-3	-	-	3,98%	-
25	Cyclopentasiloxane. decamethyl- \$\$\$\$ Decamethylcyclopentasiloxane	7,781	000541-02-6	0,62%	-	-	-
26	Butanoic acid. propyl ester (CAS) \$\$\$\$ Propyl butyrate \$\$\$\$ Propyl butanoate	7,993	000105-66-8	-	0,57%	-	-
27	3-Penten-2-one. (E)- \$\$\$\$ (E)-3-Penten-2-one \$\$\$\$ trans-3-Penten-2-One	8,011	003102-33-8	-	-	-	0,50%
28	p-Xylene	8,24	000106-42-3	0,74%	-	-	-
29	Pentanoic acid. ethyl ester (CAS) \$\$\$\$ Ethyl n-valerate \$\$\$\$ Ethyl valerate	8,328	000539-82-2	-	2,04%	-	0,67%
30	Benzene. 1.3-dimethyl-	8,411	000108-38-3	1,62%	-	-	-
31	Propanoic acid. butyl ester (CAS) \$\$\$\$ Butyl propionate \$\$\$\$ Butyl propanoate	8,493	000590-01-2	-	0,26%	-	-
32	.beta.-Myrcene \$\$\$\$ 1.6-Octadiene. 7-methyl-3-methylene- (CAS)	9,14	000123-35-3	0,44%	-	0,55%	-
33	p-Xylene	9,622	000106-42-3	1,15%	-	-	-
34	dl-limonene \$\$\$\$ Cyclohexene. 1-methyl-4-(1-methylethenyl)- (CAS)	10,016	000138-86-3	5,81%	1,91%	15,82%	0,87%
35	Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene. 4-methyl-1-(1-methylethyl)- \$\$\$\$ 2-Thujene	10,258	028634-89-1	-	-	0,34%	-
36	Butanoic acid. butyl ester (CAS) \$\$\$\$ n-Butyl n-butyrate \$\$\$\$ Butyl butylate	10,669	000109-21-7	-	2,72%	-	1,17%
37	Pentanoic acid. propyl ester \$\$\$\$ Valeric acid. propyl ester	10,74	000141-06-0	-	-	-	0,93%
38	Benzene. 1-ethyl-4-methyl- (CAS) \$\$\$\$ p-Ethyltoluene \$\$\$\$ 1-Methyl-4-ethylbenzene	10,816	000622-96-8	0,77%	-	-	-
39	Hexanoic acid. ethyl ester (CAS) \$\$\$\$ Ethyl N-Caproate \$\$\$\$ Ethyl caproate	11,128	000123-66-0	-	8,85%	-	2,36%
40	Benzene. 1-ethyl-3-methyl- (CAS) \$\$\$\$ m-Ethyltoluene \$\$\$\$ 1-Methyl-3-ethylbenzene	11,352	000620-14-4	0,32%	-	-	-

Tableau 34 (2/2) : Profil (% m/m) des composés organiques volatiles par échantillon de beurre de karité cibles (suite)

N°	Composés	Rt (min)	N° CAS	Houe ₁ (%)	Oubr ₁ (%)	Kadi ₂ (%)	Yate ₁ (%)
41	Gamma.-Terpinene \$\$ 1.4-Cyclohexadiene. 1-methyl-4-(1-methylethyl)- (CAS)	11,405	000099-85-4	0,46%	0,25%	1,35%	-
42	1-Pentanol (CAS) \$\$ Amylol \$\$ n-Pentanol \$\$ Amyl alcohol \$\$ n-Pentan-1-ol	11,54	000071-41-0	2,31%	-	-	-
43	Styrene \$\$ Benzene. ethenyl- \$\$ Bulstren K-525-19 \$\$ Cinnamene \$\$ Phenethylene	11,758	000100-42-5	2,50%	0,35%	0,77%	-
44	Isoamylbutyrate \$\$ Iso amyl n-butyrate \$\$ Butanoic acid. 1-methylbutyl ester	12,022	060415-61-4	-	0,38%	-	-
45	Benzene. 1-methyl-4-(1-methylethyl)- (CAS) \$\$ p-Cymene	12,111	000099-87-6	-	-	2,24%	0,34%
46	Benzene. 1-methyl-2-(1-methylethyl)-	12,116	000527-84-4	2,40%	0,84%	-	-
47	Benzene. 1.2.3-trimethyl- (CAS) \$\$ 1.2.3-Trimethylbenzene	12,428	000526-73-8	1,55%	-	-	-
48	2-Butanone. 3-hydroxy- \$\$ gamma.-Hydroxy-.beta.-oxobutane \$\$ Acetoin	12,528	000513-86-0	-	0,29%	2,79%	-
49	Octanal \$\$ n-Caprylaldehyde \$\$ n-Octaldehyde \$\$ n-Octanal \$\$ n-Octylal	12,681	000124-13-0	-	-	0,28%	-
50	Pentanoic acid. butyl ester \$\$ Valeric acid. butyl ester \$\$ Butyl pentanoate	13,457	000591-68-4	-	2,35%	-	-
51	Propyl hexanoate \$\$ Propyl Hexoate \$\$ Propyl caproate \$\$ Propyl Carpoate	13,563	000626-77-7	-	-	-	1,02%
52	Heptanoic acid. ethyl ester (CAS) \$\$ Ethyl heptanoate \$\$ Wine oil \$\$ Grape oil	13,993	000106-30-9	-	0,93%	-	-
53	6-Methyl-5-hepten-2-one \$\$ 5-Hepten-2-one. 6-methyl- (CAS)	14,069	000110-93-0	0,31%	-	0,30%	-
54	2-Nonanone (CAS) \$\$ Methyl heptyl ketone \$\$ Nonan-2-one \$\$ Heptyl methyl ketone	15,516	000821-55-6	0,56%	-	-	-
55	Nonanal \$\$ n-Nonaldehyde \$\$ n-Nonanal \$\$ n-Nonylaldehyde \$\$ Nonaldehyde	15,657	000124-19-6	1,18%	0,41%	1,03%	0,63%
56	Cyclohexanecarboxylic acid. ethyl ester	16,434	003289-28-9	-	2,01%	-	-
57	Octanoic acid. ethyl ester (CAS) \$\$ Ethyl caprylate \$\$ Ethyl octanoate	16,804	000106-32-1	-	0,41%	-	-
58	Acetic acid (CAS) \$\$ Ethylic acid \$\$ Vinegar acid \$\$ Ethanoic acid	17,445	000064-19-7	13,22%	8,34%	20,14%	2,56%
59	2-Furancarboxaldehyde (CAS) \$\$ Furfural \$\$ 2-Furaldehyde \$\$ Fural \$\$ Furole	17,634	000098-01-1	-	0,87%	-	-
60	Pyrazine. tetramethyl- (CAS) \$\$ Tetramethylpyrazine \$\$ BS factor	17,728	001124-11-4	2,70%	-	-	-
61	Indene-2-D1 \$\$ 1H-Indene-2-d (CAS) \$\$ 2-Deuterioindene \$\$ Indene-1-D1	18,081	050613-68-8	0,17%	-	-	-
62	Hexanoic acid. pentyl ester	18,869	000540-07-8	-	-	-	0,59%
63	2-Cyclopenten-1-one. 3-methyl- (CAS) \$\$ 3-Methyl-2-cyclopentenone	18,928	002758-18-1	0,24%	-	-	-
64	Benzaldehyde (CAS) \$\$ Phenylmethanal \$\$ Benzenecarbonal \$\$ Benzaldehyde FFC	19,145	000100-52-7	1,19%	0,54%	1,38%	0,87%
65	Propanoic acid (CAS) \$\$ Propionic acid \$\$ Prozoin \$\$ Luprosil \$\$ Luprisol	19,692	000079-09-4	-	1,71%	0,60%	0,88%
66	Propanoic acid. 2-methyl- (CAS) \$\$ Isobutyric acid \$\$ Isobutanoic acid	20,445	000079-31-2	-	-	-	2,29%
67	Butanoic acid	21,957	000107-92-6	1,65%	14,27%	1,26%	18,34%
68	Ethanone. 1-phenyl- (CAS) \$\$ Acetophenone \$\$ Phenyl methyl ketone \$\$ Hypnon	22,386	000098-86-2	1,45%	0,73%	-	0,46%
69	2-Furanmethanol (CAS) \$\$ Furfuryl alcohol \$\$ Furfuralcohol \$\$ Furyl alcohol	22,669	000098-00-0	0,42%	0,24%	-	-
70	Naphthalene (CAS) \$\$ White tar \$\$ Naphtaline \$\$ Naphthene \$\$ Albocarbon	24,545	000091-20-3	0,94%	-	-	-
71	Pentanoic acid (CAS) \$\$ Valeric acid \$\$ n-Valeric acid \$\$ Valerianic acid	24,568	000109-52-4	-	14,01%	1,22%	30,85%
72	Hexanoic acid \$\$ Caproic acid \$\$ n-Caproic acid \$\$ n-Hexanoic acid	27,033	000142-62-1	-	23,66%	1,40%	29,78%
73	Phenol. 2-methoxy- (CAS) \$\$ Guaiacol \$\$ o-Methoxyphenol \$\$ Guajol \$\$ Guasol	27,327	000090-05-1	3,09%	0,68%	-	-
74	Heptanoic acid (CAS) \$\$ Heptoic acid \$\$ Enanthic acid \$\$ Heptylic acid	29,374	000111-14-8	-	2,67%	-	-
75	2-Methoxy-4-methylphenol \$\$ Phenol. 2-methoxy-4-methyl- \$\$ p-Cresol. 2-methoxy-	29,427	000093-51-6	1,29%	-	-	-
76	Ethanone. 1-(1H-pyrrol-2-yl)- \$\$ Ketone. methyl pyrrol-2-yl	29,756	001072-83-9	1,67%	-	-	-
77	Phenol	30,509	000108-95-2	5,28%	0,40%	0,76%	-
78	Benzeneethanol. 2-methoxy- (CAS) \$\$ Phenethyl alcohol. o-methoxy-	30,992	007417-18-7	0,54%	-	-	-
79	Phenol. 4-methyl-	32,074	000106-44-5	1,35%	0,76%	-	-
80	Cyclohexanecarboxylic acid \$\$ Benzoic acid. hexahydro-	32,162	000098-89-5	-	2,91%	-	1,09%

Rt : Temps de rétention.

Les résultats ont été obtenus selon les conditions chromatographiques décrites au point II.4.4. Caractérisations chimiques spécifiques et extraites à partir de la librairie « Mass Spectral Library 600K »

III.2.5. Composition en stérols

La détermination du profil en stérols des sept échantillons testés a permis d'identifier et de quantifier sept composés : cholestérol, campstérol, $\Delta 7$ -campestérol, β -sitostérol, $\Delta 5$ -avenastérol, $\Delta 7$ -stigmastérol et $\Delta 7$ -avenastérol, répartis entre les échantillons, comme le montre le tableau 35. La teneur totale en stérols variait donc de 0,0 mg/kg de beurre brut (Siss₁ - P₃ - de la région du Nando) à 838,7 mg/kg de beurre brut (Ioba₁ - P₂ - région du Djôrô). En dehors de l'échantillon Siss₁, le composé β -sitostérol était la forme majoritaire, présent dans tous les échantillons, suivi du $\Delta 7$ -Avenastérol. Leurs teneurs étaient comprises entre [40,9 mg/kg (Ioba₂) - 612,6 mg/kg (Ioba₁)] et [20,3 mg/kg (Ioba₂) - 142,6 mg/kg (Yate₁)], respectivement. La figure 22 illustre un chromatogramme de l'échantillon Yate₁.

Les conditions expérimentales pour l'acquisition des données ont été décrites au paragraphe II.4.5. Composition en stérols.

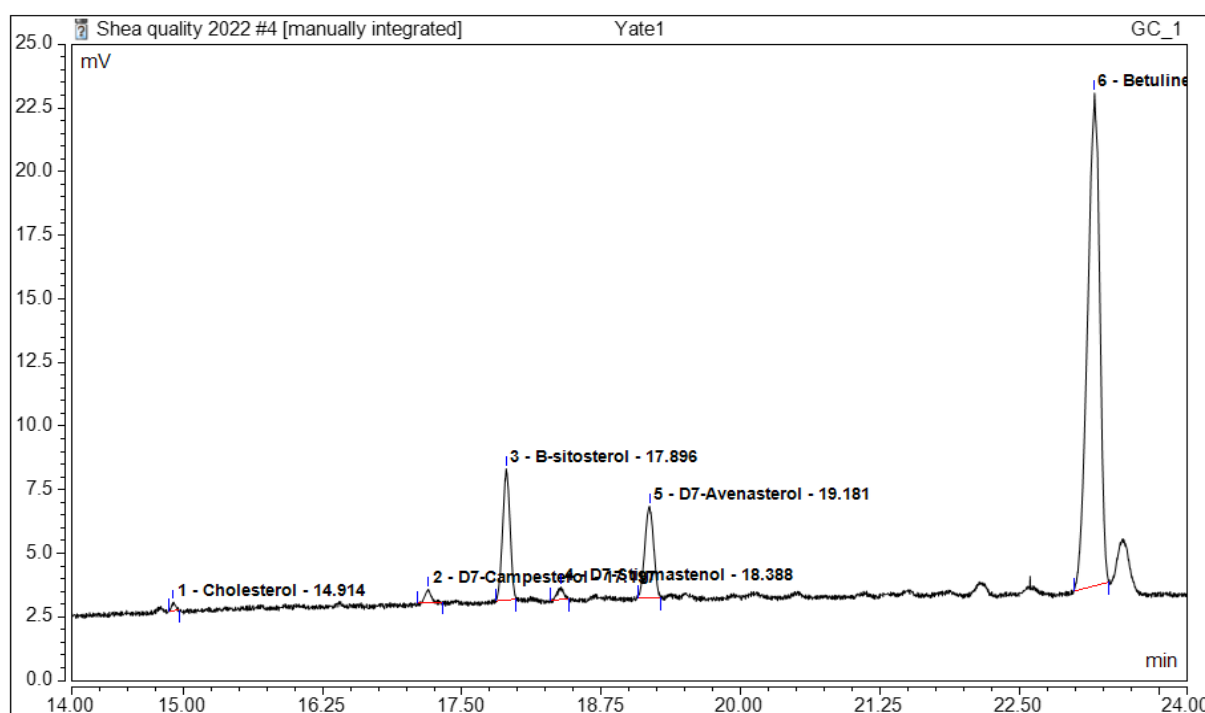


Figure 22: Exemple de chromatogrammes des composés stéroliques de l'échantillon Yate₁

Tableau 35 : Profil en stérols (mg/kg) des échantillons cibles de beurre de karité du Burkina Faso

Composés (mg/kg)	Gour ₁	Houe ₅	Kadis	Ioba ₁	Ioba ₂	Siss ₁	Yate ₁
Cholestérol	15,1	4,6	2,8	10,0	2,4	0,0	5,8
Campestérol	13,3	7,0	0,0	18,7	0,0	0,0	0,0
Δ 7-Campestérol	0,0	3,8	0,0	15,6	0,0	0,0	13,2
β -sitostérol	401,4	226,0	51,5	612,6	40,9	0,0	170,6
Δ 5-avenastérol	33,4	8,0	0,0	24,9	0,0	0,0	0,0
Δ 7-Stigmastérol	0,0	6,0	0,0	17,0	0,0	0,0	13,6
Δ 7-Avenastérol	39,3	56,0	24,0	139,9	20,3	0,0	142,6
Total	502,5	311,3	78,3	838,7	63,6	0,0	345,9

III.2.6. Degré de coloration

Les résultats des indices de couleur mesurés par le système de couleur Lovibond (L^* a^* b^*) ont été présentés dans le tableau 36. Les résultats des 37 échantillons indiquent que les formes solides de BK présentaient des valeurs de clarté (L^*) comprises entre $61,5 \pm 0,1$ (Naya₁ - P₅) et $82,0 \pm 0,1$ (Gour₁ - P₁). Cinq échantillons parmi les plus clairs avaient des valeurs de clarté $L^* > 80,0$: respectivement Oubr₁, Como₃, Houe₆, Sang₁, Komo₁ et Gour₁. Contrairement au beurre solide, les valeurs (L^*) du beurre fondu étaient plus faibles et comprises entre $40,1 \pm 0,1$ (Naya₁ - P₅) et $66,9 \pm 0,3$ (Komo₁ - P₂). Quant aux 5 échantillons pilotes, les valeurs de clarté (L^*) des formes brutes étaient toutes $< 80,0$ et comprises entre 73,7 et 77,9. Pour la forme liquide, les valeurs étaient comprises entre 52,2 et 60,2. Les valeurs de l'indice b^* (de jaune à bleu) étaient dans l'intervalle $[13,3 \pm 0,1 - 30,1 \pm 0,1]$ et $[12,8 \pm 0,1 - 36,2 \pm 0,1]$, respectivement pour les échantillons bruts solides et fondus. Pour les 5 échantillons préliminaires, les résultats obtenus avec la forme solide étaient dans l'intervalle des 37 échantillons. Cependant, pour la forme fondue, les valeurs étaient nettement supérieures à celles des 37 échantillons et comprises entre 50,7 et 62,4. Dans sa forme fondue, l'échantillon industriel Degom avait une clarté L^* ($69,6 \pm 0,1$) supérieure à l'ensemble des échantillons testés.

Tableau 36 : Degré de coloration selon le système (L* a* b*) et indice de jaunissement des formes brutes et fondues des échantillons de beurre de karité collectés au Burkina Faso

Échantillon	L* (Brut)	L* (Fondu)	a* (Brut)	a* (Fondu)	b* (Brut)	b* (Fondu)	YI (Brut)	YI (Fondu)
Baze ₁	76,6±0,1	59,4±0,2	-0,4±0,1	-3,1±0,1	29,4±0,1	29,3±0,1	54,8±0,2	70,5±0,4
Boul ₁	76,0±0,1	58,9±0,2	-1,4±0,1	-3,5±0,1	23,7±0,2	24,8±0,1	44,6±0,4	60,2±0,4
Boulg ₁	77,8±0,1	65,4±0,1	-1,0±0,1	-2,7±0,1	19,5±0,1	12,9±0,1	35,8±0,1	28,2±0,2
Como ₁	78,9±0,1	61,8±0,1	-2,1±0,1	-2,7±0,1	20,5±0,1	13,5±0,1	37,1±0,2	31,2±0,1
Como ₂	79,8±0,2	58,6±0,1	-1,8±0,1	-4,3±0,1	22,4±0,1	20,4±0,1	40,0±0,2	49,6±0,1
Como ₃	80,2±0,1	63,5±0,1	-3,4±0,1	-4,6±0,1	24,4±0,2	19,4±0,1	43,4±0,4	44,0±0,1
Como ₄	75,1±0,1	62,1±0,3	0,9±0,1	-2,5±0,1	23,6±0,1	23,5±0,1	44,8±0,1	54,1±0,5
Gour ₁	82,0±0,1	60,0±0,1	-0,6±0,1	-4,8±0,1	24,7±0,3	23,7±0,1	43,0±0,5	56,4±0,2
Houe ₁	73,9±0,1	59,3±0,2	1,3±0,1	-2,0±0,1	26,0±0,3	25,5±0,1	50,3±0,6	61,4±0,2
Houe ₂	78,9±0,1	61,8±0,3	-0,2±0,1	-3,5±0,1	27,4±0,2	23,5±0,1	49,6±0,3	54,2±0,3
Houe ₃	72,6±0,2	55,1±0,2	0,9±0,1	-0,5±0,1	19,0±0,1	24,4±0,1	37,3±0,1	63,3±0,5
Houe ₄	67,4±0,1	61,2±0,2	2,1±0,1	-1,7±0,1	26,2±0,1	30,4±0,2	55,5±0,2	71,1±0,8
Houe ₅	79,9±0,1	61,3±0,1	-1,7±0,1	-3,1±0,1	18,4±0,1	21,9±0,1	32,8±0,2	51,1±0,3
Houe ₆	80,6±0,1	62,6±0,1	-1,0±0,1	-3,3±0,1	27,2±0,2	15,2±0,1	48,2±0,3	35,0±0,1
Ioba ₁	78,1±0,1	59,6±0,3	-0,6±0,1	-3,3±0,1	24,2±0,6	25,4±0,2	44,3±1,1	61,0±0,8
Ioba ₂	78,6±0,1	64,2±0,2	-1,5±0,1	-3,4±0,1	20,8±1,3	18,9±0,1	37,8±2,2	42,1±0,2
Kadi ₁	76,2±0,1	62,6±0,1	-1,7±0,1	-3,9±0,1	23,3±0,2	24,0±0,1	43,7±0,3	55,0±0,2
Kadi ₂	75,7±0,1	61,6±0,1	0,1±0,1	-3,6±0,1	25,5±0,1	34,6±0,1	48,1±0,2	80,3±0,3
Kadi ₃	79,3±0,1	62,9±0,1	-1,5±0,1	-3,5±0,1	23,5±0,3	17,1±0,1	42,3±0,6	38,8±0,1
Kadi ₄	77,7±0,1	60,2±0,2	-1,4±0,1	-3,0±0,1	21,2±0,1	27,5±0,1	38,9±0,1	65,1±0,2
Kadi ₅	74,1±0,1	61,1±0,4	1,2±0,1	-2,1±0,1	23,9±0,2	31,7±0,2	46,1±0,4	74,2±0,8
Kadi ₆	77,4±0,1	64,9±0,1	-2,3±0,1	-5,5±0,1	29,6±0,1	29,9±0,1	54,6±0,1	65,8±0,2
Kene ₁	68,2±0,1	59,6±0,2	0,8±0,1	-1,8±0,1	21,9±0,1	23,8±0,2	45,8±0,2	56,9±0,5
Komo ₁	81,0±0,1	66,9±0,3	-2,0±0,1	-3,3±0,1	18,7±0,1	12,8±0,1	33,0±0,1	27,3±0,2
Koul ₁	76,1±0,1	59,2±0,1	-0,3±0,1	-1,7±0,1	13,3±0,1	13,0±0,1	24,9±0,1	31,5±0,3
Koul ₂	79,7±0,2	60,7±0,5	-1,8±0,1	-3,5±0,1	23,1±0,2	20,0±0,1	41,4±0,5	47,1±0,3
Mouh ₁	75,6±0,1	60,7±0,3	-0,1±0,1	-2,3±0,1	18,0±0,5	20,8±0,1	34,1±1,1	49,0±0,3
Naho ₁	76,6±0,1	59,6±0,2	-1,5±0,1	-3,1±0,1	20,1±0,1	20,7±0,1	37,4±0,1	49,5±0,4
Naho ₂	79,5±0,1	60,7±0,1	-1,1±0,1	-2,4±0,1	17,9±0,2	14,9±0,1	32,2±0,4	35,0±0,2
Naho ₃	77,1±0,2	55,8±0,2	-2,0±0,1	-2,4±0,1	19,4±0,4	21,7±0,1	35,9±0,8	55,5±0,4
Naya ₁	61,5±0,1	40,1±0,1	2,9±0,1	6,1±0,1	21,5±0,1	36,2±0,1	50,0±0,2	128,8±0,1
Noum ₁	75,3±0,1	55,7±0,1	1,4±0,1	-0,9±0,1	25,2±0,2	33,2±0,1	47,9±0,4	85,2±0,2
Oubr ₁	80,0±0,1	62,5±0,1	-0,1±0,1	-3,4±0,1	30,1±0,1	18,1±0,1	53,7±0,1	41,3±0,1
Sang ₁	80,8±0,1	63,1±0,3	-1,5±0,1	-3,5±0,1	24,1±0,1	18,3±0,1	42,7±0,1	41,4±0,3
Siss ₁	76,1±0,1	58,0±0,2	-1,2±0,1	-1,8±0,1	14,8±0,1	17,4±0,1	27,9±0,1	43,0±0,2
Siss ₂	77,8±0,1	62,6±0,2	-0,1±0,1	-2,8±0,1	22,2±0,1	16,4±0,1	40,7±0,2	37,5±0,2
Yate ₁	71,8±0,2	55,9±0,2	-0,2±0,1	-3,0±0,1	28,4±0,2	31,8±0,1	56,5±0,2	81,2±0,4
Degom	79,8±0,1	69,6±0,1	-1,96±0,1	-3,0±0,1	19,9±0,2	7,7±0,1	35,7±0,3	15,9±0,2
Échantillons pilotes								
Lot ₁	76,6	57,5	-1,3	-1,5	27,2	62,4	50,7	155,1
Lot ₂	75,9	57,1	- 2,1	-1,9	26,8	60,9	50,5	152,5
Lot ₃	76,3	55,8	-0,4	-1,5	24,9	50,7	46,5	129,7
Lot ₄	73,7	52,2	-0,1	0,8	25,5	55,4	49,4	151,7
Lot ₅	77,9	60,2	-2,3	-4,3	27,4	56,5	50,3	134,0

Les analyses ont été faites en triplicat (n = 3) par échantillon et les valeurs moyennes ± écarts-types ont été reportées.

III.2.7. Indice de jaunissement

Les résultats des YI calculés à partir du système de couleur Lovibond ($L^* a^* b^*$) ont été présentés dans le tableau 36. Les YI des formes solides des 37 échantillons étaient compris entre $24,9 \pm 0,1$ (Koul₁ - P₁) et $56,5 \pm 0,2$ (Yate₁ - P₄). Ils étaient compris entre $27,3 \pm 0,2$ (Komo₁ - P₂) et $128,8 \pm 0,1$ (Naya₁ - P₅) pour les beurres fondus. Pour les échantillons pilotes, les résultats étaient compris entre (46,5 - 50,7) et (129,7 - 155,1) respectivement pour les formes solides et fondues. L'indice de jaunissement de la forme fondue de l'échantillon Degom avait la plus faible valeur ($15,9 \pm 0,2$) parmi tous les échantillons.

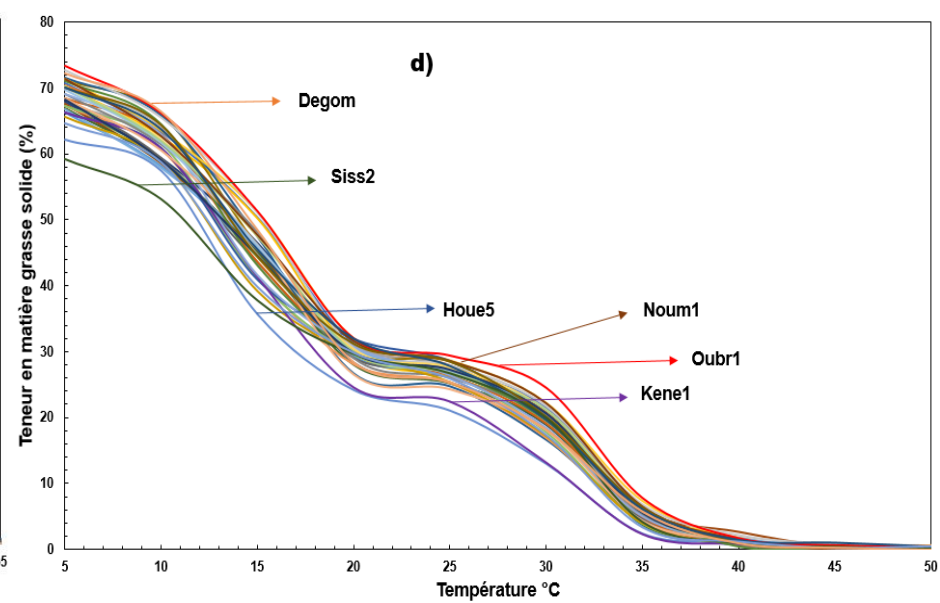
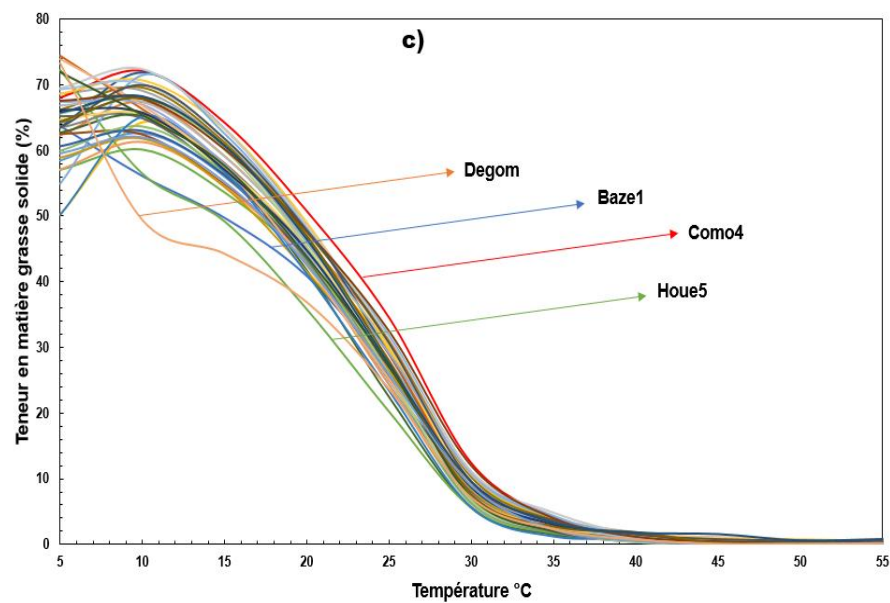
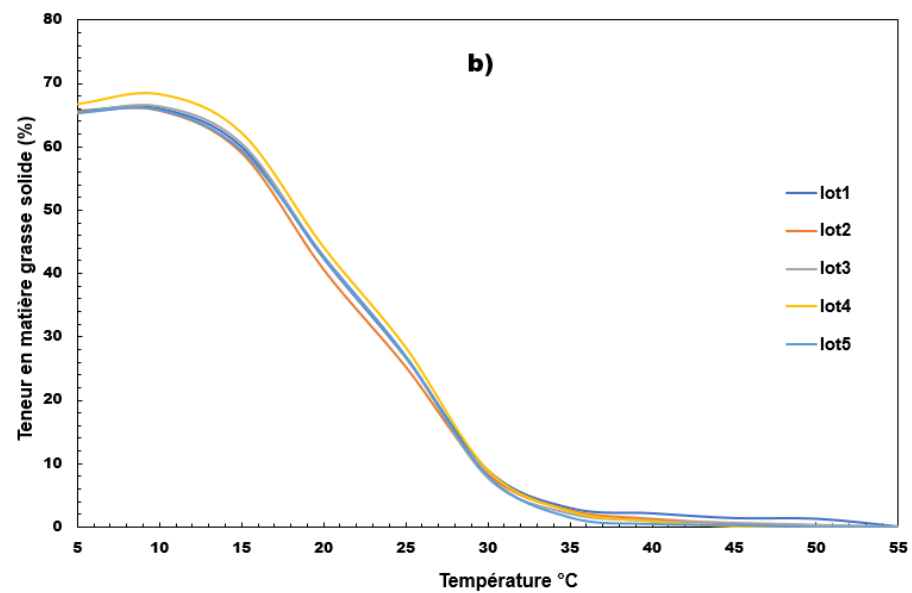
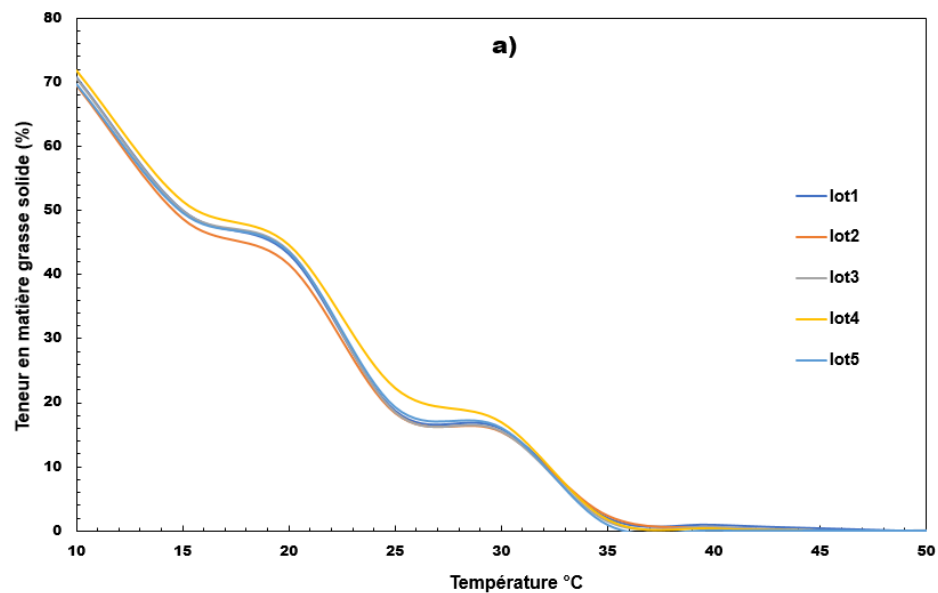
III.3. Caractéristiques thermiques du beurre de karité

III.3.1. Profil de fusion par RMNp

Les différents profils de fusion de l'ensemble des échantillons obtenus par *RMN pulsée* basse résolution (RMNp) sont présentés dans la figure 23. Les résultats ont montré que les échantillons lot₂ et lot₄ avaient les profils SFC les plus élevés pour les deux modes analytiques. Les profils SFC présentés dans la figure 23 c-e) illustrent ceux des 37 échantillons + Degom en mode série avec et sans prétraitement, de même que les profils les plus élevés et les plus bas selon les deux méthodes, respectivement. Les profils présentaient une diversité selon les échantillons. En mode sans prétraitement, les échantillons Siss₂, Kadi₁, Como₃, Ioba₂, Noum₁, Oubr₁ et Como₄, d'origines différentes, mais tous extraits selon la même méthode (P₁), présentaient des profils SFC plus élevés que ceux des autres. En revanche, les échantillons Houe₄ (P₁), Houe₅ (P₂) et Kene₁ (P₁), tous collectés dans la même région (Guiriko), ont présenté les profils SFC les plus bas. Le profil de l'échantillon Degom, en mode tempéré, présentait une allure différente des autres échantillons entre 5 °C et 20 °C comme illustré dans la figure 23c.

Les profils SFC des 37 échantillons + Degom en mode parallèle sans prétraitement et avec prétraitement sont présentés dans la figure 23 f-h. Les résultats ont montré que les profils étaient diversifiés, à l'image des profils en mode série. En mode sans prétraitement, les échantillons Oubr₁ (P₁) et Mouh₁ (P₃), d'origine différente, avaient les profils SFC les plus élevés (c'est-à-dire qu'une proportion importante de la matière grasse conserve une consistance semi-solide sur une plage de températures), contrairement aux échantillons Houe₅ (P₂), Kene₁ (P₁) et Siss₂

(P₁) qui avaient les profils les plus bas (c'est-à-dire que le SFC est faible sur une large plage de températures). Le profil de l'échantillon Degom était typiquement différent de ceux des autres échantillons, en mode sans prétraitement entre 5 °C et 20 °C comme illustré dans la figure 23f.



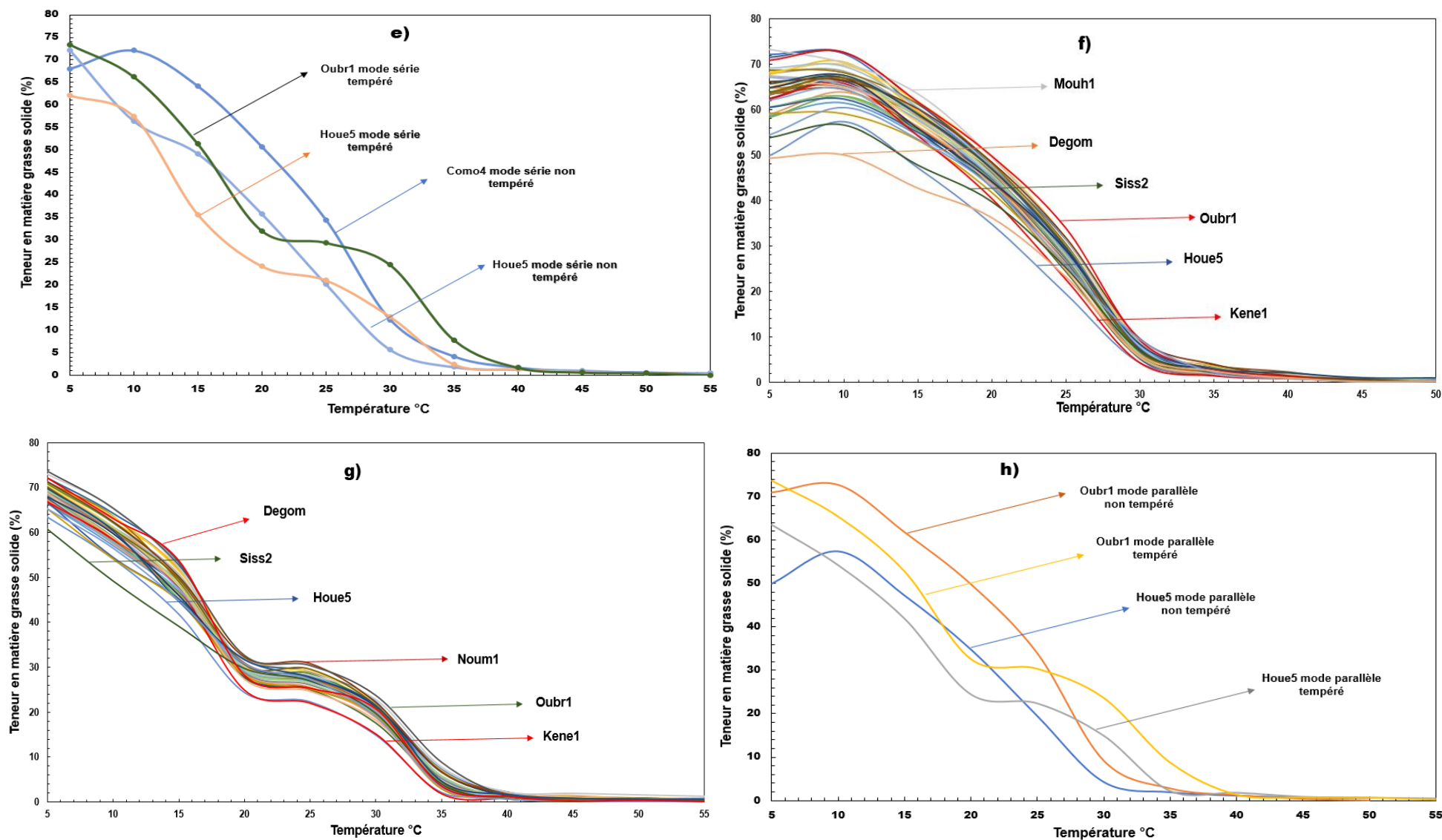
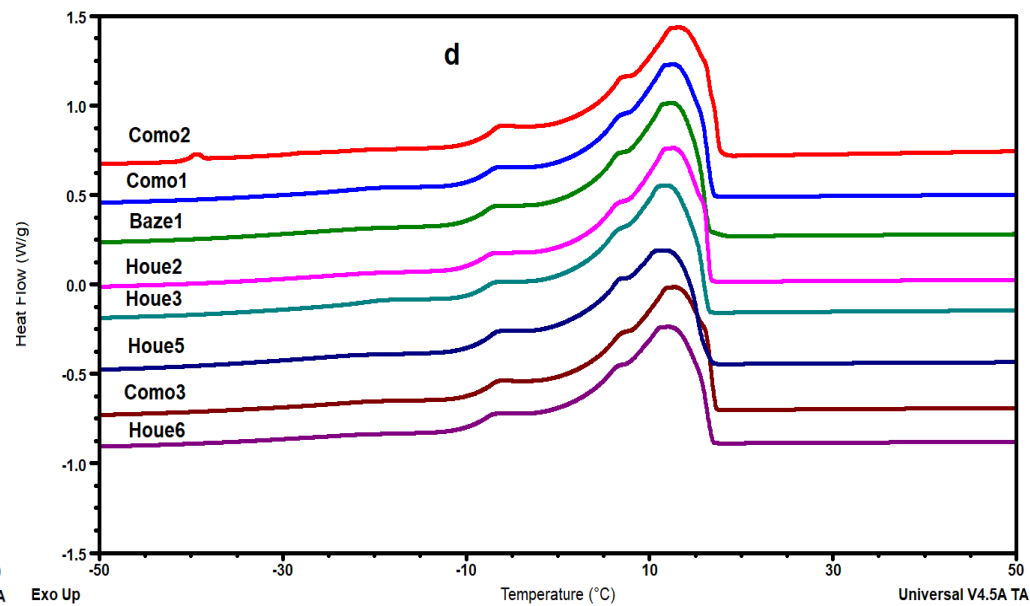
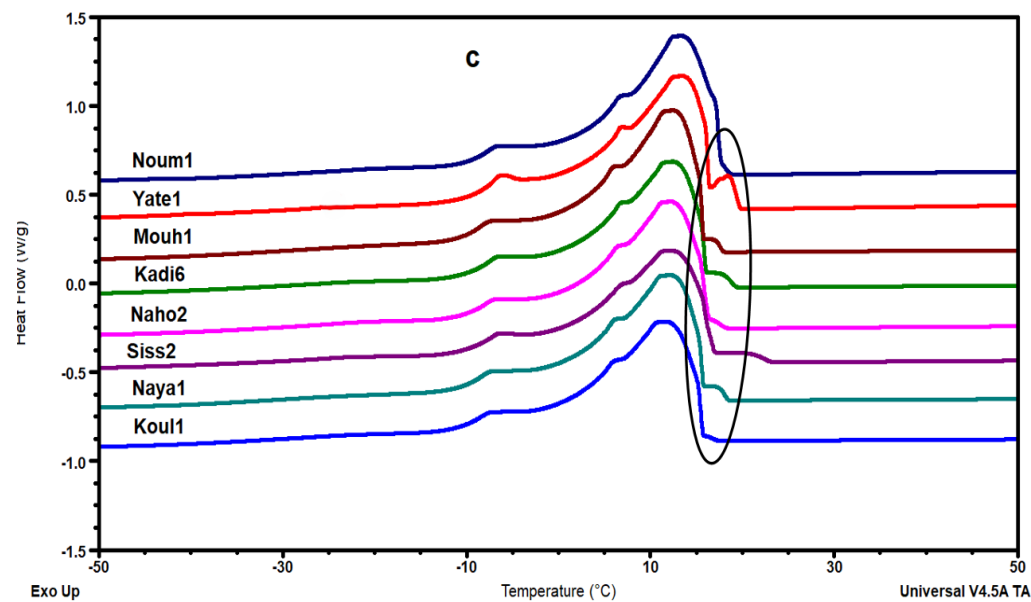
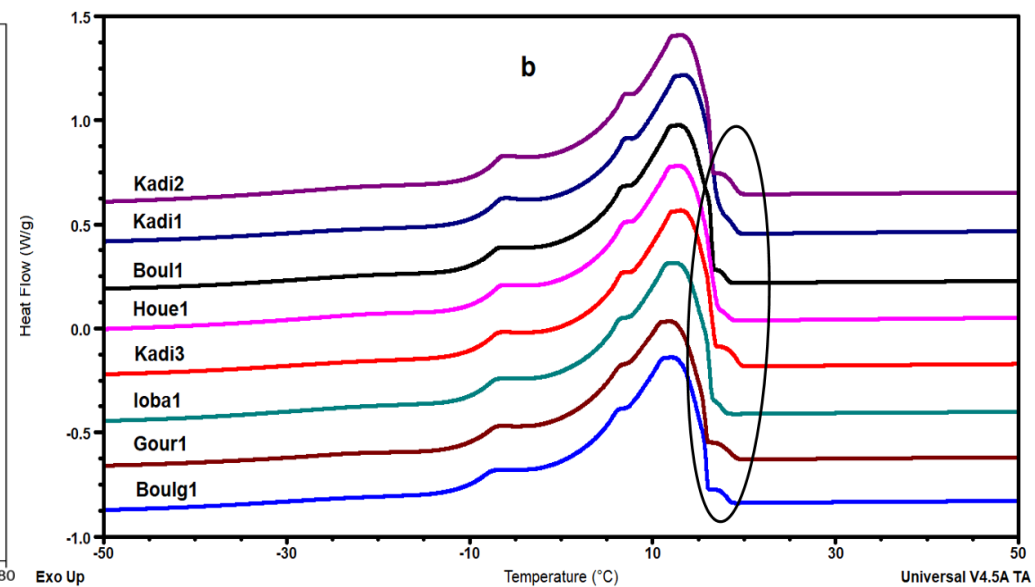
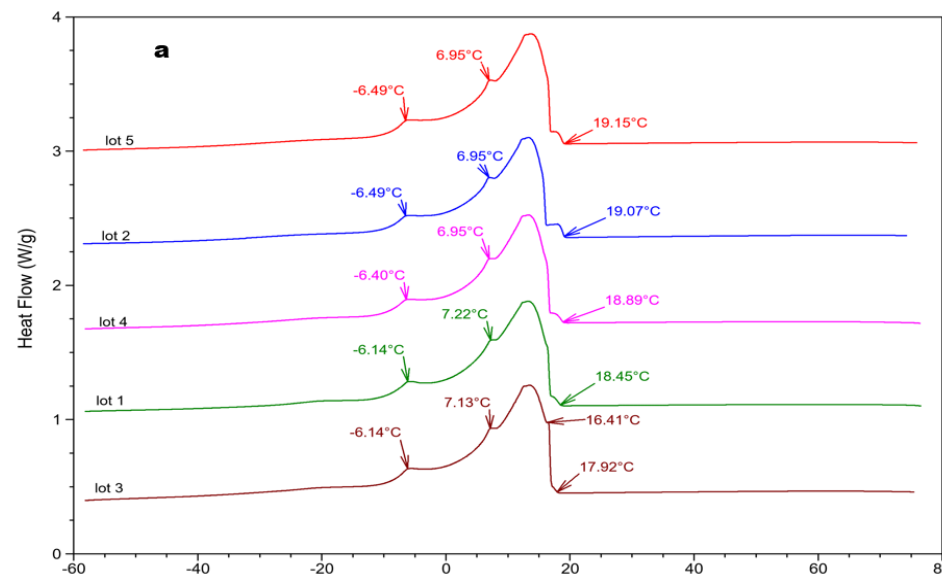
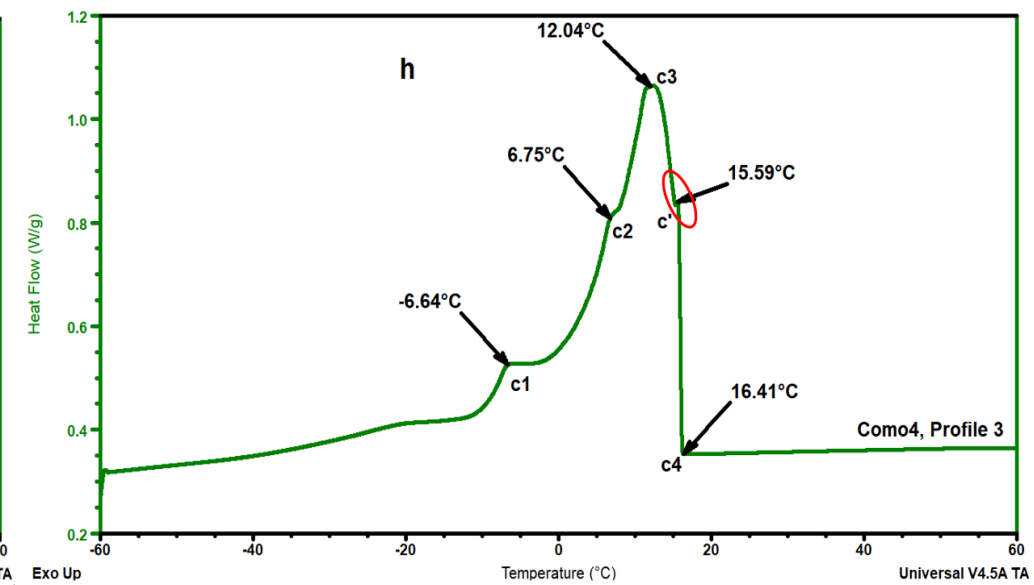
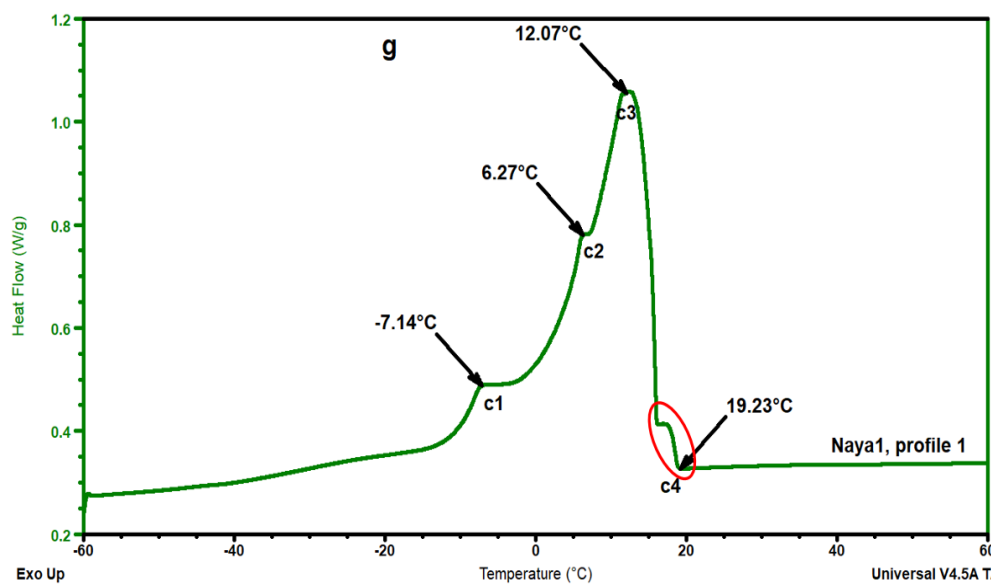
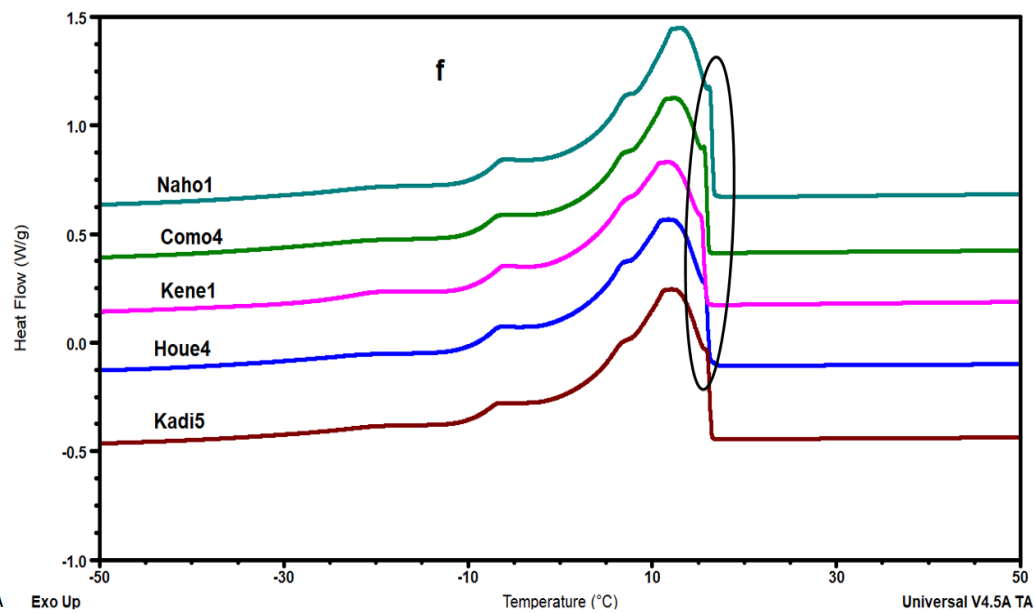
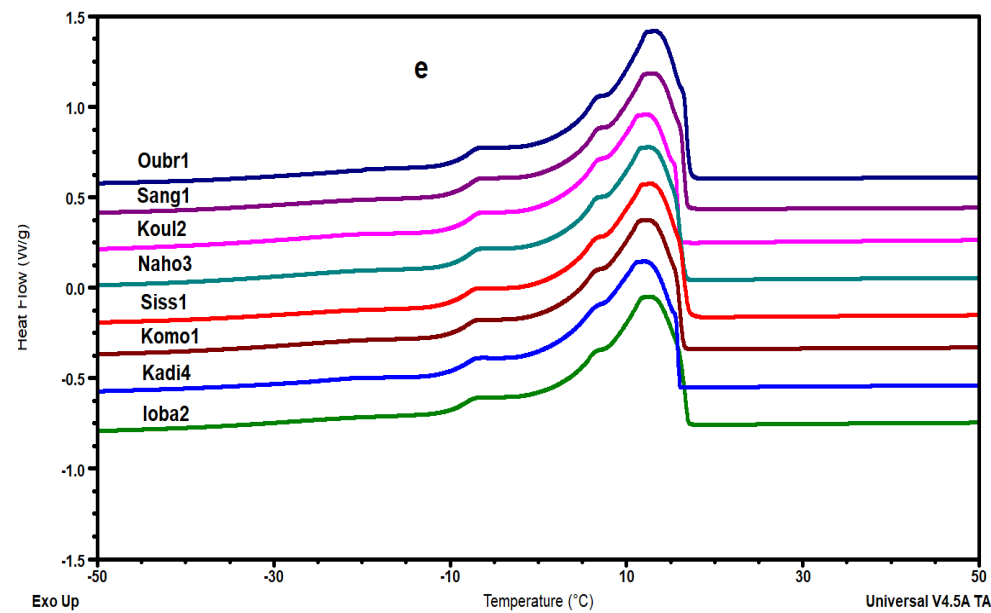


Figure 23: Profils de teneur en matières grasses solides de tous les échantillons de beurre de karité brut obtenus par RMNp avec les méthodes en série et en parallèle : **a)** SFC des échantillons pilotes en mode parallèle tempéré - **b)** SFC des échantillons pilotes en mode série non tempérée - **c)** SFC des 37 échantillons en mode série non tempérée - **d)** SFC des 37 échantillons en mode série tempérée - **e)** Échantillons présentant les profils de SFC les plus élevés et les plus bas selon les méthodes en série tempérée et non tempérée - **f)** SFC des 37 échantillons en mode parallèle non tempérée - **g)** SFC des 37 échantillons en mode parallèle tempérée - **h)** Échantillons présentant les profils de SFC les plus élevés et les plus bas selon les méthodes en parallèle tempérée et non tempérée. Les mesures ont été faites en triplicat ($n = 3$).

III.3.2. Profil de fusion et de cristallisation par ACD

Les thermogrammes de l'ensemble des 43 échantillons combinés (5 échantillons pilotes + 37 échantillons de mesure + 1 échantillon « Degom ») selon la méthode normalisée AOCS ont été présentés dans les figures 24 et 25, respectivement pour les profils de cristallisation et de fusion. Les caractéristiques thermiques de fusion et de cristallisation, telles que la température de début de cristallisation, la température de fusion complète, les enthalpies de fusion et les températures de transition exothermique et endothermique, ont été reportées dans le tableau 37. Les profils de cristallisation et de fusion des 5 échantillons pilotes ont été illustrés respectivement dans la figure 24a et la figure 25b, mettant en évidence leurs caractéristiques de cristallisation et leur similitude de fusion. Sont également mises en évidence les diversités du comportement thermique (cristallisation et fusion) des 37 échantillons collectés en lien avec leurs procédés d'extraction dans la figure 24 b-f et la figure 25 b-f, respectivement. Des profils illustratifs des thermogrammes de cristallisation des échantillons Naya₁ - Como₄ - Houe₃ et Degom d'une part ; ainsi que les thermogrammes de fusion des échantillons Sang₁ - Como₃ - Como₄ et Degom ont été présentés dans les figures 24 g-j et 25 g-j.





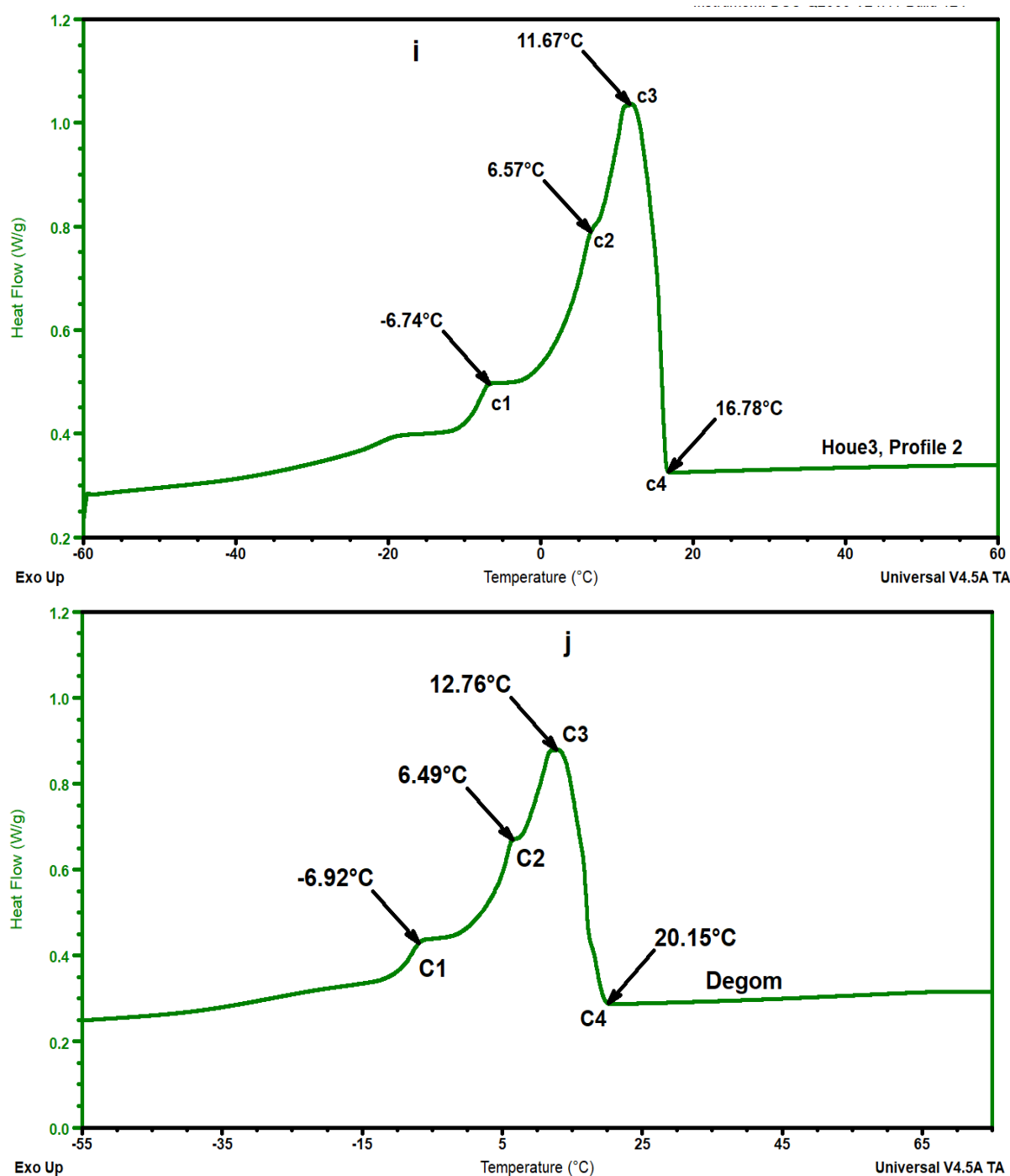
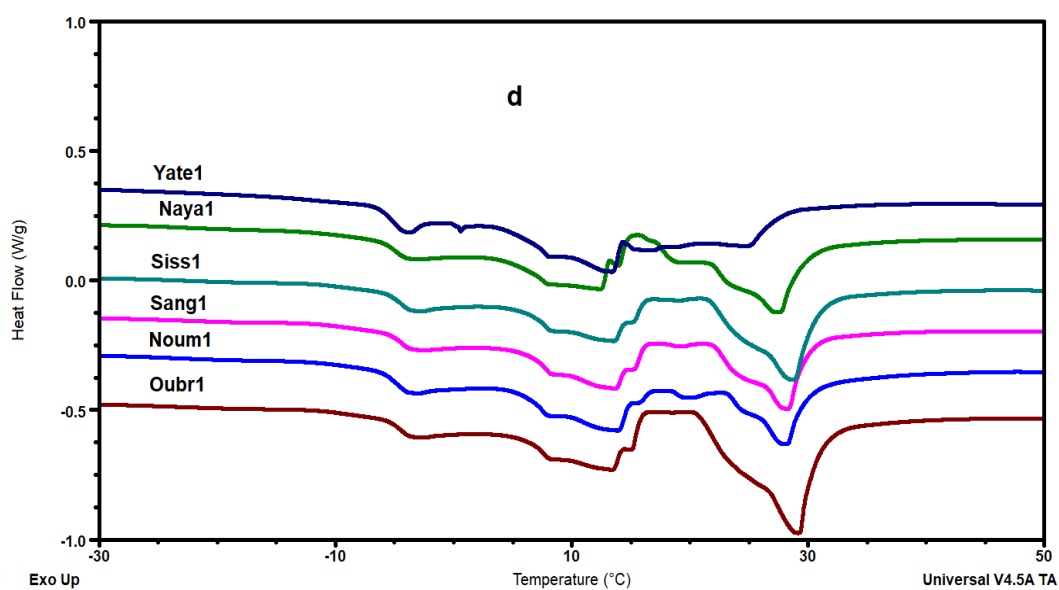
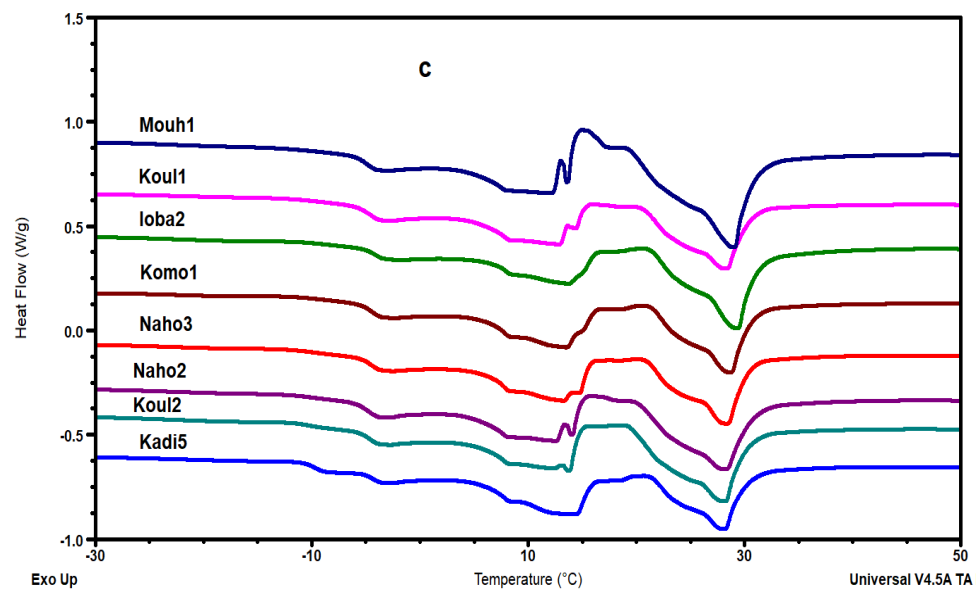
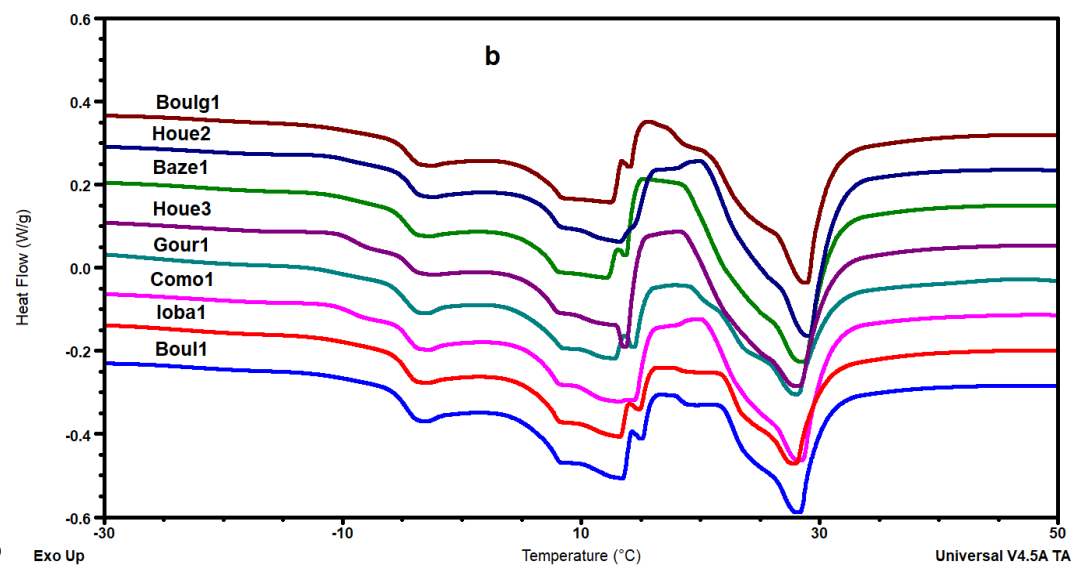
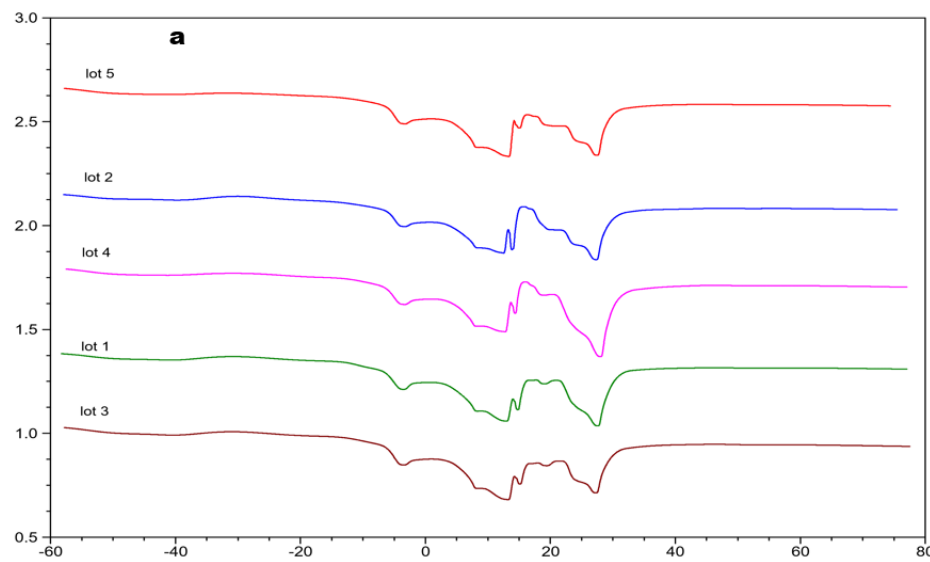
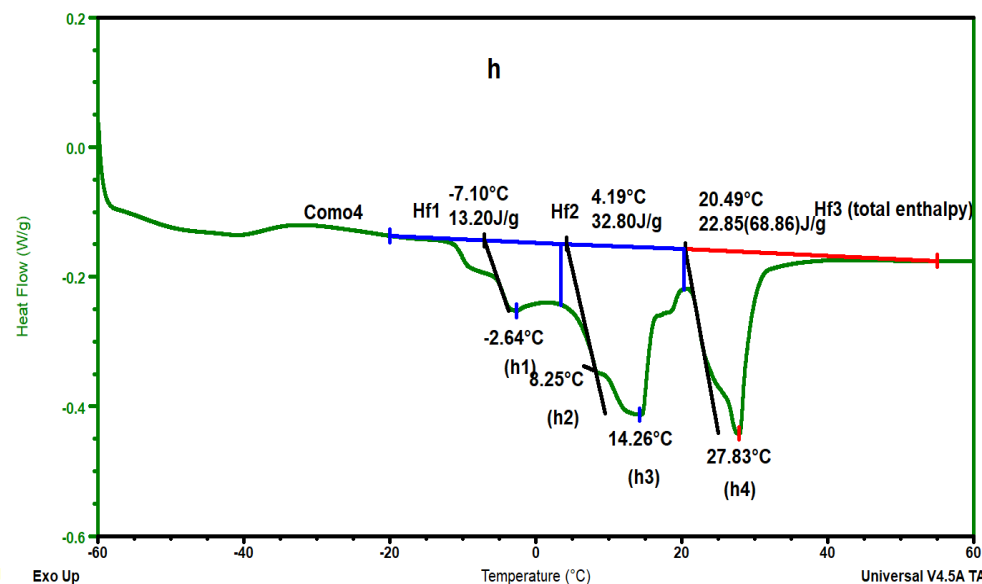
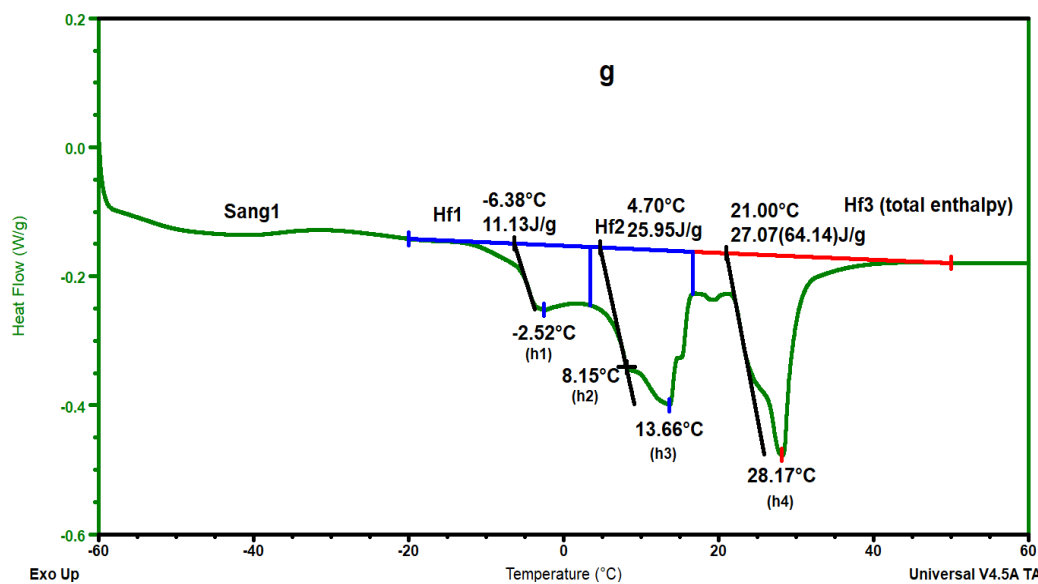
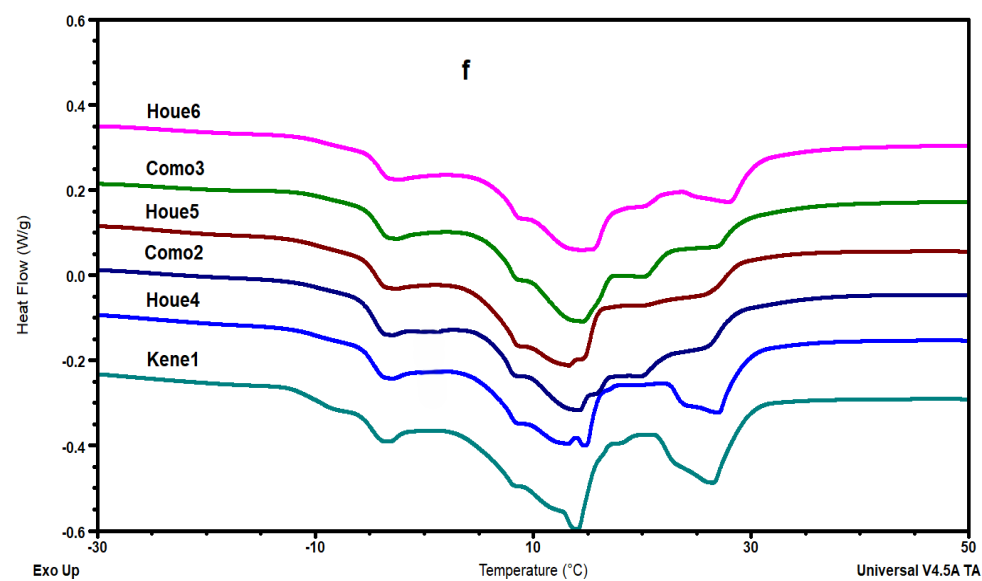
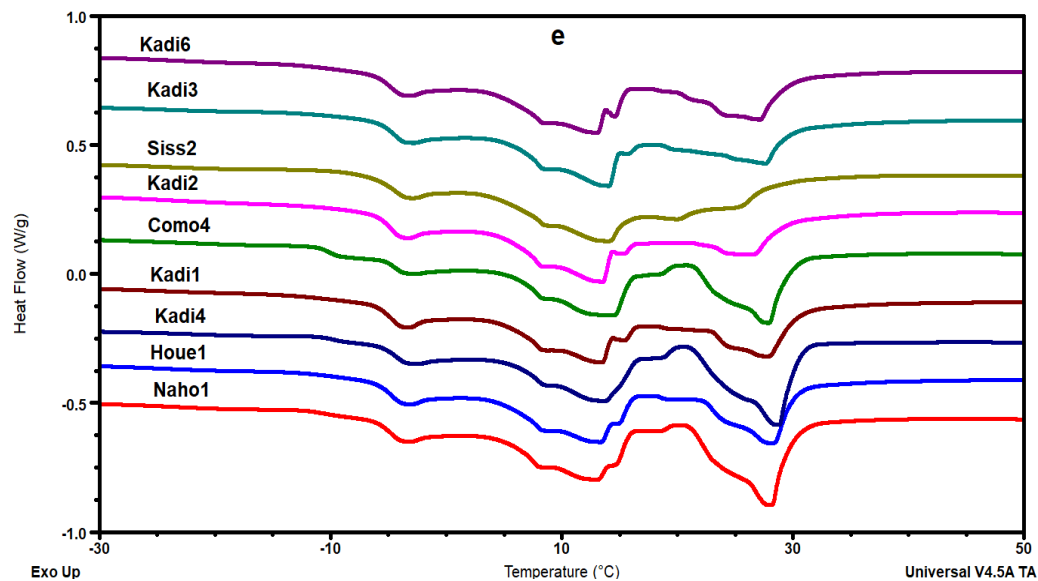


Figure 24: Diversité des profils de cristallisation par ACD des échantillons de beurre de karité. **a)** : Profils de cristallisation des 5 échantillons pilotes. Les profils de cristallisation illustratifs parmi les 37 échantillons pour les profils₁₋₂₋₃, ont été représentés sur la base de leurs similitudes en **b-c)** ; **d-e)** et **f)** respectivement. Les profils thermiques typiques de cristallisation illustrés en **g-i)** respectivement pour les profils₁₋₃₋₂, avec les températures de transition : c1, c2, c3 = T_{Peak} , c4 = T_{Onset} , et c' du profil₃; **j)** : Profil de cristallisation de l'échantillon Degom.





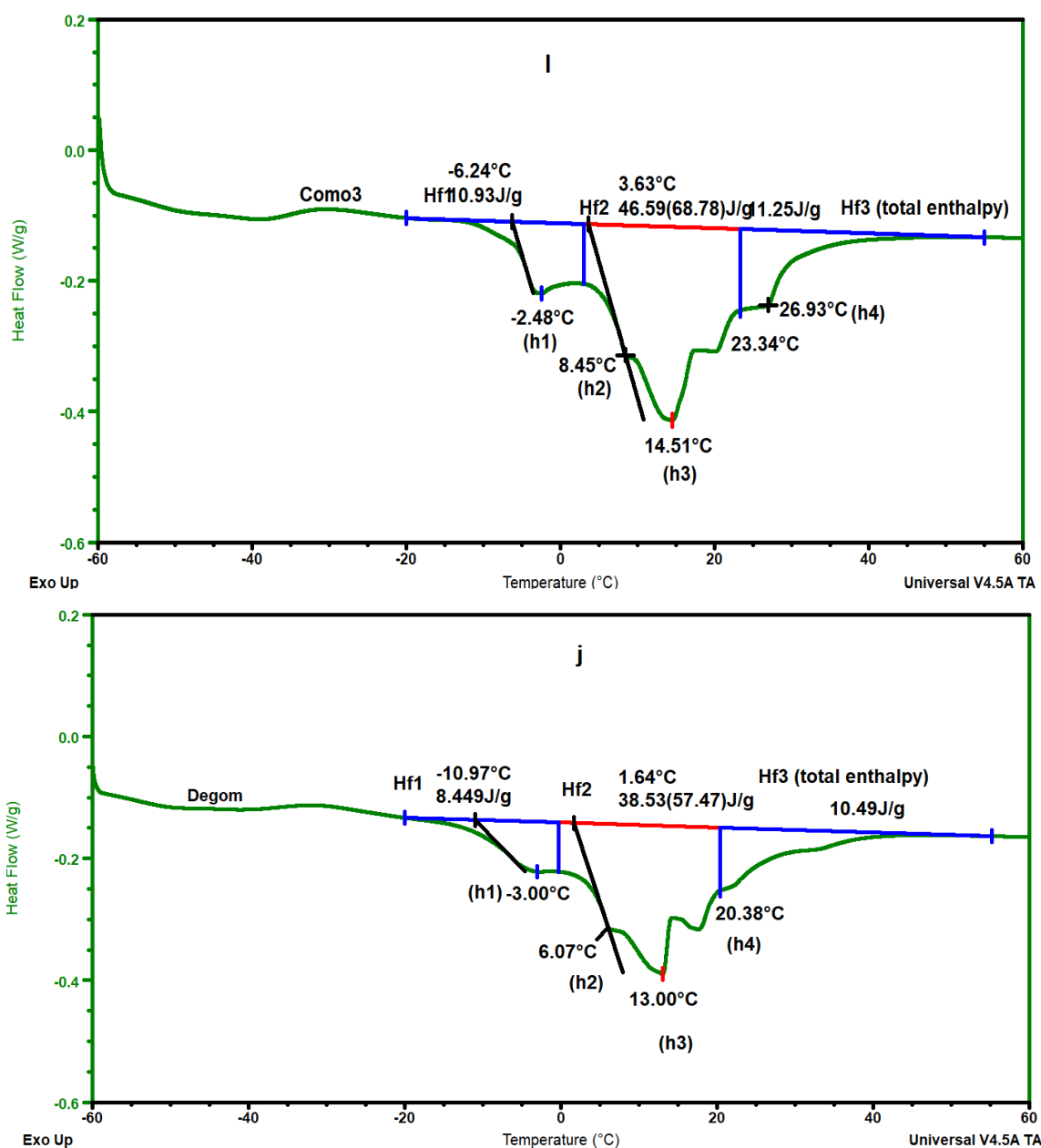


Figure 25: Diversité des profils de fusion par ACD des échantillons de beurre de karité. **a)** profils de cristallisation des 5 échantillons pilotes ; **b-i)** profils de cristallisation de certains échantillons parmi les 37 en fonction de leur rapport d'enthalpie $\Delta H_f = H_{f2}/H_{f3}$. Les profils de fusion 1 ; 2 et 3 sont illustrés dans les graphiques **b-d)** ; **e)** et **f)** respectivement. Le comportement thermique typique de fusion est représenté en **g-i)** respectivement pour les profils 1 ; 2 et 3 et les températures de transition mises en évidence (h1; h2 = T_{Onset} ; h3 = T_{Peak} ; et h4 = T_{End}) et l'enthalpie H_f (J/g); **j)** profils de fusion de l'échantillon Degom

Tableau 37: Températures de transition des thermogrammes de fusion et de cristallisation du beurre de karité brut collectés au Burkina Faso

Échantillon	Caractéristiques de fusion								Caractéristiques de cristallisation				
	h2	h3	h4	Hf1	Hf2	Hf3	Total Hf	ΔHf	c1	c2	c3	c4	c'
Baze ₁	3,5±0,3	12,1±0,1	28,5±0,1	11,7±0,3	20,0±0,2	35,1±0,4	66,7±0,1	0,6±0,1	-6,9±0,1	6,6±0,1	12,2±0,1	18,4±0,1	-
Boul ₁	4,0±0,1	13,4±0,1	28,1±0,1	12,0±0,3	27,5±0,8	29,5±0,4	69,0±0,9	0,9±0,1	-6,8±0,1	6,8±0,1	12,7±0,1	18,7±0,1	-
Boulg ₁	3,9±0,1	12,4±0,1	28,9±0,2	11,5±0,1	17,8±0,7	34,9±1,9	64,2±1,1	0,5±0,1	-7,3±0,1	6,4±0,1	12,1±0,6	19,3±0,1	-
Como ₁	3,9±0,1	13,2±0,1	28,2±0,1	12,2±0,1	26,4±0,4	32,8±1,0	71,4±0,5	0,8±0,1	-6,7±0,1	6,8±0,1	12,3±0,1	17,7±0,1	-
Como ₂	4,0±0,1	14,2±0,1	26,0±0,1	16,3±0,1	48,8±0,2	11,3±0,4	76,3±0,6	4,3±0,1	-6,3±0,1	7,1±0,1	12,9±0,1	18,5±0,1	-
Como ₃	3,5±0,2	14,4±0,2	27,2±0,3	11,4±0,6	47,6±1,4	11,3±0,1	70,3±2,1	4,2±0,1	-6,2±0,1	7,1±0,1	12,7±0,4	17,6±0,3	-
Como ₄	4,2±0,1	14,3±0,1	27,8±0,1	13,1±0,1	31,4±2,1	24,4±2,1	68,8±0,1	1,3±0,2	-6,7±0,1	6,8±0,1	12,0±0,1	16,4±0,1	15,6
Gour ₁	3,1±0,1	12,7±0,1	27,8±0,3	11,8±0,5	25,4±0,9	29,1±1,2	66,3±0,2	0,9±0,1	-7,0±0,1	6,5±0,1	11,5±0,1	19,2±0,4	-
Houe ₁	3,1±0,4	13,5±0,2	28,1±0,1	12,2±0,2	30,4±0,2	26,2±0,9	68,8±1,2	1,2±0,1	-6,5±0,2	6,9±0,1	12,4±0,3	18,4±1,0	-
Houe ₂	4,2±0,3	13,1±0,2	28,9±0,2	11,2±0,1	21,2±1,1	34,4±1,5	66,8±0,5	0,6±0,1	-7,0±0,1	6,6±0,1	12,1±0,1	17,2±0,1	-
Houe ₃	3,2±0,2	13,7±0,1	28,2±0,1	11,9±0,1	23,5±0,3	35,1±0,1	70,6±0,4	0,7±0,1	-6,8±0,1	6,5±0,1	11,6±0,1	16,8±0,1	-
Houe ₄	2,9±0,4	14,7±0,1	27,0±0,1	13,2±0,1	34,2±0,1	22,7±0,2	70,0±0,1	1,5±0,1	-6,4±0,1	7,0±0,1	11,7±0,3	17,6±0,2	15,6
Houe ₅	2,7±0,1	13,4±0,2	26,0±0,3	11,9±1,5	35,2±1,8	19,1±1,5	66,2±4,8	1,8±0,1	-6,6±0,3	6,6±0,4	11,1±0,1	17,7±0,2	-
Houe ₆	3,5±0,2	14,4±0,1	28,1±0,2	12,9±1,0	43,0±1,2	14,0±0,7	70,0±0,4	3,1±0,2	-6,8±0,1	6,7±0,1	11,8±0,1	17,5±0,3	-
Ioba ₁	3,9±0,4	13,2±0,1	28,0±0,2	12,3±0,1	26,2±0,6	28,5±0,3	67,0±0,3	0,9±0,1	-6,9±0,1	6,5±0,1	12,0±0,1	18,4±0,3	-
Ioba ₂	4,6±0,2	13,7±0,1	29,3±0,1	9,9±0,3	20,1±0,5	32,0±1,0	62,1±0,8	0,6±0,1	-7,1±0,1	6,5±0,1	12,0±0,3	17,9±0,3	-
Kadi ₁	2,9±0,2	13,4±0,1	27,6±0,3	12,7±0,1	29,6±0,2	27,3±0,3	69,7±0,1	1,1±0,1	-6,3±0,1	7,0±0,1	12,9±0,1	19,6±0,5	-
Kadi ₂	3,5±0,2	13,6±0,1	26,4±0,1	12,8±0,3	32,1±1,5	25,2±0,5	70,1±2,3	1,3±0,1	-6,4±0,2	7,0±0,2	12,7±0,1	19,6±0,3	-
Kadi ₃	4,0±0,3	14,1±0,1	27,6±0,1	11,7±0,3	29,1±1,6	25,2±0,1	66,1±1,4	1,2±0,1	-6,7±0,1	6,7±0,1	12,5±0,1	20,0±0,2	-
Kadi ₄	3,8±0,1	13,6±0,1	28,7±0,1	11,3±0,1	27,1±0,1	26,3±0,2	64,7±0,3	1,0±0,1	-6,8±0,1	6,9±0,1	11,9±0,1	16,8±0,6	-
Kadi ₅	4,1±0,1	14,3±0,1	28,0±0,1	13,3±0,1	27,6±0,4	29,4±0,9	70,2±1,4	0,9±0,1	-6,5±0,2	6,8±0,1	12,1±0,2	16,8±0,1	15,7
Kadi ₆	2,6±0,1	13,0±0,1	27,1±0,1	12,5±0,1	29,1±0,3	25,1±0,1	66,6±0,3	1,2±0,1	-6,5±0,1	7,0±0,1	12,2±0,1	19,6±0,3	-
Kene ₁	2,2±1,7	14,1±0,2	26,8±0,5	13,2±0,6	37,8±4,6	20,2±0,4	71,1±4,9	1,9±0,3	-6,5±0,3	7,0±0,3	11,2±0,3	16,0±0,4	15,1
Komo ₁	4,2±0,5	13,4±0,1	28,6±0,1	11,0±0,6	25,8±1,7	28,6±0,1	65,4±2,1	0,9±0,1	-6,8±0,3	6,6±0,1	11,9±0,1	17,3±0,4	-
Koul ₁	3,4±0,1	12,8±0,1	28,0±0,3	12,3±0,5	23,6±1,3	28,7±0,1	64,5±1,8	0,8±0,1	-7,2±0,3	6,2±0,3	11,6±0,2	17,7±0,2	-
Koul ₂	3,2±0,1	13,7±0,1	28,1±0,1	12,2±0,1	22,9±0,5	32,2±0,7	67,3±1,2	0,7±0,1	-6,5±0,1	6,8±0,1	11,8±0,1	16,9±0,1	-
Mouh ₁	3,1±0,2	12,2±0,1	29,0±0,1	11,8±0,6	20,1±0,4	35,7±1,5	67,6±2,4	0,6±0,1	-7,5±0,2	6,1±0,1	12,2±0,1	18,8±0,9	-
Naho ₁	3,7±0,2	13,0±0,1	28,0±0,1	11,9±0,3	29,7±0,5	29,4±0,5	71,0±0,3	1,0±0,1	-6,4±0,1	7,1±0,1	12,8±0,1	17,9±0,1	16,3
Naho ₂	3,3±0,1	12,5±0,1	28,2±0,2	11,7±0,2	23,6±0,1	32,0±0,7	67,3±0,8	0,7±0,1	-6,8±0,2	6,5±0,1	12,0±0,1	18,6±0,1	-
Naho ₃	4,5±0,1	13,3±0,1	28,3±0,1	11,5±0,3	26,2±0,7	28,1±0,4	66,2±0,6	0,9±0,1	-6,7±0,1	6,7±0,1	12,3±0,1	17,3±0,1	-
Naya ₁	2,9±0,1	12,4±0,1	27,6±0,1	11,6±0,1	23,0±0,4	31,2±1,5	65,7±1,2	0,7±0,1	-7,3±0,2	6,3±0,1	11,9±0,2	18,9±0,4	-
Noum ₁	4,0±0,1	13,8±0,1	28,1±0,1	12,9±0,1	28,8±0,1	30,5±0,1	72,2±0,1	0,9±0,1	-6,6±0,1	7,0±0,1	13,0±0,2	19,4±0,2	-
Oubr ₁	4,3±0,3	13,3±0,1	29,1±0,1	11,8±0,1	23,7±1,5	36,0±0,1	71,5±1,5	0,7±0,1	-6,5±0,1	6,9±0,1	13,0±0,1	18,2±0,1	-
Sang ₁	4,6±0,1	13,7±0,1	28,3±0,1	11,0±0,2	25,6±0,5	27,1±0,1	63,7±0,7	1,0±0,1	-6,8±0,4	6,7±0,2	12,3±0,5	18,2±0,1	-
Siss ₁	4,1±0,7	13,4±0,2	28,6±0,1	11,8±0,1	24,2±1,4	30,3±0,4	66,3±1,1	0,8±0,1	-6,8±0,2	6,7±0,1	12,2±0,2	18,3±0,2	-
Siss ₂	2,3±0,2	14,1±0,1	25,4±0,2	9,7±0,4	32,1±1,5	21,8±0,6	63,6±1,6	1,5±0,1	-6,4±0,1	6,9±0,2	11,8±0,1	22,4±1,3	-
Yate ₁	-3,8±0,1	13,4±0,1	25,0±0,1	15,6±0,9	27,7±0,1	29,3±0,2	72,5±0,7	1,0±0,1	-6,0±0,1	7,0±0,1	12,9±0,2	20,2±0,2	-

Les analyses ont été faites en triplicat ($n = 3$) par échantillon et les valeurs moyennes ± écarts-types ont été reportées.

Le tableau 38 rapporte les températures de fin de fusion (T_m) de l'ensemble des échantillons par l'ACD.

Tableau 38: Températures de fin de fusion (T_m) de l'ensemble des échantillons

Echantillon	T_m (°C)	Echantillon	T_m (°C)	Echantillon	T_m (°C)	Echantillon	T_m (°C)
Baze ₁	40,1	Houe ₄	38,4	Kene ₁	40,4	Sang ₁	40,3
Boul ₁	40,3	Houe ₅	40,3	Komo ₁	41,8	Siss ₁	41,0
Boulg ₁	42,0	Houe ₆	41,1	Koul ₁	41,1	Siss ₂	43,1
Como ₁	41,5	Ioba ₁	41,8	Koul ₂	40,0	Yate ₁	40,6
Como ₂	41,7	Ioba ₂	42,4	Mouh ₁	40,3	Lot ₁	41,3
Como ₃	42,5	Kadi ₁	42,7	Naho ₁	40,1	Lot ₂	41,6
Como ₄	41,4	Kadi ₂	41,8	Naho ₂	40,4	Lot ₃	42,6
Gour ₁	41,1	Kadi ₃	42,2	Naho ₃	40,3	Lot ₄	43,9
Houe ₁	41,3	Kadi ₄	41,0	Naya ₁	40,5	Lot ₅	41,8
Houe ₂	41,6	Kadi ₅	40,4	Noum ₁	41,2	Degom	38,6
Houe ₃	42,0	Kadi ₆	40,6	Oubr ₁	41,0		

T_m : Température de fin de fusion °C

Les résultats ont montré que la T_m des échantillons était comprise entre 38,4 °C pour l'échantillon Houe₄ et 43,1 °C pour l'échantillon Siss₂, tous du P₁. L'échantillon Degom avait la deuxième valeur la plus faible (38,62 °C) après Houe₄.

III.4. Analyses multivariées des caractéristiques physicochimiques et thermiques du beurre de karité

La corrélation et l'influence entre les caractéristiques physicochimiques et thermiques des 37 échantillons bruts de BK ont été déterminées à l'aide du test de corrélation de Pearson à α égal à 0,05 d'une part, et d'autre part par une analyse en composantes principales (ACP). L'ACP visait à déterminer les variables les plus importantes qui ont un effet significatif sur les composantes principales sélectionnées. Au total, 37 individus (c'est-à-dire 37 échantillons) et 30 variables quantitatives ont été utilisés pour réaliser les analyses. L'ACP a consisté dans un premier temps à normaliser les données (données centrées-réduites) afin de réduire les différences d'échelle entre les variables (biais dus aux unités de chacune des variables et à leur valeur absolue, autrement dit, la distance entre les individus). La figure 26 (données avant normalisation) et la figure 27 (données obtenues après normalisation) mettent en évidence l'intérêt de la normalisation par réduction de la distance entre les individus. La normalisation donne la chance à toutes les variables de contribuer équitablement à la construction des composantes (ACP normée). La projection des individus sur les deux premières composantes

a été présentée dans la figure 28. Selon les données de l'ACP, les deux premiers axes expliquent 41,40 % de la variance totale. Cependant, 87,20 % de la variance totale est expliquée par les dix premiers axes, ce qui justifie le choix du nombre de composantes (figure 29).

Le test de corrélation de Pearson a ensuite été réalisé afin d'établir une relation entre les paramètres physicochimiques et thermiques (profil de fusion/cristallisation par ACD et teneur en matières grasses solides par RMN p). Les résultats des analyses statistiques ont été présentés dans le tableau 39.

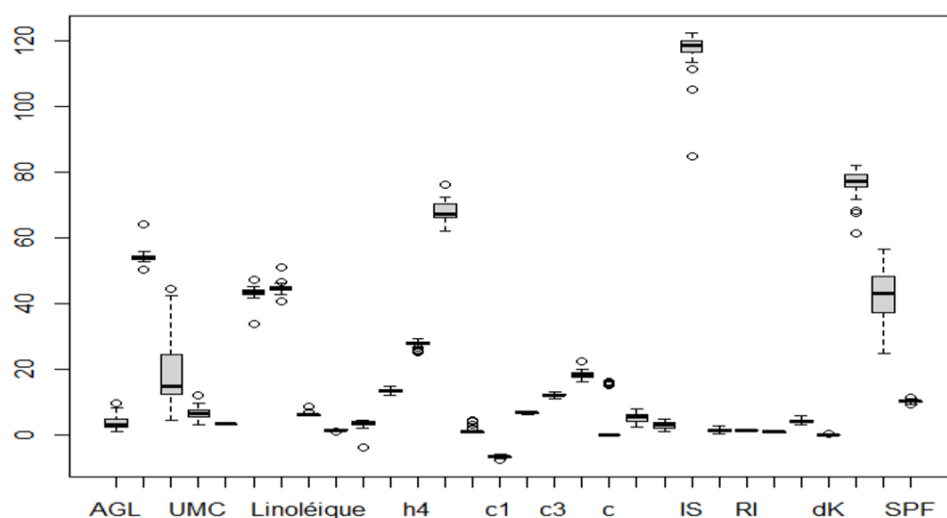


Figure 26 : Boxplots des variables avant la normalisation

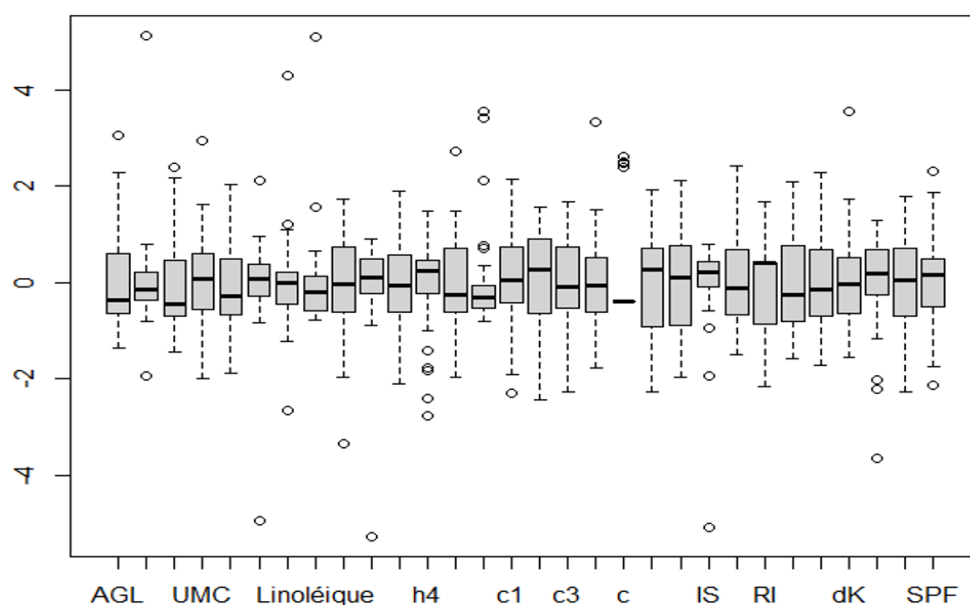


Figure 27 : Boxplots des variables après la normalisation

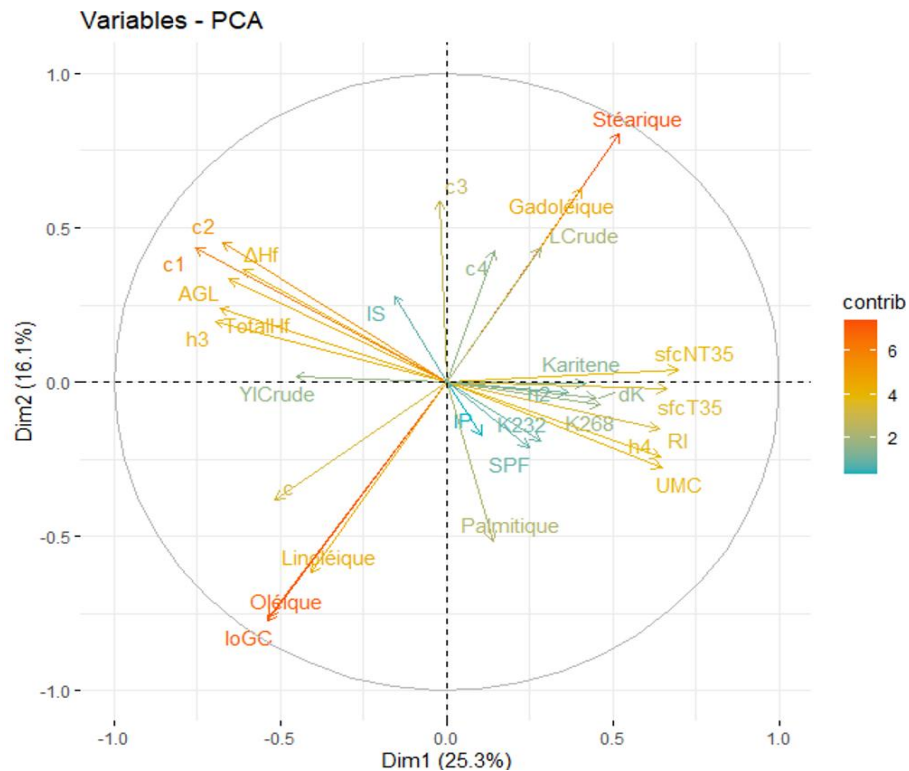


Figure 28 : Projection des variables sur les deux premières composantes principales et contribution sur les deux premières composantes.

Légende : SFCNT35 = SFC à 35 °C pour la méthode non tempérée ; SFCT35 = SFC à 35 °C pour la méthode tempérée. c1-c2-c3-c4-c' = températures de cristallisation. h2-h3-h4 = température de transition de fusion. UMC = teneur en matières insaponifiables. IoGC = indice d'iode par GC. IP = indice de peroxyde. RI = indice de réfraction. AGL = teneur en acides gras libres. SPF = facteur de protection solaire. TotalHf = total des enthalpies de fusion. ΔHf = rapport d'enthalpie de fusion. LCrude = indice de couleur clarté du beurre brut. YICrude = indice de jaunissement du beurre brut. K₂₃₂, K₂₆₈ et ΔK = coefficients d'extinction spécifique et de variation. Palmitique, stéarique, oléique, linoléique, gadoléique = acides gras.

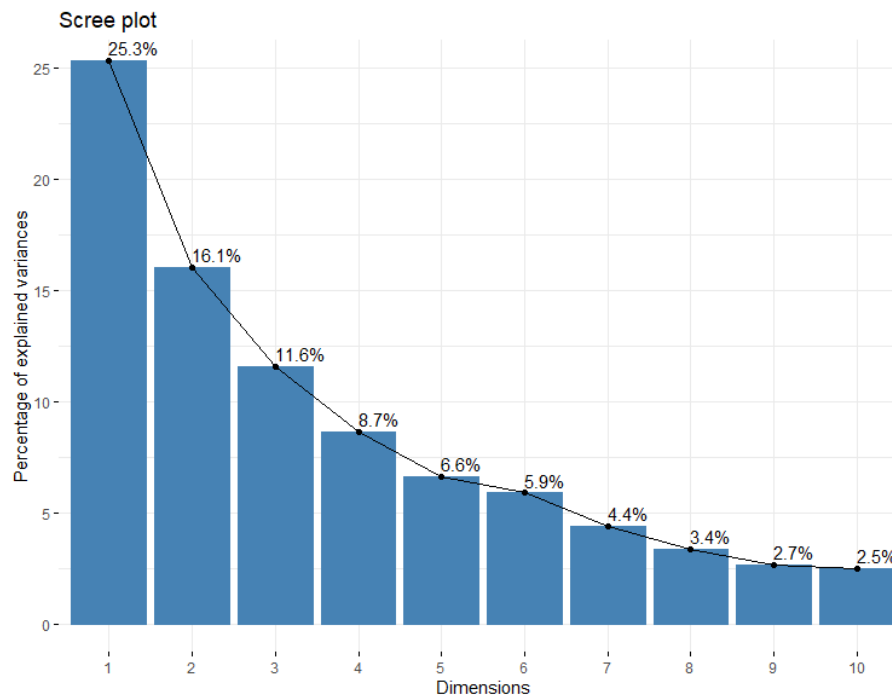


Figure 29 : Variance cumulée sur les dix premières dimensions

Tableau 39 : Coefficient de corrélation entre les paramètres physicochimiques et thermiques du beurre de karité brut

Paramètres		Coefficient de corrélation (r)	<i>p-value</i> *
Chimiques	Thermiques		
A) Corrélation pour le profil de cristallisation A			
AGL	c1	0,82	8,404e ⁻⁰⁵
C16:0	c3	-0,59	0,015
C20:1	c3	0,69	0,003
AGL	c4	0,62	0,011
IO/GC	c4	-0,68	0,004
UMC	c4	-0,75	0,000
C18:0	c4	0,71	0,002
C18:1	c4	-0,72	0,001
B) Corrélation pour le profil de cristallisation B			
IO/GC	c3	-0,56	0,023
C18:0	c3	0,59	0,015
C18:1	c3	-0,50	0,048
C) Corrélation pour le profil de cristallisation C			
AGL	c3	-0,68	0,21
UMC	c3	0,96	0,009
AGL	c4	-0,59	0,290
UMC	c4	0,80	0,100
C16:0	c4	0,77	0,130
C18:2	c4	0,55	0,340
AGL	c'	-0,71	0,180
UMC	c'	0,98	0,003
D) Corrélation pour le profil de fusion A			
AGL	h4	-0,88	5,19e ⁻⁰⁸
C16:0	h4	-0,54	0,010
C16:0	c4	0,55	0,008
AGL	ΔH _f	0,53	0,011
E) Corrélation pour le profil de fusion B			
UMC	h3	-0,50	0,170
UMC	h4	0,73	0,027
AGL	ΔH _f	0,80	0,010
F) Corrélation pour le profil de fusion C			
C20:1	h3	0,58	0,220
C16:0	h3	0,60	0,210

* p < 0,05 (corrélation significative) et p > 0,05 (corrélation non significative)

La projection des échantillons sur le plan factoriel selon leurs scores sur les deux premières composantes est représentée sur la figure 30.

À la suite des analyses multivariées mettant en évidence les différentes corrélations entre les caractéristiques chimiques du BK, la présente étude ambitionnait d'utiliser la spectroscopie proche infra-rouge (NIRS) couplée à la chimiométrie pour développer des modèles de prédiction de la qualité du BK. Les résultats obtenus n'ont pas été concluants du fait de la limite

de la taille de l'échantillon et ont été présentés sous forme de travaux préliminaires en annexe (voir annexe 7).

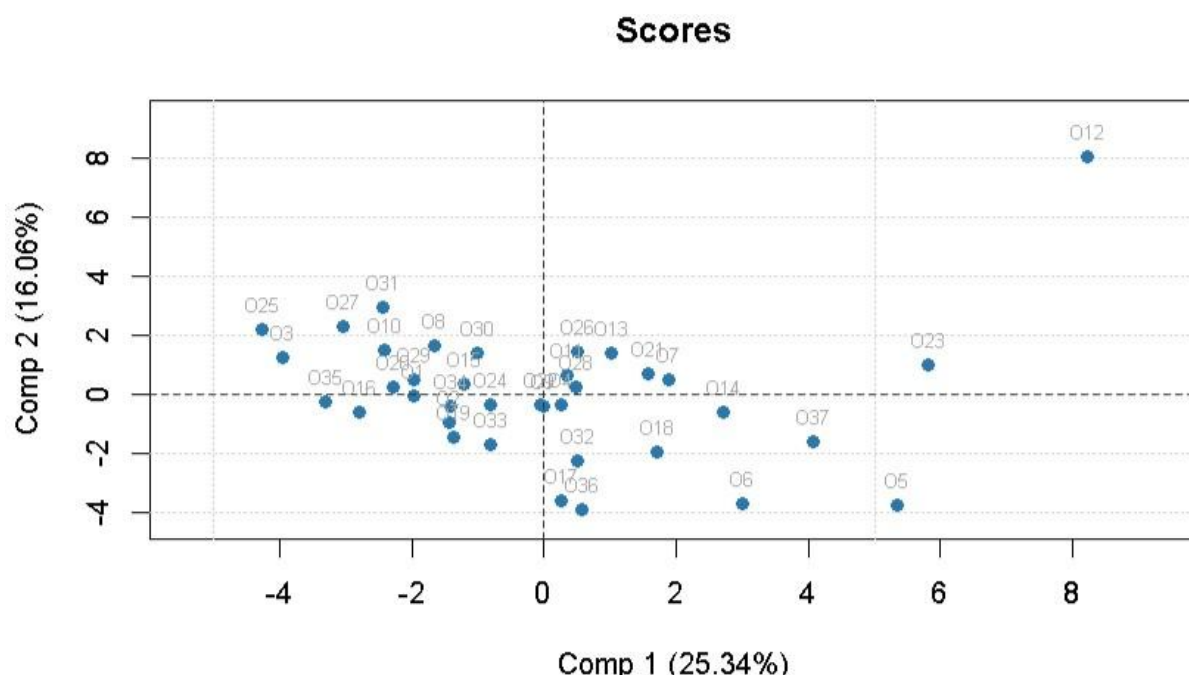


Figure 30: Projection des individus sur le plan factoriel des dimensions 1 et 2 selon leurs scores

III.5. Composés phénoliques et activité antioxydante du beurre de karité

III.5.1. Composés phénoliques totaux par colorimétrie

Pour la teneur en polyphénols totaux (TPT) la droite de calibration avec quatre niveaux de concentration de l'étalon de référence (figure 31) avait donné un coefficient de corrélation r égal à 0,9994. Les TPT des différents échantillons ont été calculées et consignées dans le tableau 40. Elles ont par la suite été exprimées en concentration de beurre brut, rapportée à la prise d'essai de 500 mg.

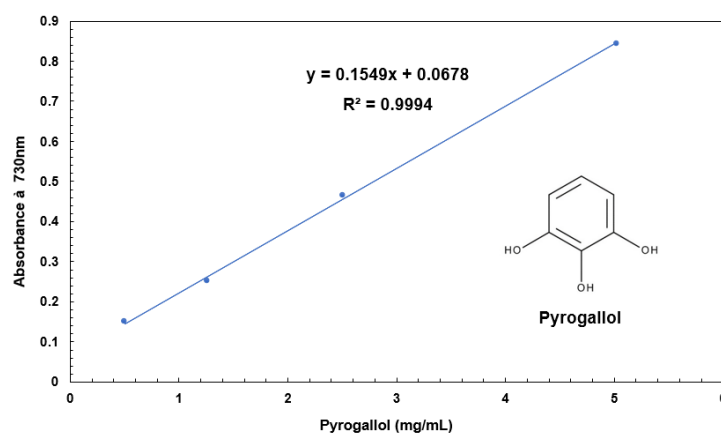


Figure 31: Courbe d'étalonnage du pyrogallol par colorimétrie. La courbe du standard de référence a été utilisée pour calculer les teneurs en composés phénoliques. Les concentrations sont exprimées en équivalent pyrogallol

Les résultats ont été exprimés en ppm (mg/kg de beurre) équivalent pyrogallol (ppm PGE). La TPT était comprise entre $14,16 \pm 2,33$ ppm PGE pour l'échantillon Siss₁ du P₃ et $82,99 \pm 8,7$ ppm PGE pour l'échantillon Yate₁ du P₄. Les TPT des échantillons industriels étaient ainsi distribués : karitène ($24,81 \pm 3,63$ ppm PGE), raffiné ($32,77 \pm 2,2$ ppm PGE) et brut industriel ($38,15 \pm 1,41$ ppm PGE).

Tableau 40 : Teneurs en polyphénols totaux par la méthode colorimétrique et concentration des échantillons testés. Les résultats ont été exprimés en moyenne $\pm$ écarts-types

Quantité de beurre (mg)	Houe ₅ *	Ioba ₁ *	Ioba ₂ *	Kadi ₅ *	Naya ₁ *	Siss ₁ *	Yate ₁ *	Brut industriel	Raffiné industriel	Karitène (% m/m)
Polyphénols totaux (ppm PGE)										
	45,12	22,98	21,13	60,74	69,22	14,16	82,99	38,15	32,77	24,81
Concentration en polyphénols (ppm) pour les tests antioxydants (ABTS/DPPH)										
3,0	2,71	1,38	1,27	3,64	4,15	0,85	4,98	2,29	1,97	1,49
2,0	1,80	0,92	0,85	2,43	2,77	0,57	3,32	1,53	1,31	0,99
1,0	0,90	0,46	0,42	1,21	1,38	0,28	1,66	0,76	0,66	0,50
0,5	0,45	0,23	0,21	0,61	0,69	0,14	0,83	0,38	0,33	0,25
0,05	0,05	0,02	0,02	0,06	0,07	0,01	0,08	0,04	0,03	0,02
Concentration en polyphénols (ppm) pour les essais de photoprotection sur modèle acellulaire										
2,0	0,201	0,102	0,094	0,270	0,308	0,063	0,369	0,170	0,146	0,110
1,0	0,100	0,051	0,047	0,135	0,154	0,031	0,184	0,085	0,073	0,055
0,1	0,010	0,005	0,005	0,013	0,015	0,003	0,018	0,008	0,007	0,006
Concentration en polyphénols (ppm) pour les essais de photoprotection sur modèle cellulaire										
2,0	1,80	0,92	0,85	2,43	2,77	0,57	3,32	1,53	1,31	0,99
1,0	0,90	0,46	0,42	1,21	1,38	0,28	1,66	0,76	0,66	0,50

* : Beurre de karité brut traditionnel originaire du Burkina Faso ; PGE : équivalent pyrogallol

III.5.2. Identification et quantification des composés phénoliques

L'analyse des composés polaires par CLHP a permis d'identifier sur la base des temps de rétention des substances chimiques de référence utilisées (voir tableau 41), combinés aux données spectrales UV, quatre composés : les acides gallique, protocatéchique, cinnamique et la quercétine. Les composés dont la teneur était supérieure à la limite de quantification (LQ - Limit of quantification LOQ) ont été quantifiés en acide gallique équivalent (GAE), sur la base de la courbe d'étalonnage de l'acide gallique de référence, figure 32. Le coefficient de corrélation R est égal à 0,9995.

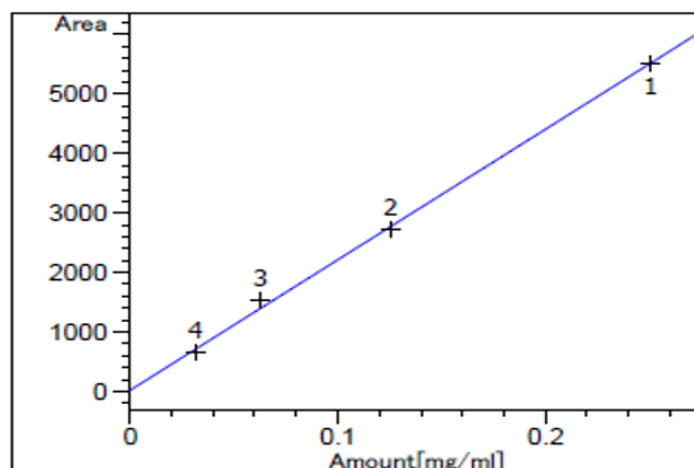


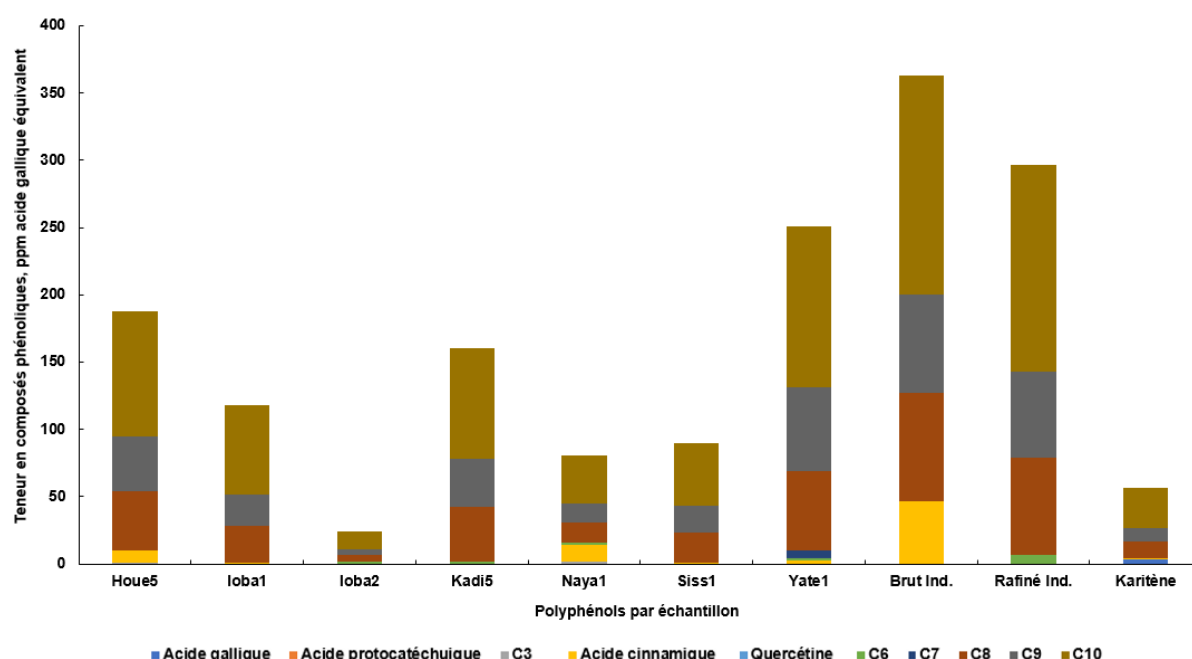
Figure 32: Courbe d'étalonnage de l'acide gallique. La courbe du standard de référence a été utilisée pour quantifier les composés phénoliques identifiés par CLHP. Les teneurs sont exprimées en GAE

La figure 33 illustre les différents composés polaires qui ont été mis en évidence par CLHP. Des chromatogrammes illustratifs d'un échantillon traditionnel (Naya₁) et d'un échantillon industriel (brut industriel) ont été illustrés dans la figure 34.

D'autres composés n'ont pas pu être identifiés à partir des temps de rétention des étalons de référence utilisés et sur la base de leurs spectres UV selon la base de données interne au LPG. Il s'agit des composés C₃-C₆-C₇ et surtout des 3 composés élués en fin d'analyse C₈-C₉ et C₁₀.

Tableau 41: Concentration et temps de rétention des substances chimiques de référence utilisées dans la procédure analytique par CLHP

Substances chimiques de référence	Concentration (mg/mL)	Temps de rétention (min)
Acide gallique	0,2505	8,4
Epigallocatechine	0,0926	6,7
Acide protocatéchuique	0,5930	6,9
Catéchine	0,0848	9,0
Epicatechine	0,0938	11,1
Acide vanillique	0,3590	12,9
Acide syringique	0,4200	13,6
Epigallocatechine gallate	0,1002	13,7
Acide cinnamique	0,1010	38,3
Quercétine	0,1140	38,5

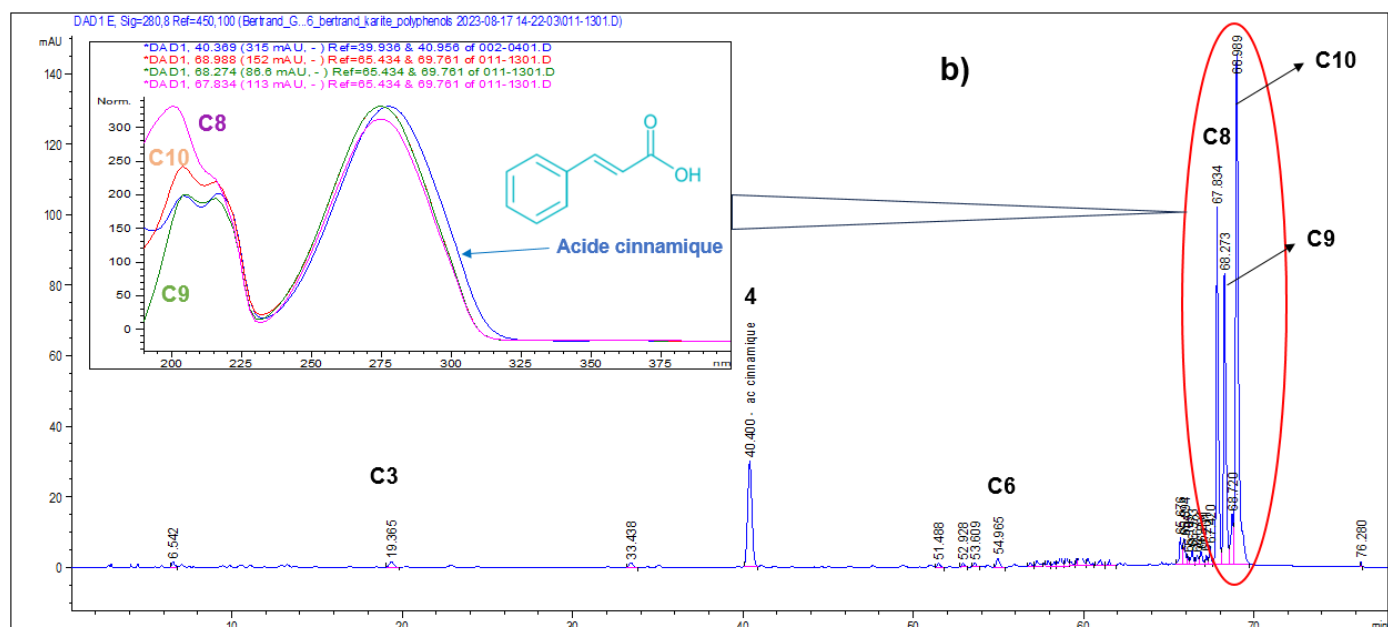
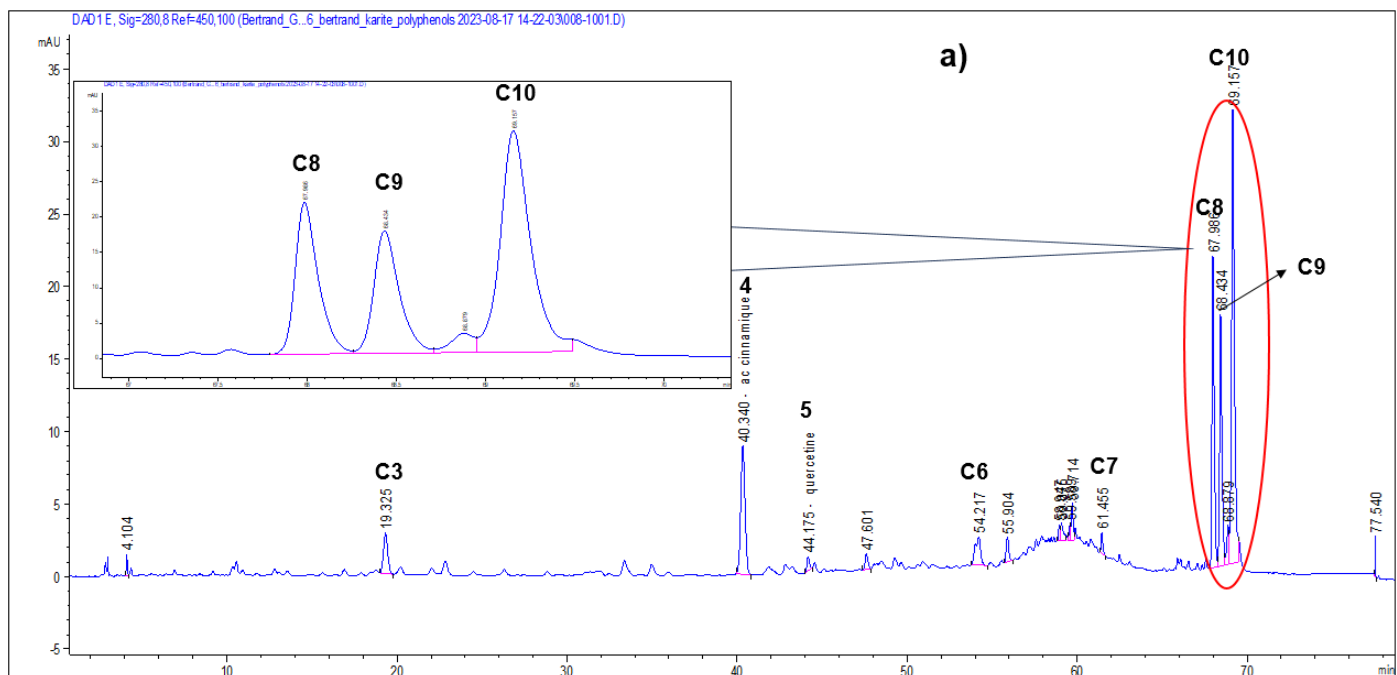


C₃-C₆-C₇-C₈-C₉ et C₁₀ représentent les composés phénoliques non identifiés

Figure 33: Différents composés phénoliques par CLHP, d'extraits de beurre de karité

Les spectres UV des composés non identifiés ont été différemment mis en évidence dans la figure 34. Les composés C₈, C₉ et C₁₀ sont illustrés dans les figures 34a et 34b. La teneur en composés phénoliques mise en évidence par CLHP était comprise entre 0,93 et 46,89 ppm GAE, avec certains composés en dessous de la LQ, comme reporté dans le tableau 42.

Sont illustrés en exemple (figures 34 c-e) les spectres UV de certains composés non identifiés et celui de l'acide gallique de l'échantillon Yate₁ (figure 34f).



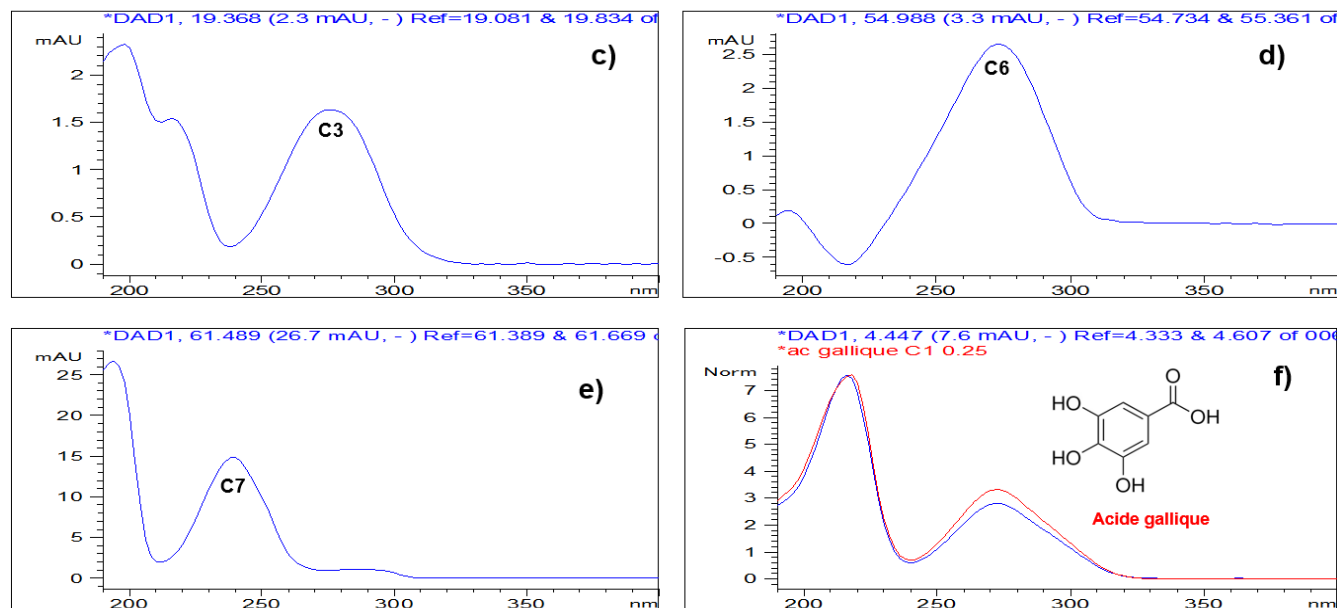


Figure 34: Chromatogrammes illustratifs des échantillons traditionnels et industriels, dont la séparation a été faite à 280 nm, mettant en évidence les pics non identifiés (C₃-C₆-C₇ et surtout les trois pics C₈-C₉ et C₁₀) et ceux identifiés : **a)** Chromatogrammes de Naya₁; **b)** Chromatogrammes du Brut industriel; **c)** Spectre UV du composé non identifié C₃ du brut industriel; **d)** Spectre UV du composé non identifié C₆ du brut industriel; **e)** Spectre UV du composé non identifié C₇ du karité; **f)** Spectre UV de l'acide gallique de Yate₁

Tableau 42: Composés phénoliques dans les échantillons de beurre de karité brut originaire du Burkina Faso et dans les échantillons industriels

Échantillon	Acide gallique	Acide protocatéchuique	C ₃	Acide cinnamique	Quercétine	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	Total
Houes	nd	< LQ	0,928	9,438	nd	0,165	< LQ	43,718	40,587	92,709	187,545
Ioba ₁	nd	< LQ	nd	1,134	nd	0,015	< LQ	27,046	23,646	66,189	118,03
Ioba ₂	nd	nd	nd	< LQ	nd	1,486	< LQ	5,226	4,001	13,184	23,897
Kadis	nd	nd	nd	0,321	nd	1,549	< LQ	40,714	35,617	82,284	160,485
Naya ₁	nd	nd	1,94	12,237	< LQ	1,681	< LQ	15,369	13,866	35,367	80,46
Siss ₁	nd	nd	< LQ	0,972	nd	nd	< LQ	22,174	19,995	46,6	89,741
Yate ₁	< LQ	nd	0,149	2,338	< LQ	2,014	5,282	59,585	62,168	119,037	250,573
Brut ind.	nd	nd	0,132	46,261	nd	0,495	nd	80,292	72,885	162,707	362,772
Raffiné ind.	nd	nd	nd	nd	nd	6,4	< LQ	73,018	63,263	153,764	296,445
Kariténe	3,374	nd	nd	0,961	nd	< LQ	< LQ	12,088	10,104	29,941	56,468

LQ : Limite de quantification ; nd : Non détecté ; Rt : Temps de rétention ; C₃-C₆-C₇-C₈-C₉-C₁₀ : Composés polaires non identifiés par HPLC : ind. : Industriel

III.5.3. Potentiel antioxydant in vitro

○ *Choix du solvant de solubilisation du beurre*

Bien que la solubilité du BK brut, en tant que matière grasse, soit meilleure dans le cyclohexane, nous avons fait le choix de l'éthanol pour la suite des investigations. En effet, la solubilité du BK dans l'éthanol (figure 35a) est similaire à celle dans le cyclohexane (figure 35b) ; avec un λ_{max} autour de 280 nm pour les deux solvants. Les composés d'intérêt du BK sont donc bien solubles dans l'éthanol, ce qui justifie son choix pour les analyses ultérieures. Un autre argument en faveur de l'éthanol est son utilisation comme solvant dans les produits cosmétiques, en raison de sa tolérance cutanée à des concentrations inférieures à 25 % (McKim *et al.* 2012).

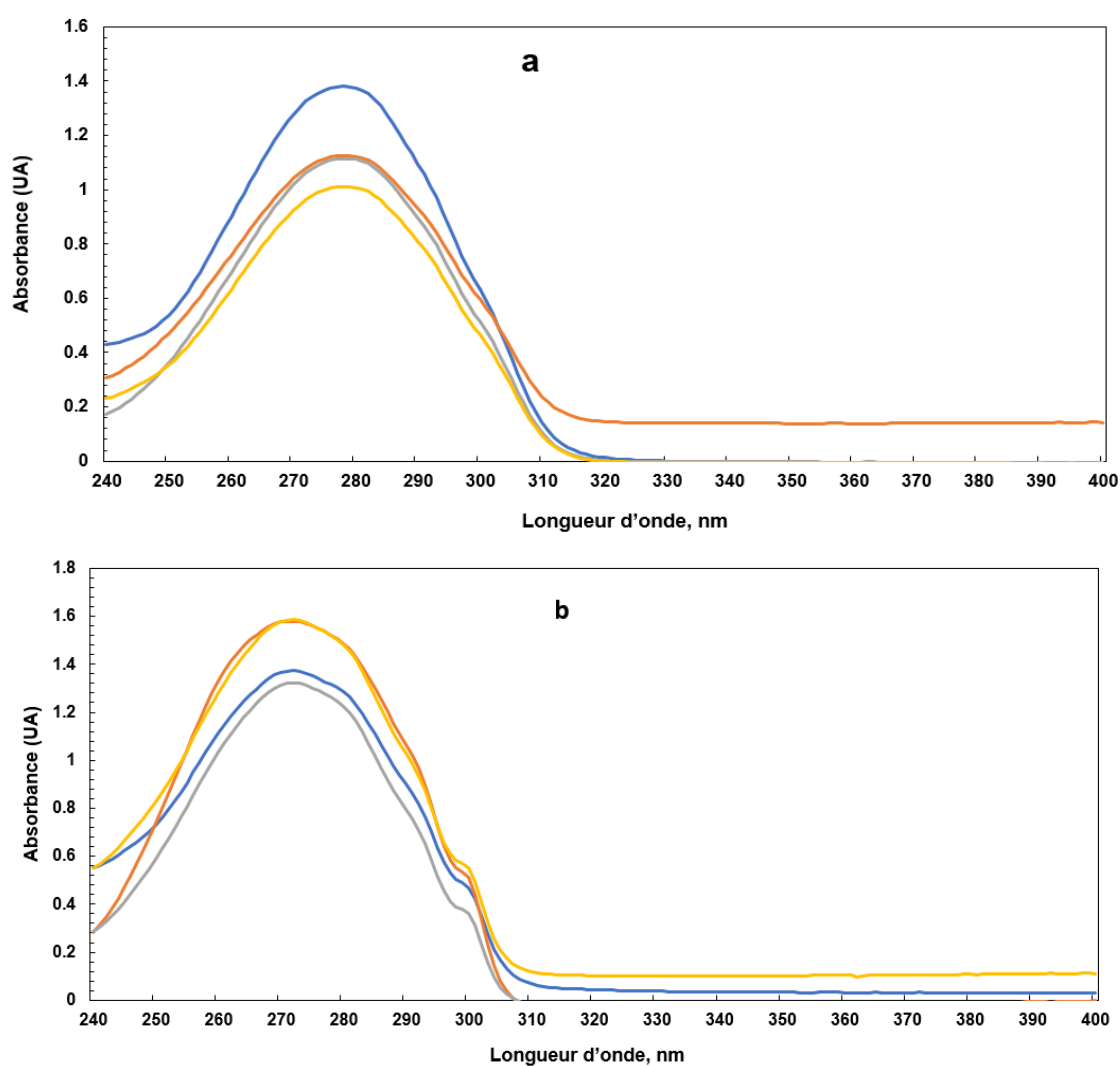


Figure 35: Absorbance comparative du beurre de karité brut dans l'éthanol **a)** et le cyclohexane **b)**

○ *Potentiel antioxydant in vitro par DPPH et par ABTS*

L'évaluation du potentiel antioxydant portant sur les échantillons bruts de karité à différentes concentrations par les tests sur le radical DPPH et le cation radical ABTS n'a pas été concluante : aucune décoloration visible n'a été observée. Par conséquent, aucune activité antioxydante n'a été mise en évidence dans le beurre brut pour les tests à l'ABTS et au DPPH. L'activité antioxydante du BK est en partie liée à la présence des polyphénols présents dans sa fraction insaponifiable. En effet, le résultat négatif constaté pourrait s'expliquer par la faible teneur en composés polyphénoliques, qui est de l'ordre du ppm (selon les résultats de la présente étude), et des potentielles interférences entre les divers composés de l'insaponifiable du BK.

Pour le test au DPPH, les concentrations des fractions polaires étaient comprises entre 2 - 1 - 0,5 et 0,05 mg de beurre brut. Quant au test à l'ABTS, les concentrations étaient comprises entre 3 - 2 - 1 - 0,5 et 0,05 mg de beurre brut (tableau 40). La figure 36 illustre ainsi les inhibitions du DPPH et de l'ABTS après 60 min d'incubation des composés phénoliques des échantillons testés. Contrairement au beurre brut, les fractions polaires testées ont montré une plus grande capacité de piégeage des cations du radical DPPH (figure 36a) et du cation radical ABTS (figure 36b). Les pourcentages d'inhibition pour les concentrations finales les plus élevées n'ont pas dépassé 40 % pour le DPPH, alors que pour l'ABTS, des valeurs supérieures à 80 % ont été observées. En général, le pourcentage d'inhibition pour l'ensemble des échantillons était compris entre $0,35 \pm 0,20$ % (Yate₁) et $35,64 \pm 1,06$ % (Naya₁) et entre $1,21 \pm 0,36$ % (Ioba₂) et $82,88 \pm 0,06$ % (Naya₁), respectivement pour le DPPH et l'ABTS.

La relation entre les valeurs moyennes des TPT et celles des pourcentages d'inhibition par les tests DPPH et ABTS a été établie en utilisant le *test de Pearson* au seuil de significativité $\alpha = 0,05$. Les résultats ont mis en évidence une corrélation modérément positive entre les TPT et les valeurs de DPPH et d'ABTS, avec un coefficient de corrélation r égal à 0,508 et 0,642, *respectivement* (voir tableau 43).

Tableau 43 : Coefficient de corrélation entre la capacité antioxydante (DPPH et ABTS) et la teneur en polyphénols totaux

	DPPH*	ABTS*	TPT
DPPH	1	0,924	0,508
ABTS	0,924	1	0,642
TPT	0,508	0,642	1

*: Les valeurs moyennes ont été utilisées pour établir les corrélations ; TPT : Teneur en polyphénols totaux.

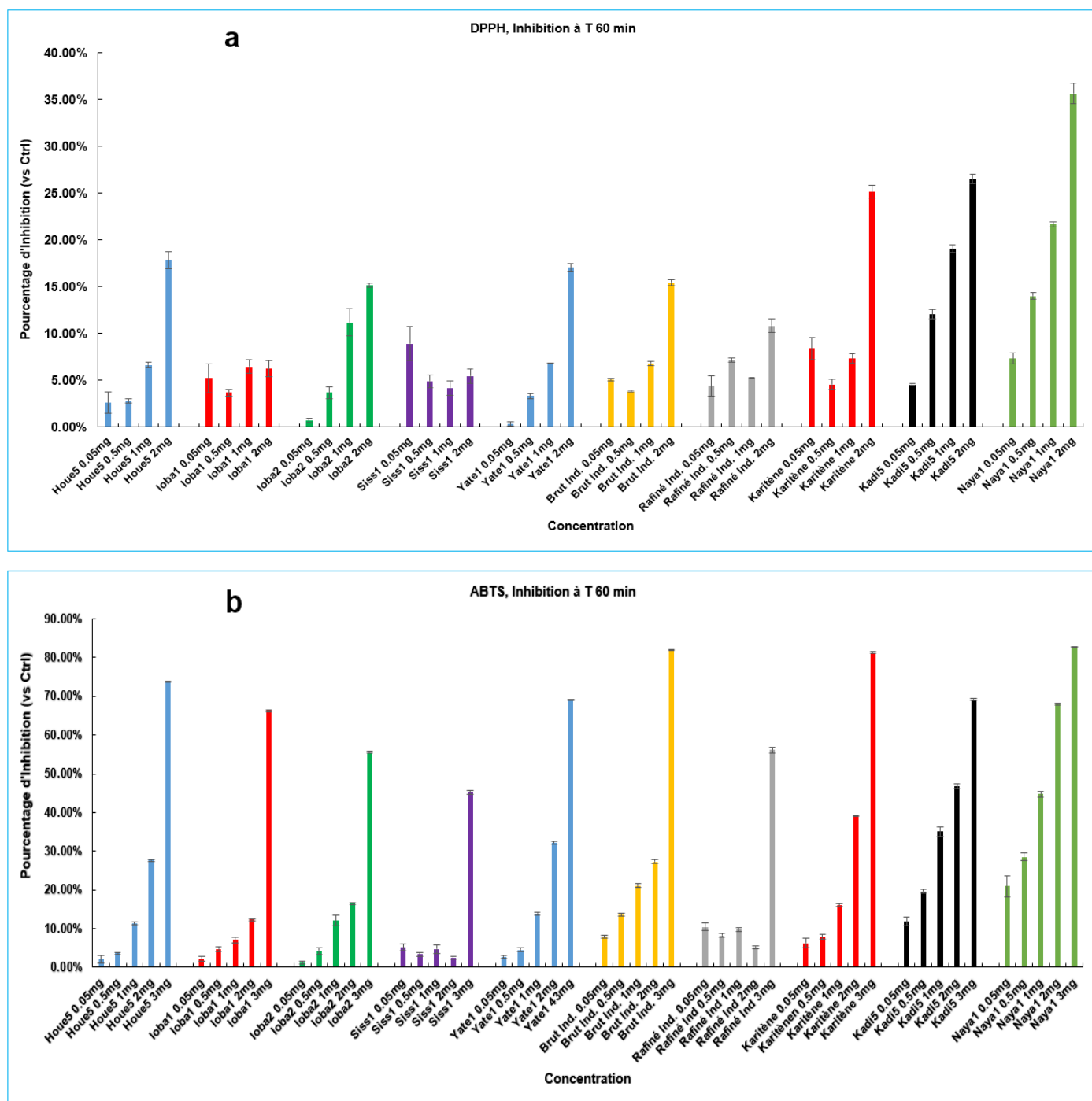


Figure 36: Effet des composés du karité sur le DPPH et l'ABTS. **a)** Effet sur le DPPH par piégeage des radicaux libres. **b)** Effet des composés du karité sur l'ABTS par piégeage des radicaux libres. Les composés phénoliques ont été dissous dans du méthanol (concentration finale de 2 %). Le résultat du pourcentage d'inhibition pour le DPPH et l'ABTS a été établi en triplicat ($n = 3$) et exprimé en valeur moyenne $\pm$ écarts-types par deux essais indépendants.

III.6. Potentiel photoprotecteur du beurre de karité

III.6.1. Facteur de protection solaire *in vitro*

Les résultats du FPS moyen des 37 échantillons de BK, à la concentration de 5 mg/mL, ont donné des valeurs comprises entre 9,26 pour l'échantillon Mouh₁ du P₃ et 11,33 pour l'échantillon Naya₁ du P₅ et consignées dans le tableau 44 et la figure 37. Le FPS moyen de l'échantillon Degom était de 10,44. Une analyse statistique par le *t-test* (ou *test de Student*) à échantillon apparié à l'aide du logiciel R (Software R Studio, version 2023.06.1) a été faite en vue de comparer la valeur FPS des échantillons tests avec celle de l'échantillon industriel Degom. Les résultats ont montré que la *p-value* = 0,01532 était inférieure au seuil de significativité α égal à 0,05, avec *t* de -2,5459 pour un degré de liberté *df* égal à 36, indiquant que le FPS moyen des échantillons était significativement différent de celui de l'échantillon industriel (10,44). Le tableau 44 donne les résultats des FPS des différents échantillons soumis aux conditions expérimentales : en mode absence d'éclairage (nuit) et en mode éclairage solaire (soleil). Selon les résultats statistiques du *test-t apparié* (ou *test de Student pour échantillons appariés*), il n'y a pas de différence significative entre les FPS moyen « soleil » et FPS moyen « nuit », avec une *p-value* = 0,2094, supérieure au seuil de significativité α égal à 0,05, *t* de -1,2774, pour un degré de liberté *df* égal à 37.

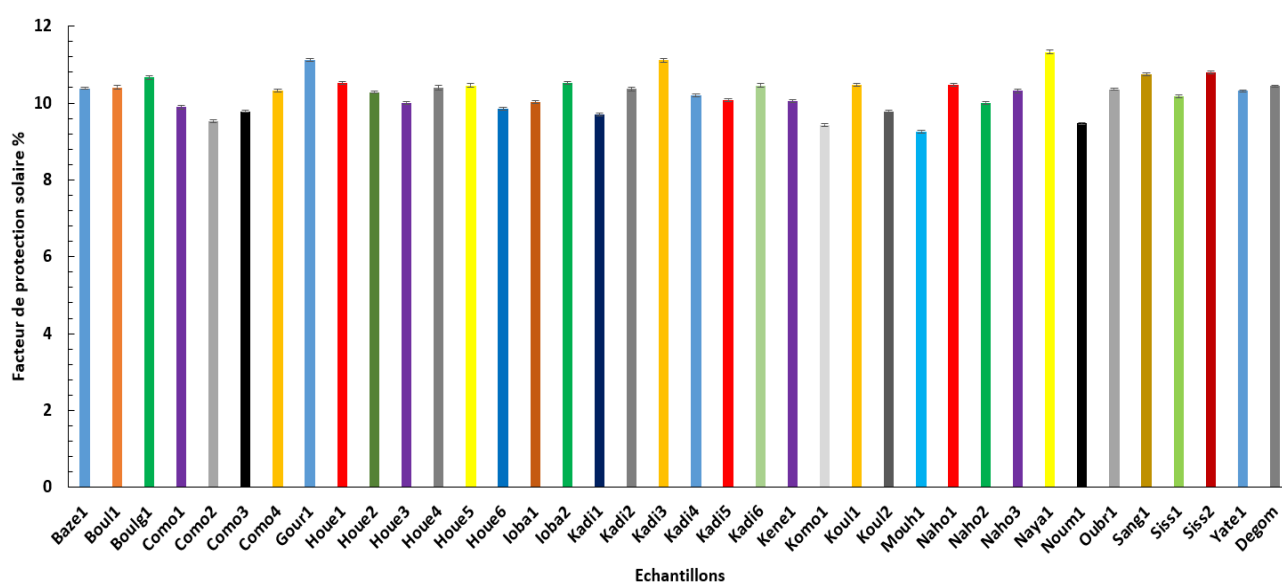


Figure 37: Représentation graphique du facteur de protection solaire *in vitro* ($n = 3$) des échantillons bruts de beurre de karité

Tableau 44 : Facteur de protection solaire in vitro des échantillons de beurre de karité originaire du Burkina Faso selon divers types de procédés d'extraction

Echantillon	Procédé d'extraction		FPS moyen "soleil"	FPS moyen "nuit"	FPS moyen
Baze ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,63	10,13	10,38±0,03
Boul ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,50	10,32	10,41±0,04
Boulg ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,20	11,14	10,76±0,05
Como ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	9,68	10,13	9,90±0,05
Como ₂	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	9,97	9,10	9,53±0,04
Como ₃	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	9,90	9,67	9,79±0,03
Como ₄	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,35	10,28	10,32±0,04
Gour ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	11,62	10,62	11,12±0,04
Houe ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,50	10,55	10,52±0,04
Houe ₂	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,44	10,13	10,28±0,03
Houe ₃	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	9,84	10,18	10,01±0,04
Houe ₄	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,48	10,32	10,40±0,06
Houe ₅	Cuisson de la pâte	P ₂	10,56	10,36	10,46±0,04
Houe ₆	P inconnu	P inconnu	9,87	9,84	9,85±0,03
Ioba ₁	Cuisson de la pâte	P ₂	9,39	10,66	10,02±0,04
Ioba ₂	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,34	10,70	10,52±0,04
Kadi ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	9,75	9,66	9,70±0,04
Kadi ₂	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,26	10,47	10,37±0,05
Kadi ₃	P inconnu	P inconnu	11,00	11,22	11,11±0,04
Kadi ₄	P inconnu	P inconnu	10,39	10,02	10,21±0,04
Kadi ₅	P inconnu	P inconnu	10,30	9,86	10,08±0,04
Kadi ₆	P inconnu	P inconnu	10,51	10,40	10,45±0,05
Kene ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	9,81	10,29	10,05±0,04
Komo ₁	Cuisson de la pâte	P ₂	9,13	9,73	9,43±0,04
Koul ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,27	10,68	10,48±0,04
Koul ₂	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	9,48	10,08	9,78±0,03
Mouh ₁	Trempage des noix-Séchage au four	P ₃	9,49	9,02	9,26±0,03
Naho ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,53	10,42	10,47±0,04
Naho ₂	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,21	9,80	10,01±0,04
Naho ₃	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,27	10,36	10,32±0,05
Naya ₁	Trempage des noix-Séchage au four- Cuisson de la pâte	P ₅	11,16	11,49	11,33±0,05
Noum ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	8,93	10,01	9,47±0,03
Oubr ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,31	10,41	10,36±0,03
Sang ₁	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	10,32	11,17	10,75±0,03
Siss ₁	Trempage des noix-Séchage au four	P ₃	9,97	10,39	10,18±0,03
Siss ₂	Barattage-Cuisson de l'émulsion	P ₁	11,04	10,57	10,81±0,04
Yate ₁	Trempage des noix-Séchage au soleil- Cuisson de la pâte-Pas de barattage	P ₄	9,66	10,98	10,32±0,03
Degom	Beurre industriel	-	10,36	10,52	10,44±0,03

Légende : FPS/SPF - Facteur de protection solaire. Les analyses ont été faites en triplicat ($n = 3$) et les valeurs moyennes $\pm$ écarts-types ont été reportées. P = Procédé

Le tableau 45 rapporte les résultats de l'évaluation de l'effet potentiel du kariténe sur la variation du FPS par ajouts dosés. Pour l'échantillon non dopé, le FPS moyen était de 10,44 comme mentionné précédemment. Le FPS a donc varié de 12,26 à 13,99 pour le dopage à 0,81 % et 2,81 % de kariténe respectivement. Une illustration graphique a été fournie dans la figure 38.

Tableau 45 : Facteur de protection solaire *in vitro* ($n = 3$) de l'échantillon industriel par ajouts dosés du karitène (% m/m de l'insaponifiable)

Échantillon dopé	Karitène (% m/m)	FPS moyen
Degom seul	0,31	10,44 ± 0,98
Degom + Kariten ₂	0,81	12,26 ± 1,60
Degom + Kariten ₃	1,31	12,31 ± 1,44
Degom + Kariten ₄	2,31	13,74 ± 1,27
Degom + Kariten ₅	2,81	13,99 ± 2,04

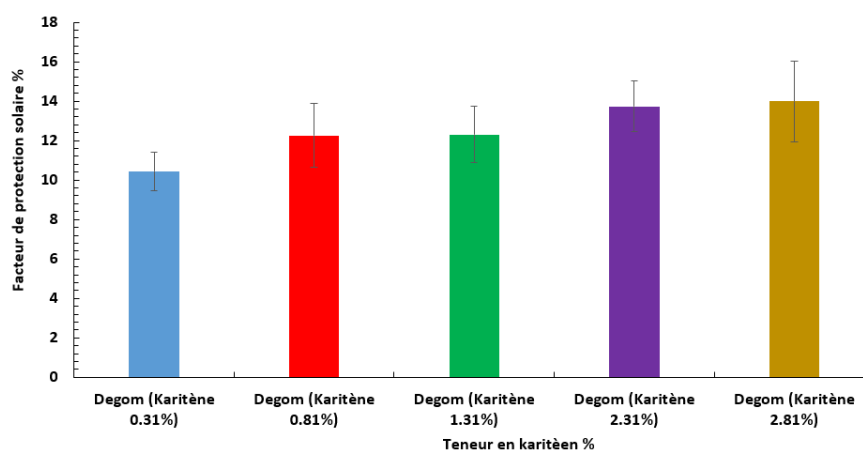


Figure 38: Facteur de protection solaire karitène dépendant. Les essais ont été réalisés en triplicat ($n = 3$)

III.6.2. Mise en évidence du potentiel photoprotecteur selon les modèles expérimentaux

La mise au point des conditions expérimentales (voir tableau 46), telle que décrite au paragraphe II.7.2.1. *Mise au point de modèles expérimentaux acellulaire et cellulaire d'investigation*, a permis de retenir les conditions optimales (N° 8) avec une préincubation pendant 10 min, un préchauffage de la lampe de 30 min, une irradiation pendant 30 min tout en maintenant la plaque fermée, et une distance plaque-source lumineuse d'environ 25 cm. Cette dernière condition expérimentale a fait l'objet d'une publication scientifique (Goumbri et al. 2025).

Tableau 46 : Résultats des essais selon les conditions expérimentales pour l'évaluation du potentiel photoprotecteur en milieu cellulaire utilisant le beurre brut

N°	Conditions expérimentales	Résultats/observations de viabilité cellulaire
1	(i) Pré-incubation à l'étuve = 10 min ; (ii) Durée d'irradiation = 15 min ; (iii) Distance = 25 cm ; (iv) Couvercle retiré ; (v) Préchauffage de la lampe = 15 min	- Viabilité du contrôle normal* après T _{4h} d'incubation à l'étuve = 128,12 % ; - Viabilité maximale des échantillons = 108,47 % ; - Viabilité minimale des échantillons = 87,95 %
2	(i) Pré-incubation à l'étuve = 10 min ; (ii) Durée d'irradiation = 30 min (iii) Distance = 25 cm ; (iv) Couvercle fermé ; (v) Pas de préchauffage de la lampe	- Viabilité du contrôle normal après T _{4h} d'incubation à l'étuve = 108,72 % ; - Viabilité maximale des échantillons = 111,74 % ; - Viabilité minimale des échantillons = 96,64 %
3	(i) Pré-incubation à l'étuve = 60 min ; (ii) Durée d'irradiation = 30 min ; (iii) Distance = 25 cm ; (iv) Couvercle retiré ; (v) Préchauffage de la lampe = 15 min	- Viabilité du contrôle normal après T _{4h} d'incubation à l'étuve = 97,53 % ; - Viabilité maximale des échantillons = 107,07 % ; - Viabilité minimale des échantillons = 93,29 %
4	(i) Pré-incubation à l'étuve = 60 min ; (ii) Durée d'irradiation = 30 min ; (iii) Distance = 25 cm ; (iv) Couvercle retiré ; (v) Préchauffage de la lampe = 60 min	- Viabilité du contrôle normal après T _{4h} d'incubation à l'étuve = 120,00 % ; - Viabilité maximale des échantillons = 108,36 % ; - Viabilité minimale des échantillons = 81,59 %
5	(i) Pré-incubation à l'étuve = 90 min ; (ii) Durée d'irradiation = 30 min ; (iii) Distance = 18 cm ; (iv) Couvercle fermé ; (v) Préchauffage de la lampe = 60 min	- Viabilité du contrôle normal après T _{4h} d'incubation à l'étuve = 99,40 % ; - Viabilité maximale des échantillons = 136,83 % ; - Viabilité minimale des échantillons = 82,04 %
6	(i) Pré-incubation à l'étuve = 60 min ; (ii) Durée d'irradiation = 60 min ; (iii) Distance = 7 cm ; (iv) Couvercle retiré ; (v) Préchauffage de la lampe = 15 min	- Viabilité du contrôle normal après T _{4h} d'incubation à l'étuve = 116,77 % ; - Viabilité maximale des échantillons = 122,42 % ; - Viabilité minimale des échantillons = 46,45 %
7	(i) Pré-incubation à l'étuve = 60 min (ii) Durée d'irradiation = 90 min (iii) Distance = 7 cm (iv) Couvercle retiré (v) Préchauffage de la lampe = 15 min	- Viabilité du contrôle normal après T _{4H} d'incubation à l'étuve = 110,80 % ; - Viabilité maximale des échantillons = 120,44 % ; - Viabilité minimale des échantillons = 38,26 %
8	(i) Pré-incubation à l'étuve = 10 min ; (ii) Durée d'irradiation = 30 min ; (iii) Distance = 25 cm ; (iv) Couvercle fermé ; (v) Préchauffage de la lampe = 30 min	- Viabilité du contrôle normal après T _{4H} d'incubation à l'étuve = 102,83 % ; - Viabilité maximale des échantillons = 570,75 % ; - Viabilité minimale des échantillons = 96,23 %

* : Contrôle normal = contrôle cellules sans le produit et le solvant

III.6.2.1. Évaluation *in vitro* du potentiel photoprotecteur par irradiation du Rose Bengal en milieu acellulaire

L'effet des échantillons tests (beurre brut et extraits polaires) sur le modèle UVR-like à 550 nm a été étudié à différentes concentrations par dilution des solutions mères et les résultats sont reportés dans le tableau 47.

L'évaluation *in vitro* du potentiel photoprotecteur par irradiation du RB en milieu acellulaire a permis de mettre en évidence dans un premier temps l'effet du RB sur la valeur de l'absorbance mesurée. En effet, en présence de RB photosensibilisé, les valeurs de l'absorbance diminuent avec le temps lorsque mesurées à 400 nm avec la formation d'endoperoxydes, mais restent inchangées en l'absence de RB à 400 nm comme à 550 nm, comme l'indique la figure 39.

Les résultats de l'expérimentation à différentes concentrations du beurre brut en solution dans l'éthanol, en présence du RB irradié, montrent une décroissance de la valeur de l'absorbance dans le temps, proportionnelle à la concentration. L'absorbance reste cependant inférieure à celle du contrôle solvant éthanol, figure 40a. La mise en évidence de l'effet *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ par les échantillons tests traditionnels est illustrée en exemple par la figure 40b. Cet effet *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ a également été observé avec les extraits polaires respectifs des échantillons bruts, figures 40c et 38d. On note également une inhibition de la décroissance de la valeur de l'absorbance par les extraits polaires des échantillons traditionnels en présence de RB irradié, par rapport au contrôle solvant méthanol. Tout comme les échantillons traditionnels bruts, les trois (3) échantillons industriels (brut, raffiné et karitène) ont présenté les mêmes effets, avec une illustration des échantillons raffiné et karitène dans les figures 41 e-h.

Tableau 47: Effets des échantillons bruts et de leurs extraits polaires sur la production de l' $^1\text{O}_2$ par photosensibilisation du RB. Les valeurs d'absorbance à 400 nm montrent une décroissance de l'ADPA en fin de réaction (300 s) pour tous les échantillons test

Échantillons	Extraits polaires		Échantillons de beurres bruts	
	Concentration (ppm)	Absorbance relative à 300s (%)	Concentration (µg/mL)	Absorbance relative à 300s (%)
	ADPA seul	93,22±2,56	ADPA seul	96,83±2,56
	Contrôle (ADPA + RB)	42,59±2,31	Contrôle (ADPA + RB)	50,75±2,31
	Contrôle (méthanol)	46,27±2,27	Contrôle (éthanol)	59,48±1,06
Houe ₅	0,010	50,82±1,11	4,44	67,01±2,49
Houe ₅	0,100	53,54±2,07	22,22	70,98±1,06
Houe ₅	0,201	55,39±0,23	44,44	76,02±2,25
Ioba ₁	0,005	50,13±2,77	4,44	66,23±1,01
Ioba ₁	0,051	49,00±4,98	22,22	73,23±2,1
Ioba ₁	0,102	50,34±1,91	44,44	78,13±1,04*
Ioba ₂	0,005	48,43±1,05	4,44	67,07±1,05
Ioba ₂	0,047	51,79±1,86	22,22	71,03±2,80
Ioba ₂	0,094	57,59±2,61 ^{###}	44,44	74,00±3,01
Kadi ₅	0,013	48,60±1,90	4,44	69,84±2,1
Kadi ₅	0,135	53,57±7,70	22,22	70,90±2,64
Kadi ₅	0,270	57,15±1,35 ^{##}	44,44	76,46±2,02
Naya ₁	0,015	49,19±6,60	4,44	68,28±3,07
Naya ₁	0,154	49,50±7,60	22,22	74,26±2,07
Naya ₁	0,308	55,79±3,84	44,44	79,30±0,62**
Siss ₁	0,003	50,73±3,06	4,44	69,72±1,01
Siss ₁	0,031	53,37±0,02	22,22	70,94±2,04
Siss ₁	0,063	53,76±0,42	44,44	70,64±0,02
Yate ₁	0,018	53,47±0,48	4,44	64,50±0,60
Yate ₁	0,184	55,15±0,49	22,22	71,60±0,93
Yate ₁	0,369	56,48±2,27 [#]	44,44	80,32±0,92***
Brut industriel	0,008	48,73±8,37	4,44	66,60±2,26
Brut industriel	0,085	50,78±7,45	22,22	70,41±2,02
Brut industriel	0,170	55,12±0,86	44,44	72,79±1,63
Raffiné	0,007	53,17±1,64	4,44	68,02±2,08
Raffiné	0,073	53,07±0,17	22,22	72,42±2,09
Raffiné	0,146	54,14±0,65	44,44	77,13±0,92
Kariténe	0,006	46,44±6,33	4,44	65,75±0,02
Kariténe	0,055	50,82±3,40	22,22	68,80±4,02
Kariténe	0,110	54,61±3,42	44,44	69,94±0,11
TiO ₂	-	-	0,44	62,76±0,79
TiO ₂	-	-	4,44	62,88±6,53
TiO ₂	-	-	22,22	64,98±3,28

^{###} > ^{##} > [#] : Top trois des extraits polaires testés présentant les effets *quenching* de l'oxygène singulet les plus élevés ; *** > ** > * : Top trois des échantillons bruts testés présentant les effets *quenching* de l'oxygène singulet les plus élevés. RB : RoseBengal ; TiO₂ : Dioxyde de titane ; ADPA : Acide Anthracène 9.10-dipropionique. Les essais ont été réalisés en triplicat ($n = 6$) sur deux jours ($N = 2$) indépendants

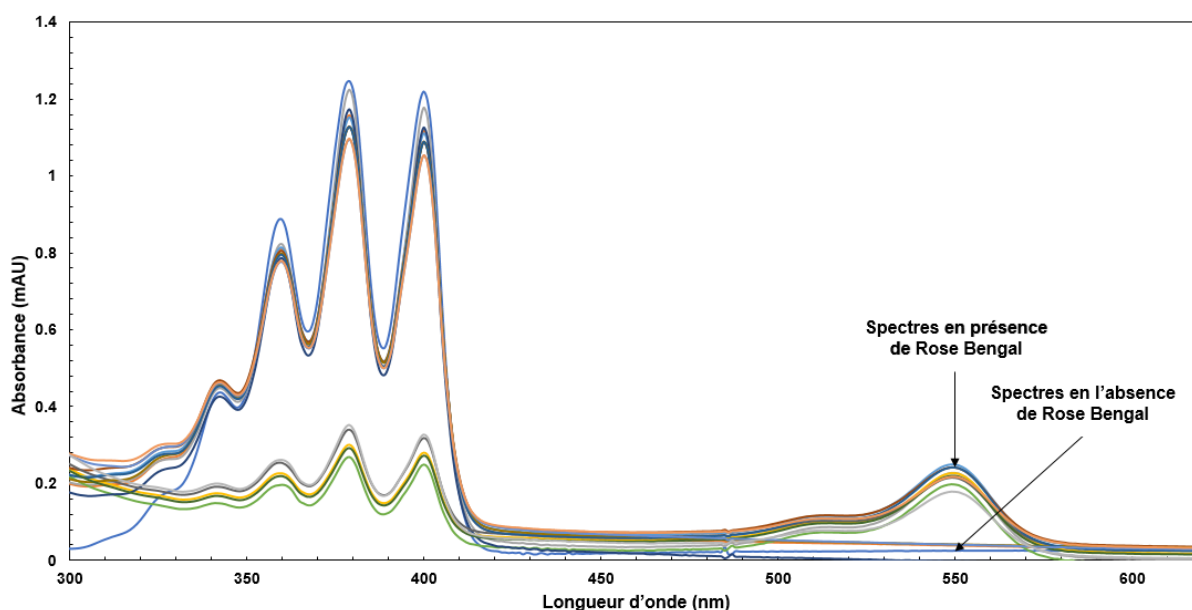


Figure 39 : Influence des échantillons tests sur la production de l' $^1\text{O}_2$ induite par l'ADPA, illustrant l'allure des spectres des échantillons Ioba₂, karitène et du TiO₂ en présence ou en absence de RB à T₀ et T_{300s}

Les résultats tels que rapportés dans le tableau 47 illustrent quantitativement la réaction photochimique de l' $^1\text{O}_2$ en présence de RB avec les échantillons testés (beurres bruts et extraits polaires), mettant en évidence la cinétique de décroissance de l'ADPA en fin d'analyse (300 s) en fonction de la concentration. On note une décroissance plus rapide du contrôle ADPA + RB par rapport au contrôle solvant en présence de RB, aussi bien pour tous les échantillons bruts que pour leurs extraits polaires. Les concentrations des échantillons bruts étaient de 4,44 µg/mL, 22,22 µg/mL et 44,44 µg/mL; contre 0,1 mg, 1,0 mg et 2,0 mg équivalents beurre brut pour les extraits polaires (voir tableau 40). Le TiO₂ en solution dans l'éthanol (0,44 µg/mL, 4,44 µg/mL et 22,22 µg/mL) a servi de contrôle positif pour les échantillons bruts.

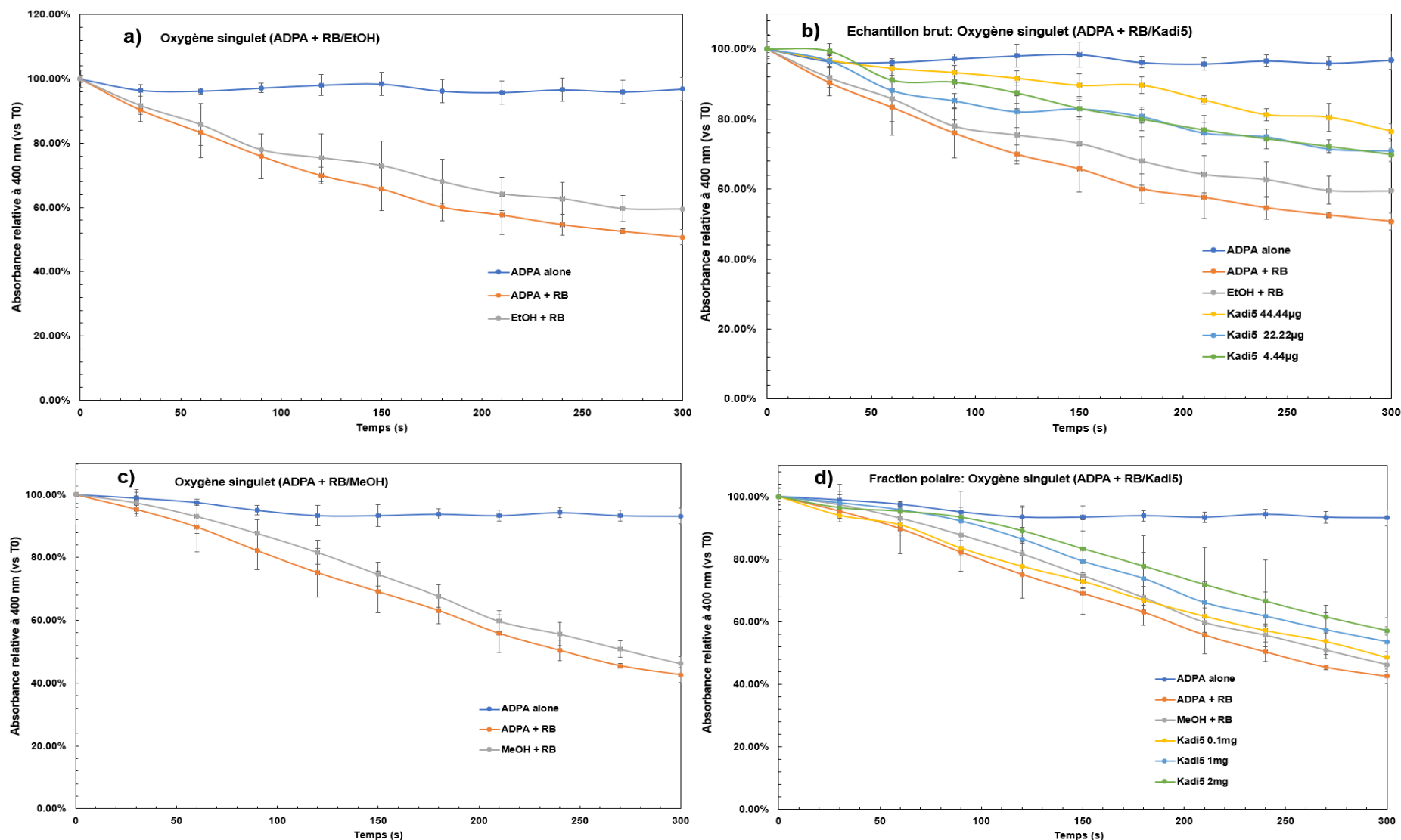


Figure 40: Effets des échantillons bruts traditionnels et de leurs extraits polaires sur la production de l' $^1\text{O}_2$ par photosensibilisation du RB. Les échantillons ont été traités à différentes concentrations par rapport à l'éthanol et au méthanol comme contrôle à 0,44 %. L'absorbance est mesurée à 400 nm et les mesures ont été faites en triplicat ($n = 6$) sur deux jours ($N = 2$) indépendants (voir tableau 47). **a)** Effet de l'ADPA seul et du contrôle (éthanol) sur la formation de l' $^1\text{O}_2$. **b)** Effet de l'échantillon traditionnel brut Kadi5 sur le système ADPA. **c)** Effet de l'ADPA seul et du contrôle (méthanol) sur la formation de l' $^1\text{O}_2$. **d)** Effet de l'extrait polaire de l'échantillon traditionnel Kadi5 sur le système ADPA

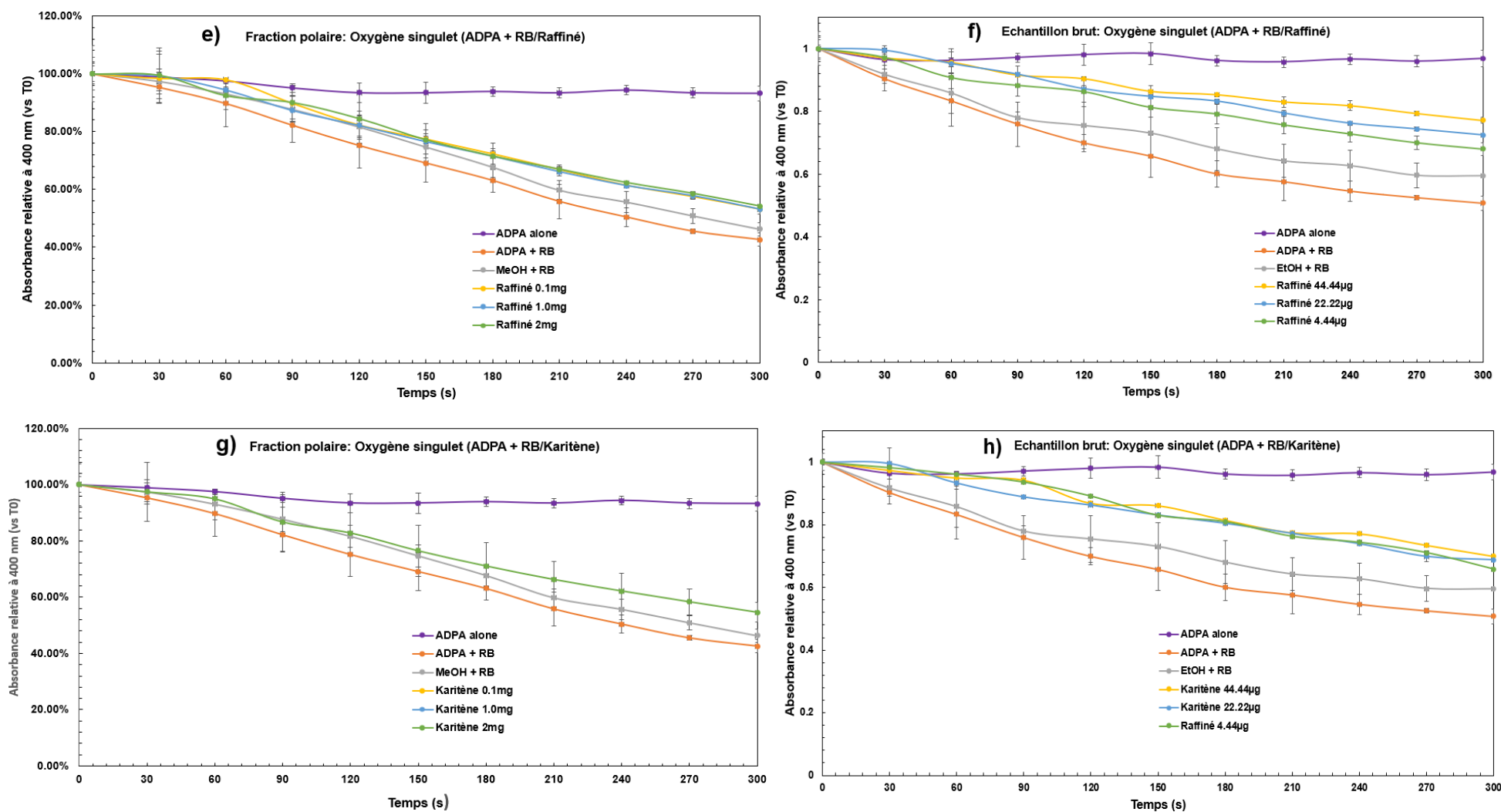


Figure 41: Effets des échantillons bruts industriels et de leurs extraits polaires sur la production de l^1O_2 par photosensibilisation du RB. Les mesures ont été faites en triplicat ($n = 6$) sur deux jours ($N = 2$) indépendants. **e)** Effets de l'extrait polaire de l'échantillon industriel raffiné sur le système ADPA. **f)** Effets de l'échantillon industriel brut raffiné sur le système ADPA. **g)** Effets de l'extrait polaire de l'échantillon industriel karité sur le système ADPA. **h)** Effets de l'échantillon industriel karité sur le système ADPA

III.6.2.2. Évaluation du potentiel photoprotecteur sur modèle cellulaire

a) Évaluation de la toxicité intrinsèque du beurre brut

L'évaluation de la phototoxicité du BK brut sur les cellules kératinocytes HaCaT a été conduite en 24 h et 48 h d'incubation, à des concentrations différentes de 0,1, 1, 10 et 100 µg/mL en solution dans l'éthanol. La viabilité cellulaire a été mesurée par le test MTS, après 1 h, 2 h et 3 h d'incubation à l'étuve à 37 °C et à 5 % de CO₂.

Les résultats ont mis en évidence l'absence de toxicité cellulaire après 24 h (figures 42a et 42b) et 48 h (figures 42c et 42d) d'incubation, avec l'éthanol comme contrôle solvant à la concentration de 2 %. La viabilité cellulaire était supérieure à 60 % et 90 %, respectivement après 24 h et 48 h d'incubation pour la mesure de 3 h (T_{3h}). Pour la mesure de 2 h (T_{2h}), la viabilité était supérieure à 75 % et 93 %, respectivement après 24 h et 48 h d'incubation. Ces résultats ont montré l'absence de toxicité intrinsèque du BK en milieu cellulaire, d'où l'évaluation du pouvoir de photoprotection du BK en solution dans l'éthanol.

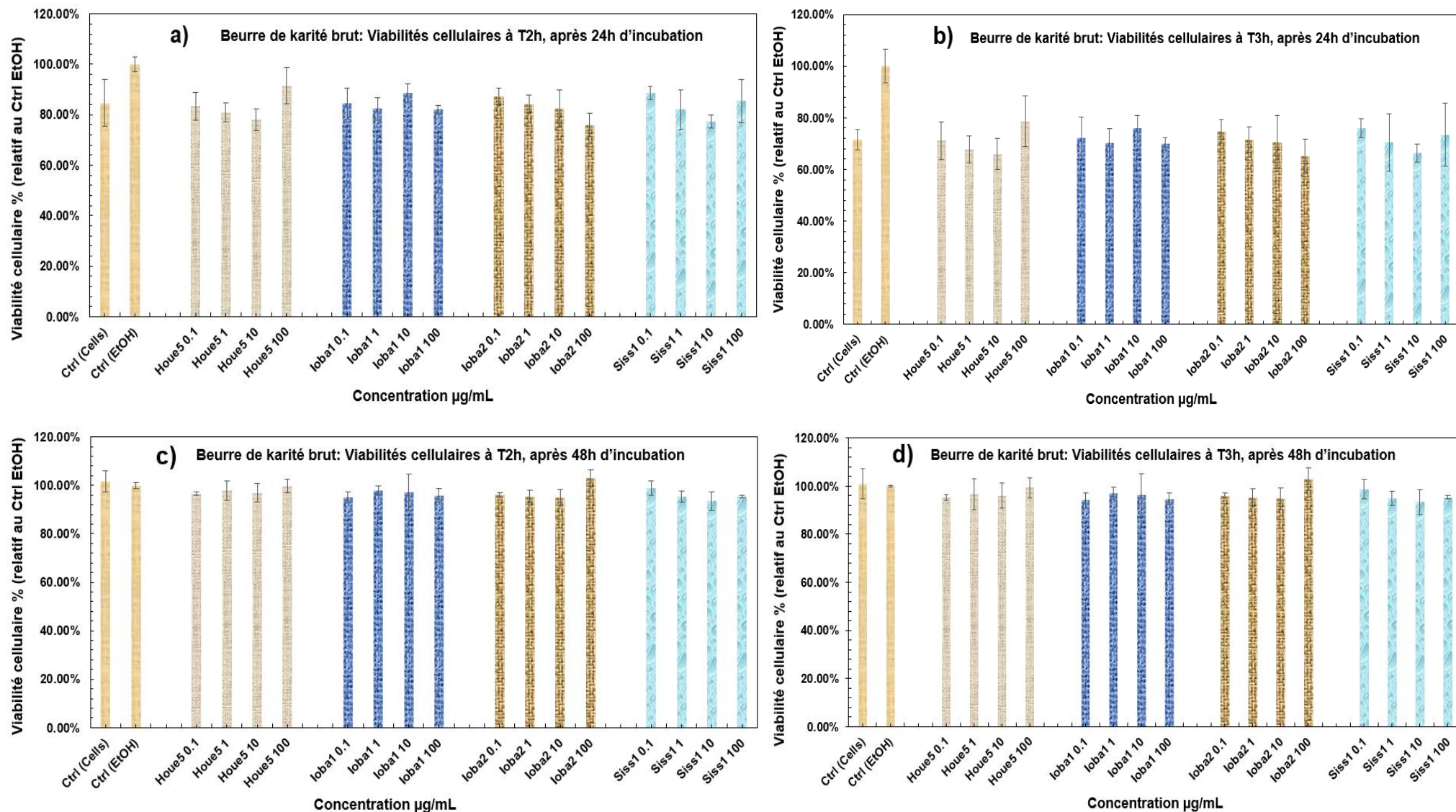


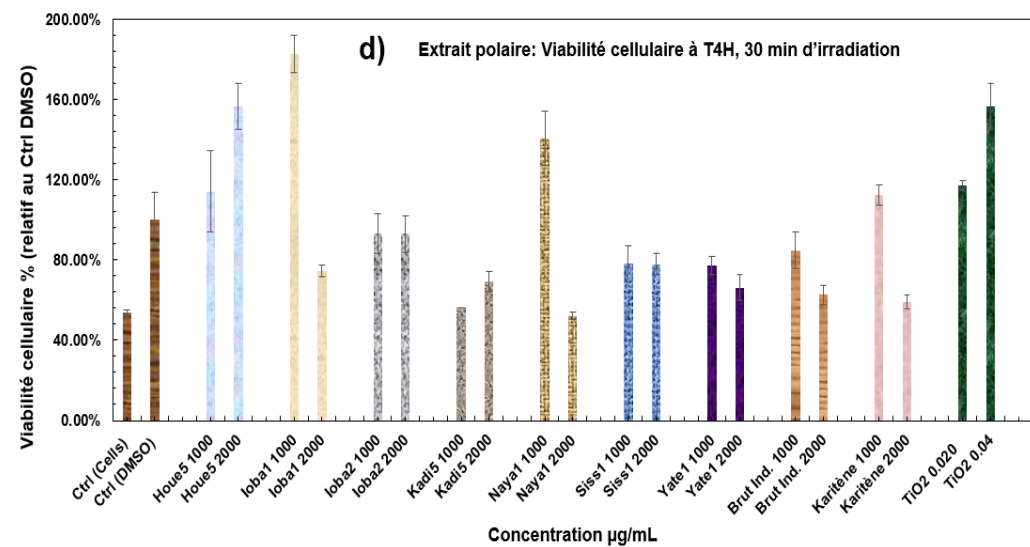
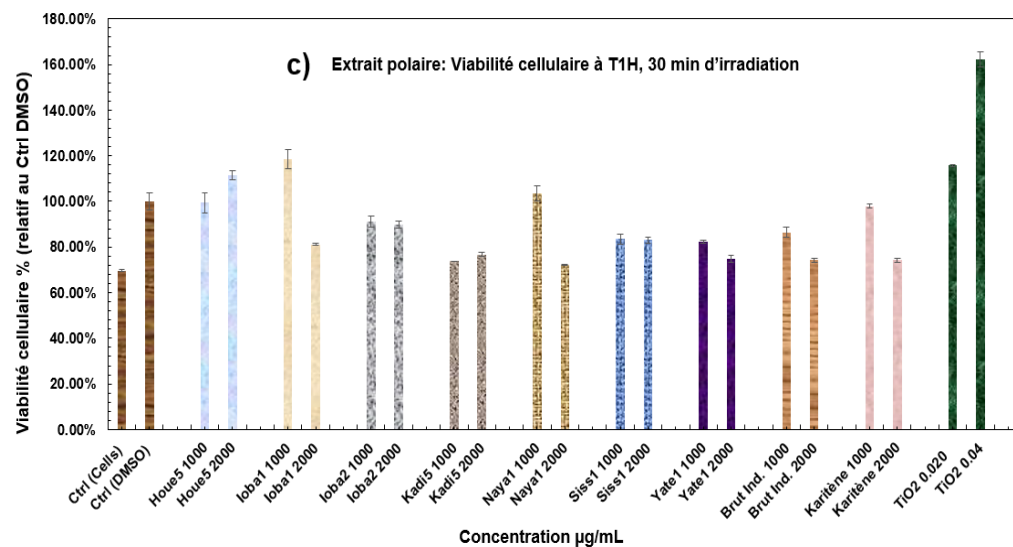
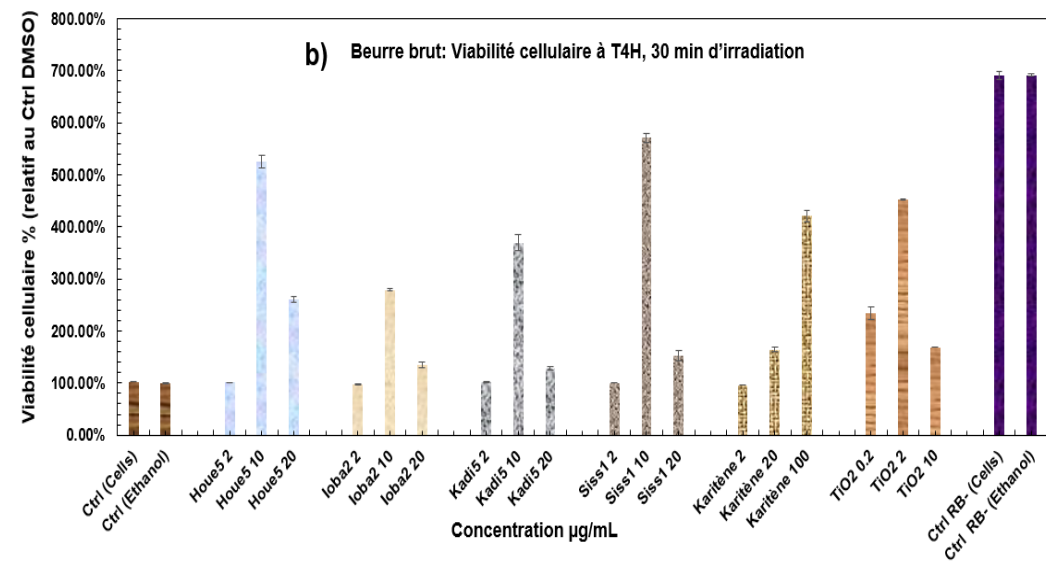
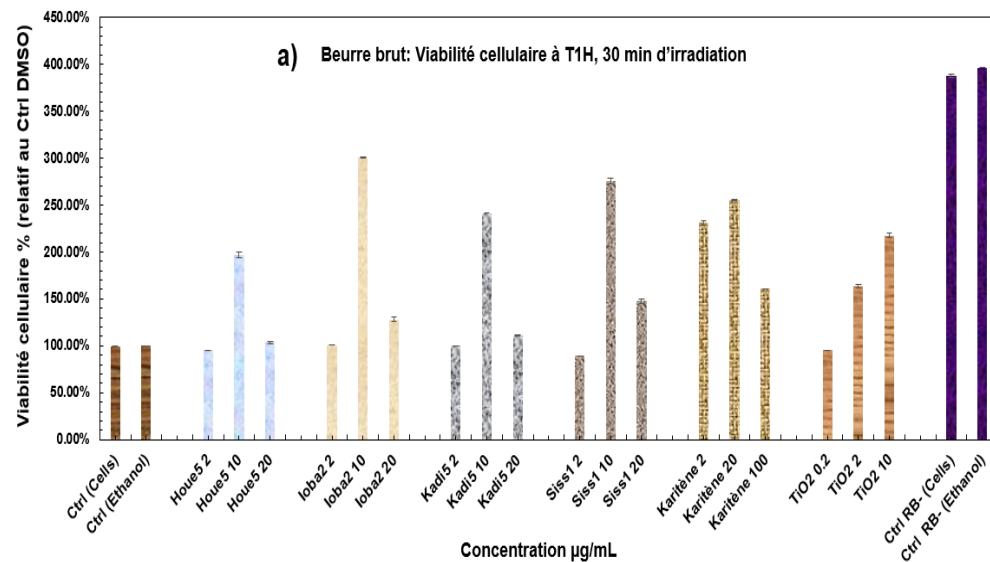
Figure 42: Cytotoxicité sur cellules HaCaT du beurre de karité brut. Les mesures ont été faites en triplicat ($n = 6$) sur deux jours ($N = 2$) indépendants. La viabilité cellulaire a été mesurée par le test MTS. **a)** Résultats en 24h d'incubation T_{2h}; **b)** Résultats en 24h d'incubation T_{3h}; **c)** Résultats en 48h d'incubation à T_{2h}; **d)** Résultats en 48h d'incubation à T_{3h}

b) Investigation de l'effet photoprotecteur après traitement des cellules HaCaT suivi de l'irradiation du Rose Bengal

Les évaluations du potentiel photoprotecteur des beurres bruts (en solution dans l'éthanol à 2, 10 et 20 µg/mL) et de leurs extraits polaires (en solution dans le DMSO à 1000 et 2000 µg/mL équivalents de beurre brut) ont été réalisées en utilisant le TiO₂ comme contrôle positif dans les solutions respectives. Des contrôles cellules et solvant en l'absence de RB ont en plus été conduits afin d'évaluer l'effet de l'irradiation sur le RB. Les résultats ont montré qu'en l'absence de RB, il y avait une bonne croissance cellulaire (figures 43a et 43b), jusqu'à environ 400 % après T_{1h} (figure 43a) et environ 700 % pour T_{4h} (figure 43b).

Après 1 h d'incubation, la viabilité cellulaire a été mesurée et les résultats ont montré que les échantillons bruts induisaient une viabilité cellulaire allant de 89,38 % pour l'échantillon Siss₁ 2 µg/mL, à 300,88 % pour l'échantillon Ioba₂ 10 µg/mL (figure 43a). Le TiO₂ a montré une viabilité cellulaire comprise entre 95,13 % à 0,2 µg/mL, et 217,26 % à 10 µg/mL. À T_{4h}, la viabilité cellulaire était de 96,23 % pour l'échantillon karitène (à 2 µg/mL) et de 570,75 % pour l'échantillon Siss₁ (à 10 µg/mL) (figure 43b). Pour le TiO₂, elle était de 169,18 % à 10 µg/mL, et 453,14 % à 2 µg/mL.

Les résultats de la viabilité cellulaire pour les extraits polaires des différents échantillons bruts ont été présentés dans les figures 43c et 43e, illustrant les mesures après 1 h (T_{1h}), 4 h (T_{4h}) et en *overnight*. Après 1 h d'incubation (figure 43c), la viabilité cellulaire due aux extraits polaires était comprise entre 72,22 % pour l'échantillon Naya₁ (à 2000 µg/mL), et 118,52 % pour l'échantillon Ioba₁ (à 1000 µg/mL). À la même concentration de 2000 µg/mL, l'échantillon Ioba₁ présentait une viabilité cellulaire de l'ordre de 81,14 %, supérieure à celle de l'échantillon Naya₁. Cependant, le TiO₂ induisait une viabilité de 115,82 % à la concentration de 0,02 µg/mL et 162,29 % à la concentration de 0,04 µg/mL. Après 4 h et en *overnight*, la viabilité cellulaire était respectivement comprise entre 52,24 % (Naya₁ à 2000 µg/mL), 182,96 % (Ioba₁ à 1000 µg/mL) et entre 54,26 % (Kadi₅ à 1000 µg/mL) et 203,71 % (Naya₁ à 1000 µg/mL). Les viabilités cellulaires pour le karitène et le TiO₂ étaient sensiblement dans les mêmes limites, tant pour la mesure à T_{4h} qu'en *overnight*.



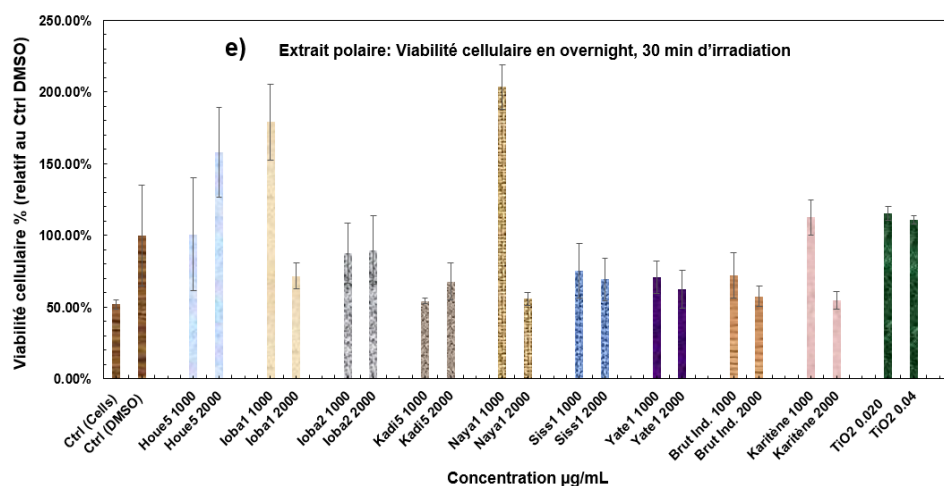


Figure 43: Effet des échantillons bruts en solution dans l'éthanol et de leurs extraits polaires par rapport au TiO₂ en solution dans le DMSO, sur la viabilité des cellules HaCaT. **a)** Effet du beurre brut après T_{1h} ; **b)** Effet du beurre brut après T_{4h} ; **c)** Effet de l'extrait polaire après T_{1h} ; **d)** Effet de l'extrait polaire après T_{4h} ; **e)** Effet de l'extrait polaire en *overnight*. Les mesures ont été faites en triplicat ($n = 6$) sur deux jours ($N = 2$) indépendants et la viabilité cellulaire a été mesurée à 492 nm relative au contrôle solvant à la concentration de 2%. Les concentrations des extraits polaires sont exprimées en beurre brut équivalent, tel qu'indiqué dans le tableau 40

À la suite de l'évaluation du potentiel photoprotecteur sur les modèles expérimentaux UVR-like à 550 nm, la présente étude ambitionnait d'évaluer concomitamment le potentiel photoprotecteur du BK sur un modèle UVB dans le domaine de 290 à 315 nm. Cependant, les résultats ont été présentés sous forme de travaux préliminaires en annexe (voir annexe 7) du fait de limites liées au plateau technique.

Discussion

IV. DISCUSSION

IV.1. Caractéristiques physicochimiques et thermiques du beurre de karité

Les différences dans les procédés d'extraction, depuis la collecte des fruits jusqu'au traitement de la pâte et de l'émulsion, peuvent expliquer les variations observées dans les caractéristiques physicochimiques du beurre de karité produit.

IV.1.1. Caractéristiques physicochimiques du beurre de karité

IV.1.1.1. Indices chimiques de qualité et teneur en kariténe

Les résultats de dosage des indices chimiques des différents échantillons (5 échantillons pilotes et 37 échantillons collectés avec leurs procédés d'extraction) ont montré une grande variabilité des paramètres (voir tableaux 29 et 30).

Les teneurs en AGL étaient comprises entre $1,1 \pm 0,1\%$ et $9,7 \pm 0,1\%$ pour l'ensemble des échantillons testés. Les échantillons avec les teneurs en AGL comprises entre $1,1\%$ et 3% indiquent du beurre de qualité agroalimentaire, propre à la consommation. Seulement deux échantillons (Houe₃ et Mouh₁) répondaient aux spécifications pour le grade pharmaceutique (valeur maximale = 1%), pour leur teneur en AGL, ce qui indique du beurre de très bonne qualité. La teneur maximale dans notre étude était de $9,7 \pm 0,1\%$, ce qui était nettement plus élevée que celle ($3,27\%$) rapportée par Seweh et *al.* (2019) pour du BK du Ghana extrait à l'aide d'un mini extracteur automatique réalisé en Chine. La cuisson des noix de karité dans l'eau pourrait conduire à la rupture des liaisons des TAG, responsables de la libération des acides gras libres (AGL), ce qui pourrait contribuer à expliquer les teneurs élevées pour les AGL de certains échantillons, ajoutée à cela la non-maîtrise des conditions de cuisson (durée, température), et donc l'absence de standardisation des techniques d'extraction.

Plutôt en 2016, une étude menée au Ghana par Seweh et *al.* (2016) avait rapporté des valeurs d'AGL d'une grande variabilité également (entre $4,65\%$ et $7,96\%$) pour du BK extraits par des méthodes traditionnelles, mécaniques et chimiques. Ces résultats étaient en accord avec ceux trouvés dans notre étude. Des teneurs encore plus élevées de AGL ($12,24\% \pm 0,30\%$)

ont été rapportées par Abdel-Razek et *al.* (2023) dans leur étude sur du BK en provenance du Ghana. Ces différences pourraient être attribuées à divers facteurs, notamment les ethno-variétés des fruits, le traitement des noix et des amandes, les méthodes d'extraction mises en œuvre et les conditions de stockage. Dans notre étude, l'échantillon Yate₁ du P₄ (Trempe à l'eau des fruits dépulés - Séchage au soleil - Cuisson de la pâte - Pas de barattage) avait la teneur en AGL la plus élevée, et les échantillons du P₁ avaient les valeurs les plus faibles. Ce procédé d'extraction se distinguait des autres par l'étape de trempage des noix et l'absence de barattage à l'eau de la pâte, qui est une étape importante pour le procédé d'extraction. Ces résultats mettent en évidence l'impact des pré-traitements de la matière première sur la qualité du BK.

De façon générale, les échantillons tests de BK du Burkina Faso étaient dans leur majorité non conformes aux normes pour les industries cosmétiques et pharmaceutiques. Les AGL qui proviennent de l'hydrolyse des triglycérides sont un indicateur crucial de la qualité chimique des graisses (Abdel-Razek et *al.* 2023). Leurs taux peuvent être réduits par neutralisation ou par raffinage physique, mais ces procédures réduisent également la teneur en plusieurs composés bioactifs naturellement présents dans le BK. Cependant, il est conseillé de maintenir des niveaux de l'AGL à un minimum en appliquant des pratiques de traitement appropriées.

Les résultats de l'IO obtenus pour l'ensemble des échantillons (54,0 gI₂/100g - 65,5 gI₂/100g) g montrent qu'ils étaient dans les limites fixées dans le Codex Alimentarius, entre 30 gI₂/100g et 75 gI₂/100g. En ce qui concerne le BK brut, l'IO/Wijs est légèrement supérieur à l'IO/GC, en raison de la présence du karitène, influençant considérablement sa teneur. Il est donc recommandé de calculer la valeur de l'IO obtenue par la méthode de Wijs (IO/Wijs) en lien avec la composition en AG par GC (IO/GC). Ainsi, l'IO/GC calculé se situe entre 50,5 gI₂/100g et 64,2 gI₂/100g. Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par Ajala et *al.* (2019) au Nigéria, qui trouvaient des valeurs comprises entre 58,50 gI₂/100g et 70,30 gI₂/100g pour du BK extrait par diverses méthodes (traditionnelles, par solvant, enzymatiques, et mécaniques). Contrairement à nos résultats, (Oussou et *al.* 2022) avaient rapporté des taux plus bas du BK extrait par pression à froid (28,74 gI₂/100g), par solvant (32,36 gI₂/100g), et par méthode traditionnelle (44,52 gI₂/100g). Les auteurs (Seweh et *al.* 2016) avaient rapporté des taux légèrement similaires à nos résultats, entre 45,67 gI₂/100g et 63,89 gI₂/100g, pour du BK originaire du Ghana extrait par méthode traditionnelle. Cette différence est liée à la variation de la teneur en AG des échantillons. En effet, la teneur en AG insaturé est directement proportionnelle à la teneur en IO. L'IO est directement lié au degré d'insaturation de l'huile.

Plus l'IO est élevé, plus la teneur en AG insaturés est élevée, et plus la matière est susceptible d'oxydation, donc beaucoup plus instable.

L'indice de peroxyde (IP) est un critère de qualité de choix pour les huiles et les graisses, en fournissant une indication sur le rancissement et donc sur la stabilité du produit. Le rancissement oxydatif est un phénomène observé lorsque les AG insaturés sont en présence d'oxygène atmosphérique et catalysé par la chaleur et la lumière. Conformément à la classification établie par le Codex Alimentarius, seulement 9 échantillons sur les 37 étaient conformes aux critères pour le beurre de grade pharmaceutique 1^a (≤ 10 meq O₂/kg). Tous les 5 échantillons de lots pilotes étaient de grade pharmaceutique. Les échantillons dont les teneurs étaient parmi les plus faibles étaient ceux dont le procédé d'extraction était inconnu (Kadi₄ et Kadi₅), suivis des échantillons du P₁ (Ioba₂, Naho₂ et Gour₁). Pour le beurre de qualité alimentaire 1^b (11 - 15 meq O₂/kg), 19 échantillons parmi les 37 au total étaient conformes, indiquant la possibilité de son utilisation dans l'industrie agroalimentaire. Les 18 autres échantillons avec des teneurs > 15 meq O₂/kg constituent du beurre de qualité 1^c, indiqué pour la savonnerie et la consommation directe après raffinage. Les résultats obtenus pour l'IP dans leur majorité étaient élevés par rapport à ceux de Seweh et *al.* (2016) qui rapportaient des valeurs de l'IP comprises entre 3,25 meq O₂/kg et 3,85 meq O₂/kg pour du beurre extrait par des méthodes traditionnelles. Dans le même ordre, (Elijah et *al.* 2019) dans leur étude sur du BK extrait selon diverses techniques au Nigéria, avaient trouvé respectivement 9,80 meq O₂/kg, 11,00 meq O₂/kg, 12,10 meq O₂/kg et 13,80 meq O₂/kg pour le beurre extrait traditionnellement, par solvant, par des enzymes et par des méthodes mécaniques. Aussi, pour le BK originaire de Côte d'Ivoire, les IP étaient encore plus bas, de l'ordre de 2,28 meq/kg, 1,88 meq/kg et 2,94 meq/kg, respectivement pour l'extraction par pression à froid, au solvant et par la méthode traditionnelle (Oussou et *al.* 2022). Les valeurs élevées de l'IP obtenues dans cette étude pourraient s'expliquer par le fait d'un emballage non adapté, qui laisse passer la lumière, de conditions de stockage inappropriées (température extrême), et/ou d'un contact permanent avec l'oxygène dans le conditionnement définitif (défaut de remplissage). Les variations observées dans notre étude et celles d'autres auteurs pourraient s'expliquer par les différences de qualité de la matière première (fruits de karité), des étapes des procédés d'extraction, du conditionnement et du stockage du produit fini.

L'indice de réfraction (RI) est lié à la longueur de la chaîne d'AG, au degré d'insaturation et au degré de conjugaison; il augmente avec la longueur de la chaîne et avec le nombre de

doubles liaisons (Bariwere Samuel et *al.* 2017; Shahidi et Ambigaipalan 2020). Dans le cas spécifique du BK, la relation qui est établie entre la RI et l'IO (Chéneveau 1917) doit l'être en prenant en compte l'IO/GC à cause de la teneur en karitène. La pureté de la matière grasse et de l'huile influence fortement la RI et l'IO, ce qui peut expliquer certains résultats obtenus. Ainsi, la pureté des échantillons de BK dans la présente étude pourrait expliquer la diversité des résultats de RI constatés dans notre étude, qui étaient compris entre 1,407 et 1,472. Seul l'échantillon Komo₁ du P₂ avait la valeur 1,407, suivi par Como₂ à 1,469. La RI à 44 °C pour le BK non raffiné est établie entre 1,4620 et 1,4650 (Codex Alimentarius 2017b), ce qui diffère des résultats obtenus dans cette étude. Excepté l'échantillon Komo₁, nos résultats étaient légèrement différents de ceux trouvés par Honfo et *al.*, (2014) (1,467 - 1,469 à 40 °C), et de (Nahm et *al.* 2013) (1,463 - 1,466). Selon Ollivier et *al.* (2015), la température de mesure de RI est normalisée par la méthode *ISO 6320 (Corps gras d'origines animales et végétale. Détermination de l'indice de réfraction)* entre 20 °C et 40 °C selon le type de graisse. Plus les AG sont insaturés, plus la RI est élevée. Les résultats de la présente étude pourraient donc s'expliquer par la composition en AG des beurres.

Les valeurs de l'IS obtenues pour tous les échantillons (120 - 195) mgKOH/g étaient inférieures aux limites définies par le Codex Alimentarius (160 - 195 mgKOH/g), ce qui pourrait être dû à plusieurs facteurs intrinsèques ou extrinsèques du BK extrait localement. L'indice de saponification varie en fonction de la composition des AG présents dans une matière grasse. Selon la norme *NF EN ISO 3657, annexe B*, plus la longueur des chaînes hydrocarbonées des AG est courte, plus l'IS est élevée, car la quantité de base nécessaire pour saponifier ces acides est faible. Contrairement à cela, plus la chaîne des AG est longue (telle que stéarique, arachidique, etc.), plus l'IS est faible. En plus de la composition en AG qui influence fortement la valeur de l'IS, les impuretés et/ou les résidus non lipidiques peuvent biaiser la mesure de l'IS. De même, la qualité intrinsèque du beurre - oxydation entraînant une altération de la composition chimique -, le phénomène de rancissement - certains produits oxydés ne saponifient pas totalement, diminuant ainsi la valeur de l'IS - et la méthode d'extraction employée - risque de perte de certains composants, modification de la proportion d'AG et donc IS -, sont autant de facteurs pouvant expliquer nos résultats.

La mesure du coefficient d'extinction spécifique $K_{\lambda 232nm}$ fournit des informations sur la teneur en diènes formés suite à la peroxydation des AG polyinsaturés, et sur les produits d'oxydation primaire dans l'huile. De la même manière, le coefficient d'extinction spécifique $K_{\lambda 268nm}$ fournit des informations sur les triènes conjuguées et les produits d'oxydation secondaires. La

mesure du coefficient d'extinction spécifique par spectrophotométrie UV donne une indication sur la teneur en produits d'oxydation dans les huiles (Omar M Almrhag et Abookleesh 2016; Karoui et *al.* 2020; Symoniuk et *al.* 2022). Des spécifications ont été établies et existent pour certaines graisses et huiles, comme par exemple l'huile d'olive et l'huile de grignons d'olive (Conseil Oléicole International 2018), ce qui n'est pas encore le cas pour le BK. Dans notre étude, les valeurs du coefficient $K_{\lambda 232nm}$ étaient comprises entre 0,612 et 1,337 ; respectivement pour les échantillons Como₂ et Naho₃, tous du P₁, suivi par Kadi₄ (procédé non collecté) à 1,244. À la longueur d'onde de 268 nm, les valeurs étaient comprises entre 2,916 et 5,685, pour les échantillons Como₂ et Kadi₄. Ces résultats soulignent la nécessité d'apporter des améliorations aux conditions de traitement et de stockage du BK afin de prévenir les phénomènes d'oxydation.

Les conditions telles que l'exposition à la chaleur, à la lumière, le contact direct avec l'air durant l'extraction et surtout pendant le stockage et la conservation, influencent négativement la qualité du produit fini, et partant sa composition chimique, pour les usages agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques. Ces facteurs affectent la teneur de l'UMC. Les résultats obtenus dans notre étude de l'ordre de 3,0 % ± 1,0 % - 12,0 % ± 0,1 %, respectivement pour les échantillons Siss₂ et Koul₁, tous du P₁. Ces résultats étaient en conformité avec les critères établis par la FAO, entre 1% m/m et 19 % m/m (Codex Alimentarius 2017b). La teneur en matières insaponifiables est un critère d'intérêt pour les industries cosmétiques et pharmaceutiques, du fait de ses attributs thérapeutiques, comme ses activités anti-inflammatoires, antioxydantes, humectantes entre autres (voir tableau 2). Pour le cas spécifique du BK, cette teneur est relativement plus élevée que pour les autres graisses et huiles végétales, d'où son intérêt. Plus l'UMC est élevée, plus le beurre est riche en composés bioactifs, comme les antioxydants, les anti-inflammatoires, les antimicrobiens, les éléments minéraux et les vitamines (Abdel-Razek et *al.* 2023). Les résultats de la présente étude étaient en conformité avec ceux obtenus par Abagale et *al.* (2016), qui rapportaient des taux compris entre 5,04 % - 7,89 % pour le beurre extrait du Ghana. En effet, les auteurs avaient conclu que l'UMC n'était pas fonction du procédé d'extraction, mais plutôt des conditions environnementales et de la variabilité génétique individuelle des arbres de karité. Des valeurs plus élevées étaient rapportées par Megnanou et Niamke (2015) qui avaient rapporté des teneurs de l'ordre de 17,6 % et 17,3 % de beurre de couleur beige et jaune, respectivement.

La teneur en kariténe était comprise entre 3,18 % et 4,35 % pour les 5 échantillons pilotes, entre 0,36 % (Kadi₂) et 2,76 % (Siss₁) pour les 37 échantillons et 0,31 % pour l'échantillon

industriel Degom (tableaux 29 et 30). Ces variations pourraient être fonction des différentes étapes des procédés d'extraction, comme le prétraitement des matières premières, le traitement des produits intermédiaires et du produit fini (conservation, stockage). Les techniques d'extraction peuvent ainsi modifier la composition chimique du produit fini. Ajouter à cela l'origine géographique et les facteurs édaphiques (ce sont toutes les caractéristiques du sol que sont physiques, chimiques et biologiques, qui influencent directement la vie des plantes) pourraient influencer la teneur en kariténe. Selon Lipp et Anklam (1998), le kariténe, fraction insaponifiable du BK, a une consistance similaire au caoutchouc, à des proportions d'environ 11 %.

De façon générale, la qualité du produit fini est fonction de la qualité de la matière première, c'est-à-dire depuis le fruit de karité jusqu'à l'amande. L'indice de peroxyde est un critère déterminant de qualité et les paramètres tels que l'épaisseur des amandes concassées (< 10 mm), le séchage au soleil en moins de 5 jours contribuent à améliorer l'IP (Womeni et *al.* 2007). Le broyage des amandes favorise l'évaporation de l'eau, ce qui entraîne une augmentation de l'acidité et une diminution de l'UMC, des alcools triterpéniques et des stérols, en raison de l'augmentation de la surface de contact entre les enzymes et les substrats. Une exposition prolongée des amandes au soleil entraîne la formation de peroxydes qui déstabilisent les composés ayant un point de fusion élevé et une faible stabilité.

Comme décrit par Sandwidi et *al.* (2018) au Ghana, les caractéristiques chimiques des matières grasses sont également fonction du type de fruits entrant dans l'extraction. Ainsi, 13 différentes ethno-variétés avaient été identifiées, permettant leur classification en quatre groupes : les fruits à chaire/pulpe, les fruits à haut rendement en beurre, les fruits à pulpe et à beurre et les fruits à pulpe comestible. Aussi, au Burkina Faso, différentes ethno-variétés de fruits de karité (25 au total) avaient été mises en évidence par Karambiri et *al.* (2017), parmi lesquelles deux ethno-variétés de fruits ont été préférées (« petits fruits de karité » et « grands fruits de karité ») par les populations comme entrant dans la production de BK. La grande diversité observée dans notre étude pourrait également s'expliquer par le fait des variances dans les fruits de karité. Nos résultats sont ainsi confortés par Seweh et *al.* (2016), qui avaient trouvé des différences significatives entre les caractéristiques chimiques du BK de diverses origines du Ghana, extraits selon plusieurs types de procédés (chimiques, mécaniques et traditionnels). Lorsque les étapes du procédé d'extraction ne sont pas maîtrisées, cela aboutit à des variabilités de la qualité chimique du PF.

Afin d'évaluer l'effet potentiel du procédé d'extraction et de l'origine (variables indépendantes) sur les caractéristiques chimiques de l'ensemble des beurres (variables dépendantes, 42 échantillons), une analyse statistique de la variance, l'ANOVA à un seul facteur a été conduite en utilisant le logiciel R. Les résultats ont mis en évidence un effet significatif et assez significatif du procédé d'extraction uniquement sur la teneur en AGL et l'IP, avec des $p\text{-value} = 0,0198$, $p\text{-value} = 0,00805$ ($\alpha = 0,05$) respectivement. Pour le reste des paramètres chimiques (IO/GC, UMC, IS, teneur en karitène, RI, $K_{\lambda 232\text{nm}}$, $K_{\lambda 268\text{nm}}$ et ΔK), les effets n'ont pas été significatifs, avec des $p\text{-values} > \alpha = 0,05$. Il a été également trouvé un effet significatif de l'origine sur l'indice de peroxyde, avec une $p\text{-value} = 0,0422$.

IV.1.1.2. Profil en acides gras - stérols - composés organiques volatiles

Les résultats des analyses des AG ont montré que les AG majoritaires étaient l'acide stéarique (C18:0) et l'acide oléique (C18:1), avec des teneurs respectives allant de 33,9 % à 47,2 % pour le C18:0 et de 40,8 % à 51,0 % pour le C18:1 (tableaux 31 et 32). Ces résultats étaient en accord avec les spécifications du Codex Alimentarius, indiquant une bonne qualité du point de vue du profil en AG, indiqué pour un usage agroalimentaire. Cette composition en AG du BK brut originaire du Burkina Faso représente un intérêt à l'exportation et à la transformation en produits finis pour les industries cosmétiques et pharmaceutiques. Les AG, comme l'acide palmitique (C16:0) et l'acide linoléique (C18:2), étaient présents en faible teneur, mais restaient dans les limites attendues. L'acide linoléique était la forme polyinsaturée (PUFA) la plus prédominante, avec des teneurs comprises entre 5,8 % et 8,4 %. De façon générale, nos résultats étaient similaires à ceux obtenus par Omar et Abookleesh 2016; Seweh et al. (2019) au Ghana et en Côte d'Ivoire. Le BK originaire d'Afrique de l'Ouest est décrit comme étant plus riche en AG stéarique qu'oléique, dû à la sous-espèce *Vitellaria paradoxa paradoxa* qui y pousse exclusivement. Par opposition, la sous-espèce *Vitellaria paradoxa nilotica* retrouvée en Afrique de l'Est et Centrale (Éthiopie, Sud-Soudan, Ouganda, République Démocratique du Congo) donne du BK riche en AG oléique (Davrieux et al. 2010; Ugehe et al. 2010). Selon Vincenzo et al. (2005), la teneur moyenne en AG oléique et stéarique du beurre d'Afrique de l'Est (Ouganda) était respectivement d'environ 58 % et 29 %, tandis que les échantillons d'Afrique de l'Ouest (Burkina Faso et Mali) contenaient des acides oléique et stéarique d'environ 43 % et 44 %, respectivement. Cette constance observée entre les différentes variétés constitue un critère d'intérêt pour l'usage auquel le BK serait destiné.

Cependant, (Maranz et al. 2004) ont mis en évidence un fait très important. Ils ont signalé que les beurres soft (avec une teneur plus élevée en AG oléique qu'en AG stéarique) semblent être prédominants dans toutes les zones de distribution de *V. paradoxa ssp. nilotica* et dans certaines zones de la sous-espèce *paradoxa*. Ainsi, dans les principales zones de production d'Afrique de l'Ouest, telles que le Mali, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et le Ghana, on y rencontre du beurre soft dû à la composition en acides gras oléiques. Le marché international de l'exportation des produits du karité (noix et beurre) est dominé par ceux originaires de la sous-espèce *paradoxa*, du fait de la composition en AG qui est plus riche en AG stéarique, idéale pour la fabrication du chocolat et des confiseries. Dans notre étude, l'échantillon Siss₂ du P₁ avait la teneur la plus élevée en AG stéarique à 47,2 %. Cependant, l'échantillon Houe₄ du P₁, avait la teneur la plus forte en AG oléique (51,0 %), palmitique (3,66 %), linoléique (8,43 %) ; et la plus faible en AG stéarique (33,9 %) et gadoléique (1,18 %). Les résultats de cette étude confortent ceux obtenus par Nahm (2011) qui rapportaient que les AG stéarique et oléique étaient les formes majoritaires, respectivement entre 40 et 45 %.

Concernant les stérols, les résultats des sept (07) échantillons tests ont montré une forte variabilité dans la composition en stérols du BK selon la région et le procédé d'extraction (tableau 35). Les échantillons ayant fait l'objet d'analyse étaient : Gour₁ (P₁, région du Goulmou), Houe₅ (P₂, région du Guiriko), Kadi₅ (P inconnu, région du Kadiogo), Ioba₁ (P₂, région du Djôrô), Ioba₂ (P₁, région du Djôrô), Siss₁ (P₃, région du Nando) et Yate₁ (P₄, région du Yaadga). Ainsi donc, sept différents stérols ont été identifiés avec des concentrations différentes. Le β -sitostérol était le plus abondant dans la plupart des échantillons, suivi du Δ -7-avenastérol. L'échantillon Siss₁ ne contenait aucun stérol, ce qui pourrait être imputable au procédé d'extraction ou à la qualité de la matière première. En effet, la particularité du P₃ était le trempage des noix à l'eau, comme étape de prétraitement. Aussi, l'échantillon Ioba₁ (P₂, région du Djôrô) présentait la plus forte teneur en stérols (838,7 mg/kg), alors que les échantillons Ioba₂ (40,9 mg/kg) et Siss₁ en contenaient très peu ou pas du tout. Au vu de ces résultats portant sur un nombre assez limité d'échantillons, une hypothèse serait que le procédé d'extraction et l'origine géographique de la matière première influenceraient fortement la teneur en stérols du BK. Étant donné la forte concentration du β -sitostérol dans presque tous les échantillons, il pourrait jouer un rôle clé dans les propriétés fonctionnelles du BK. Les auteurs (Nahm et al. 2013) avaient rapporté des concentrations en phytostérols de l'ordre de 5 à 8 % de la fraction insaponifiable du BK, dont l' α -spinastérol, Δ -7-stigmastérol, Δ -7-avenastérol, β -sitostérol, stigmastérol, campesterol et 24-méthyl-cholest-7-enol. Des stérols

tels que le sitostérol, le stigmastérol et le phytosérol ont été mis en évidence dans du BK originaire du Nigéria, avec une prédominance pour le stigmastérol (Njoku et *al.*, 2000). Deux formes de stérols avaient été mises en évidence par Peers (1977) : l' α -spinastérol et le Δ -7-stigmastérol. L'insaponifiable du BK est composé d'environ 65 % d'alcools triterpéniques, 8 % de stérols et 27 % d'hydrocarbures (Lipp et Anklam 1998). Les composés stéroliques tels que le phytostérol, le β -sitosterol, l' α -spinasterol, le Δ 7-stigmasterol, le 24-methyl-cholest-7-enol et le Δ 7-avenasterol y ont été identifiés et quantifiés, avec le Δ 7-stigmasterol et le 24-methyl-cholest-7-enol qui étaient les formes majoritaires.

Une diversité de composés organiques volatiles a été identifiée pour les quatre échantillons testés, objets de l'étude. Ces échantillons étaient Houe₁ (P₁, région du Guiriko), Kadi₂ (P₁, région du Kadiogo), Oubr₁ (P₁, région du Oubri), et Yate₁ (P₄, région du Yaadga). Au total, 80 composés ont été identifiés pour l'ensemble des beurres, dont 47 pour Houe₁, 33 pour Kadi₂ et 35 pour Oubr₁. Cette grande diversité pourrait être due à des facteurs comme la méthode d'extraction, l'origine géographique du karité ou les conditions de stockage. Les composés volatiles pourraient provenir de réactions enzymatiques avant et durant l'extraction (torréfaction surtout), une altération de la matière durant le stockage, ou une contamination extérieure (Bail et *al.* 2009). On note la présence d'acides carboxyliques comme l'acide acétique qui est présent dans tous les échantillons, souvent en proportions significatives (jusqu'à 20,14 % pour Kadi₂). D'autres acides comme les acides hexanoïque et butanoïque étaient retrouvés dans les échantillons Oubr₁ (8,85 % et 14,27 %) et Yate₁ (2,36 % et 18,34 %). Ces acides pourraient influencer l'odeur du beurre et refléter des différences dans la fermentation ou l'oxydation des lipides. Aussi, le guaiacol identifié dans les échantillons Houe₁ (3,09 %) et Oubr₁ (0,68 %) serait responsable de l'odeur de « fumée » des beurres comme décrit par Bail et *al.* (2009). Les échantillons Houe₁ et Kadi₂ diffèrent du reste des échantillons par la présence d'hydrocarbures (hexane et heptane) et de terpènes (dL-limonène). Les échantillons Oubr₁ et Yate₁ présentaient une concentration plus élevée en AG volatils, ce qui pourrait suggérer une variation dans le vieillissement ou le traitement du beurre. La présence de furane dans l'échantillon Houe₁ (0,19 %), qui est un contaminant potentiellement cancérigène pour l'homme, pose un problème sur la qualité de l'extraction, car le furane peut se former dans les aliments qui sont traités à la chaleur, selon un rapport de l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA 2019). La pyrazine est responsable de l'odeur de torréfaction rencontrée dans les produits alimentaires (Mortzfeld et *al.* 2020), celle-ci ayant été identifiée et quantifiée dans l'échantillon Houe₁ (2,70 %). La présence de pyrazines dans

les aliments est due principalement aux réactions chimiques induites par la chaleur selon la réaction de Maillard, responsable de l'odeur de torréfaction. La réaction de Maillard résulte de la réaction entre l' α -dicarbonyl (qui se forme principalement lors de la dégradation thermique des sucres) et les acides aminés, pour former des aminocétones qui se condensent pour former les pyrazines (Zhao et *al.* 2020). Les pyrazines peuvent également être d'origine naturelle due à la fermentation ou au métabolisme végétal. De ce fait, l'odeur de torréfaction représente une caractéristique du beurre de karité, non nécessairement signe de dégradation. Quant à l'odeur caractéristique (odeur naturelle) du beurre de karité, elle pourrait être éliminée par simple raffinage industriel. Aussi, il est traditionnellement appliqué la désodorisation par traitement thermique du beurre avec du citron.

IV.1.2. Caractéristiques physiques et thermiques du beurre de karité

Les résultats des indices de couleur mesurés par le système de couleur Lovibond (L^* a^* b^*) ont montré que la forme solide du beurre avait une clarté L^* supérieure à celle de la forme liquide fondue, pour l'ensemble des 42 échantillons et l'échantillon industriel Degom (voir tableau 36). L'indice de couleur L^* (clarté) était compris entre 61,5 et 82,0 pour les formes solides. Les échantillons Gour₁, Oubr₁, Komo₁, Houe₆, Sang₁ étaient jugés très clairs pour leur indice de clarté $L^* > 80$. Les échantillons Houe₄ (P₁, région du Guiriko) et Naya₁ (P₅, région du Sourou), avaient les clartés les plus faibles, respectivement 67,4 et 61,5. En effet, selon le procédé d'extraction recueilli, l'émulsion de l'échantillon Naya₁ n'a pas été filtrée avant le conditionnement final. Ce résultat nous permet de formuler l'hypothèse selon laquelle la faible clarté de cet échantillon pourrait s'expliquer par le fait que l'émulsion finale n'a pas été filtrée, mais laissée à décantation pour donner le beurre brut, avec la présence d'impuretés solubles. Un échantillon (Oubr₁) avait une couleur tendant vers le jaune, la couleur jaune des huiles et graisses pouvant être liée à la présence des caroténoïdes. En effet, la présente étude a montré que l'indice b^* (de couleur jaune à bleue) de l'ensemble des échantillons était compris entre 13,3 et 30,1 pour les formes solides. Pour les formes liquides, cet indice variait très légèrement.

Une étude réalisée en Côte d'Ivoire avait trouvé que le beurre extrait artisanalement présentait des couleurs différentes : blanc, beige et jaune (Megnanou et *al.* 2014), avec des valeurs de clarté (L^*) comprises entre 63,66 et 68,67 respectivement pour le beurre de couleur jaune (identifié par “*marché*”) et celui dit “*original*”. Une autre étude réalisée en Côte d'Ivoire avait montré que selon la technique d'extraction mise en œuvre, le BK présentait des clartés

différentes (Oussou et *al.* 2022). En effet, selon cette étude, l'indice de couleur était compris entre 37,18 et 55,23 et 66,18 respectivement pour le beurre extrait par pression à froid, par solvant et traditionnellement. Ces résultats étaient en adéquation avec les données obtenues dans cette étude, mettant clairement en évidence l'influence du procédé d'extraction sur la couleur du beurre. Selon Honfo et *al.* (2011), la clarté (L^*) du BK diminue selon la durée de stockage et le type de matériel de conditionnement. Les données de cette étude indiquaient que les échantillons fondus étaient moins clairs que les échantillons non fondus, avec un rapport moyen d'environ 0,78. La fusion a influencé de manière significative la clarté du beurre, avec des valeurs L^* fondues allant de $40,1 \pm 0,1$ à $66,9 \pm 0,3$. Le ratio de clarté (L^*) entre les formes liquides et fondus de l'échantillon Naya₁ était le plus faible, à 0,65 probablement dû au fait que l'émulsion finale n'ait pas été filtrée. La filtration de l'émulsion contribue à éliminer les impuretés insolubles et solides et à améliorer la stabilité par l'élimination des agrégats et des noyaux de floculation.

Pour les formes solides et liquides de BK obtenues par des techniques d'extraction traditionnelles, l'indice de jaunissement (YI) sert d'indicateur de changement de couleur. Les résultats de la présente étude ont montré que le beurre fondu présente généralement des valeurs YI plus élevées que la forme solide. En moyenne, le ratio YI (forme liquide/forme solide) était d'environ 1,2 pour tous les échantillons, avec des valeurs allant de 0,7 (Houe₆) à 2,5 (Naya₁), mettant encore en évidence la particularité de l'échantillon Naya₁. Les résultats ont montré que l'indice YI des formes solides de l'ensemble des échantillons était compris entre 24,9 et 56,5 respectivement pour les échantillons Koul₁ et Yate₁. Pour les formes liquides, on note une valeur très élevée pour l'échantillon Naya₁ (128,8) et une valeur très faible pour l'échantillon Degom (15,9). Les valeurs les plus élevées pour YI_fondu étaient retrouvées parmi les cinq (5) premiers échantillons, entre 129,7 (lot₃) et 155,1 (lot₁). Ces résultats témoignent d'une variation notable de l'indice de jaunissement des beurres.

Une analyse statistique par le *t-test* (ou *test de Student*) à échantillon unique a été réalisée en vue de comparer les caractéristiques thermiques (L^* _brut, L^* _fondu, YI_brut, YI_fondu, b^* _brut, b^* _fondu) des 42 échantillons avec celles de l'échantillon industriel de référence Degom. Les résultats ont montré que les *p-values* étaient toutes inférieures au seuil de significativité α égal à 0,05, ce qui signifie que toutes les caractéristiques thermiques moyennes des échantillons traditionnels, solides comme fondus, étaient significativement différentes de celles de l'échantillon industriel de référence Degom. En effet, les *p-values* trouvées étaient

comprises entre $2,943e^{-06}$; $< 2,2e^{-16}$; $7,328e^{-08}$; $1,776e^{-11}$; $1,747e^{-10}$ et $2,023e^{-13}$, respectivement pour L^*_brut , L^*_fondu , YI_brut , YI_fondu , b^*_brut et b^*_fondu .

Afin d'évaluer l'effet potentiel du procédé d'extraction et de l'origine (variables indépendantes) sur les caractéristiques thermiques de l'ensemble des 42 échantillons (variables dépendantes), une analyse statistique de la variance, l'ANOVA à un seul facteur, a été conduite. Pour le procédé d'extraction, les résultats ont mis en évidence un effet assez significatif sur l'indice de jaunissement (YI_brut), avec une $p\text{-value} = 0,00557 < \alpha$ égal à 0,05 (seuil de significativité). L'effet du procédé d'extraction sur les paramètres tels que L^*_brut , L^*_fondu et YI_fondu , était très significatif, avec des $p\text{-values}$ comprises entre $0,000442 - 5,22e^{-06}$ et $0,000426$. L'effet de l'origine du beurre sur les caractéristiques thermiques a été mis en évidence pour les paramètres L^*_brut , L^*_fondu et YI_brut , pour lesquels des effets assez significatifs (YI_brut) ont été trouvés. Les $p\text{-values}$ étaient comprises entre $0,00752-0,00504$ et $0,0317$ respectivement.

La teneur en matières grasses solides (ou solid fat content - SFC) est un paramètre essentiel pour la détermination des potentielles applications agroalimentaires et cosmétiques des huiles, des graisses ou des mélanges (Braipson-Danthine et Deroanne 2006). Elle reflète la consistance du beurre à différentes températures. Ainsi, selon ces auteurs, dans les formulations de margarine ou de « shortening » par exemple, la SFC doit être définie généralement entre 15 et 40 °C, pour couvrir la gamme d'utilisation. Quant à Teles Dos Santos et *al.* (2014), la plage de température dans laquelle une graisse peut conserver sa consistance est déterminée par les températures comprises dans les valeurs SFC situées entre 15 et 35 %. La SFC comprise entre 4 °C et 10 °C détermine la facilité d'étalement du produit à température de réfrigération et une valeur ne dépassant pas 32 % à 10 °C est essentielle pour une bonne aptitude à l'étalement. Une valeur d'au moins 10 % est essentielle pour éviter une séparation de phase. Dans les matières grasses de cuisson, des performances optimales sont obtenues avec une SFC comprise entre 15 % et 25 % à la température d'utilisation, tandis qu'un excès de liquide peut provoquer une sensation d'onctuosité, diminuant ainsi les qualités sensorielles. Les résultats ont mis en évidence la diversité des profils SFC de l'ensemble des 42 échantillons traditionnels et celui de l'échantillon industriel Degom, en fonction de leur origine et du procédé d'extraction mis en œuvre (voir figure 23).

En mode série sans prétraitement et avec prétraitement, les échantillons Siss₂, Kadi₁, Como₃, Ioba₂, Noum₁, Oubr₁ et Como₄, de différentes origines, mais tous du même procédé

d'extraction P₁, avaient les profils SFC parmi les plus élevés par rapport aux restes des échantillons. Ces échantillons étaient donc plus solides à température ambiante. Cependant, les échantillons Houe₄ (P₁), Houe₅ (P₂) et Kene₁ (P₁), tous de la région du Guiriko, présentaient les profils SFC les plus bas. Ces procédés, outre leur provenance commune, avaient en commun la cuisson des noix, suivie du tri-lavage avant décorticage. Les amandes étaient torréfiées et la pâte obtenue après mouture était barattée. La composition en AG influence fortement la SFC des matières grasses. En effet, les BK avec une forte teneur en AG saturés, spécialement une forte teneur en AG stéarique et une plus faible teneur en AG insaturés, ont des valeurs SFC élevées. Plus la teneur en AG stéarique est élevée, plus la valeur SFC diminue autour de 20-35 °C. Les résultats de la détermination du profil en AG avaient montré que les échantillons Oubr₁ et Ioba₂ avaient des teneurs en AG oléiques d'environ 44,0 %, proches des plus faibles teneurs. La teneur pour l'échantillon Siss₂ était de 41,0 %. Aussi, ces échantillons avaient des valeurs d'indice, telles que l'IO/GC et l'AGL, parmi les plus faibles, respectivement 53,0 g/100 g et 2,0 - 2,1 %. Ainsi, les profils SFC les plus élevés déterminés pour les échantillons Siss₂, Kadi₁, Como₃, Ioba₂, Noum₁, Como₄ et Oubr₁ étaient dus à leurs teneurs élevées en AG stéariques. Comme l'avaient rapporté (Kouassi et *al.* 2024), des valeurs de SFC inférieures à la température ambiante (25 °C) indiquent la fermeté de la graisse, tandis que la SFC mesurée entre 25 et 30 °C indique sa résistance à la chaleur. Les échantillons Siss₂, Kadi₁, Como₃, Ioba₂, Noum₁ et Oubr₁ avaient la consistance ferme la plus élevée, tandis que les échantillons Houe₄, Houe₅ et Kene₁ avaient la consistance la plus faible. Ces observations corroborent les résultats obtenus pour l'IO. Les différences observées pourraient conduire à une large gamme d'applications dans les industries alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques. Au cours du processus de tempérage, les cristaux de graisse sont transformés en leurs formes polymorphiques plus stables, ce qui conduit à une plage de fusion étroite. Comme le beurre de cacao, le BK est une matière grasse polymorphique qui nécessite un tempérage pour parvenir aux propriétés souhaitées. Le tempérage des graisses est essentiel pour garantir leur stabilité et leur qualité, et il est largement appliqué pour stabiliser les graisses de confiserie (Gao et *al.* 2022; Kevin Smith 2001). Dans la présente étude, le tempérage à 26 °C a eu un effet similaire sur le profil SFC de tous les échantillons. Au-dessus de 25 °C, la SFC s'établissait à des valeurs plus élevées pour tous les échantillons, indiquant des transitions polymorphiques pendant le traitement.

Les mesures ont également été faites en mode parallèle avec et sans prétraitement. Ces mesures diffèrent de la mesure en mode série par la façon dont les températures sont gérées. En effet,

pour le mode série, un seul échantillon est mesuré successivement à différentes températures, tandis que pour le mode parallèle, plusieurs échantillons sont préalablement conditionnés à différentes températures, puis mesurés les uns après les autres. Autant d'échantillons que de températures sont préparés. Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que les profils étaient diversifiés, à l'image des profils en mode série.

Une analyse statistique par le *t-test* (ou *test de Student*) à échantillon unique a été effectuée en vue de comparer les SFC en mode parallèle et en mode série des échantillons traditionnels avec celles de l'échantillon industriel de référence Degom. En mode parallèle sans prétraitement, pour les températures d'intérêt de 25 °C, 30 °C et 40 °C, les résultats ont montré que les *p-values* étaient inférieures au seuil de significativité α fixé à 0,05, ce qui signifie que les SFC moyennes aux températures des échantillons traditionnels étaient significativement différentes de celles de l'échantillon industriel de référence Degom. En effet, les *p-values* trouvées étaient comprises entre $5,735e^{-13}$ - $5,242e^{-06}$ et $< 2,2e^{-16}$, respectivement pour les SFC à 25 °C, 30 °C et 40 °C. Les résultats étaient similaires pour les mesures en mode série sans prétraitement, et avec prétraitement. Pour le mode série sans prétraitement, les *p-values* étaient comprises entre $8,28e^{-11}$ - $4,437e^{-06}$ et $4,675e^{-06}$, respectivement pour les SFC à 25 °C, 30 °C et 40 °C. Quant au mode série avec prétraitement, les *p-values* étaient comprises entre $2,819e^{-05}$ - 0,00138 et $4,848e^{-05}$, respectivement pour les SFC à 25 °C, 30 °C et 40 °C. Pour les résultats du mode parallèle avec prétraitement, seule la SFC moyenne à 30 °C des échantillons traditionnels était significativement différente de celle de l'échantillon industriel de référence Degom, avec une *p-value* = 0,005744. Il n'y avait pas de différence pour les SFC à 25 °C et à 40 °C entre les échantillons traditionnels et l'échantillon industriel de référence Degom.

Afin d'évaluer l'effet potentiel du procédé d'extraction et de l'origine (variables indépendantes) sur les SFC à 25 °C, 30 °C et 40 °C en mode parallèle et en mode série des échantillons traditionnels (variables dépendantes), une analyse statistique de la variance, l'ANOVA à un seul facteur a été conduite. Quant à l'effet du procédé d'extraction, les résultats ont mis en évidence des effets assez significatifs sur les SFC à 25 °C et à 40 °C, avec des *p-values* = 0,00773 et 0,00682, respectivement. L'effet du procédé d'extraction sur la SFC à 30 °C, était significatif, avec une *p-value* = 0,0275. L'effet de l'origine du beurre a été significatif pour la SFC à 30 °C, avec une *p-value* = 0,027. La *p-value* pour la SFC à 40 °C était de 0,0512, on peut donc parler d'un effet presque significatif.

Les profils de cristallisation de l'ensemble des échantillons présentaient quatre points de transition exothermiques différents : c1, c2, c3 (T_{Peak}) et c4 (T_{Onset}) (figure 24, tableau 37). Pour les 37 échantillons, la température de début de cristallisation était comprise entre 16,4 °C et 22,4 °C. Selon la classification opérée pour les profils de cristallisation, les échantillons pilotes et l'échantillon industriel Degom, étaient ainsi classés : les échantillons des lots₁, ₂, ₄ et ₅ correspondaient au profil₁ ; l'échantillon Degom correspondait au profil₂ ; et l'échantillon lot₃ correspondait au profil₃. Dans la présente étude, les thermogrammes de cristallisation étaient similaires du point de vue des pics de transition (quatre pics, c1 à c4) à ceux du BK du Ghana (Badu et al. 2018). Selon ces auteurs, le profil thermique est fonction des paramètres analytiques de l'équipement « *scanning rate* », quelle que soit la composition chimique de la matière grasse. Les différences de comportements de cristallisation des échantillons étudiés étaient dues à la différence de teneur en AG. Le profil de cristallisation 1, auquel appartiennent les échantillons pilotes (lot₁, lot₂, lot₄ et lot₅) se distingue des autres profils par la forme de la courbe à T_{Onset} . Au moins un échantillon de chacun des différents types de procédés d'extraction identifiés (P₁ à 5) se retrouvait dans le profil de cristallisation 1.

L'analyse a montré que le profil₁ avait des températures de transitions plus élevées c4 (T_{Onset}), par rapport aux autres profils, comprises entre 17,7 et 22,4 °C. Cela pourrait s'expliquer par la teneur élevée en AG insaturés. Sur la base de leur procédé d'extraction, les échantillons ont été répartis entre les trois profils de cristallisation. Ces profils sont liés aux propriétés thermiques des graisses, telles que la cristallisation et la fusion, et à la composition en AG. Les échantillons du profil₁ étaient caractérisés par une teneur plus élevée en AG stériques et une teneur plus faible en AG oléiques, respectivement entre 42,6 % et 47,2 % et 40,8 % et 45,3 %. En plus de cette différence de composition en AG, ces échantillons avaient les teneurs en AGL et d'IP les plus élevées entre 9,7 % et 9,8 - 44,5 meq O₂/kg. La teneur en matières insaponifiables était diversement répartie parmi les échantillons du profil₁, comprenant les valeurs minimales et maximales : 3,0 % et 12,0 %.

Le profil de cristallisation 2 comprenait de nombreux échantillons différents du profil de cristallisation 1 de par la forme du pic à c4. En ce qui concerne le profil de cristallisation 3, ses échantillons différaient des autres par la forme du thermogramme en c', une température de transition spécifique, comprise entre 15,1 et 16,3 °C, puis identifiée entre les transitions c3 et c4. Des échantillons issus de quatre des onze régions d'étude étaient comptés parmi le profil₃. Ce profil de cristallisation comptait deux différents procédés d'extraction (P₁ et procédé non

collectés), correspondant aux échantillons avec les faibles teneurs en AG stériques (33,9 - 43,3 %) et les fortes teneurs en AG oléiques (44,8 - 51,0 %), par opposition au profil₁. Les indices d'iode des échantillons du profil₃ étaient parmi les plus élevés : 54,3 - 64,2 gI₂/100 g.

Quant aux thermogrammes de fusion, leur classification a nécessité la mesure de trois paramètres obtenus par intégration avec le logiciel “*Universal TA Analysis V4.5 A, TA Instruments*”. Il s’est agi de l’enthalpie de fusion (Hf) des trois premiers pics, Hf₁, Hf₂, Hf₃ (J/g) et de l’enthalpie de fusion totale (Total Hf - J/g). Par la suite, les rapports d’enthalpie ΔHf, ont été calculés ($\Delta Hf = Hf_2/Hf_3$) sur la base desquels les classifications ont été faites. Les résultats ont montré que les ΔHf étaient comprises entre [0,51 - 0,95 J/g], [1,01 - 1,47 J/g] et [1,51 - 4,34 J/g] (figure 25, tableau 37). De ce fait, trois différents profils ont ainsi été mis en évidence : profil de fusion 1 ; 2 et 3, respectivement selon la valeur de ΔHf. La composition en AG pourrait permettre d’expliquer ces différents profils obtenus. L’analyse du comportement thermique a permis d’identifier 4 pics endothermiques : h₁, h₂ (T_{Onset}), h₃ (T_{Peak}) et h₄ (T_{End}), mettant en évidence l’enthalpie de fusion typique du BK. La diversité de la caractérisation chimique du BK pourrait expliquer la diversité des profils de fusion. La classification des différents thermogrammes de fusion ne correspondait pas exactement à celle faite avec les thermogrammes de cristallisation, et cela pourrait s’expliquer par le mode de classification opéré.

Le profil de fusion 1 incluait la grande majorité des échantillons, prenant en compte tous les différents types de procédés d’extraction recensés, ainsi que toutes les origines des beurres, à l’exception de la région des Tannounyan. Ce profil était composé des échantillons avec des valeurs minimales et maximales de AGL de 1,0 à 9,7 % et de IP de 4,6 à 44,5 meqO₂/kg.

Les températures de transition, T_{Peak} et T_{End}, étaient comprises entre 12,1 et 14,7 °C, et 25,0 - 29,3 °C respectivement, et variaient légèrement d’un échantillon à l’autre. La température de fusion complète (T_m) des échantillons de BK variait entre 38,4 °C et 43,1 °C, pour les 37 échantillons. Elle était de 38,6 °C pour l’échantillon Degom, et entre 41,3 °C et 4,9 °C pour les échantillons de lot pilotes. La température de fusion complète de l’échantillon Degom était parmi les plus basses, contrairement à celles des échantillons pilotes qui étaient parmi les plus élevées. Sur la base de la classification des thermogrammes de fusion, l’échantillon Degom était du profil₃, tandis que l’échantillon pilote du lot₄, relevait du profil₁. Quant aux échantillons pilotes lots_{1, 2, 3 et 5}, ils correspondaient au profil₂ de la classification.

Ces résultats confirment ce qui a été observé dans l’analyse de la SFC sans prétraitement. Dans la présente étude, les profils de fusion ACD des échantillons de BK étaient différents de ceux

rapportés par Badu et *al.* (2018) dans son étude sur le BK originaire du Ghana. Comme mentionné plus haut, cette différence pourrait s'expliquer par les conditions analytiques liées aux équipements utilisés. Les résultats de cette étude ont montré que l'enthalpie de fusion totale (Total Hf) était comprise entre 62 et 73 J/g pour les 37 échantillons. Elle était de 57,47 J/g pour l'échantillon Degom et de 68,89 à 74,00 J/g pour les échantillons pilotes. Ces résultats sont en adéquation avec les données de température de fin de fusion. Concernant les 37 échantillons, les échantillons des profils de fusion 2 et 3 avaient des allures presque similaires, mais leur composition en AG était différente. En effet, leurs températures de transition T_{Peak} et T_{End} étaient plus proches et variaient légèrement.

Une analyse statistique par le *t-test* (ou *test de Student*) à échantillon unique a été faite en vue de comparer les caractéristiques thermiques des 37 échantillons traditionnels avec celles de l'échantillon industriel de référence Degom. Seulement pour les caractéristiques T_m , T_{End} (c4), T_{Peak} (h3) et T_{Peak} (c3), des différences significatives avec les caractéristiques de l'échantillon Degom ont été trouvées, avec des p-values $< 2,2e^{-16}$ - $5,681e^{-11}$ - $0,0001964$ - $1,131e^{-08}$ respectivement ($< \alpha$ égal à 0,05).

Les résultats ont mis en évidence la relation entre la composition des BK (en fonction de l'origine et du procédé d'extraction) et les propriétés physiques, tout en soulignant l'impact du procédé d'extraction sur les caractéristiques physicochimiques du BK du Burkina Faso. En général, les résultats soulignent la grande diversité du comportement thermique observé dans les échantillons de BK brut du Burkina Faso. Cette variabilité souligne la relation complexe entre la composition et les propriétés thermiques du BK, qui peut influencer son aptitude à diverses applications dans l'agroalimentaire, la pharmacie et la cosmétique. La compréhension de ces facteurs est cruciale pour optimiser les méthodes de traitement et garantir une qualité constante des produits.

IV.2. Composés phénoliques et potentiel antioxydant

IV.2.1. Composés phénoliques

La teneur en polyphénols totaux (TPT) était diversement distribuée parmi les 10 échantillons testés, objet de l'étude (7 traditionnels et 3 industriels), voir tableau 40. Les valeurs minimales et maximales étaient retrouvées au sein des échantillons traditionnels et étaient comprises entre

82,99 ppm PGE (Yate₁) et 14,16 ppm PGE (Siss₁). Les échantillons Naya₁ et Kadi₅ à la suite de Yate₁ avaient les TPT les plus élevées, respectivement entre 69,22 ppm PGE et 69,22 ppm PGE. L'échantillon industriel raffiné avait une teneur de 32,77 ppm PGE. Cependant, n'ayant aucune information sur la TPT avant raffinage de cet échantillon, aucune conclusion ne peut être tirée sur l'impact du raffinage sur la composition quantitative des polyphénols, même si cela a une incidence négative sur la composition qualitative et quantitative des composés bioactifs des matières grasses. Cependant, il a été démontré que le dosage par le réactif de Folin-Ciocalteu n'est pas spécifique aux composés phénoliques, car il réagit facilement avec les composés oxydables non nécessairement phénoliques (Ainsworth et Gillespie 2007; Maranz et al. 2003; Padda et Picha 2007). La TPT, tout comme les autres paramètres physicochimiques et biochimiques, peut être affectée par plusieurs facteurs, comme la qualité de la matière première ou du produit fini, les conditions climatiques auxquelles est soumise la matière première végétale, les techniques d'extraction et de production, l'emballage et les conditions de stockage (Franke et al. 2010). Dans notre cas, l'échantillon avec la plus forte teneur en polyphénols a été extrait selon un procédé atypique (P₄ : Trempage des noix, suivi d'un séchage au soleil, d'une cuisson de la pâte sans barattage au préalable), ne faisant pas recours au barattage, une étape cruciale et majoritaire dans la plupart des procédés (Goumbri et al. 2024). Quant à l'échantillon Siss₁, avec la plus faible teneur en polyphénols, le procédé d'extraction P₃ passait par le trempage des noix, avec en prélude le barattage, un procédé également atypique de par l'étape de trempage des fruits dans l'eau. Une analyse statistique par le *t-test (ou test de Student) à échantillon unique* a été faite en vue de comparer les TPT des échantillons avec celle de l'échantillon ayant la valeur la plus faible comme échantillon de référence (Siss₁). Les résultats ont montré que la *p-value* = 0,01249 était inférieure au seuil de significativité α égal à 0,05, indiquant que la TPT moyenne des échantillons était significativement différente de celle de Siss₁ (14,16). Une étude réalisée dans 10 pays africains avait montré que la TPT des échantillons de BK chimiquement extraits à l'hexane était comprise entre 62 et 135 ppm, en comparaison de celle des amandes de karité, dont la teneur était comprise entre 2100 et 9500 ppm GAE (Maranz et al. 2003). Ainsi, selon ces auteurs, la teneur en polyphénols serait fonction de l'origine du BK et du procédé d'extraction mis en œuvre, confortant ainsi les résultats obtenus dans notre étude.

Pour l'analyse des composés polaires par RP-CLHP, quatre composés avaient été clairement identifiés : l'acide gallique, l'acide protocatéchuique, l'acide cinnamique et la quercétine. En effet, six (6) autres composés n'avaient pas pu l'être sur la base de leur temps de rétention et

du spectre UV. Parmi ces composés non identifiés, les trois (3) derniers composés étaient élués en fin d'analyse (C₈, C₉, et C₁₀). Les composés étaient diversément répartis entre les échantillons. L'acide gallique était seulement retrouvé dans les échantillons Yate₁ et le karitène, dans des proportions inférieures à la limite de quantification (LQ) en GAE. Le composé polaire le plus représentatif était l'acide cinnamique (0,00 à 46,26 ppm GAE), qui était retrouvé dans presque tous les échantillons, sauf dans l'échantillon industriel raffiné. Dans l'échantillon Ioba₂, l'acide cinnamique était retrouvé dans des proportions < LQ. Uniquement pour l'échantillon karitène, un composé non identifié avec un spectre UV proche de celui de l'acide cinnamique a été élué autour de 40 min.

La teneur des composés phénoliques mis en évidence par RP-CLHP (0,97 à 46,88 ppm GAE) était quantitativement inférieure à celle des TPT par spectrophotométrie UV (69,22 ppm PGE et 69,22 ppm PGE), (voir tableaux 40 et 41). Cette différence pourrait être dans un premier temps due au procédé d'extraction mis en œuvre pour les échantillons traditionnels, puisque les valeurs les plus faibles y étaient retrouvées, s'agissant des échantillons Siss₁ (14,16 ppm GAE), Ioba₂ (21,13 ppm GAE) et Ioba₁ (22,98 ppm GAE). Les analyses par CLHP n'ont pas permis de quantifier tous les composés phénoliques présents dans les échantillons. Aussi, la méthode spectrophotométrique réalise une quantification du totum des polyphénols. Les flavonoïdes par exemple ne sont pas quantifiés par CLHP, mais réagissent avec le réactif de Folin-Ciocalteu. En effet, selon Maranz et *al.* (2003), la procédure d'extraction du BK à l'hexane est responsable de la perte de 90 à 98 % des phénols. La teneur en polyphénols est fonction de la technique d'extraction du BK, et une optimisation serait nécessaire afin d'augmenter les quantités dans le beurre (Honfo et *al.* 2014). La température employée lors des différentes étapes de l'extraction pourrait contribuer à éliminer les composés antioxydants (Thioune et *al.* 2019). Les méthodes traditionnelles d'extraction du BK, du fait de l'absence de standardisation, expliqueraient certains paramètres tels que la teneur en eau, les impuretés insolubles, les AGL et les peroxydes. Les valeurs plus ou moins élevées de ces paramètres contribueraient à réduire la durée de vie du produit fini et, partant, les composés polyphénoliques. Par opposition aux méthodes industrielles, où les étapes d'extraction sont maîtrisées, constituent un critère d'intérêt pour du BK de bonne qualité.

Les composés qui n'ont pas pu être identifiés présentaient un spectre UV avec un maximum d'absorption autour de 200 et 300 nm. Trois de ces composés non identifiés (C₈, C₉ et C₁₀), élués autour de 68 - 69 min, avaient des spectres UV similaires à celui de l'acide cinnamique. Ces composés étaient présents dans tous les échantillons et en fonction de leurs temps de

rétenion, l'élution avait lieu au moment où la phase mobile correspondait à 100 % du solvant acétonitrile (voir tableau 24). En fonction du temps de rétenion de ces composés en comparaison de celui de l'acide cinnamique (40,3 min), on peut raisonnablement déduire qu'ils pourraient correspondre à 3 dérivés de l'acide cinnamique, portant un chromophore cinnamate, combinés à une fraction moins polaire. Cette hypothèse est en accord avec la littérature qui rapportait la présence d'esters de cinnamate d'alcool triterpéniques dans le BK. Une étude menée au Nigéria avait pu isoler et identifier quatre composés triterpéniques de cinnamate, qui sont : α -amyrine cinnamate, β -amyrine cinnamate, lupéol-cinnamate et butyrospermol cinnamate. En plus de ces quatre composés, quatre autres acétates triterpéniques ont été isolés puis identifiés (Akihisa, et *al.* 2010). Plus tard en 2011, une étude similaire réalisée sur du BK extrait à l'hexane, originaire de sept pays africains, avait de nouveau identifié les mêmes composés triterpéniques du cinnamate, qui étaient majoritaires parmi les triterpènes acétates (Akihisa et *al.* 2011). Une revue de la littérature sur l'utilisation du BK et de ses dérivés dans les produits cosmétiques avait également signalé la présence de ces esters triterpéniques du cinnamate à des taux significatifs exprimés en esters triterpéniques totaux: α -amyrine cinnamate (29,3 %), β -amyrine cinnamate (7,6 %), lupéol-cinnamate (9,0 %) et butyrospermol cinnamate (14,8 %) (Burnett et *al.* 2024). Cependant, malgré le fait que ces composés ci-dessus énumérés n'aient pas pu être confirmés dans notre étude, nous pouvons, sur la base de leurs spectres UV proches de celui de l'acide cinnamique, donc des dérivés du cinnamate, émettre l'hypothèse selon laquelle les composés C₈, C₉ et C₁₀ contribueraient probablement à l'activité photoprotectrice potentielle des beurres étudiés. Les flavonoïdes et les dérivés du cinnamate sont considérés comme des agents photoprotecteurs naturels, avec une préférence pour les dérivés du cinnamate utilisés comme des filtres UVA-UVB dans la longueur d'onde de 310 à 325 nm (Nunes et *al.* 2018). L'activité photoprotectrice de certains dérivés du cinnamate a été documentée et certains d'entre eux sont retrouvés dans des produits commerciaux de protection solaire.

IV.2.2. Potentiel antioxydant

Les résultats de l'évaluation de la capacité antioxydante des beurres bruts de karité par les tests DPPH et ABTS n'ont pas permis de conclure à une activité antioxydante. En effet, aucune décoloration des solutions n'a été observée. La faible teneur en polyphénols (% m/m du beurre

brut) et des interférences éventuelles pourraient expliquer ce résultat négatif, d'où l'intérêt de réaliser les essais sur la fraction polaire du beurre brut.

En effet, les tests antioxydants (DPPH et ABTS) sur les extraits polyphénoliques à différentes concentrations ont donné des résultats concluants (voir figure 36). Ces résultats ont montré que les fractions polaires avaient une plus grande capacité à piéger les cations du radical ABTS que ceux du radical DPPH. Le pourcentage d'inhibition de la concentration finale la plus élevée n'a pas excédé 40 % pour le test au DPPH, contrairement au test à l'ABTS, où le pourcentage d'inhibition était supérieur à 80 %. Les échantillons dans leur majorité ont présenté un effet d'inhibition dose-dépendant qui serait lié à la teneur en polyphénols totaux et aux phénols.

Il s'agit des échantillons Houe₅, Ioba₂, Yate₁, Kadi₅ et Naya₁ pour le test au DPPH. Seuls les échantillons Siss₁ et raffiné n'ont pas montré un effet d'inhibition dose-dépendant, tant pour le test au DPPH qu'à l'ABTS. Pour le test à l'ABTS, seulement les échantillons Siss₁ et raffiné n'ont pas présenté un effet inhibiteur dose-dépendant, qui ne l'a pas non plus été pour le test au DPPH. Au vu des résultats de la présente étude, les échantillons Kadi₅ et Naya₁ avaient les valeurs d'inhibition les plus élevées (26,48 % et 35,64 % respectivement) pour le test au DPPH. Parallèlement à ces résultats, ces échantillons étaient parmi ceux avec des TPT les plus élevées. Quant au test à l'ABTS, les échantillons bruts industriels et Naya₁ avaient les valeurs d'inhibition les plus élevées (82,01 % et 82,88 % respectivement). Cependant, l'échantillon Yate₁, avec la TPT la plus élevée, avait un pourcentage d'inhibition de 17,06 % et 69,21 %, respectivement pour le DPPH et l'ABTS. L'explication probable serait que l'activité antioxydante serait fonction de la teneur en polyphénols totaux.

Les résultats des tests de corrélation entre les valeurs moyennes des TPT et celles des pourcentages d'inhibition par les tests DPPH et ABTS (tableau 43) étaient différents de ceux obtenus par Zhang et *al.* (2018) qui avaient trouvé des corrélations diverses entre les capacités antioxydantes et la TPT de tissus de divers fruits, selon un procédé maîtrisé. Cependant, les auteurs Dudonné et *al.* (2009) avaient pu établir une corrélation positive entre la TPC et les capacités antioxydantes ABTS et DPPH d'extraits aqueux de trente plantes d'intérêt industriel, suivant un protocole maîtrisé. Ces différences observées entre les résultats de notre étude et ceux des auteurs cités pourraient s'expliquer par l'inhomogénéité de nos échantillons en raison de leurs origines diverses et des procédés d'extraction non standardisés, contrairement aux procédés industriels et maîtrisés mis en œuvre dans ces études. Cela suggère donc que les composés phénoliques contribuent modérément aux capacités de piégeage des radicaux libres des beurres. Entre les capacités antioxydantes DPPH d'une part, et ABTS d'autre part, les

résultats de notre étude ont montré une corrélation assez significative (R égal à 0,924), similaire à celle trouvée par Dudonné et *al.* (2009), qui rapportaient un coefficient de corrélation R égal à 0,946. Il est en effet suggéré par Dudonné et *al.* (2009) que le potentiel antioxydant des composés phénoliques est directement lié à la structure moléculaire des phénols, c'est-à-dire au nombre de noyaux aromatiques et de groupes hydroxyles (Dudonné et *al.* 2009).

IV.3. Potentiel photoprotecteur

IV.3.1. Facteur de protection solaire *in vitro*

Le FPS moyen était compris entre 9,26 et 11,33 (à la concentration de 5 mg/mL en solution dans l'éthanol) pour les échantillons de BK traditionnels (tableau 44 et figure 37). Quant à l'échantillon de référence Degom, cette valeur était de 10,44 et n'était pas la plus faible. Les résultats de l'analyse statistique ont montré que le FPS moyen des échantillons traditionnels était significativement différent de celui de l'échantillon industriel, avec un intervalle de confiance de 95 %. Selon le type de procédé d'extraction, le FPS était diversément réparti. En effet, l'échantillon Naya₁ (P₅ - province du Nayala) avait la valeur la plus élevée, suivi de l'échantillon Gour₁ (P₁ - province du Gourma). L'échantillon Mouh₁ (P₃ - province du Mouhoun) avait la plus faible valeur. L'analyse de variance conduite afin d'évaluer l'effet des procédés d'extraction d'une part et d'autre part l'effet de l'origine, sur le FPS des échantillons bruts traditionnels, a donné les *p-values* respectivement égales à 0,0891 et 0,0511. Ces résultats montrent clairement l'absence d'effet du procédé d'extraction sur le FPS. Cependant, l'effet de l'origine, comme le montre la *p-value*, est à la limite du seuil de significativité α .

Selon l'Agence nationale de la vigilance sanitaire du Brésil (ANVISA, 2012), l'efficacité d'une formule protectrice (écran solaire) est universellement mesurée en fonction de son FPS, qui doit être ≥ 6 . Aussi, prenant en compte les critères de classification établis par le COLIPA (tableau 48) (Official Journal of the European Union 2006; Padera 2011), les résultats montrent que le BK brut extrait traditionnellement confère une faible protection dans les conditions expérimentales de l'étude. Cependant, il faut noter que ces classifications concernent pour l'essentiel les formulations galéniques revendiquant des propriétés d'écran solaire et des produits chimiques et physiques aux propriétés avérées. Étant donné que le présent matériel expérimental est un produit naturel brut, de plus amples investigations, comme l'évaluation du

potentiel photoprotecteur en milieu cellulaire et acellulaire sur la production des ROS “*Reactive oxygen species*” sont nécessaires.

Tableau 48: Classification des produits de protection solaire selon « European Commission and Cosmetics Europe » (Ex COLIPA)

European Commission recommendation			Ex COLIPA standard		FPS beurre de karité (5 mg/mL)	
Labelled category	Labelled SPF	Measured SPF (measured in accordance with the principles recommended in point 10)	Label SPF	Protection class	Min	Max
Low protection	6	6-9,9	6	Low	9,26	-
	10	10-14,9	10			
Medium protection	15	15-19,9	15	Moderate	-	11,33
	20	20-24,9	20			
	25	25-29,9	30	High		
High protection	30	30-49,9	50	Very high		
	50	50-59,9	50 +			
Very high protection	50 +	60 ≤		-		-

COLIPA: European Cosmetic Toiletry and Perfumer Association; SPF/FPS: Sun protection factor/Facteur de protection solaire

Selon Alander (2004), le BK aurait une certaine fonction d'écran solaire, bien que fournissant une faible protection contre les rayons UV, qui serait liée aux triterpénoïdes, en particulier les esters d'acides cinnamate qui absorberaient fortement dans le domaine UV de 250-300 nm. Pour remédier aux difficultés d'évaluation du FPS *in vivo* des produits d'origine naturelle, certains auteurs recommandent l'utilisation de ces derniers comme adjuvants ou composés actifs dans les formulations afin d'augmenter le FPS *in vivo* (Morocho-Jácome et al. 2021). Ces produits pourraient ainsi être considérés comme des filtres naturels UV “vert”, offrant une de multiples potentialités aux industries cosmétiques et pharmaceutiques. Cependant, (Sarruf et al. 2020) ont évalué l'effet du BK, du TiO₂ et du méthoxycinnamate d'éthylhexyle à différentes concentrations dans des formulations photoprotectrices de rouge à lèvres et avaient conclu à l'absence d'activité du BK sur le FPS de la formulation, contrairement au TiO₂ et au méthoxycinnamate d'éthylhexyle. Notons cependant que l'évaluation du FPS avait été faite par analyse au spectrophotomètre à réflectance diffuse équipé d'une sphère d'intégration, différente de la méthodologie mise en œuvre dans notre étude. Selon Brazilian Society of Dermatology (2014), des composés tels que les vitamines C & E, les caroténoïdes, les polyphénols (flavonoïdes), les AG (acide eïcosapentaénoïque) et les oméga-3, ainsi que les antioxydants, sont considérés comme photoprotecteurs systémiques. Dans la même logique, (Donglikar et Deore 2016) avaient conclu que les polyphénols (flavonoïdes, tannins), les

caroténoïdes, les composés organiques volatiles étaient doués d'activités antioxydantes puissantes.

L'effet potentiel du karitène sur l'amélioration du FPS du beurre brut a permis d'établir une relation presque concentration-dépendante sur le FPS du beurre brut, avec un coefficient de corrélation R égal à 0,9045 (tableau 45 et figure 38). En effet, le blanc échantillon (Degom) utilisé avait la teneur en karitène la plus faible parmi les échantillons testés, de l'ordre de 0,31 %. Ces résultats permettent d'établir que la concentration en karitène influence positivement le FPS *in vitro* du BK brut. Cependant, comme mentionné dans le contexte de l'étude, le matériel "karitène" qui a été utilisé n'était pas exclusivement pur, et pourrait contenir d'autres substances qui inhiberaient ou stimuleraient la réponse, d'où la nécessité d'investigations plus approfondies. Le FPS moyen des échantillons dopés était de 12,26 % et 13,99 %, respectivement pour la teneur en karitène de 0,81 % et 2,81 %.

IV.3.2. Photoprotection en milieu acellulaire

L'évaluation de l'effet photoprotecteur en milieu acellulaire des beurres bruts et de leurs fractions polaires a mis en évidence l'effet *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ par les échantillons tests. Cet effet *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ s'est manifesté par une décroissance de la valeur de l'absorbance mesurée en présence de RB irradié, par rapport au contrôle solvant, en fonction de la concentration et du temps (300 s) (figures 40 et 41, tableau 47). Dans l'ensemble, les échantillons testés ont présenté des effets d'inhibition de l' $^1\text{O}_2$ concentration-dépendante. Pour les beurres bruts, à la concentration la plus élevée, l'échantillon Yate₁ a montré l'effet *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ le plus important, suivi par les échantillons Naya₁ et Ioba₁, qui étaient de 29,57 %, 28,55 % et 27,38 %, respectivement. Cet effet était plus important que celui du TiO₂ qui était de 14,23 %. Cependant, le TiO₂ est connu pour ses propriétés d'écran solaire, car il est utilisé comme filtre UV. À ce titre, il devrait présenter une plus grande inhibition de l'effet du RB irradié. Ces résultats pourraient s'expliquer par la différence de concentration entre les beurres bruts et le TiO₂ et par la solubilisation du TiO₂ en milieu aqueux, sachant que ce dernier y est difficilement soluble. Les données de cette étude ont montré que les échantillons traditionnels avaient une capacité de *quenching* de l' $^1\text{O}_2$ plus élevée que celle des échantillons industriels, dont le pourcentage d'inhibition était compris entre 26,38 % et 19,19 %, respectivement pour le beurre raffiné et le karitène.

Pour ce qui concerne les extraits polaires, à la plus forte concentration, l'échantillon Ioba₂ a montré l'effet *quenching* de l'¹O₂ le plus important, soit 15,00 %, suivi par les échantillons Kadi₅ et Yate₁. La capacité d'inhibition des extraits polaires traditionnels était de nouveau plus importante que celle des échantillons industriels, dont les plus élevées étaient respectivement de 12,53 % et 11,55 % pour le brut et le karitène. Pour les fractions brutes, l'échantillon Yate₁ était celui qui avait le plus d'effet de *quenching*, contrairement à Ioba₂ pour les fractions polaires. Il est évident que le BK, en tant que matière première d'origine végétale, contient plusieurs composés bioactifs (parmi les quels les insaponifiables) dont des phénols (Honfo et al. 2014), les alcools triterpéniques (65 à 75 % de l'insaponifiable), le tocophérol (α -tocophérol : 112 $\mu\text{g/g}$ de beurre ; γ -tocophérol : 13 $\mu\text{g/g}$ de beurre ; β -tocophérol et δ -tocophérol), et le stérol (Nahm, 2011; Allal et al. 2013) qui pourraient expliquer ces effets.

Les beurres bruts traditionnels et leurs extraits polaires ont montré plus d'effets sur l'¹O₂ que les beurres industriels. D'après les résultats de l'étude, seuls les échantillons bruts ont montré une activité concentration-dépendante. Ces composés sont donc de puissants *quencher*s de l'¹O₂, qui pourraient protéger la peau humaine contre les rayonnements UVA et UVB. Cependant, les effets ne sont pas uniquement liés aux polyphénols/composés polaires présents dans le beurre, puisque le beurre brut contient davantage de composés bioactifs. Les antioxydants agissent comme donneurs d'hydrogène, produisant des radicaux phénoxy (sur le noyau benzénique), ce qui entraîne une liaison hydrogène intramoléculaire avec l'hydrogène libre.

Par analyse statistique (*test t à échantillon unique*), il a été mis en évidence une différence significative entre les moyennes des valeurs d'absorbance relatives mesurées d'une part, entre les extraits polaires et la moyenne du contrôle ADPA, et d'autre part entre les échantillons bruts et le contrôle ADPA. Ces résultats ont donné une *p-value* égale à $1,09\text{e}^{-16}$ et $1,69\text{e}^{-19}$, respectivement, ce qui était inférieur au seuil de significativité α égal à 0,05. Par la suite, une analyse statistique, par le *test t à deux échantillons*, a permis de comparer l'effet *quenching* des extraits polaires et des échantillons bruts testés sur la production de l'¹O₂ lors de la photo-irradiation du RB. Les résultats ont également montré une différence significative de l'effet *quenching* des échantillons testés sur la production de l'¹O₂ lors de la photo-irradiation du RB, avec une *p-value* $< 2,2 \text{e}^{-16}$; pour une moyenne de $52,4 \pm 2,92$, et une moyenne de $71,4 \pm 4,12$, respectivement pour les extraits polaires et les échantillons bruts.

IV.3.3. Photoprotection en milieu cellulaire

IV.3.3.1. Toxicité inhérente du beurre de karité brut sur les cellules HaCaT

Les résultats ont montré que l'éthanol utilisé comme solvant témoin à la concentration finale de 2 % ne présentait aucune toxicité après 24 h et 48 h d'incubation (figure 42). Des résultats similaires ont été obtenus avec l'ensemble des échantillons testés en solution dans l'éthanol à des concentrations finales allant de 0,1 à 100 µg/mL. La viabilité cellulaire était supérieure à 60 % après 24 h d'incubation et supérieure à 90 % après 48 h d'incubation. Les résultats ont montré que le BK brut aux concentrations testées ne présentait aucune toxicité pour les cellules HaCaT après 24 h et 48 h d'incubation. Sur la base de ces résultats, le BK brut en solution dans l'éthanol peut être utilisé pour des études de photoprotection sur les cellules HaCaT.

IV.3.3.2. Effets photoprotecteurs des échantillons de beurres bruts et de leurs extraits polaires sur la production de l'oxygène singulet

Aux concentrations expérimentales de l'étude, les résultats des effets photoprotecteurs des échantillons de beurres bruts et de leurs extraits polaires ont montré qu'en l'absence de RB, les cellules n'ont pas été affectées et ont continué à croître normalement, montrant même une augmentation très significative à près de 700 % de la viabilité (voir figure 43) par rapport au contrôle normal (cellules HaCaT + RB) qui est à 100 %. Dans les conditions optimales d'incubation à l'étuve (5 % de CO₂, 37 °C), en l'absence de RB et en overnight, l'activité métabolique cellulaire se poursuit pouvant atteindre des viabilités élevées. Cela pourrait s'expliquer par l'absence de $^1\text{O}_2$ et, par conséquent, par l'absence de toxicité. La viabilité cellulaire a été mise en évidence dans le beurre brut après 4 h d'incubation avec une croissance cellulaire de 96,23 % à 570,75 %, respectivement, pour le karitène à 2 µg/mL et l'échantillon Siss₁ à 10 µg/mL. Comparativement, les viabilités cellulaires dues au TiO₂ étaient comprises entre 169,18 % à 10 µg/mL et 453,13 % à 2 µg/mL. Pour les échantillons bruts, les concentrations à 10 µg/mL procuraient les viabilités cellulaires les plus élevées. Cependant, le karitène semblait fournir une protection concentration-dépendante au vu des résultats de la fraction brute à 4 h après 30 min d'irradiation. Les résultats ont montré que le TiO₂ offrait une plus grande protection que le beurre brut. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que le TiO₂ est un filtre UV à large spectre. Sous sa forme microfine (20 - 50 µm), il offre une

photoprotection contre les rayons UVB et UVA à 315-340 nm uniquement, ne couvrant pas la gamme 340-400 nm (Moloney *et al.* 2002). Par ailleurs, Wright *et al.* (2017) ont rapporté que les particules de TiO₂ (fines et ultrafines) avaient un effet positif sur la viabilité cellulaire après 24 h d'exposition aux rayons UVC à 254 nm pendant 30 min, 1 h et 5 h, contrairement à la forme nanoparticule de TiO₂. Après 48 h d'exposition, toutes les formes de TiO₂ ont inhibé la croissance cellulaire, avec un effet plus prononcé pour les formes nanoparticulaires de TiO₂. Pour l'échantillon Siss₁ (à 10 µg/mL) par exemple, on a noté une croissance cellulaire de 275,66 % à 570,75 % après 1 h et 4 h d'incubation, respectivement.

La viabilité cellulaire après 4 h d'incubation variait entre 52,24 % et 182,96 % pour les extraits polaires, respectivement pour Naya₁ (équivalent à 2 mg de beurre) et Ioba₁ (équivalent à 1 mg de beurre). On a donc noté, à l'image des fractions brutes, une augmentation de la viabilité cellulaire à l'issue des 4 h d'incubation. À T_{1h} d'incubation, la croissance cellulaire était de 103,54 % et 118,52 %, respectivement pour les échantillons Naya₁ et Ioba₁ (équivalents à 1 mg de beurre). Après 4 h d'incubation, les résultats pour le TiO₂ étaient de 117,34 % à 156,80 %, pour les concentrations à 0,02 µg/mL et 0,04 µg/mL. Au vu des résultats, les composés polaires offraient une meilleure protection que le TiO₂ en solution aqueuse par rapport au beurre brut. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que l'irradiation du TiO₂ en suspension aqueuse génère de l'¹O₂ et du peroxyde/eau oxygénée (H₂O₂) (Konaka *et al.* 1999). Certaines études ont montré que le TiO₂ à 1,0 g/L avait une faible toxicité, uniquement après une exposition de longue durée. L'effet cytotoxique n'apparaît qu'à des concentrations très élevées, réduisant la viabilité cellulaire après sept jours d'exposition (Crosera *et al.* 2015), ce qui est en accord avec les résultats de notre étude. Avec les extraits polaires, les résultats de la présente étude ont montré que les taux de viabilité cellulaire étaient diversément répartis et n'étaient pas nécessairement concentration-dépendants, sauf pour l'échantillon Houe₅. Cependant, les concentrations les plus faibles offraient la meilleure protection pour Ioba₁, Naya₁, le brut industriel et le karitène.

Une analyse statistique (*test t à un échantillon unique*) a été réalisée afin de comparer la moyenne de viabilité cellulaire des échantillons bruts à celle du contrôle éthanol. Les résultats ont montré une différence significative entre les moyennes de l'échantillon brut testé et le solvant contrôle (*t* (df) égal à 15, *p-value* égale à 0,00748).

IV.4. Discussion générale

IV.4.1. Caractéristiques physicochimiques et thermiques du beurre de karité en lien avec les procédés d'extraction

L'analyse des différents procédés d'extraction des BK au Burkina Faso a mis en évidence une diversité de procédés et d'outils, variant d'une localité à l'autre et au sein de la même localité d'un fabricant à l'autre. Il n'y a donc pas de standardisation ni dans les procédés ni dans les moyens techniques utilisés. La filière karité du Burkina Faso est donc marquée par des méthodes de transformation très variées, auxquelles s'ajoutent des moyens techniques non adaptés (techniques de séchage, de concassage, de barattage, de filtration) peu productifs par rapport aux procédés industriels. Aussi, les conditions de conservation et de stockage de la matière première par la majorité des producteurs favorisent la poursuite de l'activité physiologique de germination des graines, impactant les caractéristiques organoleptiques du produit fini brut, étant donné que la majorité de la production est destinée à l'exportation. Outre l'exportation, le beurre produit est également consommé localement, soit plus ou moins transformé en produits de soins corporels, soit directement comme huile de cuisson pour l'alimentation.

Le trempage des noix de karité dans l'eau avant l'obtention des amandes, est source d'activation enzymatique ; lesquelles activations enzymatiques sont inhibées par la cuisson à l'eau des amandes. Cependant, si la cuisson n'est pas bien maîtrisée et standardisée, l'une des conséquences serait une altération des composés organiques volatiles, une dégradation de la texture, une décoloration du beurre (préjudiciable aux caractéristiques organoleptiques), des indices chimiques et des composés bioactifs sous-standard. Quant à la technique de séchage solaire, il s'agit d'un procédé lent durant lequel la matière à sécher peut être soumise aux intempéries et à un séchage non uniforme, avec des teneurs en eau parfois élevées, une augmentation de l'acidité du beurre et une oxydation élevée (César Kapseu 2009). En effet, selon Womeni et *al.* (2007), le séchage au soleil des amandes concassées d'épaisseur de plus de 16 mm réduirait l'acidité du beurre, tout en préconisant une durée de séchage optimale de 8 jours. La torréfaction des amandes est un procédé qui influence les caractéristiques organoleptiques et physicochimiques du beurre. En effet, l'augmentation et la durée de la température de torréfaction influencent l'odeur et certains paramètres chimiques tels que la teneur en AGL, l'IP et le rendement d'extraction. Une élévation des IP et IA a été notée après

cinq minutes de torréfaction entre 120 et 150 °C, selon les résultats de Megnanou et Niamke (2013). Lorsque non maîtrisée, la torréfaction pourrait entraîner une thermolyse des TAG, influençant ainsi la composition en AG du beurre. Au Burkina Faso, la production de BK est une activité presque exclusivement féminine, organisée autour de coopératives, associations et groupements. En cela, le barattage qui est une étape importante dans le procédé d'extraction était majoritairement retrouvé chez les producteurs.

Les résultats de l'étude des procédés d'extraction ont montré que pour le procédé d'extraction P₅, les noix étaient trempées dans l'eau, puis séchées au four de même que les amandes, et enfin la pâte était portée à ébullition. L'échantillon Naya₁ du P₅ avait les indices de peroxyde et de jaunissement les plus élevés, le pourcentage d'inhibition le plus élevé pour les tests DPPH et ABTS, avec une teneur en polyphénols totaux parmi les plus élevées. Ainsi, les résultats de notre étude soulignent l'importance d'optimiser le prétraitement des matières premières, le traitement des produits intermédiaires et les techniques d'extraction afin d'améliorer la qualité du produit, avec des caractéristiques chimiques qui satisfont aux critères de qualité requis. Un meilleur contrôle de ces facteurs permettra d'obtenir du beurre de karité de meilleure qualité, adapté à diverses applications, y compris la cosmétique et la pharmacie. Des méthodes d'amélioration de l'extraction du beurre de karité, utilisant des outils mécanisés et semi-mécanisés, permettant de se conformer aux exigences des industries cosmétiques et pharmaceutiques, ont été décrites (Goumbri et *al.* 2021; César Kapseu 2009). En effet, des équipements tels que les séchoirs solaires (indirects à convection forcée/ou électriques à température contrôlée), les broyeurs mécanisés en inox, les barattes motorisées et les presses (hydrauliques, à vis, à cric) sont parmi les outils utilisés. Les étapes clés pour l'extraction du beurre de qualité pharmaceutique passent nécessairement par une sélection rigoureuse de la matière première (noix/amandes), suivie du nettoyage et de la décontamination, un broyage, une torréfaction et un barattage dont les paramètres optimaux sont connus et maîtrisés, une extraction mécanisée ou pression à froid, puis une filtration suivie d'une décantation, le tout dans des conditions aseptiques. Le conditionnement et le stockage doivent être assurés dans des conditions ambiantes garantissant une bonne stabilité et une bonne conservation du produit.

Les résultats du degré de coloration et de l'indice de jaunissement ont montré des écarts importants de couleur traduisant une hétérogénéité des caractéristiques organoleptiques qui sont liées, soit à l'origine géographique de la matière première, soit au procédé d'extraction, et à la présence de pigment.

Quant aux résultats des propriétés thermiques de fusion/cristallisation par ACD et la teneur en matière grasse solide par RMN p , les résultats ont également mis en évidence une diversité de caractéristiques, comme observé pour les caractéristiques chimiques. Dans l'ensemble, les variations pourraient être attribuées aux procédés d'extraction. Pour la teneur en matière grasse solide, les variations les plus importantes étaient observées entre les procédés 1 et 2 et l'origine du beurre (région du Guiriko en particulier).

L'analyse de la composition stérolique a permis d'identifier et de quantifier sept composés, très variables d'un échantillon à l'autre. Ces résultats ont mis en évidence la variabilité de la composition en stérols en fonction de la méthode d'extraction et de l'origine du beurre. Une meilleure maîtrise de la technique d'extraction, partant d'une sélection optimale de la matière première, permettrait d'obtenir du beurre avec les caractéristiques biochimiques aux teneurs requises. Ainsi, la composition en stérols, tout comme celle en AG, pourrait constituer des marqueurs de qualité du beurre de karité, pour les usages agroalimentaires et cosmétiques. Une teneur plus élevée en stérols pourrait indiquer un bon profil lipidique. Le β -sitostérol (figure 44a) était la forme majoritaire, présente dans tous les échantillons, et pourrait de ce fait constituer un marqueur de qualité. Sa structure chimique est similaire à celle du cholestérol (figure 44b), où il a des fonctions similaires au niveau végétal (Saloufou et *al.* 2018).

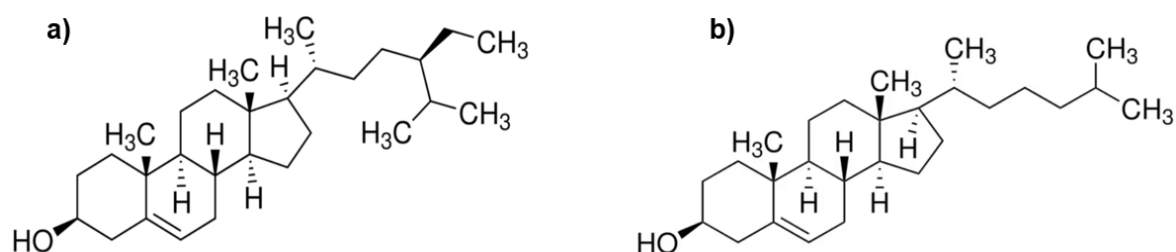


Figure 44: Structures chimiques du β -sitostérol a) et du cholestérol b)

La fonction des stérols dans les plantes est identique à celle du cholestérol chez l'homme qui consiste au maintien de la structure et du fonctionnement de la membrane cellulaire. Selon Gupta et *al.* (2011), le β -sitostérol a un effet protecteur sur le tissu pancréatique. Il a été mis en évidence son potentiel antioxydant par une élévation des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques d'une part (Baskar et *al.* 2012), et d'autre part par sa capacité probable à manifester un effet *quenching* sur les espèces réactives de l'oxygène (ROS).

Pour ce qui concerne les composés organiques volatiles, la grande diversité observée a une influence sur les caractéristiques organoleptiques, notamment sensorielles, et la qualité

alimentaire du beurre de karité de par la présence de composés comme les acides carboxyliques, les hydrocarbures. Une teneur plus élevée en composés acides volatiles, comme c'était le cas de l'acide acétique qui était présent dans tous les échantillons, et d'autres acides comme les acides hexanoïque et butanoïque, est source d'odeur plus âcre, tandis que le guaiacol serait responsable de l'odeur de « fumée ».

De façon générale, les résultats de la présente étude ont montré que les procédés d'extraction influençaient fortement les caractéristiques chimiques et biochimiques du beurre de karité. Les variations étaient significatives d'un échantillon à l'autre et ce, indépendamment du procédé d'extraction. Bien que certains indices chimiques de qualité soient conformes aux normes internationales de référence, d'autres, comme les indices de saponification et de peroxyde, ont montré des écarts qui pourraient nécessiter une optimisation des procédés d'extraction, avant une éventuelle standardisation selon l'utilisation (agroalimentaire, cosmétique et/ou pharmaceutique). Les résultats ont mis en évidence la diversité des caractéristiques du beurre de karité selon les procédés d'extraction, tout en soulignant la nécessité d'optimiser certains paramètres pour répondre aux normes internationales.

IV.4.2. Analyses en composantes principales

La corrélation entre les paramètres physicochimiques et thermiques du beurre de karité a été présentée dans le tableau 39. Les résultats ont montré une relation entre la teneur en matières grasses solides (SFC) et les paramètres chimiques que sont la teneur en acides gras libres (AGL) et la teneur en matières insaponifiables (UMC). Cette relation était négative ($r = -0,70$) entre l'AGL et la SFC en mode série non tempérée à 35 °C (SFCNT35), et modérément positive ($r = 0,50$) entre l'UMC et la SFC en mode série tempérée à 35 °C (SFCT35).

On note des corrélations modérées entre C18:0 (acide gras stéarique) et c3 (température de transition de cristallisation) ($r = 0,59$) et entre UMC et h3 (température de transition de fusion) ($r = -0,50$) par exemple. Les corrélations étaient significatives entre AGL et c1 (température de transition de cristallisation) ($r = 0,82$) ; entre UMC et h4 (température de transition de fusion) ($r = 0,73$). Ces résultats indiquent que le comportement thermique du beurre de karité brut est fonction des caractéristiques chimiques de qualité, telles que la teneur en AG et les indices chimiques de qualité (AGL, IO, UMC).

Les corrélations entre l'UMC-c' (température de transition de cristallisation) et l'UMC-c3 étaient respectivement de 0,98 et 0,96. Quant à la corrélation entre AGL-h4, elle était de -0,88. La teneur en acides gras a également présenté des corrélations significatives. Le coefficient de corrélation était de 0,77 pour l'acide gras palmitique (C16:0-c4), de -0,72 pour l'acide gras oléique (C18:1-c4) et de 0,71 pour l'acide gras C18:0-c4 (tableau 39).

Selon la figure 29, les résultats montrent que 87,20 % de la variance totale est expliquée par les dix premiers axes, ce qui justifie le choix du nombre de composantes. Les trois premières variables qui contribuent le plus à l'axe 1 sont c' (température de transition, cristallisation), SFCNT35 (teneur en matières grasses solides - SFC - à 35 °C pour la méthode non tempérée) et h3 (température de transition, fusion).

Selon la projection des échantillons sur le plan factoriel suivant leurs scores sur les deux premières composantes (figure 30), la plupart des échantillons semblent distribués uniformément sur les composantes 1 et 2. Seul l'échantillon 12 (échantillon Houe₄ issu du procédé₁, de la province du Houet) se démarque. Ceci peut s'expliquer par sa teneur en acides gras oléique et linoléique (suivant la composante 2), son indice d'iode et sa température de transition de fusion h3, (suivant la composante 1) qui sont plus élevés. Les scores représentent les projections des échantillons sur ces composantes, et leur construction est déterminée par la contribution des variables. Les variables qui contribuent le plus à la variation (*loading* = contribution d'une variable à la construction d'une composante) selon les axes les plus significatifs sont ainsi décrites :

Sur la première dimension, les variables les plus explicatives sont la température de transition h3, la teneur en acides gras libres (AGL) et l'indice d'iode (IoGC) (les plus élevées), suivies de la SFCNT35, de la température de transition h1 et de la teneur en matières insaponifiables (UMC) (plus faibles). Sur la deuxième composante, les caractéristiques IoGC, les acides gras oléique et linoléique contribuent le plus à la construction des composantes par leurs valeurs qui sont les plus élevées, comme sur la première composante. Cette contribution est également influencée par les variables acides gras stéarique et gadoléique (les plus faibles). Sur la sixième composante significative, l'IOGc impacte le plus la variation avec l'échantillon Naya₁ qui a la valeur la plus élevée (44,5 meqO₂/kg) et l'échantillon Houe₂ (41,9 meqO₂/kg), dont la valeur est parmi les plus élevées. Quant à la septième dimension significative, les variables UMC et SPF (les plus faibles) et les variables YICrude et SPF (les plus élevées) contribuent le plus aux variations.

La construction de cluster par classification hiérarchique ascendante n'a pas permis de dégager des groupes clairement distincts sur la base de leurs procédés d'extraction et de leurs caractéristiques physicochimiques. Cela pourrait s'expliquer par les limites de l'étude. En effet, la taille de l'échantillon (37), la nature des produits (produits biologiques dont les techniques d'extraction sont très variables), la non-maîtrise des paramètres de la matière première et des étapes de l'extraction du produit fini (origine, variété et qualité de la matière première, standardisation des procédés) et aussi la représentativité des échantillons par procédés (échantillons du même procédé mais issus de saisons de production différentes, homogénéité de la taille des échantillons par procédé) constituent des biais ne permettant pas un clustering statistique assez significatif. En effet, une taille d'échantillon plus importante (une taille d'échantillon à trois chiffres) améliore la précision, réduit les risques d'erreurs avec une bonne répétabilité et une bonne représentativité.

Parlant des procédés d'extraction, les résultats obtenus dans la présente étude ne permettent pas de proposer avec preuve à l'appui des procédés optimaux d'extraction traditionnelle du beurre de karité de qualité désirée (qualité agroalimentaire et cosmétique/pharmaceutique). À moins d'une production industrielle contrôlée, une extraction traditionnelle/artisanale standardisée du beurre de karité est très difficile. La production artisanale de beurre de karité répond à des savoir-faire traditionnels, variant d'une communauté à l'autre. Selon les critères de qualité du beurre de karité non raffiné édictés par le Codex Alimentarius (tableau 1), la teneur en eau est une caractéristique importante, influençant la qualité du produit fini. La teneur en eau admise est comprise entre 0,0 % et 0,05 % pour le beurre de grade pharmaceutique/cosmétique, et entre 0,06 % et 0,2 % pour celui de grade agroalimentaire. La limite maximale tolérée est de 2 % pour la savonnerie. L'étroitesse de ces valeurs démontre la nécessité de maîtriser ce paramètre, qui, si elle n'est pas maîtrisée, est source d'oxydation et de dégradation, influençant la stabilité du produit (rancissement, prolifération microbienne, couleur et odeur sous standards, séparation de phase). Aussi, la teneur en impuretés insolubles constitue un autre paramètre d'intérêt pour le beurre de karité non raffiné. Elle varie de 0,09 à 0,2 % m/m pour les beurres de grades pharmaceutiques et agroalimentaires. Dans notre étude, ces paramètres n'ont pas pu être déterminés du fait de la logistique, ce qui constitue une autre limite dans la proposition de procédés d'extraction optimaux selon le besoin.

Des quatre paramètres d'intérêt pour le beurre non raffiné, deux ont été réalisés dans notre étude, il s'agit de la teneur en acides gras libres et de l'indice de peroxyde. Pour ce qui concerne la teneur en acides gras libres, seulement deux échantillons ($Kadi_2$ - Process1 et $Yate_1$ - Process4)

sont de grade 3, c'est-à-dire indiqués pour la savonnerie. Les autres échantillons satisfont aux critères de qualité pharmaceutique et agroalimentaire. En effet, l'échantillon Yate₁ présente la particularité d'un trempage à l'eau des fruits de karité ramassés, d'une cuisson suivie d'un double séchage des noix au soleil. Quant à l'échantillon Kadi₂, les noix achetées sont lavées puis séchées au soleil, sans passer par l'étape de cuisson. Selon le tableau 17 qui résume les effets des différentes étapes de prétraitements impactant les caractéristiques du beurre de karité, la cuisson des amandes suivie d'un séchage au soleil incontrôlé augmenterait la teneur en acides gras libres et l'indice de peroxyde. De même, le trempage à l'eau des noix conduirait à du beurre de qualité sous standard. Le séchage au soleil des amandes n'est pas la pratique la plus optimale, à condition d'un séchage uniforme, à durée déterminée (entre 7 et 8 jours) avec des amandes concassées dont la taille des fragments est maîtrisée. Toujours selon le tableau 17, le barattage à l'eau froide au début, puis l'ajout d'eau tiède vers la fin, augmenterait la teneur en acides gras libres et la teneur en eau du beurre. Dans notre étude, 30/32 procédés font recours au barattage (tableau 26), alors que seulement 2 échantillons ont des teneurs en acides gras libres > 3 % qui est la limite maximale pour le beurre de grade agroalimentaire. C'est donc la preuve que les étapes de prétraitement et de traitement sont inclusives.

Quant à l'indice de peroxyde, tous les échantillons sont de qualité pharmaceutique et agroalimentaire. Au vu de ces résultats, les échantillons Kadi₅ et Kadi₄ dont les procédés d'extraction n'ont pas été obtenus sont de meilleure qualité, du point de vue de la teneur en acides gras libres et de l'indice de peroxyde.

Le choix d'une méthode analytique de contrôle qualité du beurre de karité brut se réfère aux techniques officielles et réglementaires existantes, c'est-à-dire le contrôle qualité selon les techniques de titrage définies dans les monographies de l'AOCS et de l'IUPAC pour le dosage des indices chimiques. La spectroscopie proche infrarouge (NIRS) combinée à la chimiométrie ne représente pas une technique réglementaire pour le contrôle qualité du beurre de karité. Pour l'appliquer comme technique de contrôle qualité, des modèles expérimentaux devraient être développés et validés et une base de données représentative est construite et utilisée comme référence. La mise au point de cette base nécessite de travailler avec une taille d'échantillon importante. Cependant, le NIRS offre l'avantage d'un déploiement facile sur site (NIRS portable) et d'être non destructif pour les échantillons, donc une méthode analytique verte, respectueuse de l'environnement.

IV.4.3. Photoprotection

Les résultats de la photoprotection ont montré que parmi les dix échantillons testés pour l'analyse des composés phénoliques, c'est seulement dans les échantillons Naya₁ et Yate₁ que la quercétine a été identifiée et en dessous de la limite de quantification. En outre, ces échantillons présentaient les concentrations les plus élevées de polyphénols totaux et figuraient parmi les échantillons ayant les pourcentages d'inhibition les plus élevés dans les tests d'ABTS et de DPPH, soulignant l'effet de la quercétine sur l'activité antioxydante.

Les métabolites secondaires des plantes, tels que les flavonoïdes et les acides cinnamiques, sont considérés comme des photoprotecteurs naturels (Nunes et *al.* 2018). Plusieurs auteurs ont montré que l'action photoprotectrice des espèces végétales, des fruits et des résidus de fruits (pelures et graines) est due à la présence de composés phénoliques, en particulier les flavonoïdes. Ces composés ont une action antioxydante, absorbent dans la région UV et ont des caractéristiques structurelles similaires aux filtres chimiques (Agati et *al.* 2013; Cavinato et *al.* 2017). Présents dans le beurre de karité, les flavonoïdes constituent un groupe de polyphénols qui absorbent de manière significative les rayons UVA-UVB en raison de leur structure moléculaire et de leurs doubles liaisons (José et *al.* 2016). Cependant, selon certains auteurs (Saewan et Jimtaisong 2015; Ghazi 2022), les flavonoïdes agissent par absorption des rayons UV, par une action antioxydante directe et indirecte par piégeage des ROS générés après une irradiation UV, par un effet anti-inflammatoire en contribuant à la réduction de l'inflammation causée par l'irradiation, par des actions immunomodulatrices et par la protection et la réparation de l'ADN.

L'échantillon kariténe a réduit de manière significative le radical ABTS de 81,29 % à sa concentration la plus élevée (1,49 ppm). Les activités de piégeage des radicaux libres de la fraction polaire par réduction de l'ABTS et du DPPH ont confirmé que les composés phénoliques du beurre de karité présentaient une activité antioxydante. Selon les résultats obtenus sur modèle cellulaire, aux concentrations expérimentales, les beurres bruts et leurs fractions polaires ont protégé les cellules HaCaT de l'¹O₂ généré après irradiation à 550 nm. Dans le modèle acellulaire utilisant le système ADPA + RB, les résultats ont également fourni des preuves expérimentales de l'inhibition de l'¹O₂ généré. Le beurre de karité est utilisé comme ingrédient actif dans les crèmes solaires et autres formulations dermatologiques et cosmétiques. Les propriétés des écrans solaires ont été décrites dans plusieurs études (Palm et O'Donoghue 2007; Gilaberte et González 2010). En raison de ses propriétés lipophiles, le

beurre de karité peut absorber, réfléchir et/ou disperser les radiations émises. Sa teneur élevée en insaponifiables (Goumbri et *al.* 2021) lui confère des activités antioxydantes directes et indirectes contre la phototoxicité en piégeant l' $^1\text{O}_2$ et en induisant des réactions cytoprotectrices intrinsèques, respectivement (Gilaberte et González 2010). Ainsi, l'activité photoprotectrice du beurre de karité s'expliquerait par une synergie de mécanismes d'action : un effet quenching physique couplé à un effet quenching chimique. En effet, le quenching de l' $^1\text{O}_2$ est un processus physique où l'espèce réactive et excitée ($^1\text{O}_2$) retourne à son état fondamental ($^3\text{O}_2$) en transférant son énergie au quencher (beurre de karité) sans réaction chimique, comme décrit par Hirayama et *al.* (1994). Le quenching chimique est lié à l'action du beurre de karité sur la molécule chimique ADPA (voir figure 17 (Goumbri et *al.* 2025)), qui après irradiation, réagit avec l' $^1\text{O}_2$ pour former l'endoperoxyde (ADPAO₂) qui est phototoxique. Le beurre de karité agit donc par inhibition de la formation de l'endoperoxyde, dans le modèle acellulaire, d'où son effet photoprotecteur indirect.

Selon Gilaberte et González (2010), la quercétine est le flavonoïde présentant les propriétés antioxydantes les plus puissantes. Incorporée dans certaines formulations topiques, elle inhibe les dommages causés par les rayons UVB chez les animaux. Les polyphénols présents dans le beurre de karité qui ont été mis en évidence par colorimétrie et par CLHP jouent un rôle très important de par leurs propriétés biologiques. Quant à leur effet sur le beurre de karité, les polyphénols contribuent à améliorer la stabilité du beurre en limitant le phénomène de rancissement et donc l'oxydation. Dans sa revue de la littérature, (Donglikar et Deore 2016) avaient décrit que la quercétine de source végétale est l'un des composés antioxydants les plus puissants. Elle a des propriétés photoprotectrices et agirait en protégeant les systèmes antioxydants de la peau (glutathion peroxydase, glutathion réductase, catalase et superoxyde dismutase) et en prévenant la peroxydation des liposomes induite par les rayons UVC. Une autre revue de la littérature avait également décrit certains composés phénoliques, l'acide caféique, l'acide ferrulique, la p-coumarine, comme ayant des applications cosmétiques, en tant qu'antioxydants, anti-âge, photoprotecteurs. Ils absorberaient dans le domaine UVB, entre 280 et 320 nm (Morocho-Jácome et *al.* 2021).

Conclusion et Perspectives

CONCLUSION

La présente étude a mis en évidence la grande diversité des caractéristiques chimiques, physiques, biochimiques et thermiques du beurre brut de karité. Ces diversités étaient fonction des techniques d'extraction mises en œuvre, de l'origine du beurre et donc de la matière première. Le beurre de karité brut originaire du Burkina Faso pourrait donc constituer un grand intérêt pour les industries agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques du fait de ses caractéristiques physicochimiques, biochimiques et thermiques, contribuant ainsi à sa valorisation. La teneur en matières insaponifiables, critère de qualité cosmétique et pharmaceutique, était relativement élevée, de même que le profil en acides gras (stéarique et oléique) importants pour l'agroalimentaire. Une grande diversité a été constatée dans les propriétés thermiques (profil de cristallisation et de fusion et teneur en matières grasses solides). Néanmoins, des relations statistiquement significatives ont été mises en évidence entre les différents paramètres physicochimiques, thermiques et biochimiques. L'absence de procédés standardisés pour l'extraction du beurre de karité est à l'origine de la diversité des paramètres. La mise en œuvre de procédés standardisés pourrait améliorer la qualité et donc contribuer à valoriser le beurre de karité brut localement produit au Burkina Faso.

Les capacités de piégeage des radicaux libres ABTS et DPPH sur les composés polaires, dont les polyphénols, ont mis en évidence la capacité antioxydante du beurre de karité. Aussi, le potentiel photoprotecteur du beurre de karité brut et de sa fraction polaire a été évalué selon deux modèles expérimentaux, en milieu acellulaire et cellulaire sur l'oxygène singulet généré après photosensibilisation du Rose Bengal. Les beurres bruts avaient beaucoup plus d'effet *quenching* de l'oxygène singulet que leurs fractions polaires correspondantes. Parmi ces beurres, ceux extraits traditionnellement, donc originaires du Burkina Faso, avaient des effets plus importants que les formes industrielles brutes et raffinée. Selon le modèle cellulaire d'évaluation du potentiel photoprotecteur, utilisant des cellules HaCaT, les pourcentages de viabilité cellulaire les plus élevés des beurres traditionnels ne conféraient pas nécessairement la meilleure protection cellulaire contre les ROS générés par photo-irradiation.

Les résultats ont mis en évidence les effets photoprotecteurs directs et indirects du beurre de karité, y compris pour ses fractions polaires contre le modèle expérimental d'irradiation. Par conséquent, l'effet photoprotecteur rapporté du beurre de karité pourrait être attribuable à une synergie d'effets physiques et chimiques : l'hydratation de la double couche bi-lipidique et l'effet de la fraction insaponifiable.

PERSPECTIVES

Les limites énoncées dans la présente étude ont permis de dégager des perspectives, dont :

- (i) Le développement de modèle de prédiction des caractéristiques physicochimiques et thermiques du beurre brut de karité par spectroscopie proche infra-rouge (NIRS) couplée à la chimiométrie,
- (ii) L'évaluation du potentiel photoprotecteur en milieu cellulaire du beurre de karité sur modèle UVB (290 à 315 nm),
- (iii) L'investigation à grande échelle des composés organiques volatiles afin de confirmer ou infirmer la présence de contaminants potentiels dus au procédé,
- (iv) Le développement d'une méthode d'extraction, d'identification et de dosage du karitène afin de compléter l'insuffisance de littérature scientifique sur ce composé,
- (v) La restitution des résultats de la recherche aux producteurs locaux de beurre de karité ayant accepté volontairement de participer à l'étude.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- Abagale, S., Oseni, L. A., Abagale, F. K., & Oseifosu, N. (2016). Chemical Analyses of Shea Butter from Northern Ghana : Assessment of Six Industrially Useful Chemical Properties Chemical Analyses of Shea Butter from Northern Ghana : Assessment of Six Industrially Useful Chemical Properties. *Journal of Chemical Engineering and Chemistry Research*, 3(1), 953–961.
- Abdel-Razek, A. G., Abo-Elwafa, G. A., Al-Amrousi, E. F., Badr, A. N., Hassanein, M. M. M., Qian, Y., et al. (2023). Effect of Refining and Fractionation Processes on Minor Components, Fatty Acids, Antioxidant and Antimicrobial Activities of Shea Butter. *Foods*, 12(1626), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods12081626>
- Abramovic', H., Grobin, B., Ulrih, N. P., & Cigic', B. (2018). Relevance and Standardization of In Vitro Antioxidant Assays : ABTS , DPPH , and Folin – Ciocalteu. *Journal of Chemistry*, 2018, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2018/4608405>
- ACIA. (2019). Présence de furane, de 2-méthylfurane et de 3- méthylfurane dans des aliments sélectionnés – 1 avril 2018 au 31 mars 2019.
- Aculey, P. C., Lowor, S. T., Kumi, W. O., Assuah, M. . K., Aculey, Lowor, S. T., et al. (2012). The effect of traditional primary processing of the shea fruit on the kernel butter yield and quality. *American Journal of Food Technology*, 7(2), 73–81. <https://doi.org/10.3923/ajft.2012.73.81>
- Addaquay, J. (2004). The shea butter value chain: Refining in west Africa. West Africa Trade Hub Technical Report No. 3. Retrieved from www.hubrural.org/The-shea-butter-value-chain,4240.htm
- Adegoke, C. O., Laoye, O. O., Folorunso, O. A., & Ogunbanwo, S. T. (2024). Antibacterial activity of Vitellaria paradoxa seed oil extract (shear butter) and Honey against Bacterial Pathogens Causing wound infection. *Sokoto Journal of Medical Laboratory Science*, 9(3), 289–300. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.4314/sokjmls.v9i3.30>
- Adhikari, P., & Hu, P. (2012). Enzymatic and Chemical Interesterification of Rice Bran Oil, Sheaolein, and Palm Stearin and Comparative Study of Their Physicochemical Properties. *Journal of Food Science*, 77(12). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02977.x>
- Afaq, F., & K. Katiyar, S. (2012). Polyphenols: Skin Photoprotection and Inhibition of Photocarcinogenesis. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 11(14), 1200–1215. <https://doi.org/10.2174/13895575111091200>
- Agati, G., Brunetti, C., Di Ferdinando, M., Ferrini, F., Pollastri, S., & Tattini, M. (2013). Functional roles of flavonoids in photoprotection: New evidence, lessons from the past. *Plant Physiology and Biochemistry*, 72, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.03.014>
- AGRINFO. (2025). Hydrocarbures d'huiles minérales dans les aliments (No. v. 2.0). www.colead.link
- Ainsworth, E. A., & Gillespie, K. M. (2007). Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent. *Nature Protocols*, 2(4), 875–877. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102>
- Ajala, E. O., Aberuagba, F., Olaniyan, A. M., & Onifade, K. R. (2015). Enzymatic Extraction of Shea Butter: Optimization Study Using Response Surface Methodology. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), 1–7. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12329>
- Ajala, E. O., Aberuagba, F., Olaniyan, A. M., & Onifade, K. R. (2016). Optimization of solvent extraction of shea butter (Vitellaria paradoxa) using response surface methodology and its characterization. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 730–738. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2033-7>
- Ajala, Elijah Olawale, Aberuagba, F., Olaniyan, A. M., Ajala, M. A., & Okedere, O. B. (2019). Mechanical extraction of shea butter: An optimisation and characterisation study with comparison to other methods of extraction. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 41(4), 879–886. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2019.112>
- Ajila, C. M., Brar, S. K., Verma, M., Tyagi, R. D., Godbout, S., & Valéro, J. R. (2010). Extraction and Analysis of Polyphenols : Recent trends. *Critical Reviews in Biotechnology*, 1–22. <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.513677>
- Akihisa, T., Kojima, N., Katoh, N., Kikuchi, T., Fukatsu, M., Shimizu, N., & Masters, E. T. (2010). Triterpene Alcohol and Fatty Acid Composition of Shea Nuts from Seven African Countries. *Journal of oleo science*, 59(7), 351–360. <https://doi.org/10.5650/jos.60.385>
- Akihisa, T., Kojima, N., Katoh, N., Kikuchi, T., Fukatsu, M., Shimizu, N., & Masters, E. T. (2011).

- Triacylglycerol and triterpene ester composition of shea nuts from seven African countries. *Journal of Oleo Science*, 60(8), 385–391. <https://doi.org/10.5650/jos.60.385>
- Akihisa, T., Kojima, N., Kikuchi, T., Yasukawa, K., Tokuda, H., Masters, E. T., et al. (2010). Anti-inflammatory and chemopreventive effects of triterpene cinnamates and acetates from shea fat. *Journal of Oleo Science*, 59(6), 273–280. <https://doi.org/10.5650/jos.59.273>
- Akingbala, J., Falade, K., Adebese, E., Baccus-Taylor, G., & Lambert, I. (2006). Effect Of Processing Conditions On Yield, Physical And Chemical Properties Of Shea Butter. *West Indian Journal of Engineering*, 29(1), 73–80. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=27470314&site=ehost-live>
- Alain Karleskind. (1992). *Manuel des Corps Gras Volume 2*. (Lavoisier, Ed.). Paris: Technique et Documentation.
- Alander, J. (2004). Shea butter a multifunctional ingredient for food and cosmetics. *Lipid Technology*, 16(9), 202–205.
- Allal, F., Piombo, G., Kelly, B. A., Okullo, J. B. L., Thiam, M., Diallo, O. B., et al. (2013). Fatty acid and tocopherol patterns of variation within the natural range of the shea tree (*Vitellaria paradoxa*). *Agroforestry Systems*, 87(5), 1065–1082. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9621-1>
- Alvarez, A. M. R., & Rodríguez, M. L. G. (2000). Lipids in pharmaceutical and cosmetic preparations. *Grasas y aceites*, 51(1–2), 74–96.
- Ameh, A. O., Muhammad, J. A., & Audu, H. G. (2013). Synthesis and characterization of antiseptic soap from neem oil and shea butter oil. *African Journal of Biotechnology Full*, 12(29), 4656–4662. <https://doi.org/10.5897/AJB2013.12246>
- Andersson, A.-C., & Alander, J. (2015). Shea butter extract for bioactive skin care. *Cosmetics and Toiletries*, 130(6), 18–25.
- ANVISA. (2012). Aprova o Regulamento Técnico Mercosul sobre Protetores Solares em Cosméticos e dá outras providências. *Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), Diário Oficial da União*, DF. https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2012/rdc0030_01_06_2012.html
- AOCS Official methods. (2009). *Official methods and recommended practices of the AOCS 6th edn*.
- Aparicio, R., & Aparicio-Ruiz, R. (2000). Authentication of vegetable oils by chromatographic techniques. *Journal of Chromatography A*, 881(1–2), 93–104. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)00355-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00355-1)
- Ayanlowo, O., Cole-Adeife, O., Ilomuanya, M., Ebie, C., Adegbulu, A., Ezeanyache, O., et al. (2022). African oils in dermatology. *Dermatologic Therapy*, 35(e14968), 1–8. <https://doi.org/10.1111/dth.14968>
- Badini, Z., Kaboré, M., Mheen, J. Van Der, & Vellema, S. (2011). Le marché du karité et ses évolutions. Quel positionnement pour le REKAF. *VC4PD Research Paper*, 12(14), 34 p. https://www.wur.nl/upload_mm/7/2/c/b20ed990-9828-4a90-8343-d6d0330c892d_VC4PDResearchPaper_14_Burkina.pdf
- Badu, M., & Awudza, A. M. J. (2017). Determination of the triacylglycerol content for the identification and assessment of purity of shea butter fat, peanut oil, and palm kernel oil using maldi-tof/tof mass spectroscopic technique. *International Journal of Food Properties*, 20(2), 271–280. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1155056>
- Badu, M., Awudza, J., Budd, P. M., & Yeates, S. (2018). Determination of Physical Properties and Crystallization Kinetics of Oil From *Allanblackia* Seeds and Shea Nuts Under Different Thermal Conditions. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 120(3), 1–9. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700156>
- Bail, S., Krist, S., Masters, E., Unterweger, H., & Buchbauer, G. (2009). Volatile compounds of shea butter samples made under different production conditions in western, central and eastern Africa. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(7–8), 738–744. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.02.011>
- Barel, A. O., Paye, M., & Maibach, H. I. (2014). Sun protection and sunscreens. In C. Press (Ed.), *Handbook of Cosmetic Science and Technology, Fourth Edition* (4th ed., pp. 287–292). New York.
- Bariwere Samuel, C., Barine, K.-K. D., & Joy, E.-E. (2017). Physicochemical Properties and Fatty Acid Profile of Shea Butter and Fluted Pumpkin Seed Oil, a Suitable Blend in Bakery Fat Production. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 6(3), 122–128. <https://doi.org/10.11648/j.ijnfs.20170603.12>
- Baskar, A. A., Al Numair, K. S., Gabriel Paulraj, M., Alsaiif, M. A., Muamar, M. Al, & Ignacimuthu, S.

- (2012). B-Sitosterol Prevents Lipid Peroxidation and Improves Antioxidant Status and Histoarchitecture in Rats With 1,2-Dimethylhydrazine-Induced Colon Cancer. *Journal of Medicinal Food*, 15(4), 335–343. <https://doi.org/10.1089/jmf.2011.1780>
- Bauer K.H., & Umbach G. (1932). Über den Kohlenwasserstoff des unverseifbaren Anteils der Sheabutter" (Hydrocarbure de la partie insaponifiable du beurre de karité). *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, 65, 859–862.
- Belibi, S. E., Stechschulte, D., & Olson, N. (2006). The Use of Shea Butter as an Emollient for Eczema. *J Allergy Clin Immunol*, 113(2), S41. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2010.12.881>
- Boadu, K. O., Anang, M. A., & Kyei, S. K. (2017). Chemical characterization of shea butter oil soap (*Butyrospermum parkii* G. Don). *International Journal of Development and Sustainability*, 6(10), 1282–1292. www.isdsnet.com/ijds
- Braipson-Danthine, S., & Deroanne, C. (2006). Determination of solid fat content (SFC) of binary fat blends and use of these data to predict SFC of selected ternary fat blends containing low-erucic rapeseed oil. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(7), 571–581. <https://doi.org/10.1007/s11746-006-1242-7>
- Brazilian Society of Dermatology. (2014). Brazilian Consensus on Photoprotection. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, 89(6), 1–75. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/abd1806-4841.20143971>
Abstract:
- Bréhima, D., Konkobo-Yaméogo, C., Charles, P., Léguet, G., Bernard, B., Thierry, F., et al. (2007). *Rapport d'activité du projet FSP: Qualité et karité au Burkina Faso*. Burkina Faso. <https://www.semanticscholar.org/>
- Bridier, B., & Kombolo, C. (2009). Des savoir-faire locaux entre IG et standardisation des produits : exemple du beurre de karité au Burkina Faso. *Colloque Localisation et Circulation des Savoir-Faire en Afrique*, 20 p. <http://calenda.revues.org/nouvelle12170.html>
- Brissinger, D., & Deniel, J.-M. (2022). Risques Photobiologiques liés aux Équipements de Désinfection UV-C et Mesures de Prévention. *Hygiène & sécurité du travail*, 268.
- Bruneton, J. (2015). Composés phénoliques. In Lavoisier (Ed.), *Pharmacognosie: Phytochimie Plantes médicinales* (pp. 287–623). Paris.
- Buchgraber, M., Ulberth, F., & Anklam, E. (2003). Capillary GLC: a robust method to characterise the triglyceride profile of cocoa butter – results of an intercomparison study. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 105(1), 754–760. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200300873>
- Bup, D. N., Kapseu, C., Matos, L., Mabiala, B., & Mouloungui, Z. (2011). Influence of physical pretreatments of sheanuts (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) on butter quality. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(9), 1152–1160. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100005>
- Burnett, C. L., Bergfeld, W. F., Belsito, D. V., Hill, R. A., Klaassen, C. D., Liebler, D. C., et al. (2024). Safety Assessment of *Butyrospermum parkii* (Shea)-Derived Ingredients as Used in Cosmetics. *International Journal of Toxicology*, 43(1_suppl), 82S–95S. <https://doi.org/10.1177/10915818231224230>
- Cavinato, M., Waltenberger, B., Baraldo, G., Grade, C. V. C., Stuppner, H., & Jansen-Dürr, P. (2017). Plant extracts and natural compounds used against UVB-induced photoaging. *Biogerontology*, 18(4), 499–516. <https://doi.org/10.1007/s10522-017-9715-7>
- Chawla, K. K., Bencharitiwong, R., Ayuso, R., Grishina, G., & Nowak-Wgrzyn, A. (2011). Shea butter contains no IgE-binding soluble proteins. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 127(3), 680–682. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2010.10.022>
- Chemonics International Inc. (2006). *Etude sur la collecte et la transformation du karité en Guinée*.
- Chéneveau, C. (1917). Contribution à l'étude de la relation entre les propriétés réfractives des corps gras et leur constitution chimique. *J. Phys. Theor. Appl.*, 7(1), 53–68. <https://doi.org/10.1051/jphysap:01917007005300>
- Chrysafidis, D., Maggos, P., Kiosseoglou, V., & Boskou, D. (1992). Composition of total and esterified 4 α -monomethylsterols and triterpene alcohols in virgin olive oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 58(4), 581–583. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740580419>
- Chukwu, O., & Adgidzi, P. P. (2008). Evaluation of some physico-chemical properties of Shea-butter (*Butyrospermum paradoxum*) related to its value for food and industrial utilisation. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 1(3), 320–326. <https://doi.org/10.1504/IJPTI.2008.021466>
- Codex Alimentarius. (2017). Regional standard for unrefined shea butter, CXS 325R-2017; *Adopted in 2017*. *Codex Alimentarius* (7th ed.). International food standards.

- COI/T.20/Doc. No30/Rev.2. (2017). Method of analysis determination of the composition and content of sterols and Triterpene dialcohols by Capillary column gas chromatography; 2013 Nov. 13. *International Olive Council*. Madrid - Espana. <http://www.internationaloliveoil.org/>
- Conseil Oléicole International. (2018). *Norme commerciale applicable aux huiles d'olive et aux huiles de grignons d'olive*. Madrid. <http://www.internationaloliveoil.org/>
- Couillaud, J., Leydet, L., Duquesne, K., & Iacazio, G. (2021). The Terpene Mini-Path, a New Promising Alternative for Terpenoids Bio-Production. *genes*, 12(1974), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/genes12121974>
- Coulibaly, S., Ban Koffi, L., & Mosso, K. (1994). Les méthodes traditionnelle et améliorée de fabrication du beurre de karité dans le nord de la Côte d'Ivoire. Résultats d'une étude comparative. *Tropicultura*.
- Coulibaly, Y., Ouédraogo, S., & Niculescu, N. (2009). Experimental study of shea butter extraction efficiency using a centrifugal process. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(6), 14–19.
- Crosera, M., Prodi, A., Mauro, M., Pelin, M., Florio, C., Bellomo, F., et al. (2015). Titanium dioxide nanoparticle penetration into the skin and effects on HaCaT cells. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 9282–9297. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809282>
- Cui, X., Ma, Y., Wang, H., Huang, J., Li, L., Tang, J., & Cheng, B. (2021). The Anti-photoaging Effects of Pre- and Post-treatment of Platelet-rich Plasma on UVB-damaged HaCaT Keratinocytes. *Photochemistry and Photobiology*, 97(3), 589–599. <https://doi.org/10.1111/php.13354>
- Cuvelier, C., Cabaraux, J. F., Dufrasne, I., Hornick, J. L., & Istasse, L. (2004). Acides gras: Nomenclature et sources alimentaires. *Annales de Médecine Vétérinaire*, 148(3), 133–140.
- Dandjoma, A., Adjia, H., Kameni, A., & Tchiégang, C. (2009). Procédés traditionnels de production et circuit de commercialisation du beurre de karité au Nord-Cameroun. *Tropicultura*, 27(1), 3–7.
- Davrieux, F., Allal, F., Piombo, G., Kelly, B., Okulo, J. B., Thiam, M., et al. (2010). Near infrared spectroscopy for high-throughput characterization of shea tree (*Vitellaria paradoxa*) nut fat profiles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(13), 7811–7819. <https://doi.org/10.1021/jf100409v>
- Deby-Dupont, G., Deby, C., Mouithys-Mickalad, A., Hoebeke, M., Mathy-Hartert, M., Jadoul, L., et al. (1998). The antibiotic ceftazidime is a singlet oxygen quencher as demonstrated by ultra-weak chemiluminescence and by inhibition of AAP consumption. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, 1379(1), 61–68. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(97\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(97)00083-4)
- Degotte, G., Frederich, M., Francotte, P., Franck, T., Colson, T., Serteyn, D., & Mouithys-Mickalad, A. (2023). Targeting Myeloperoxidase Activity and Neutrophil ROS Production to Modulate Redox Process: Effect of Ellagic Acid and Analogues. *Molecules*, 28(11). <https://doi.org/10.3390/molecules28114516>
- Deruaz, C. A., Lapointe, A., Bart, P., Leimgruber, A., & Spertini, F. (2004). Latex : de l'allergie professionnelle au syndrome latex-fruit. *Médecine&Hygiène*, 62(2471), 421–425. www.medhyg.ch
- Desai, F., Ramanathan, M., Fink, C. S., Wilding, G. E., Weinstock-Guttman, B., & Awad, A. B. (2009). Comparison of the immunomodulatory effects of the plant sterol β -sitosterol to simvastatin in peripheral blood cells from multiple sclerosis patients. *International Immunopharmacology*, 9(1), 153–157. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2008.10.019>
- Diarrassouba, N., Sangare, A., & N'Guessan, K. A. (2002). Le karité au nord de la Côte d'Ivoire: utilisations possibles, processus de transformation et analyse de la filière de commercialisation. in *Atelier international sur le traitement, la valorisation et le commerce du karité en Afrique ; Centre de Suivi Ecologique Dakar (Sénégal)*.
- Dini, I., & Laneri, S. (2021). The new challenge of green cosmetics: Natural food ingredients for cosmetic formulations. *Molecules*, 26(13), 1–28. <https://doi.org/10.3390/molecules26133921>
- Dionisi, F., Prodoillet, J., & Tagliaferri, E. (1995). Assessment of Olive Oil Adulteration by Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography / Amperometric Detection of Tocopherols and Tocotrienols. *JAOC*, 72(12), 1505–1511.
- Donglikar, M. M., & Deore, S. L. (2016). Sunscreens: A review. *Pharmacognosy Journal*, 8(3), 171–179. <https://doi.org/10.5530/pj.2016.3.1>
- Dubois, V., Breton, S., Linder, M., Fanni, J., & Parmentier, M. (2008). Proposition de classement des sources végétales d'acides gras en fonction de leur profil nutritionnel. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 15(1), 56–75. <https://doi.org/10.1684/ocl.2008.0163>
- Dudonné, S., Vitrac, X., Coutière, P., Woillez, M., & Mérillon, J. M. (2009). Comparative study of antioxidant properties and total phenolic content of 30 plant extracts of industrial interest using

- DPPH, ABTS, FRAP, SOD, and ORAC assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(5), 1768–1774. <https://doi.org/10.1021/jf803011r>
- Elsewedy, H. S., Shehata, T. M., & Soliman, W. E. (2022). Shea Butter Potentiates the Anti-Bacterial Activity of Fusidic Acid Incorporated into Solid Lipid Nanoparticle. *Polymers*, 14(2436), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym14122436>
- Etsè, K. S., Etsè, K. D., Nyssen, P., & Mouithys-Mickalad, A. (2021). Assessment of anti-inflammatory-like, antioxidant activities and molecular docking of three alkynyl-substituted 3-ylidene-dihydrobenzo[d]isothiazole 1,1-dioxide derivatives. *Chemico-Biological Interactions*, 344(May), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2021.109513>
- Ezema, D. O., & Ogujiofor, K. O. (1992). The Evaluation of Butyrospermum paradoxum as a Suppository Base. *Int. J. Pharmacog.*, 30(4), 275–280. <https://doi.org/https://doi.org/10.3109/13880209209054012>
- Fonseca, A., & Rafaela, N. (2016). Determination Of Sun Protection Factor By Uv-Vis Spectrophotometry. *Health Care : Current Reviews*, 4(2), 1–4. <https://doi.org/10.4172/hccr.1000108>
- Fontanel, D. (2013). *Unsaponifiable Matter in Plant Seed Oils*. (Springer, Ed.). New York: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35710-7>
- François, M. (2018). Beurre de karité: Développement d'innovations techniques, économiques, organisationnelles, dans la filière karité. *GRET*, 12.
- François, M., Niculescu, N., Badini, Z., & Diarra, M. (2009). Le beurre de karité au Burkina Faso : Entre marché domestique et filières d'exportation. *Cahiers Agricultures*, 18(4), 369–375. <https://doi.org/10.1684/agr.2009.0315>
- Franke, S., Fröhlich, K., Werner, S., Böhm, V., & Schöne, F. (2010). Analysis of carotenoids and vitamin E in selected oilseeds, press cakes and oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(10), 1122–1129. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900251>
- Gao, H., Gao, W., Yang, X., Liu, Y., & Wang, Z. (2022). Effects of different tempering temperatures on the properties of industrial sheet margarine. *RSC Advances*, 12(36), 23311–23321. <https://doi.org/10.1039/d2ra03999k>
- Gezahegn, Y. A., Emire, S. A., & Asfaw, S. F. (2016). Optimization of Shea (Vitellaria paradoxa) butter quality using screw expeller extraction. *Food Science and Nutrition*, 4(6), 840–847. <https://doi.org/10.1002/fsn3.351>
- Ghazi, S. (2022). Do the polyphenolic compounds from natural products can protect the skin from ultraviolet rays? *Results in Chemistry*, 4(July), 100428. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100428>
- Gilaberte, Y., & González, S. (2010). Update on photoprotection. *Actas Dermo-Sifiliograficas*, 101(8), 659–672. [https://doi.org/10.1016/S1578-2190\(10\)70696-X](https://doi.org/10.1016/S1578-2190(10)70696-X)
- Goreja W.G. (2004). *Shea Butter: The Nourishing Properties of Africa's Best-Kept Natural Beauty Secret* (Amazing He.). New York, NY.
- Goumbri, B. W. F., da Silva, T. L. T., Marini, R. D., Semdé, R., Somé, T. I., & Danthine, S. (2021). African Shea Butter Properties Related to Common Extraction Technologies: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 15(2), 231–248. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02708-w>
- Goumbri, B. W. F., Jansen, O., Marini, R., Frederich, M., Semdé, R., Somé, T. I., et al. (2025). Effects of Crude Shea Butters and Their Polar Extracts on Singlet Oxygen Quenching and Against Rose Bengal - Induced HaCaT Cell Phototoxicity. *Molecules*, 30(6), 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules30061360>
- Goumbri, B. W. F., Kouassi, A. K., Djang'eing'a, R. M., Semdé, R., Mouithys-Mickalad, A., Sakira, A. K., et al. (2024). Quality Characteristics and Thermal Behavior Diversity of Traditional Crude Shea (Vitellaria paradoxa Gaertn) Butter from Burkina Faso. *Food Biophysics*. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09865-3>
- Gouyahali, S., Georges, Y. S., & Abdoulaye, K. (2012). Besoins et pratiques du dosage de l'eau du procédé d'extraction du beurre de karité par barattage. *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo)*, 14(1), 45–52.
- Guichard, J.-M., Laur, J. M., Castera, A., Mordret, F., & Pages-Xatart-Pares, X. (1997). Matières Insaponifiables d'origine Végétale et Compositions Cosmétiques les Contenant. EP 0690 904 B1.
- Gupta, R., Sharma, A. K., Dobhal, M. P., Sharma, M. C., & Gupta, R. S. (2011). Antidiabetic and antioxidant potential of β -sitosterol in streptozotocin-induced experimental hyperglycemia. *Journal of Diabetes*, 3(1), 29–37. <https://doi.org/10.1111/j.1753-0407.2010.00107.x>
- Heilbron I. M., Moffet, G. L., & Spring, F. S. (1934). The Non-saponifiable Matter of Shea Nut Pat. Part

- I. *Journal of the Chemical Society*, 1583–1585. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/JR9340001583>
- Hirayama, O., Nakamura, K., Hamada, S., & Kobayasi, Y. (1994). Singlet oxygen quenching ability of naturally occurring carotenoids. *Lipids*, 29(2), 149–150. <https://doi.org/10.1007/BF02537155>
- Honfo, F., Akissoe, N., Linnemann, A. R., Soumanou, M., & Van Boekel, M. A. J. S. (2014). Nutritional Composition of Shea Products and Chemical Properties of Shea Butter: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(5), 673–686. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.604142>
- Honfo, F. G., Hell, K., Akissoé, N., Coulibaly, O., Fandohan, P., & Hounhouigan, J. (2011). Effect of storage conditions on microbiological and physicochemical quality of shea butter. *Journal of Food Science and Technology*, 48(3), 274–279. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0150-x>
- Honfo, F., Hell, K., Akissoé, N., Linnemann, A., & Coulibaly, O. (2012). Microbiological and physicochemical characterization of shea butter sold on Benin markets. *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, 3(3), 24–29. <https://doi.org/10.5897/jsppr11.045>
- Honfo, F., Linnemann, A. R., Guo, M., Akissoe, N., Soumanou, M. M., & Van Boekel, M. A. J. S. (2017). Influence of roasting of shea kernels on their fat content and some quality characteristics of shea butter. *Journal of Food Studies*, 6(1), 66. <https://doi.org/10.5296/jfs.v6i1.10881>
- Honfo, Linnemann, R., Akissoe, N., Soumanou, M., & Van Boekel, M. (2013). Characteristics of traditionally processed shea kernels and butter. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(8), 1714–1721. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12142>
- Ibanga, O., A., R., A., & A., L. (2015). Effect of Frying , Toasting , Boiling and Parboiling of Sheanuts on Percentage Yield , Sensory Attributes , Some Physical and Chemical Properties of Shea Butter. *Elixir Food Science*, 81, 31532–31539. www.elixirpublishers.com
- Im, A. R., Kim, Y. M., Chin, Y. W., & Chae, S. (2017). Protective effects of compounds from *Garcinia mangostana* L. (mangosteen) against UVB damage in HaCaT cells and hairless mice. *International Journal of Molecular Medicine*, 40(6), 1941–1949. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2017.3188>
- Iso, N. (2005). Systèmes de management de la sécurité des denrées alimentaires: Exigences pour tout organisme appartenant à la chaîne alimentaire (Vol. 22000).
- Iso, N. (2006). Animal and vegetable fats and oils - Determination of tocopherol and tocotrienol contents by high-performance liquid chromatography. *ISO 9936*.
- Israel, M. O. (2014). Effects of Topical and Dietary Use of Shea Butter on Animals. *American Journal of Life Sciences*, 2(5), 303. <https://doi.org/10.11648/j.ajls.20140205.18>
- Israel, M. O. (2015). Shea Butter: An Opposite Replacement for Trans Fat in Margarine. *Nutrition & Food Sciences*, 511:001(1), 1–5. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000S11001>
- IUPAC. (1987). Standard Methods for the Analysis of Oils, Fats and Derivatives. (Blackwell Scientific Publications, Ed.) (7th ed.). London.
- IUPAC 2.201. (1992). Determination of the acid value (A.V.) and the acidity. In *IUPAC Standard Methods for the Analysis of Oils, Fats and Derivatives* (7th Revise., p. 2.201/1). Berlin, Boston: Prepared by C. Paquot and A. Hautfenne, Blackwell Scientific Publications, Oxford 2.201/1.
- Ixtaina, V. Y., Martínez, M. L., Spotorno, V., Mateo, C. M., Maestri, D. M., Diehl, B. W. K., et al. (2011). Characterization of chia seed oils obtained by pressing and solvent extraction. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(2), 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.08.006>
- Jansen, R., Osterwalder, U., Wang, S. Q., Burnett, M., & Lim, H. W. (2013). Photoprotection: Part II. Sunscreen: Development, efficacy, and controversies. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 69(6), 867.e1-867.e14. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2013.08.022>
- Jatto, W. O., Yuanfa, L., Shan, L., Wang, X., & Aworh, O. C. (2010a). Liquid-gas chromatographic analysis of fatty acid content of south-western Nigerian shea butter (*Vitellaria paradoxa*). *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 9(2), 358–363.
- Jatto, W. O., Yuanfa, L., Shan, L., Wang, X., & Aworh, O. C. (2010b). Liquid-Gas Chromatographic Analysis of Fatty Acid Content of South-Western Nigerian Shea Butter (*Vitellaria paradoxa*). *Electronic Journal of Environmental, Agricultural & Food Chemistry*, 9(2), 358–363.
- JBL, O., F, O., JG, A., PC, V., A, N., JBA, O., & Nyanzi, S. (2010). Physico-Chemical Characteristics of Shea Butter (*Vitellaria Paradoxa* C.F. Gaertn.) Oil from the Shea Districts of Uganda. *AJFAND*, 10(1), 2070–2084.
- José, M. T. de A. F., Pedrita, A. S., Emanuella, C. V. P., Raimundo, G. de O. J., Fabrício, S. S., Jackson, R. G. da S. A., et al. (2016). Flavonoids as photoprotective agents: A systematic review. *Journal of Medicinal Plants Research*, 10(47), 848–864. <https://doi.org/10.5897/jmpr2016.6273>

- Kapseu, C., Jiokap, N., Parmentier, M., Dirand, M., & Dellacherie, J. (2001). Fatty acids and triglycerides of Cameroon shea butter. *Rivista Italiana delle Sostanze Grasse*, 78(1), 31–34.
- Kapseu, César. (2009). Production, analyse et applications des huiles végétales en Afrique. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 16(4), 215–229. <https://doi.org/10.1051/ocl.2009.0280>
- Karambiri, M., Elias, M., Vinceti, B., & Grosse, A. (2017). Exploring local knowledge and preferences for shea (*Vitellaria paradoxa*) ethnovarieties in Southwest Burkina Faso through a gender and ethnic lens. *Forests Trees and Livelihoods*, 26(1), 13–28. <https://doi.org/10.1080/14728028.2016.1236708>
- Karoui, I. J., Ayari, J., Ghazouani, N., & Abderrabba, M. (2020). Physicochemical and biochemical characterizations of some Tunisian seed oils. *OCL - Oilseeds and fats, Crops and Lipids*, 27(29), 1–9. <https://doi.org/10.1051/ocl/2019035>
- Kaufman, M., & Wiesman, Z. (2007). Pomegranate oil analysis with emphasis on MALDI-TOF/MS triacylglycerol fingerprinting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(25), 10405–10413. <https://doi.org/10.1021/jf072741q>
- Kerrihard, A. L., & Pegg, R. B. (2015). Utilizing the bioactive contents of specialty oils and fats. In Geoff Talbot (Ed.), *Specialty Oils and Fats in Food and Nutrition: Properties, Processing and Applications* (Woodhead P., pp. 318–348). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-376-8.00013-2>
- Kevin W Smith. (2001). Cocoa Butter and Cocoa Butter Equivalents. In F. D. Gunstone (Ed.), *Structured Lipids and New Lipids* (pp. 401–422). Marcel Dekker.
- Khalil, C., & Shebaby, W. (2017). UVB damage onset and progression 24 h post exposure in human-derived skin cells. *Toxicology Reports*, 4(July), 441–449. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.07.008>
- Komlaga, G. A., Oduro, I., & Essel, E. M. (2019). Utilization of selected tropical crops (cocoa, kola nuts, sorghum, millet, and shea butter). In and F. T. Benjamin K. Simpson, Alberta N. A. Aryee (Ed.), *Byproducts from Agriculture and Fisheries: Adding Value for Food, Feed, Pharma and Fuels* (pp. 563–580). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119383956.ch24>
- Konaka, R., Kasahara, E., Dunlap, W. C., Yamamoto, Y., Chien, K. C., & Inoue, M. (1999). Irradiation of titanium dioxide generates both singlet oxygen and superoxide anion. *Free Radical Biology and Medicine*, 27(3–4), 294–300. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(99\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(99)00050-7)
- Kouassi, A. K., Alabi, T., N'guessan, E. A., Purcaro, G., Moret, S., Cissé, M., et al. (2024). Comparative study of thermal behavior of mango kernel fat from seven Ivorian varieties related to their chemical composition. *European Food Research and Technology*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04538-4>
- Kouglblénou, N., Ahouansou, R. H., Aïssi, M. V., Houssou, P. A., Padonou, W., Fandohan, P., & Mensah, G. A. 19 et Soumanou, M. M. (2012). Caractérisation physique du fruit et valeur nutritionnelle de la pulpe de karité (*Vitellaria paradoxa*) collecté dans différents parcs au Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, 42–49. <http://www.slire.net>
- Krist, S., Bail, S., Unterweger, H., Ngassoum, M. B., Mohagir, A. M., & Buchbauer, G. (2006). Volatile compounds of original African black and white shea butter from Tchad and Cameroon. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 108(7), 583–588. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200500340>
- Lacour, J. P., & Béani, J. C. (2007). Photoprotection naturelle, photoprotection externe (topique et vestimentaire). *Annales de Dermatologie et de Vénéréologie*, 134(5 C2), 18–24. [https://doi.org/10.1016/S0151-9638\(07\)89241-6](https://doi.org/10.1016/S0151-9638(07)89241-6)
- Lautenschlager, S., Wulf, H. C., & Pittelkow, M. R. (2007). Photoprotection. *Lancet*, 370(9586), 528–537. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)60638-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)60638-2)
- Lebert, O. (2005). *Le karité et le henné : deux matières premières africaines à fort pouvoir culturel local utilisées dans les cosmétiques*. Université de Nantes.
- Lerma-García, M. J., Lusardi, R., Chiavaro, E., Cerretani, L., Bendini, A., Ramis-Ramos, G., & Simó-Alfonso, E. F. (2011). Use of triacylglycerol profiles established by high performance liquid chromatography with ultraviolet-visible detection to predict the botanical origin of vegetable oils. *Journal of Chromatography A*, 1218(42), 7521–7527. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.07.078>
- Li, J., Ho, C. T., Li, H., Tao, H., & Liu, L. (2000). Separation of sterols and triterpene alcohols from unsaponifiable fractions of three plant seed oils. *Journal of Food Lipids*, 7(1), 11–20. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.2000.tb00156.x>
- Lim, D., Bae, S., & Oh, T. (2021). Anti-inflammatory Effect of Shea Butter Extracts in Canine Keratinocytes. *J Vet Clin*, 38(1), 27–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.17555/jvc.2021.02.38.1.27> Anti-inflammatory

- Lin, T. K., Zhong, L., & Santiago, J. L. (2018). Anti-inflammatory and skin barrier repair effects of topical application of some plant oils. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijms19010070>
- Lipp, M., & Anklam, E. (1998a). Review of cocoa butter and alternative fats for use in chocolate - Part B. Analytical approaches for identification and determination. *Food Chemistry*, 62(1), 99–108. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(97\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(97)00161-1)
- Lipp, M., & Anklam, E. (1998b). Review of cocoa butter and alternative fats for use in chocolate - Part A. Compositional data. *Food Chemistry*, 62(1), 73–97. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(97\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(97)00160-X)
- Lovett, P. (2004). The shea butter value chain: Production, transformation and marketing in west Africa. *USAID*. Washington, DC, USA. Retrieved from www.hubrural.org/The-shea-butter-value-chain,4240.htm
- Lovett, P. (2010). Sourcing Shea Butter in 2010 : A Sustainability Check. In *Ingredients of natural origin with certificate* (pp. 62–68). West Africa Trade Hub. www.watradehub.com
- Lovett, P., Miller, E., Mensah, P., Adams, V., & Kannenberg, C. (2006). *Guide à l'exportation du beurre de karité*. West Africa Trade Hub. www.watradehub.com
- Lovett, P. N. (2015). Shea butter: Properties and processing for use in food. In Geoff Talbot (Ed.), *Specialty Oils and Fats in Food and Nutrition: Properties, Processing and Applications* (Woodhead P., pp. 126–158). Elsevier Ltd. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-376-8.00005-3>
- Lovett, P., & Phillips, L. D. (2018). Agroforestry Shea Parklands of Sub-Saharan Africa : Threats and Solutions. *International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank*, 1–54. www.worldbank.org
- Maranz, S., & Wiesman, Z. (2004). Influence of Climate on the Tocopherol Content of Shea Butter. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(10), 2934–2937. <https://doi.org/10.1021/jf035194r>
- Maranz, S., Wiesman, Z., Bisgaard, J., & Bianchi, G. (2004). Germplasm resources of *Vitellaria paradoxa* based on variations in fat composition across the species distribution range. *Agroforestry Systems*, 60(1), 71–76. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000009406.19593.90>
- Maranz, S., Wiesman, Z., & Garti, N. (2003). Phenolic constituents of shea (*Vitellaria paradoxa*) kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(21), 6268–6273. <https://doi.org/10.1021/jf034687t>
- Masters, E. T., Yidana, J. A., & Lovett, P. N. (2004). Rendre la gestion plus rationnelle grâce au commerce : les produits du karité en Afrique. *Revue internationale des forêts et des industries forestières*, 55(4), 1–10. www.fao.org/3/y5918f/y5918f11.htm
- Mbaiguinam, M., Mbayhoudel, K., & Djekota, C. (2007). Physical and Chemical Characteristics of Fruits, Pulps, Kernels and Butter of Shea *Butyrospermum parkii* (Sapotaceae) from Mandoul, Southern Chad. *Asian Journal of Biochemistry*, 2(2), 101–110. <https://doi.org/10.3923/ajb.2007.101.110>
- McKim, J. M., Keller, D. J., & Gorski, J. R. (2012). An in vitro method for detecting chemical sensitization using human reconstructed skin models and its applicability to cosmetic, pharmaceutical, and medical device safety testing. *Cutaneous and Ocular Toxicology*, 31(4), 292–305. <https://doi.org/10.3109/15569527.2012.667031>
- Megnanou, R.-M., & Dioph, K. J. (2008). Caractérisation Sensorielle, Physico-chimique et Microbiologique du Beurre de Karité, *Vitellaria paradoxa* des marchés de Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 20(2), 221–231.
- Megnanou, R. M., & Niamke, S. (2015). Improving the optimized shea butter quality: a great potential of utilization for common consumers and industrials. *SpringerPlus*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1454-0>
- Megnanou, R. M., Niamke, S., & Diopoh, J. (2007). Physicochemical and microbiological characteristics of optimized and traditional shea butters from Côte d'Ivoire. *African Journal of Biochemistry Research*, 1(4), 41–47. <http://www.academicjournals.org/AJBR>
- Megnanou, Rose-Monde, & Niamke, S. (2013). Effect of Nut Treatments on Shea Butter Physicochemical Criteria and Wrapper Hygienic Quality Influence on Microbiological Properties. *Journal of Food Research*, 2(5), 66. <https://doi.org/10.5539/jfr.v2n5p66>
- Megnanou, Rose-Monde, Zoue, L. T., & Niamke, S. (2014). Marketed and Original Shea Butters of Côte d'Ivoire: Physicochemical and Biochemical Characterization and Evaluation of the Potential Utilizations. *Sustainable Agriculture Research*, 3(1), 50. <https://doi.org/10.5539/sar.v3n1p50>
- Mensink, R. P. (2005). Effects of stearic acid on plasma lipid and lipoproteins in humans. *Lipids*, 40(12), 1201–1205. <https://doi.org/10.1007/s11745-005-1486-x>

- Mensink, R. P., Zock, P. L., Kester, A. D. M., & Katan, M. B. (2003). Effects of dietary fatty acids and carbohydrates on the ratio of serum total to HDL cholesterol and on serum lipids and apolipoproteins: A meta-analysis of 60 controlled trials. *American Journal of Clinical Nutrition*, 77(5), 1146–1155. <https://doi.org/10.1093/ajcn/77.5.1146>
- Moharram, H., Ray, J., Ozbas, S., Juliani, H., & Simon, J. (2006). Shea Butter : Chemistry , Quality , and New Market Potentials Shea Butter : Chemistry , Quality , and New Market Potentials. In *Challenges in Chemistry and Biology*. Washington, DC: ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC. <https://doi.org/10.1021/bk-2006-0925.ch025>
- Moloney, F. J., Collins, S., & Murphy, G. M. (2002). Sunscreens: Safety, efficacy and appropriate use. *American Journal of Clinical Dermatology*, 3(3), 185–191. <https://doi.org/10.2165/00128071-200203030-00005>
- Morin, O., & Pagès-Xatart-Parès, X. (2012). Huiles et corps gras végétaux : Ressources fonctionnelles et intérêt nutritionnel. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 19(2), 63–75. <https://doi.org/10.1684/ocl.2012.0446>
- Morocho-Jácome, A. L., Freire, T. B., de Oliveira, A. C., de Almeida, T. S., Rosado, C., Velasco, M. V. R., & Baby, A. R. (2021). In vivo SPF from multifunctional sunscreen systems developed with natural compounds—A review. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 20(3), 729–737. <https://doi.org/10.1111/jocd.13609>
- Mortzfeld, F. B., Hashem, C., Vranková, K., Winkler, M., & Rudroff, F. (2020). Pyrazines: Synthesis and Industrial Application of these Valuable Flavor and Fragrance Compounds. *Biotechnology Journal*, 15(11), 1–7. <https://doi.org/10.1002/biot.202000064>
- Mosquera, M. E. G., Jiménez, G., Tabernero, V., Vinueza-Vaca, J., García-Estrada, C., Kosalková, K., et al. (2021). Terpenes and Terpenoids: Building Blocks to Produce Biopolymers. *Sustainable Chemistry*, 2(3), 467–492. <https://doi.org/10.3390/suschem2030026>
- Nagaoka, S., Futamura, Y., Miwa, K., Awano, T., Yamauchi, K., Kanamaru, Y., et al. (2001). Identification of novel hypocholesterolemic peptides derived from bovine milk β -lactoglobulin. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 281(1), 11–17. <https://doi.org/10.1006/bbrc.2001.4298>
- Nahm, H. S. (2011). Quality characteristics of West African Shea Butter (*Vitellaria paradoxa*) and Approaches to Extend Shelf-life. *Graduate School-New Brunswick Rutgers: New Brunswick, NJ, USA*. Graduate School-New Brunswick Rutgers,. Retrieved from https://www.cipd.co.uk/Images/human-capital-theory-assessing-the-evidence_tcm18-22292.pdf <http://asianvu.com/bk/framework/wp-content/uploads/2013/08/Factors-Limiting-Effective-Implementation-of-Training-Programmes-in-Parastatal-Organizations-in-Tanzania>
- Nahm, H. S., Juliani, H. R., & Simon, J. E. (2013). Quality characteristics of shea butter, *Vitellaria paradoxa*. In *African Natural Plant Products Volume II: Discoveries and Challenges in Chemistry, Health, and Nutrition* (ACS Sympos., pp. 167–184). Washington, DC: American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2013-1127.ch012>
- Nde Bup, D., Abi, C. F., Tenin, D., Kapseu, C., & Tchiegang, C. (2012). Optimisation of the cooking process of sheanut kernels (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) using the Doehlert Experimental Design. *Food and Bioprocess Technology*, 5(1), 108–117. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0274-z>
- Nde Bup, D., Boldor, D., Astete, C., Muley, P., & Xu, Z. (2016). Oil extraction from sheanut (*Vitellaria paradoxa* Gaertn C.F.) kernels assisted by microwaves. *Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 1424–1434. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2160-1>
- Neff, W. E., Adlof, R. O., List, G. R., & El-Agaimy, M. (2006). Analyses of Vegetable Oil Triacylglycerols by Silver Ion High Performance Liquid Chromatography with Flame Ionization Detection. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, 3919(17:18), 3951–3968. <https://doi.org/10.1080/10826079408016165>
- Nichols, J. A., & Katiyar, S. K. (2011). Skin photoprotection by natural polyphenols: Anti-inflammatory, anti-oxidant and DNA repair mechanisms. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 11(14), 1200–15. <https://doi.org/10.1007/s00403-009-1001-3>
- Nicolas, J.-P. (2018). Manuel-Plantes-Medicinales-soin-famille-Burkina-Faso. Association Jardins du Monde. www.jardinsdumonde.org
- Nisbet, S. J. (2018). Skin acceptability of a cosmetic moisturizer formulation in female subjects with sensitive skin. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, 11, 213–217.

<https://doi.org/10.2147/CCID.S157297>

- Njoku, O. U., Eneh, F. U., Ononogbu, I. C., & Michael, U. A. (2000). Compositional and toxicological studies on shea butter compositional and toxicological studies on shea Butter. *Journal of Nutraceuticals, Functional and Medical Foods*, 3, 33–39. <https://doi.org/10.1300/J133v02n03>
- Nkouam, G. B. (2007). 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. Université de Ngaoundéré. Retrieved from http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2007_NKOUAM_G_B.pdf
- Nkouam, G. B., Kapseu, C., Barth, D., Dirand, M., & Tchatchueng, J. B. (2007). Oil Extraction from Sheanut Kernel (*Vitellaria paradoxa* Gaertn) and *Canarium schweinfurthii* Engl.) Using Supercritical Co₂ and Hexane: A Comparative Study. *Research Journal of Applied Sciences*. <http://docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/rjasci/2007/646-652.pdf>
- Nunes, A. R., Vieira, Í. G. P., Queiroz, D. B., Leal, A. L. A. B., Maia Morais, S., Muniz, D. F., et al. (2018). Use of Flavonoids and Cinnamates, the Main Photoprotectors with Natural Origin. *Advances in Pharmacological Sciences*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5341487>
- Nurah, O. T., & Julius, I. U. (2018). Optimization of aqueous extraction conditions of unrefined shea butter using response surface methodology. *American Journal of Food and Nutrition*, 6(4), 108–114. <https://doi.org/10.12691/ajfn-6-4-3>
- Obibuzor, U. (2013). Effect of processing germinated shea kernels on the quality parameters of shea (*Vitellaria paradoxa*) butter. *Journal of Cereals and Oilseeds*, 4(2), 26–31. <https://doi.org/10.5897/jco12.017>
- Official Journal of the European Union. (2006). *Commission Recommendation of 22 September 2006 on the efficacy of sunscreen products and the claims made relating thereto*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006H0647&from=EN>
- Okullo, J., Omujal, F., Agea, J., Vuzi, P., Namutebi, A., Okello, J., & Nyanzi, S. (2010). Physico-chemical characteristics of shea butter (*Vitellaria Paradoxa* C.F. Gaertn.) oil from the shea districts of Uganda. *AJFAND*, 10(1), 76–99. <https://doi.org/10.1558/jsrnc.v4i1.24>
- Ollivier, V., Ollivier, D., & Artaud, J. (2015a). Analyse des lipides - Extraction. Paramètres physico-chimiques. Constituants majeurs. *Techniques de l'ingénieur*, P 3 325v2, 28. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-agroalimentaire-tiaf0/archive-2/analyse-des-lipides-p3325/>
- Omar M Almrhag, & Abookleesh, F. L. (2016). Evaluation of Oxidative Stability of Vegetable Oils during Deep Frying. *The Arab Journal of Sciences & Research Publishing*, 2(2), 90–97. <https://doi.org/10.26389/ajsrp.o15216>
- Oussou, K. F., Guclu, G., Sevindik, O., Starowicz, M., Kelebek, H., & Selli, S. (2022). Comparative Elucidation of Aroma , Key Odorants , and Fatty Acid Profiles of Ivorian Shea Butter Prepared by Three Different Extraction Methods. *Separations*, 9(245), 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/separations9090245>
- Oyedele, A. O., Igbeneghu, O. A., Alade, T. I., & Akinmusire, O. O. (2020). Moderate heat treatments enhance the quality of traded natural shea butter. *Ife Journal of Science*, 22(1), 17–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.4314/ij.s.v22i1.3>
- Padda, M. S., & Picha, D. H. (2007). Antioxidant activity and phenolic composition in “beauregard” sweetpotato are affected by root size and leaf age. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132(4), 447–451. <https://doi.org/10.21273/jashs.132.4.447>
- Padera, F. (2011). Sunscreen Testing According to COLIPA 2011/ FDA Final Rule 2011 Using UV/Vis LAMBDA Spectrophotometers. *PerkinElmer, Inc.*, 1–9.
- Pages, X. (2009). Production, obtention et valorisation des beurres exotiques. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 16(4), 248–253. <https://doi.org/10.1051/ocl.2009.0282>
- Pagliarini, E., Vernile, M., & Peri, C. (1990). Kinetic Study on Color Changes in Milk Due to Heat. *Journal of Food Science*, 55(6), 1766–1767. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb03625.x>
- Palm, M. D., & O'Donoghue, M. N. (2007). Update on photoprotection. *Dermatologic Therapy*, 20(5), 360–376. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8019.2007.00150.x>
- Paquot, C., S, A., & M, Q. (1952). Etudes sur l'insaponifiable du beurre de karité. *Revue générale des corps gras et dérivés*, 7(7), 397–402.
- Parkouda, C. (2015). *Technologie de production du beurre de karité*. Centre National de Recherche Scientifique et

- Technologique*. Ouagadougou, Burkina Faso.
<https://www.researchgate.net/publication/322745948%0ATechnologie>
- Parlement Européen. (2000). Directive 2000/36/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 juin 2000 relative aux produits de cacao et de chocolat à l'alimentation humaine, 8(2), 128.
- Peers, K. E. (1977). The non-glyceride saponifiables of shea butter. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 28(11), 1000–1009. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740281109>
- Petrovic', M., Kezic, N., & Bolanca, V. (2010). Optimization of the GC method for routine analysis of the fatty acid profile in several food samples. *Food Chemistry*, 122, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.018>
- Pharmacopée Européenne 9.0. (2016a). Composition en acides gras par chromatographie en phase gazeuse (No. 2.4.22.).
- Pharmacopée Européenne 9.0. (2016b). Identification des huiles grasses par chromatographie sur couche mince (No. 2.3.2.).
- Pharmacopée Européenne 9.0. (2016c). Stéroïls dans les huiles grasses (No. 2.2.23.).
- Plattner, R. D. (1981). High Performance Liquid Chromatography of Triglycerides: Controlling Selectivity with Reverse Phase Columns. *JAOCs*, (8), 638–642.
- Pompeu, D. R., Larondelle, Y., Rogez, H., Abbas, O., Pierna, J. A. F., & Baeten, V. (2018). Characterization and discrimination of phenolic compounds using Fourier transform Raman spectroscopy and chemometric tools. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 22(1), 13–28. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.16270>
- Pradain J. (1949). Les constituants du beurre de karité. *Annales de la nutrition et de l'alimentation*, 3(3), 459–461.
- Prieto, J. M., Recio, M. C., & Giner, R. M. (2006). Anti-inflammatory activity of beta-sitosterol in a model of oxazolone- induced contact delayed type hypersensitivity. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 5(3), 57)62.
- Qu, D. U., Pr, M., Qu, D. U., En, T., Industriel, N. I. E., Chantalbernatchez, P. A. R., et al. (2007). Université du québec mémoire présenté.
- Quainoo, A. K., & Dugbatey, J. G. (2016). Effect of age of the shea tree (*Vitellaria paradoxa*) on the flow of shea latex. *UDS International Journal of Development*, 3(1), 10–12.
- Rancurel, A. (2004). Huiles, corps gras et produits cosmétiques. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 11(6), 398–400. <https://doi.org/10.1051/ocl.2004.0398>
- Ray, J., Smith, K. W., Bhaggan, K., Nagy, Z. K., & Stapley, A. G. F. (2013). Crystallization and polymorphic behavior of shea stearin and the effect of removal of polar components. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 115, 1094–1106. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201200434>
- Rezanka, T., & Rezankova, H. (1999). Characterization of fatty acids and triacylglycerols in vegetable oils by gas chromatography and statistical analysis. *Analytica Chimica Acta*, 398(1), 253–261.
- Rodríguez-Estrada, M. T., Frega, N., & Lercker, G. (2002). Applications on thermostable polar capillary GC columns. *Grasas y Aceites*, 53(1), 76–83. <https://doi.org/10.3989/gya.2002.v53.i1.291>
- Rodriguez-Negrette, A. C., Huck-Iriart, C., & Herrera, M. L. (2019). Physical Chemical Properties of Shea/Cocoa Butter Blends and their Potential for Chocolate Manufacture. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 96(3), 239–248. <https://doi.org/10.1002/aocs.12189>
- Rogers, S., & Jr, A. O. (2009). Shea Butter Alkoxylates. United States of America: 11/347,272. <http://www.freepatentsonline.com/7544824.pdf>
- Rombaut, R., De Clercq, N., Foubert, I., & Dewettinck, K. (2009). Triacylglycerol analysis of fats and oils by evaporative light scattering detection. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 86(1), 19–25. <https://doi.org/10.1007/s11746-008-1316-9>
- Rumpf, J., Burger, R., & Schulze, M. (2023). Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins. *International Journal of Biological Macromolecules*, 233(January). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123470>
- Saewan, N., & Jimtaisong, A. (2015). Natural products as photoprotection. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 14(1), 47–63. <https://doi.org/10.1111/jocd.12123>
- Saloufou, K. I., Boyode, P. B., Simalou, O., Eloh, K., Melila, M., Kpegba, K., et al. (2018). Identification de deux phytostéroïls biologiquement actifs de l'extrait cyclohexanique des feuilles de *Ficus sur* (Moraceae). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5), 2510. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.44>
- Sandwidi, A., Diallo, B. O., Lamien, N., Vinceti, B., Sanon, K., Coulibaly, P., et al. (2018). Participatory

- identification and characterisation of shea butter tree (*Vitellaria paradoxa* C . F . Gaertn .) ethnovarieties in Burkina Faso. *Fruits, International journal of tropical and subtropical horticulture*, 73(3), 141–152. <https://doi.org/https://doi.org/10.17660/th2018/73.3.1>
- Sarruf, F. D., Cândido, T. M., de Oliveira, C. A., Bou-Chacra, N. A., Robles Velasco, M. V., & Baby, A. R. (2020). Influence of Shea (*Butyrospermum parkii*) butter, TiO₂ and ethylhexyl methoxycinnamate on physical parameters and in vitro photoprotective efficacy. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 19(8), 2076–2085. <https://doi.org/10.1111/jocd.13238>
- Saussey, M. (2011). Le barattage des savoirs. Circulations des ressources et apprentissages des artisanes burkinabè dans un contexte de mondialisation. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 5(3), 551–572. <https://doi.org/10.3917/rac.014.0551>
- Sayre, R. M., Agin, P. P., LeVee, G. J., & Marlowe, E. (1979). A Comparison of in Vivo and in Vitro Testing of Sunscreening Formulas. *Photochemistry and Photobiology*, 29(3), 559–566. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1979.tb07090.x>
- Sebaugh, J. L. (2011). Guidelines for accurate EC₅₀/IC₅₀ estimation. *Pharmaceutical Statistics*, 10(2), 128–134. <https://doi.org/10.1002/pst.426>
- Segman, O., Wiesman, Z., & Yarmolinsky, L. (2012). Methods and Technologies Related to Shea Butter Chemophysical Properties and to the Delivery of Bioactives in Chocolate and Related Products. In *Cocoa Butter and Related Compounds* (pp. 417–441). AOCS Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-9830791-2-5.50020-7>
- Semdé, R., Bandré, E., & Traoré, S. (2019). Emulsion du beurre de karité dans du miel, sans additifs, pour le traitement des plaies et brûlures. Burkina Faso. <http://www.oapi.int>
- Seweh, E. A., Xiaobo, Z., Tao, F., Jiachen, S., Tahir, H. E., & Arslan, M. (2019). Multivariate analysis of three chemometric algorithms on rapid prediction of some important quality parameters of crude shea butter using Fourier transform-near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 27(3), 220–231. <https://doi.org/10.1177/0967033519830061>
- Seweh, E., Asagadunga, P., Apuri, S., & Owusu, G. (2016). Effects of Extraction Method and Geographical Location on the Physico-chemical Properties of Shea (*Vitellaria paradoxa*) Butter. *Asian Research Journal of Agriculture*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.9734/arja/2016/27513>
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2020). Quality Assurance of Fats and Oils. In F. Shahidi. (Ed.), *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (p. 17). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/047167849X.bio072.pub2>
- Sloffer, E. M., Gaur, S., Engeseth, N. J., & Andrade, J. E. (2017). Development and Physico-Chemical Characterization of a Shea Butter-Containing Lipid Nutrition Supplement for Sub-Saharan Africa Elizabeth. *Foods*, 6(97), 1–11. <https://doi.org/10.3390/foods6110097>
- Stübiger, G., Werther, W., & Krist, S. (2015). Characterization of Shea Butter Using a Combination of MALDI-TOF-MS, SPME-GC-MS and Multivariate Data Analysis. *Current Bioactive Compounds*, 11(1), 3–12. <https://doi.org/10.2174/157340721101150804130232>
- Symoniuk, E., Wroniak, M., Napiórkowska, K., Brzezińska, R., & Ratusz, K. (2022). Oxidative Stability and Antioxidant Activity of Selected Cold-Pressed Oils and Oils Mixtures. *Foods*, 11(1597), 1–8. <https://doi.org/10.3390/foods11111597>
- Talbot, G. (2015). Specialty oils and fats in confectionery. In Geoff Talbot (Ed.), *Specialty Oils and Fats in Food and Nutrition Properties, Processing and Applications* (Woodhead P., pp. 221–239). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-376-8.00009-0>
- Talbot, Geoff, Smith, K. W., Bhaggan, K., Ray, J., Nagy, Z., & Stapley, A. (2014). Physical characterisation of silica-treated shea stearin. *Lipid Technology*, 26(4), 83–86. <https://doi.org/10.1002/lite.201400020>
- Tame, V. T., Hassan, I., & Gungula, D. T. (2015). Influence of Heating Time of Shea Nuts (*vitellariaparadoxa*) on Some Chemical Properties of Shea Butter. *World Journal of Engineering and Technology*, 03(03), 13–18. <https://doi.org/10.4236/wjet.2015.33b003>
- Tano-Debrah Kwaku, & Ohta, Y. (1994). Enzyme-assisted aqueous extraction of fat from kernels of the shea tree, *Butyrospermum parkii*. *J Am Oil Chem Soc*, 71(9), 979–983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02542265>
- Tchobo, P., Natta, Æ. A. K., Barea, Æ. B., Barouh, Æ. N., & Sohounhloue, D. C. K. (2007). Characterization of Pentadesma butyracea sabine Butters of Different Production Regions in Benin, 755–760. <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1102-0>
- Teles Dos Santos, M., Gerbaud, V., & Le Roux, G. A. C. (2014). Solid Fat Content of vegetable oils and

- simulation of interesterification reaction: Predictions from thermodynamic approach. *Journal of Food Engineering*, 126(April), 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.012>
- Tella, A. (1979). Preliminary studies on nasal decongestant activity from the seed of the shea butter tree, *Butyrospermum parkii*. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 7(5), 495–497. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2125.1979.tb00992.x>
- Thioune, O., Koueime Fall, A. B., Dieng, S., & Diop, M. (2019). Focus On the Use of Shea Butter as Excipient For Ointment. *American Journal of PharmTech Research*, 9(6), 254–266. <https://doi.org/10.46624/ajptr.2019.v9.i6.022>
- Tholstrup, T., Marckmann, P., Jespersen, J., & Sandström, B. (1994). Fat high in stearic acid favorably affects blood lipids and factor VII coagulant activity in comparison with fats high in palmitic acid or high in myristic and lauric acids. *American Journal of Clinical Nutrition*, 59(2), 371–377. <https://doi.org/10.1093/ajcn/59.2.371>
- Thomas, A., Matthäus, B., & Fiebig, H.-J. (2015). *Fats and Fatty Oils*. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. https://doi.org/10.1002/14356007.a10_173.pub2
- Toivo, J., Piironen, V., P, K., & Varo, P. (1998). Gas Chromatographic Determination of Major Sterols in Edible Oils and Fats Using Solid-Phase Extraction in Sample Preparation. *Chromatographia*, 48(11/12), 745–750.
- Tom-Dery, D., Eller, F., Reisdorff, C., & Jensen, K. (2018). Shea (*Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn.) at the crossroads: current knowledge and research gaps. *Agroforestry Systems*, 92(5), 1353–1371. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0080-y>
- Total Improvement. (2010). Le guide pratique de la production du beurre de karité, manuel de l'apprenant. *Swisscontact/Helvetas Bénin*, 1–68. https://www.doc-developpement-durable.org/file/Huiles-vegetales-noix/Fiches_plantes/karite/guide_pratique_de_la_production_du_beurre_de_karite.pdf
- Ugese, F. D., Baiyeri, P. K., & Mbah, B. N. (2010). Fatty acid profile of shea tree (*vitellaria paradoxa* c. f. gaertn.) seeds from the savanna of nigeria. *Forests Trees and Livelihoods*, 19(4), 393–398. <https://doi.org/10.1080/14728028.2010.9752680>
- Ugwu-dike, P., & Nambudiri, V. E. (2021). A review of ethnomedicinal uses of shea butter for dermatoses in Sub-Saharan Africa. *Dermatologic Therapy*, e14786., 1–11. <https://doi.org/10.1111/dth.14786>
- Verma, N., Chakrabarti, R., Das, R. H., & Gautam, H. K. (2012). Anti-inflammatory effects of shea butter through inhibition of iNOS, COX-2, and cytokines via the Nf-Kb pathway in Lps-activated J774 macrophage cells. *Journal of Complementary and Integrative Medicine*, 9(1). <https://doi.org/10.1515/1553-3840.1574>
- Villaseñor, I. M., Angelada, J., Canlas, A. P., & Echegoyen, D. (2002). Bioactivity studies on β -sitosterol and its glucoside. *Phytotherapy Research*, 16(5), 417–421. <https://doi.org/10.1002/ptr.910>
- Vincenzo, Daria Di, Maranz, S., Serraiocco, A., Vito, R., Wiesman, Z., & Bianchi, G. (2005). Regional variation in shea butter lipid and triterpene composition in four African countries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(19), 7473–7479. <https://doi.org/10.1021/jf0509759>
- Vrbková, B., Roblová, V., Yeung, E. S., & Preisler, J. (2014). Determination of sterols using liquid chromatography with off-line surface-assisted laser desorption / ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1358(1), 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.06.077>
- Warra, A. A. (2011). Cosmetics Potentials Of African Shea Nut (*Vitellaria paradoxa*) Butter. *Knowledgea review, Malaysia*, 3(2), 80–86. <https://doi.org/10.3923/crc.2011.8.86>
- Weidner, M. S. (2008). Novel Composition Containing Extracts of *Butyrospermum Parkii* and the Use of Such a Composition for Preparing a Medicament or a Dietary Supplement for the Treatment or Prevention of Inflammation Hypersensitivity or Pain. United States of America.
- Womeni, H. M., Tchagna, D. ., Ndjouenke, R., Kapseu, C., Mbiapo, F. T., Linder, M., et al. (1997). Influence des traitements traditionnels des graines et amandes de karité sur la qualité du beurre. *FoodAfrica*, 1–8.
- Womeni, Hilaire Macaire, Ndjouenkeu, R., Kapseu, C., Mbiapo, F. T., Linder, M., & Fanni, J. (2007). Application du procédé séchage-friture aux amandes de karité: Influence sur la composition en matières insaponifiables du beurre. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 14(6), 366–370. <https://doi.org/10.1051/ocl.2007.0143>
- Womeni, Hilaire Macaire, Ndjouenkeu, R., Kapseu, C., Mbiapo, F. T., Parmentier, M., & Fanni, J. (2007). Séchage des amandes de karité et qualité du beurre: impact du séchage traditionnel au soleil. *Tropicultura*, 25(4), 240–247.

- Womeni, Hilaire Macaire, Ndjouenkeu, R., Kapseu, C., & Parmentier, M. (2004). Application du procédé séchage-friture aux amandes de karité: Cinétique de séchage. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 11(6), 457–463. <https://doi.org/10.1051/ocl.2004.0457>
- Womeni, Hilaire Macaire, Ndjouenkeu, R., Kapseu, C., Parmentier, M., & Fanni, J. (2006). Application du procédé séchage-friture aux amandes de karité : Influence sur les indices chimiques de qualité et les propriétés de fusion du beurre. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 13(4), 297–302.
- Wright, C., Iyer, A. K. V., Wang, L., Wu, N., Yakisich, J. S., Rojanasakul, Y., & Azad, N. (2017). Effects of titanium dioxide nanoparticles on human keratinocytes. *Drug and Chemical Toxicology*, 40(1), 90–100. <https://doi.org/10.1080/01480545.2016.1185111>
- Xiao, F., Xu, T., Lu, B., & Liu, R. (2020). Guidelines for antioxidant assays for food components. *Food Frontiers*, 1(1), 60–69. <https://doi.org/10.1002/fft2.10>
- Xue, C., Wu, J., Lan, F., Liu, W., Yang, X., Zeng, F., & Xu, H. (2010). Nano titanium dioxide induces the generation of ROS and potential damage in HaCaT cells under UVA irradiation. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10(12), 8500–8507. <https://doi.org/10.1166/jnn.2010.2682>
- Yao, S., Alphonse, A. K., Marie, K. N. T., Pkagni, B. A., Brehima, K., & Nafan, D. (2019). Réussir le « greffage en fente simple » et le « greffage de côté dans l' aubier » du karité (No. 137). *Journal of Applied Biosciences*. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.4314/jab.v137i1.4>
- Yé, S., Lebeau, F., Wathélet, J. P., Leemans, V., & Destain, M. F. (2007). Étude des paramètres opératoires de pressage mécanique des amandes de *Vitellaria paradoxa* Gaertn C.F. (karité). *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 11(4), 79–87.
- Yi, L. Z., He, J., Liang, Y. Z., Yuan, D. L., & Chau, F. T. (2006). Plasma fatty acid metabolic profiling and biomarkers of type 2 diabetes mellitus based on GC/MS and PLS-LDA. *FEBS Letters*, 580(30), 6837–6845. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2006.11.043>
- Yonas, G. A., Shimelis, E. A., & Sisay, A. F. (2016). Effect of processing factors on Shea (*Vitellaria paradoxa*) butter extraction. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.036>
- Zhang, Hong, Zhou, Y., & Xu, X. (2026). Shea Butter: A Comprehensive Review of Its Compositions, Processing, Applications, and Challenges. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1–24. <https://doi.org/10.1002/aocs.70065>
- Zhang, Honggen, Wang, Z., & Liu, O. (2015). Development and validation of a GC – FID method for quantitative analysis of oleic acid and related fatty acids. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 5(4), 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.01.005>
- Zhang, Hua, Yang, Y. fei, & Zhou, Z. qin. (2018). Phenolic and flavonoid contents of mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) fruit tissues and their antioxidant capacity as evaluated by DPPH and ABTS methods. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 256–263. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61664-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61664-2)
- Zhang, J., Kurita, M., Shinozaki, T., Ukiya, M., Yasukawa, K., Shimizu, N., et al. (2014). Triterpene glycosides and other polar constituents of shea (*Vitellaria paradoxa*) kernels and their bioactivities. *Phytochemistry*, 108, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.09.017>
- Zhang, Z., Ma, X., Huang, H., & Wang, Y. (2017). Shea olein based specialty fats: Preparation, characterization and potential application. *LWT - Food Science and Technology*, 86, 492–500. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.035>
- Zhao, C., Cao, H., & Xiao, J. (2020). Pyrazines in Food. In Springer Nature Singapore Pte Ltd. (Ed.), *Handbook of Dietary Phytochemicals* (pp. 1–25). Singapoure. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-13-1745-3_44-1
- Zhuang, Y., Dong, J., He, X., Wang, J., Li, C., Dong, L., & Wang, S. (2022). Impact of Heating Temperature and Fatty Acid Type on the Formation of Lipid Oxidation Products During Thermal Processing. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.913297>

Annexes

Annexe 1 : Aperçu sur les méthodes analytiques de dosage applicables aux corps gras

Le tableau 49 ci-dessous énumère quelques techniques analytiques mises en œuvre dans l'identification, la caractérisation et le dosage des différentes fractions de matière grasse dans les lipides et notamment dans le beurre de karité.

Tableau 49: Techniques analytiques mises en œuvre dans l'analyse des corps gras

Techniques analytiques de caractérisation des acides gras		Références
Chromatographie gazeuse (GC) après méthylation (acides gras méthyl esters - AGME)	GC-FID sur colonne capillaire	(Aparicio et Aparicio-Ruiz 2000) (Tchobo et <i>al.</i> 2007) (Jatto et <i>al.</i> 2010) (Rodríguez-Estrada et <i>al.</i> 2002) (Petrovic' et <i>al.</i> 2010) (Zhang et <i>al.</i> 2015)
GC après méthylation suivi de l'identification par GC-MS	GC-FID sur colonne capillaire, Identification par spectrométrie de masse	(Vincenzo et <i>al.</i> 2005) (Kaufman et Wiesman 2007) (Megnanou et <i>al.</i> 2014) (Badu et <i>al.</i> 2018)
GC après méthylation	GC sur colonne remplie (packed column) ; Détecteur à conductivité thermique (thermal conductivity detector) ou FID	(AOCS Official methods 2009) – (AOCS Ce 1-62)
GC sur colonne en silice fondue en verre ou en quartz	GC-FID sur colonne en silice fondue en verre ou en quartz	(Pharmacop 2016)
Techniques analytiques de caractérisation des triglycérides		References
CLHP ; GC	CLHP en phase inverse ; GC-FID après méthylation, sur colonne capillaire	(Neff et <i>al.</i> 2006)
GC	GC-FID sur colonne capillaire	(Buchgraber et <i>al.</i> 2003) (Rezanka et Rezankova 1999)
	GChaute résolution (High-resolution gas chromatography (HRGC)) après méthylation, sur colonne capillaire, détecteur FID	(Vincenzo et <i>al.</i> 2005)
Chromatographie liquide haute performance (CLHP)	CLHP en phase inverse sur détecteur à indice de réfraction (RI - Differential refractometer) sur colonne C18	(Plattner 1981)
	CLHP en phase inverse sur détecteur RI ou sur détecteur UV ; colonne en acier inoxydable	(AOCS Official methods 2009) – (AOCS Ce 5b-89)
	CLHP sur détecteur évaporatif à diffusion de la lumière (ELSD - Evaporative light scattering detector) sur colonnes C18	(Tchobo et <i>al.</i> 2007)
	CLHP sur détecteur ELSD ; colonne ODS C8	(Akihisa et <i>al.</i> 2011)

	CLHP sur détecteur ELSD ; colonne C18	(Rombaut et al. 2009)
	CLHP sur détecteur UV ; colonne C18	(Segman et al. 2012)
	CLHP sur barrette de diode (PDA) ; colonne C18	(Lerma-García et al. 2011)
Autre technique	Spectrométrie de masse à temps de vol avec désorption/ionisation laser assistée par matrice Matrix Assisted Laser Desorption Ionization - Time of Flight/MS (MALDI TOF/MS)	(Kaufman et Wiesman 2007) (Badu et Awudza 2017)
Techniques analytiques de caractérisation des stérols		References
Chromatographie sur couche mince (CCM) préparative	Séparation par CCM sur gel de silice imprégné de nitrate d'argent ; puis analyse par GC- FID sur colonne en verre	(Li et al. 2000)
CLHP en phase inverse avec spectrométrie de masse à désorption/ionisation laser assistée par surface (Reversed phase liquid chromatography with off-line surface-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry (RPLC–SALDI MS))	CLHP détecteur PDA sur colonne C18 ; SALDI MS: Autoflex Speed MALDI TOF/TOF	(Vrbková et al. 2014)
GC/MS	GC-FID sur colonne capillaire	(Toivo et al. 1998)
GC après saponification puis séparation par CCM	GC-FID sur colonne en silice fondue	(Pharmacop et al. n.d.) (Pharmacopée Européenne 9.0 2016)
	GC-FID sur colonne capillaire	(Rodríguez-Estrada et al. 2002)
Techniques analytiques de caractérisation des polyphénols		References
CLHP	CLHP sur détecteur ampérométrique, colonne ODS	(Dionisi et al. 1995)
	CLHP sur détecteur spectro- fluorimétrique, colonne hypersil en silice	(Iso 2005)
	CLHP sur colonne remplie recouverte de microparticules en silice ; détecteur en fluorescence/ou UV	(AOCS Official methods 2009) – (AOCS Ce 8-89)
	Chromatographie liquide couplée à un détecteur de masse (LC/MS) sur colonne C18	(Maranz et al. 2003)
	Détecteur : liquid-nitrogen cooled germanium	(Pompeu et al. 2018)
Spectroscopie Raman à transformée de Fourier (FT-Raman)		
Dosage spectrophotométrique	Par oxydation avec le réactif de Folin-Ciocalteu	(Iso 2006)
High pressure liquid chromatography-Electrospray ionization mass spectrometry (HPLC-DAD–ESI-MS) ;	Analyse des acides phénoliques après extraction sur phase solide	(Ajila et al. 2010)

Techniques analytiques des alcools triterpéniques et aliphatiques		References
GC	Séparation par CCM sur gel de silice ; Analyse par GC sur colonne remplie, puis sur colonne capillaire	(Chrysafidis et <i>al.</i> 1992)
HRGC	GC-FID sur colonne capillaire en silice fondue	(Vincenzo et <i>al.</i> 2005)
CLHP	CLHP après séparation par CCM sur gel de silice ; détecteur ELSD, colonne ODS C8 Détecteur RI	(Akihisa et <i>al.</i> 2011)
CCM, puis CLHP, suivie d'une LC/MS TOF system	CCM sur gel de silice, CLHP en phase inverse, colonne ODS	
Techniques analytiques de caractérisation du profil du beurre		References
Détermination de l'effet sur le beurre de karité selon le type d'extraction : traditionnelle et extraction par solvant	Analyse par Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dans le domaine de 4000 - 400 cm ⁻¹	(Ajala et <i>al.</i> 2016)

Notes :

1. Caractérisation des acides gras

La GC-FID sur colonne capillaire après méthylation en AGME est la technique analytique majoritairement admise.

2. Caractérisation des triglycérides

Cette analyse fait intervenir majoritairement la RP-HPLC sur colonne C18 comme technique analytique. Il existe cependant une grande variété de détecteurs tels la RI, ELSD, PDA dû certainement aux AG composant les TAG par la variabilité : de la longueur de la chaîne carbonée, du nombre d'atomes de carbones équivalents, et du degré d'insaturation. L'analyse par GC-FID sur colonne capillaire est une des nombreuses techniques existantes.

3. Caractérisation des stérols

La détermination qualitative et quantitative des composés stéroliques fait intervenir notamment la GC-FID sur colonne capillaire après fractionnement par CCM. La spectrométrie de masse est parfois utilisée comme détecteur. Une méthode alternative est la LC/MS en phase réverse, sur détecteur PDA avec une colonne C18.

4. Analyse des composés phénoliques

Parmi les composés phénoliques, les tocophérols se trouvent être majoritaires. Son analyse fait intervenir surtout la CLHP sur colonne hypersil ODS C18, ou amino ; et divers détecteurs tels que l'UV, l'ampérométrie, la spectrofluorimétrie, et la fluorescence. Ceci pourrait être dû au nombre et à la localisation de groupes méthyle en position 5 et 7 sur les atomes de carbone. La LC/MS, la GC ainsi que la FT-Raman constituent des méthodes alternatives.

Plusieurs techniques analytiques mises en œuvre dans l'identification, la caractérisation et le dosage des différentes fractions de matière grasse et notamment du BK ont été reprises dans le tableau 49 ci-dessus. Il ressort cependant que :

Pour la caractérisation des AG, la GC-FID sur colonne capillaire après méthylation en AGME est la technique analytique majoritairement admise. La caractérisation des TAG quant à elle, fait intervenir majoritairement la RP-CLHP sur colonne C18 avec un réfractomètre différentiel comme détecteur. L'AOCs Ce 5b-89 préconise trois types de détecteurs pour l'identification

des TAG : RI, UV et MS. La détermination qualitative et quantitative des composés stéroliques fait intervenir notamment la GC-FID sur colonne capillaire après fractionnement par CCM. La spectrométrie de masse est parfois utilisée comme détecteur. Une méthode alternative est la LC/MS en phase inverse, sur détecteur PDA avec une colonne C18. L'analyse des tocophérols fait intervenir surtout la CLHP sur colonne hypersil ODS C18, ou amino ; et divers détecteurs tels que l'UV, l'ampérométrie, la spectrofluorimétrie, et la fluorescence. Ceci pourrait être dû au nombre et à la localisation de groupes méthyle en position 5 et 7 sur les atomes de carbone. La LC/MS, la GC ainsi que la FT-Raman constituent des méthodes alternatives.

Annexe 2 : Grille de collecte de données

I. INFORMATIONS GÉNÉRALES

- I.1. Responsable de production : Homme ☐ Femme ☐
- I.2. Regroupement associatif : Oui ☐ Non ☐
Si Non, précisez :
Si Oui, quelle association :
- I.3. Niveau de formation et de compétences du personnel :
- Le personnel est-il formé aux activités de production : Oui ☐ Non ☐
Si Oui, par qui ? :
Type de formation reçue :
La formation est-elle continue ? Oui ☐ Non ☐
- Taille du personnel :

II. SITES/LOCALITÉS DE COLLECTE DES NOIX DE KARITÉ

- II.1. Dans quelles localités collectez-vous les noix de karité :
- II.2. Quelles sont les périodes de récolte dans l'année :
- II.3. Quelle est la durée de conservation des noix de karité avant production du beurre :
- II.4. Quelles sont les conditions de conservation des noix :
- II.5. Utilisez-vous des engrais et/ou pesticides dans les sites de collecte ? * : Oui ☐ Non ☐
Si Oui, quels types de pesticides/engrais et/ou engrais utilisez-vous :
- II.6. Existe-t-il des champs de production de coton autour et/ou dans les sites de collecte des noix de karité ? * : Oui ☐ Non ☐
Si Oui, quels types de pesticides/engrais utilisent les coton-culteurs dans leurs champs * : ..
- II.7. Existe-t-il d'autres types de production agricoles/céréalières autour et/ou dans les sites de collecte, dont il fait usage d'engrais/pesticides * : Oui ☐ Non ☐
Si Oui, quels types de pesticides/engrais sont utilisés :

III. TRAITEMENT DES NOIX DE KARITÉ

- III.1. Sélectionnez-vous les noix de karité destinées à la production : Oui ☐ Non ☐
Si Oui, sur quels critères faites-vous la sélection :
- III.2. Traitez-vous les amandes de karité destinées à la production : Oui ☐ Non ☐
Si Oui, quel type de traitement faites-vous :
Dans quel but :

IV. PRODUCTION DU BEURRE DE KARITÉ

- IV.1. Décrivez-nous votre technique de production de beurre de karité :
- IV.2. Utilisez-vous au cours de la production, d'autres substances chimiques ou végétales :
Oui ☐ Non ☐
Si Oui, lesquels :
Dans quel but :
- IV.3. Utilisez-vous des techniques de purification du beurre produit : Oui ☐ Non ☐
Si Oui, quelle technique (description du procédé) :
- IV.4. Quelles sont vos conditions de conservation du beurre produit :

Emballage primaire :
Emballage secondaire :
Température de conservation :
Site d'entreposage :
Etiquetage :
Durée de conservation :
IV.5. Quel est le temps mis entre la collecte des noix de karité et la production du beurre :..
IV.6. Si vous sous-traitez l'achat des amandes, dans quelles conditions sont-elles transportées jusqu'au site de production :

V. UTILISATION DU BEURRE DE KARITÉ

V.1. Quelles sont les principales utilisations du beurre produit :
V.2. Quels sont les différents conditionnements disponibles avec leurs prix respectifs :

N.B : Échantillonnage d'au moins 1 kg de production du même lot de production

*: Questions facultatives

MERCI POUR VOTRE COLLABORATION

Annexe 3 : Modes opératoires normalisés

1. Monographies retranscrites du dosage des indices chimiques

○ *Détermination de la teneur en matières insaponifiables (AOCS Ca 6a-40)*

(i) Une prise d'essai de $5 \text{ g} \pm 0,1 \text{ mg}$ a été homogénéisée dans un erlenmeyer jaugé, à laquelle on ajoute 30 mL d'éthanol 95 % et 5 mL de solution d'hydroxyde de potassium (KOH) 50 %. Le mélange est porté à ébullition douce à reflux (au condenseur), en mélangeant de temps en temps, pendant 60 min ou jusqu'à complète saponification. Compléter la saponification si nécessaire. Aucune perte d'alcool ne devrait survenir pendant la saponification.

(ii) Le mélange est transféré à chaud dans le cylindre d'extraction, en lavant avec 40 mL d'éthanol 95 %. Pour terminer le transfert, ajouter de l'eau distillée tiède puis froide jusqu'à obtenir un volume total de 80 mL. Le flacon est ensuite lavé avec un petit volume (5 mL) d'éther de pétrole et rajouté dans l'ampoule. Le contenu de l'ampoule est refroidi à température ambiante (20 - 25 °C) auquel on ajoute ensuite 50 mL d'éther de pétrole.

(iii) Boucher ensuite l'ampoule et la secouer vigoureusement pendant au moins 1 min et la laisser reposer jusqu'à ce que les deux couches se séparent clairement. Transférer la couche d'éther diéthylique dans une ampoule à décanter de 250 mL.

(iv) Les fractions d'éther de pétrole sont combinées dans une ampoule à décanter de 500 mL. Répéter l'extraction six fois, en utilisant 50 mL d'une partie d'éther de pétrole à chaque fois tout en secouant vigoureusement.

(v) Laver le dispositif d'extraction 3 fois dans l'ampoule à décanter en utilisant 25 mL d'une portion d'éthanol 10 % distillée, agiter vigoureusement tout en retirant la phase alcoolique aqueuse après chaque extraction. Continuer le lavage avec l'éthanol 10 % jusqu'à ce que la solution ne donne plus de couleur rose après l'addition d'une goutte de solution de phénolphthaléine.

(vi) Transférer l'extrait d'éther de pétrole dans un bécher taré et évaporer à sec au bain-marie en utilisant un léger courant d'azote propre et sec. Une fois que tout le solvant s'est évaporé, terminer le séchage à poids constant dans une étuve à vide à 75 - 80 °C et à une pression interne ne dépassant pas 200 mm de mercure. Refroidissez dans un dessiccateur et pesez (résultat «A»).

(vii) Après la pesée, absorber le résidu dans 50 ml d'éthanol à 95% chaud (50 °C) contenant de la phénolphthaléine, préalablement neutralisé. Titrer avec 0,02 M d'hydroxyde de sodium (NaOH) à la même coloration finale. Corrigez le poids de la perte en fonction de la teneur en

acides gras, en utilisant la relation suivante : 1 mL de 0,02 M de NaOH est équivalent à 0,0056 g d'acide oléique.

Le poids en g de l'AG déterminé par titrage est nommé « B ». Un titrage à blanc est déterminé (résultat « C »).

Expression des résultats :

$$\text{Teneur en matières insaponifiables \% (m/m)} = \frac{A-(B+C)}{\text{Prise d'essai (g)}} \times 100$$

Avec A = masse du résidu sec (g) ; B = masse de l'acide gras (g) ; C = masse du blanc (g)

○ Détermination de l'indice de saponification (AOCS Cd 3-25)

(i) Une prise d'essai comprise entre 1,0 et 2,2 g (à peser environ 1 g) est faite à partir de l'échantillon fondu, à laquelle on ajoute 25 mL de KOH alcoolique avec une pipette.

(ii) Faire bouillir doucement le mélange au condenseur jusqu'à ce que la prise d'essai soit complètement saponifiée. Généralement, cela requiert au moins 30 min pour les portions normales de prise d'essai. Cependant, pour les cas difficiles à saponifier, cela peut prendre 1-6 h pour le reflux. La clarté et l'homogénéité de la solution de l'échantillon sont des indicateurs partiels d'une complète saponification, mais pas nécessairement des critères absolus. On s'assure que l'anneau de vapeur dans le condenseur ne remonte pas pour éviter les pertes.

(iii) Une fois que le ballon et le condenseur ont refroidi un peu, mais pas suffisamment pour former un gel, l'intérieur du condenseur est nettoyé avec une petite quantité d'eau distillée. Au condenseur débranché, on ajoute environ 1 mL d'indicateur de phénolphthaléine puis la solution titrez avec l'acide chlorhydrique (HCl) 0,5 M jusqu'à ce que la couleur rose disparaisse ». Un titrage à blanc est déterminé.

Expression des résultats :

$$\text{Indice de saponification (mg KOH/g beurre)} = \frac{(B-S) \times (M)}{W} \times 56,1$$

Avec : B = volume en mL de HCl 0,5 M nécessaire pour le titrage à blanc ; S = volume en mL de HCl 0,5 M nécessaire pour titrer l'échantillon test ; M = molarité de la solution de HCl ; W = masse de la prise d'essai en g.

○ Détermination de l'indice de peroxyde (AOCS Cd 3-25)

(i) Une prise d'essai comprise entre 2,0 et 1,2 g (à peser environ 1,6 g) est dissoute dans un erlenmeyer de 250 mL muni d'un bouchon en verre, à laquelle on ajoute 50 mL d'une solution acide acétique + isooctane (3 : 2 v/v). Le mélange est ensuite agité afin de dissoudre la prise

d'essai. Ajouter avec une pipette de précision 0,5 mL d'une solution saturée d'iodure de potassium R préparation extemporanée (KI).

(ii) Laisser la solution reposer pendant exactement 1 min, en l'agitant au moins trois fois au cours de la minute, puis ajouter immédiatement 30 mL d'eau distillée.

Titre avec 0,1 M de thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) jusqu'à ce que la couleur jaune de l'iode soit presque disparue. Ajouter 0,5 mL de sodium dodecyl sulfate (SDS) 10%, et ajouter 0,5 mL d'indicateur amidon. Continuer le titrage avec une agitation constante, particulièrement près du point final, pour libérer tout l'iode de la couche de solvant. Ajouter la solution de thiosulfate goutte à goutte jusqu'à ce que la couleur bleue disparaisse.

Conduire un essai à blanc. L'essai à blanc ne doit pas excéder 0,1 mL de la solution de thiosulfate de sodium 0,1 M.

Expression des résultats :

$$\text{Indice de peroxyde (milliequivalents peroxyde/1000 g prise d'essai)} = \frac{(S-B) \times M \times 1000}{\text{Prise d'essai (g)}}$$

Avec S = volume du titrant, mL de la prise d'essai ; B = volume du titrant (mL du blanc) ; M = molarité de la solution de thiosulfate de sodium.

○ Détermination de l'indice d'iode par Wijs (AOCS Tg 1a-64)

(i) Dans un erlenmeyer de 250 mL, une prise d'essai d'environ 0,6 g est dissoute dans 10 mL d'un mélange (v : v) de solution cyclohexane + acide acétique, à laquelle on ajoute exactement 25 mL de solution de Wijs.

(ii) Boucher l'erlenmeyer, agiter légèrement et placer le flacon à l'abri de la lumière durant au moins 1h. Ajouter ensuite 10 mL de la solution de KI 15 % (m/v) et environ 30 mL d'eau distillée.

(iii) Agiter et titrer l'iode libéré avec 0,1 M de thiosulfate de sodium en présence de 1 mL d'empois d'amidon à 1 % comme indicateur. Agiter vigoureusement à la fin du titrage (virage du brun au bleu + décoloration). Conduire un essai à blanc.

Expression des résultats :

$$\text{Indice d'iode (gI}_2\text{/100g)} = \frac{(V_0 - V)}{P} \times 1,269$$

Avec V_0 = volume de thiosulfate nécessaire pour titrer le blanc (mL) ; V = volume de thiosulfate nécessaire pour titrer l'échantillon (mL) ; P = prise d'essai (g)

○ *Détermination de l'indice d'acide (IUPAC 2.201 1992).*

(i) Une prise d'essai de 7 g est dissoute dans un erlenmeyer de 250 mL. Dans un berlin, neutraliser 100 mL du mélange de solvants (v : v alcool éthylique 95 ° et éther diéthylique) avec la solution de KOH 0,1 N en présence de 0,8 ml d'indicateur (Phénolphthaléine en solution 1 % dans l'alcool éthylique). Verser le solvant neutralisé sur l'échantillon.

(ii) Agiter très énergiquement et titrer avec la solution de KOH 0,1 N jusqu'à ce que la coloration persiste une dizaine de secondes.

Expression des résultats :

$$\text{Indice d'acide (mgKOH/g)} = \frac{V \times 56,1 \times N}{P}$$

Avec V = volume de KOH (mL) ; N = normalité de KOH ; P = prise d'essai (g)

○ *Détermination de l'indice de réfraction (AOCS Tp 1a-64)*

Dans notre étude, la mesure a été faite à 20 °C. L'indice de réfraction d'une substance est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans la substance. Pour les mesures pratiques, y compris cette méthode, les échelles des instruments standards indiquent les indices de réfraction par rapport à l'air plutôt que par le vide.

○ *Détermination du coefficient d'extinction spécifique et sa variation (AOCS Ch 5-91)*

L'absorbance est mesurée sous forme d'extinction spécifique E^{1cm} conventionnellement appelée K, qui représente l'extinction de la solution 1% de BK dans le solvant requis (ici iso-octane). Les mesures ont été faites aux longueurs d'onde de 232 nm, et 268 nm, de sorte à ce que les valeurs d'absorbance soient comprises entre 0,1 et 0,8. Pour ce faire, une série de dilutions a été conduite et la dilution de 1/20 a été retenue.

Expression des résultats :

$$K_{\lambda} (\text{extinction spécifique à la longueur d'onde } \lambda) = \frac{E_{\lambda}}{C \times S}$$

Avec E_{λ} = extinction mesurée à la longueur d'onde λ ; C = concentration de la solution (g/100 mL) ; S = épaisseur de la cuve (cm).

Variations du coefficient d'extinction spécifique (ΔK) aux longueurs d'onde de 232 nm et 268 nm :

$$\Delta K = K_m - \frac{(K_{m-4} + K_{m+4})}{2}$$

Avec K_m = extinction mesurée à la longueur d'onde m

2. Monographies retranscrites des caractérisations thermiques

- *Mode opératoire des mesures en mode série et parallèle de détermination du SFC (IUPAC 2.150) selon le tableau 50*

Tableau 50 : Mode opératoire des mesures en mode série et parallèle de détermination du SFC

Mesures sans prétraitement spécial		Mesures avec prétraitement spécial	
Mode série	Mode parallèle	Mode série	Mode parallèle
Fondre à + 80 °C	Fondre à + 80 °C	Fondre à + 80 °C	Fondre à + 80 °C
Passer à + 60 °C pendant 30 min	Passer à + 60 °C pendant 5 min	Passer à + 60 °C pendant 30 min	Passer à + 60 °C pendant 5 min
Transférer à 0 °C pendant 60 ± 2 min	Transférer à 0 °C pendant 60 ± 2 min	Maintenir à 0 °C pendant 90 ± 5 min	Maintenir à 0 °C pendant 90 ± 5 min
Retirer les tubes les uns après les autres, sécher rapidement et placer dans les blocs de bains de lecture réglés	Retirer les tubes les uns après les autres, sécher rapidement et placer dans les blocs de bains de lecture réglés	<i>Maintenir dans le bain de 26 ± 0,1 °C pendant 40 h ± 0,5 h</i>	<i>Maintenir dans le bain de 26 ± 0,1 °C pendant 40 h ± 0,5 h</i>
Plages de température : 10 °C, 15 °C, ..., 50 °C	Plages de température : 10 °C, 15 °C, ..., 50 °C	Maintenir à 0 °C pendant 90 ± 5 min	Maintenir à 0 °C pendant 90 ± 5 min
Lecture après 30 min	Lecture après 30 min	Retirer les tubes les uns après les autres, sécher rapidement et placer dans les blocs de bains de lecture réglés	Retirer les tubes les uns après les autres, sécher rapidement et placer dans les blocs de bains de lecture réglés
—	—	Plages de température : 5 °C, 10 °C, ..., 55 °C Lecture après 60 min	Plages de température : 5 °C, 10 °C, ..., 55 °C Lecture après 60 min

- *Mode opératoire de l'analyse calorimétrique différentielle (AOCS Cj 1-94)*

- (i) Montées de la température de 15,00 °C/min jusqu'à +80,00 °C, suivies d'un équilibre de la température à 80,00 °C puis maintenue constante pendant 10,00 min,
- (ii) Montées de la température de 10,00 °C/min jusqu'à -60,00 °C, suivies d'un équilibre de la température à -60,00 °C puis maintenue constante pendant 30,00 min,
- (iii) Montées de la température de 5,00 °C/min jusqu'à +80,00 °C, suivies d'un équilibre de la température à +30,00 °C.

Annexe 4 : Certificat d'analyse Supelco 37 Component FAME Mix

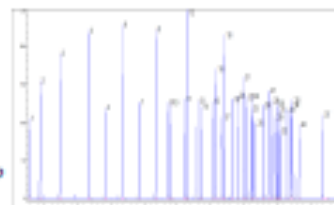
Supelco®

www.sigmaaldrich.com

Certificate of Analysis - Certified Reference Material

Supelco 37 Component FAME Mix

Product no.: CRM47885
Lot no.: LRAC6213
Expiry Date: June 2023
Manufacturing Date: June 2020
Storage: Freeze
Solvent/Matrix: METHYLENE CHLORIDE
Certificate version: LRAC6213.02 (Note: Certificates may be updated due to the availability of new data. Check our website at: www.sigmaaldrich.com for the most current version.)



Certified Values:

Analyte	Certified Value	Units	Raw Material Purity, %	Elution order	Raw Material Lot
Methyl butyrate (C4:0) CAS# 623-42-7	401 ± 11	µg/mL	99.9	01	MKCF9233
Methyl hexanoate (C6:0) CAS# 106-70-7	401 ± 11	µg/mL	99.9	02	MKBZ3038V
Methyl octanoate (C8:0) CAS# 111-11-5	401 ± 11	µg/mL	99.9	03	LC13561
Methyl decanoate (C10:0) CAS# 110-42-9	401 ± 20	µg/mL	99.1	04	MKCF2493
Methyl undecanoate (C11:0) CAS# 1731-86-8	200 ± 11	µg/mL	99.0	05	BCBN7141V
Methyl laurate (C12:0) CAS# 111-82-0	401 ± 22	µg/mL	98.8	06	BCBP3445V
Methyl tridecanoate (C13:0) CAS# 1731-88-0	200 ± 11	µg/mL	99.5	07	BCBV4347
Methyl myristate (C14:0) CAS# 124-10-7	401 ± 21	µg/mL	100.0	08	LC17239
Methyl myristoleate (C14:1) CAS# 56219-06-8	200 ± 11	µg/mL	99.0	09	U-36M-F28-C
Methyl pentadecanoate (C15:0) CAS# 7132-64-1	200 ± 9	µg/mL	99.7	10	BCBR2231V
Methyl cis-10 pentadecenoate (C15:1) CAS# 90176-52-6	200 ± 9	µg/mL	99.0	11	U-38M-JA22-D
Methyl palmitate (C16:0) CAS# 112-39-0	601 ± 26	µg/mL	99.0	12	LC17089
Methyl palmitoleate (C16:1) CAS# 1120-25-8	200 ± 9	µg/mL	100.0	13	U-40M-N13-D
Methyl heptadecanoate (C17:0) CAS# 1731-92-6	200 ± 9	µg/mL	96.4	14	BCBR1790V
Methyl cis-10 heptadecenoate (C17:1) CAS# 75190-82-8	200 ± 9	µg/mL	100.0	15	SLOG2846
Methyl stearate (C18:0) CAS# 112-61-8	401 ± 19	µg/mL	99.7	16	BCBV9185

Sigma-Aldrich RTC, 2931 Soldier Springs Rd., Laramie, WY 82070, USA;
 Tel. 1 307-742-5452; Fax 1 855-831-9211; www.sigmaaldrich.com
 Sigma-Aldrich RTC is a subsidiary of Merck KGaA, Darmstadt, Germany.

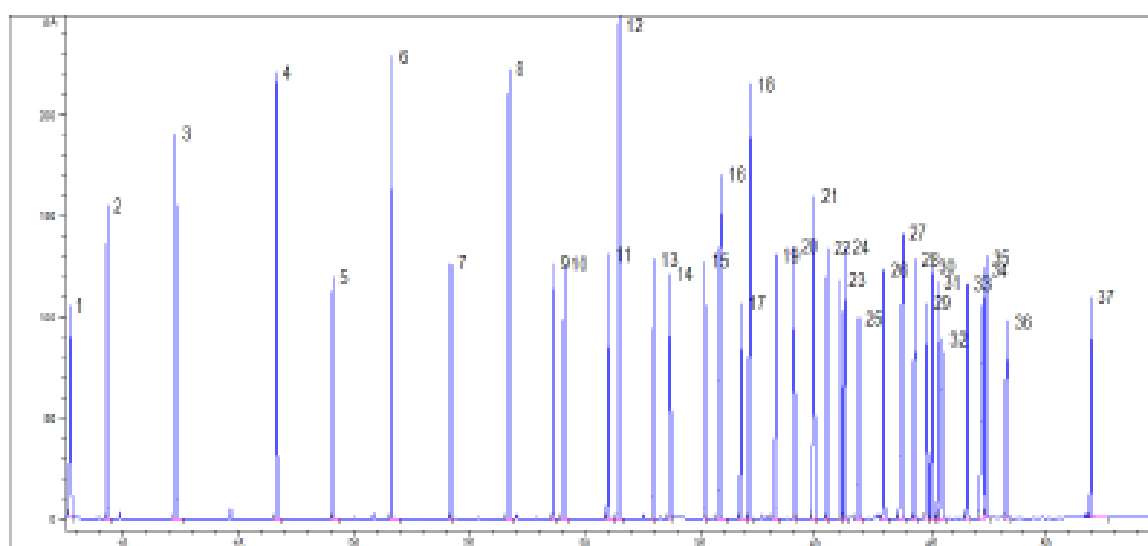
Certificate Page 1 of 5

Certificate version 02



Analyte	Certified Value	Units	Raw Material Purity, %	Elution order	Raw Material Lot
Methyl trans-9 eladate (C18:1) CAS# 1937-62-8	200 ± 10	µg/mL	100.0	17	SLBZ7823
Methyl cis-9 oleate (C18:1) CAS# 112-62-9	401 ± 19	µg/mL	99.6	18	MKCJ0804
Methyl linolelaidate (C18:2) CAS# 2566-97-4	200 ± 12	µg/mL	99.0	19	U-60M-1A13-E
Methyl linoleate (C18:2) CAS# 112-63-0	200 ± 13	µg/mL	99.0	20	BCCB2464
Methyl arachidate (C20:0) CAS# 1120-28-1	401 ± 22	µg/mL	100.0	21	QISZI-AH
Methyl-gamma-linolenate (C18:3) CAS# 16326-32-2	200 ± 17	µg/mL	99.0	22	MKCJ3604
Methyl cis-11-eicosanoate (C20:1) CAS# 2390-09-2	200 ± 11	µg/mL	99.0	23	MKCJ2391
Methyl linolenate (C18:3) CAS# 301-00-8	200 ± 18	µg/mL	99.0	24	SLBZ9269
Methyl heneicosanoate (C21:0) CAS# 6064-90-0	200 ± 11	µg/mL	99.6	25	LC08970
Methyl cis-11,14-eicosadienoate (C20:2) CAS# 61012-46-2	200 ± 15	µg/mL	99.9	26	U-68M-A4-D
Methyl behenate (C22:0) CAS# 929-77-1	401 ± 24	µg/mL	99.0	27	N-22M-1A23-E
Methyl cis-8, 11, 14-eicosatrienoate (C20:3) CAS# 21061-10-9	200 ± 20	µg/mL	99.0	28	U-69M-N30-C
Methyl erucate (C22:1) CAS# 1120-34-9	200 ± 12	µg/mL	99.4	29	BCBX7574
Methyl cis-11, 14, 17- eicosatrienoate (C20:3) CAS# 55662-88-7	200 ± 20	µg/mL	100.0	30	U-70M-S20-C
Methyl tricosanoate (C23:0) CAS# 2433-97-8	201 ± 13	µg/mL	99.6	31	SLBZ1076
Methyl cis-5, 8, 11, 14-eicosatetraenoate (C20:4) CAS# 2566-89-4	200 ± 24	µg/mL	99.9	32	LC15184
Methyl cis-13, 16- docosadienoate (C22:2) CAS# 61012-47-3	200 ± 16	µg/mL	99.0	33	U-81-M
Methyl lignocerate (C24:0) CAS# 2443-49-1	401 ± 27	µg/mL	100.0	34	SLCC4462
Methyl cis-5, 8, 11, 14, 17- eicosapentaenoate (C20:5) CAS# 2734-47-6	200 ± 31	µg/mL	99.9	35	U-99M-JY30-C
Methyl nervonate (C24:1) CAS# 2733-88-2	200 ± 14	µg/mL	99.0	36	U-88M-A16-E
Methyl cis-4, 7, 10, 13, 16, 19-docosahexaenoate (C22:6) CAS# 2566-90-7	200 ± 41	µg/mL	99.7	37	U-84M-017-C

Informational Values:



Elution details:

EO	RT(MIN)	ANALYTE
1	8.89	Methyl butyrate (C4:0)
2	9.48	Methyl hexanoate (C6:0)
3	12.72	Methyl octanoate (C8:0)
4	16.87	Methyl decanoate (C10:0)
5	19.26	Methyl undecanoate (C11:0)
6	21.77	Methyl dodecanoate (C12:0)
7	24.26	Methyl tridecanoate (C13:0)
8	26.76	Methyl myristate (C14:0)
9	28.68	Methyl myristoleate (C14:1)
10	29.15	Methyl pentadecanoate (C15:0)
11	31.05	Methyl cis-10 pentadecenoate (C15:1)
12	31.54	Methyl palmitate (C16:0)
13	33.03	Methyl palmitoleate (C16:1)
14	33.72	Methyl heptadecanoate (C17:0)
15	35.23	Methyl cis-10 heptadecenoate (C17:1)
16	35.92	Methyl stearate (C18:0)
17	36.8	Methyl trans-9 eladate (C18:1)
18	37.21	Methyl cis-9 oleate (C18:1)
19	38.28	Methyl linolelaidate (C18:2)
20	39.11	Methyl linoleate (C18:2)
21	40	Methyl arachidate (C20:0)
22	40.51	Methyl-gamma-linolenate (C18:3)
23	41.14	Methyl cis-11-eicosenoate (C20:1)
24	41.3	Methyl linolenate (C18:3)
25	41.87	Methyl heneicosanoate (C21:0)
26	42.97	Methyl cis-11,14-eicosadienoate (C20:2)
27	43.76	Methyl behenate (C22:0)
28	44.29	Methyl cis-8,11,14-eicosatrienoate (C20:3)
29	44.85	Methyl erucate (C22:1)
30	45.05	Methyl cis-11,14,17-eicosatrienoate (C20:3)
31	45.3	Methyl tricosanoate (C23:0)
32	45.5	Methyl cis-5,8,11,14-eicosatetraenoate aka methyl arachidonate (C20:4)
33	46.57	Methyl cis-13,16-docosadienoate (C22:2)

34	47.26	Methyl lignocerate (C24:0)
35	47.4	Methyl cis-5,8,11,14,17-eicosapentaenoate (C20:5)
36	48.29	Methyl nervonate aka methyl cis-15-tetracosanoate (C24:1)
37	51.94	Methyl cis-4,7,10,13,16,19-docosahexaenoate (C22:6)

Additional Information:	Analytical Method Parameters: Column: SP-2560, 100 m x 0.25 mm I.D., 0.25 µm film thickness Carrier Gas: H₂, Flow: 1.8 mL/min Inlet Temperature: 200 °C, Injection Volume: 1 µL Injection Mode: Split (Split Ratio: NA) Temperature Program: 100 °C (Hold 3 min) @ 3 °C/min to 240 °C (Hold 7 min) Detector: FID, Detector Temperature: 250 °C
Metrological traceability:	Traceable to the SI and higher order standards from NIST through an unbroken chain of comparisons. The balance used to weigh raw materials is accurate to +/-0.0001 g and calibrated regularly using mass standards traceable to NIST. All dilutions were performed gravimetrically. Additionally, individual analytes are traceable to NIST SRMs where available and specified above.
Measurement method:	Where applicable, the assigned value is based on a purity determination by mass balance and gravimetrically prepared value.
Intended use:	Intended for R&D and Analytical Use only. Not for drug, household or other uses.
Minimum sample size:	1 µL
Packaging:	1 ML IN AMBER AMPULE
Instructions for handling and correct use:	Use on the as is basis. The internal pressure of the container may be slightly different from the atmospheric pressure at the user's location. Open slowly and carefully to avoid dispersion of the material.
Health and safety information:	All chemical reference materials should be considered potentially hazardous and should be used only by qualified laboratory personnel. Please refer to the Safety Data Sheet for detailed information about the nature of any hazard and appropriate precautions to be taken.
Accreditation:	Sigma-Aldrich RTC is accredited by the US accreditation authority ANAB as a registered reference material producer AR-1470 in accordance with ISO 17034.
Certificate Issue date:	13-Apr-2021



Andy Ommen

Andy Ommen - QC Manager

Mark Pooler

Mark Pooler - QA Supervisor

Details on metrological traceability:	This standard has been gravimetrically prepared using balances that have been fully qualified and calibrated to ISO 17025 requirements. All calibrations utilize NIST traceable weights which are calibrated externally by a qualified ISO 17025 accredited calibration laboratory to NIST standards. Qualification of each balance includes the assignment of a minimum weighing by a qualified and ISO 17025 accredited calibration vendor taking into consideration the balance and installed environmental conditions to ensure compliance with USP tolerances of NMT 0.10% relative error. Fill volume to predetermined specifications is gravimetrically verified throughout the dispensing process using qualified and calibrated balances. Further traceability to a corresponding Primary Standard may be achieved through a direct comparison assay. Where a Primary Standard is available, the assay value will be included in the specified section of the COA.
--	--

Associated uncertainty:	Ucrm - Uncertainty values in this document are expressed as Expanded Uncertainty (Ucrm) corresponding to the 95% confidence interval. Ucrm is derived from the combined standard uncertainty multiplied by the coverage factor k, which is obtained from a t-distribution and degrees of freedom. The components of combined standard uncertainty include the uncertainties due to characterization, homogeneity, long term stability, and short term stability (transport). The components due to stability are generally considered to be negligible unless otherwise indicated by stability studies. The mathematical representation of the Ucrm calculation is as follows: $u_{CRM} = \sqrt{u_{char}^2 + u_{homogeneity}^2 + u_{stability}^2}$
Homogeneity assessment:	Homogeneity was assessed in accordance with ISO Guide 35. Completed units were sampled using a random stratified sampling protocol. The results of chemical analysis were then compared by Single Factor Analysis of Variance (ANOVA). The uncertainty due to homogeneity was derived from the ANOVA. Heterogeneity was not detected under the conditions of the ANOVA.
Stability assessment:	Significance of the stability assessment will be demonstrated if the analytical result of the study and the range of values represented by the Expanded Uncertainty do not overlap the result of the original assay and the range of its values represented by the Expanded Uncertainty. The method employed will usually be the same method used to characterize the assay value in the initial

Certificate of analysis revision history:

Certificate version	Date	Reason for version
LRAC6213.01	15-Jul-2020	Original Release Date
LRAC6213.02	13-Apr-2021	ELUTION TIMES ADDED

Disclaimer: The purchaser is required to determine the suitability of this product for any particular application. Sigma-Aldrich RTC makes no warranty of any kind, express or implied, other than its products meet all quality control standards set by Sigma-Aldrich RTC. We do not guarantee that the product can be used for any particular application.

The vibrant M, Supelco, TraceCERT and Sigma-Aldrich are trademarks of Merck KGaA, Darmstadt, Germany or its affiliates. All other trademarks are the property of their respective owners. Detailed information on trademarks is available via publicly accessible resources. © 2018 Merck KGaA, Darmstadt, Germany and/or its affiliates. All Rights Reserved.

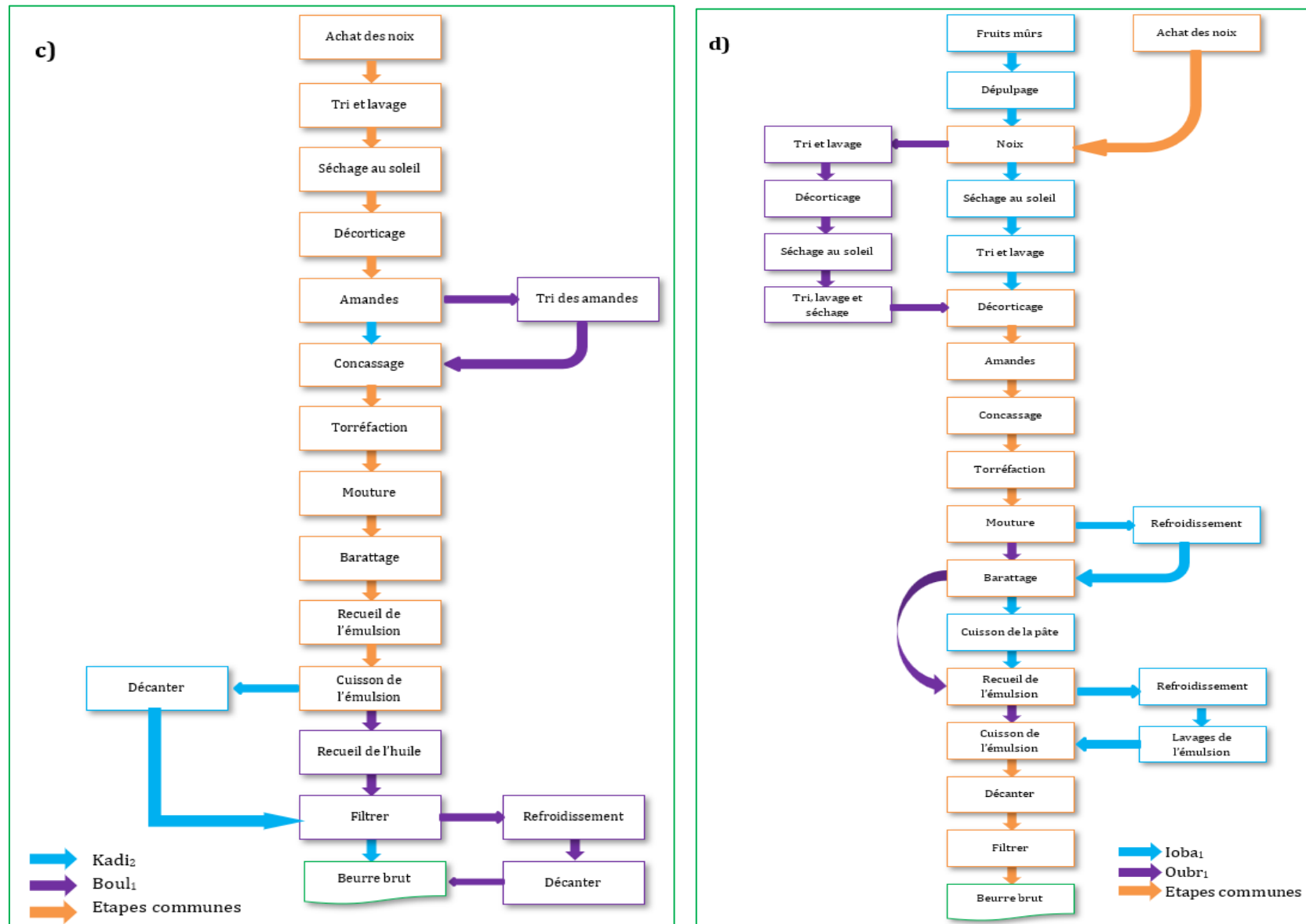
The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany operates as MilliporeSigma in the US and Canada.

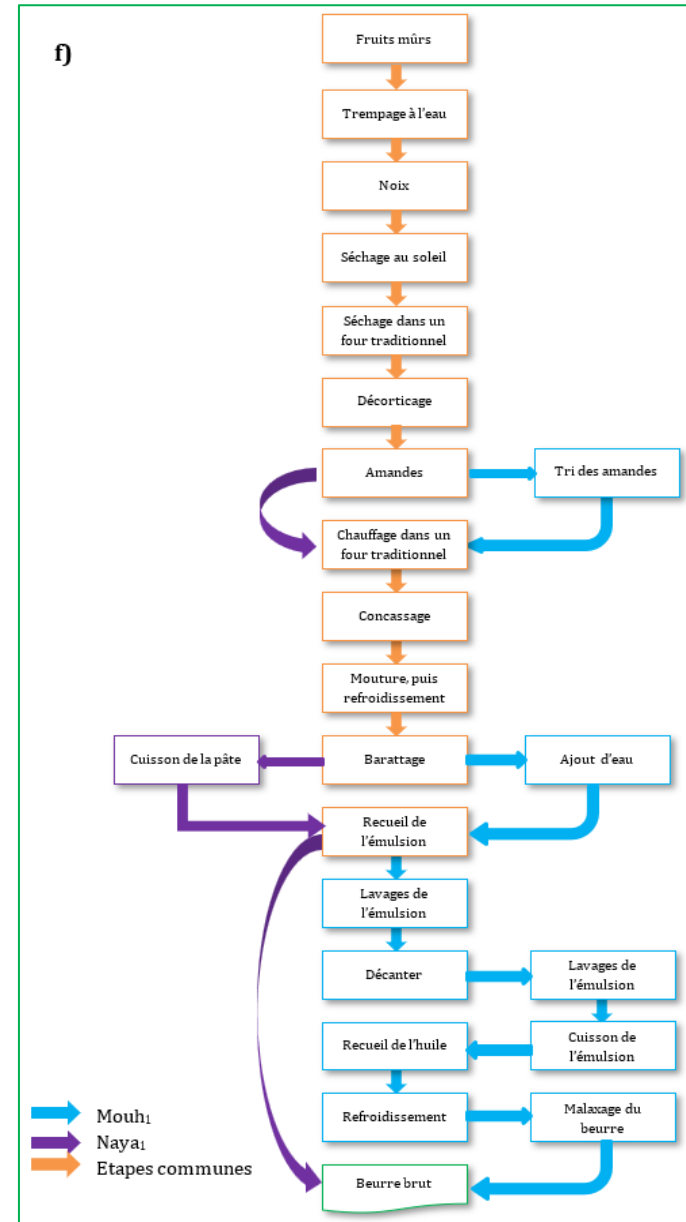
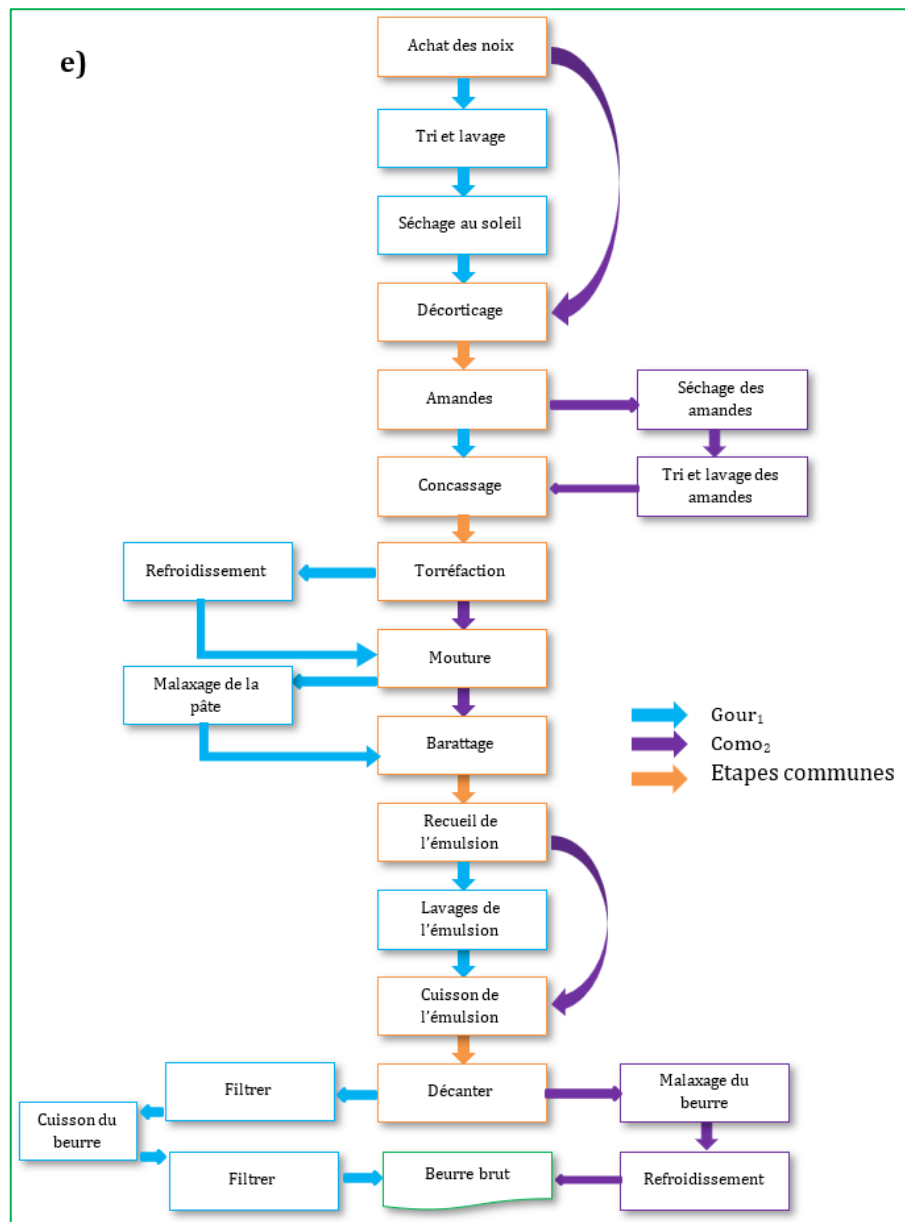


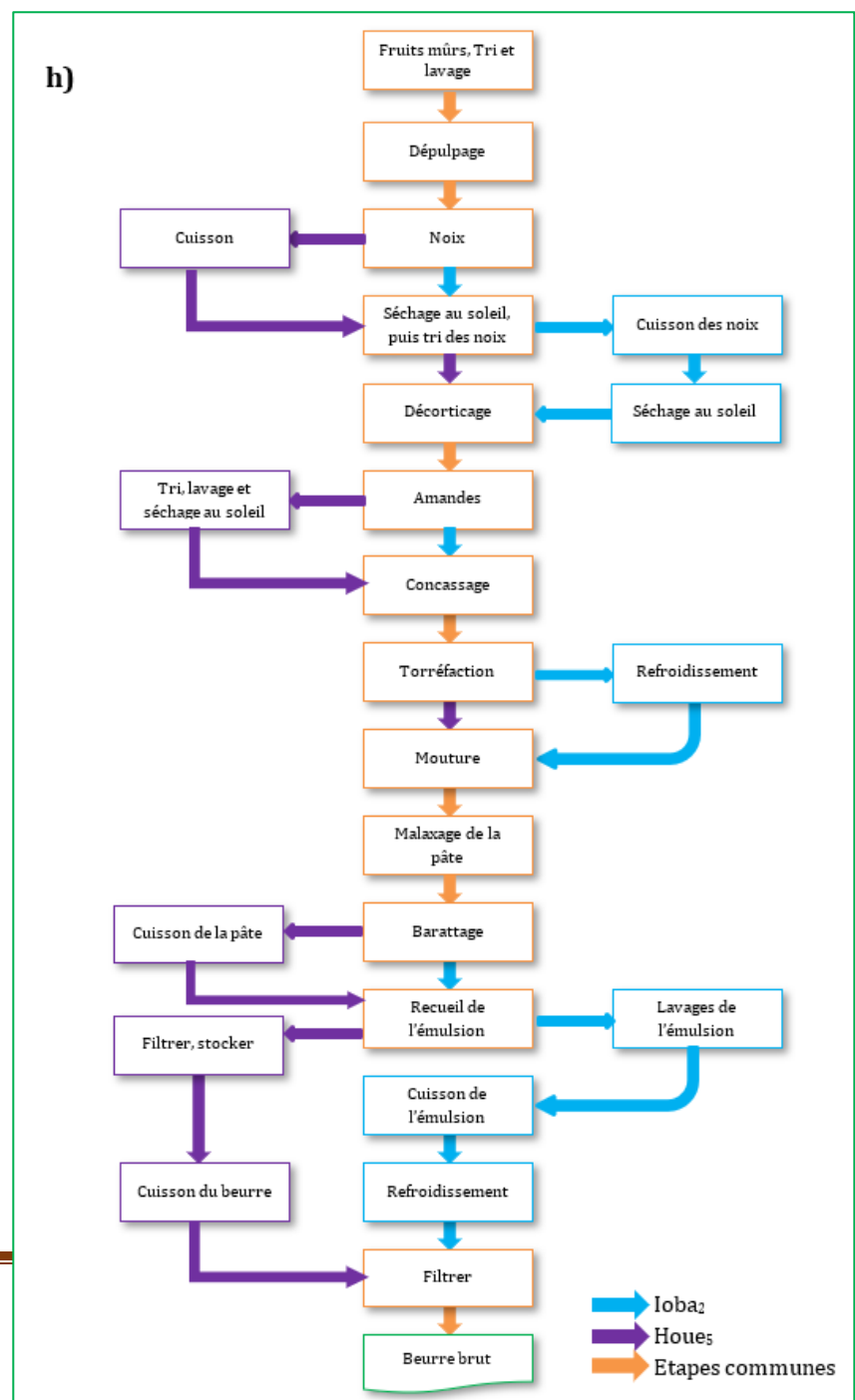
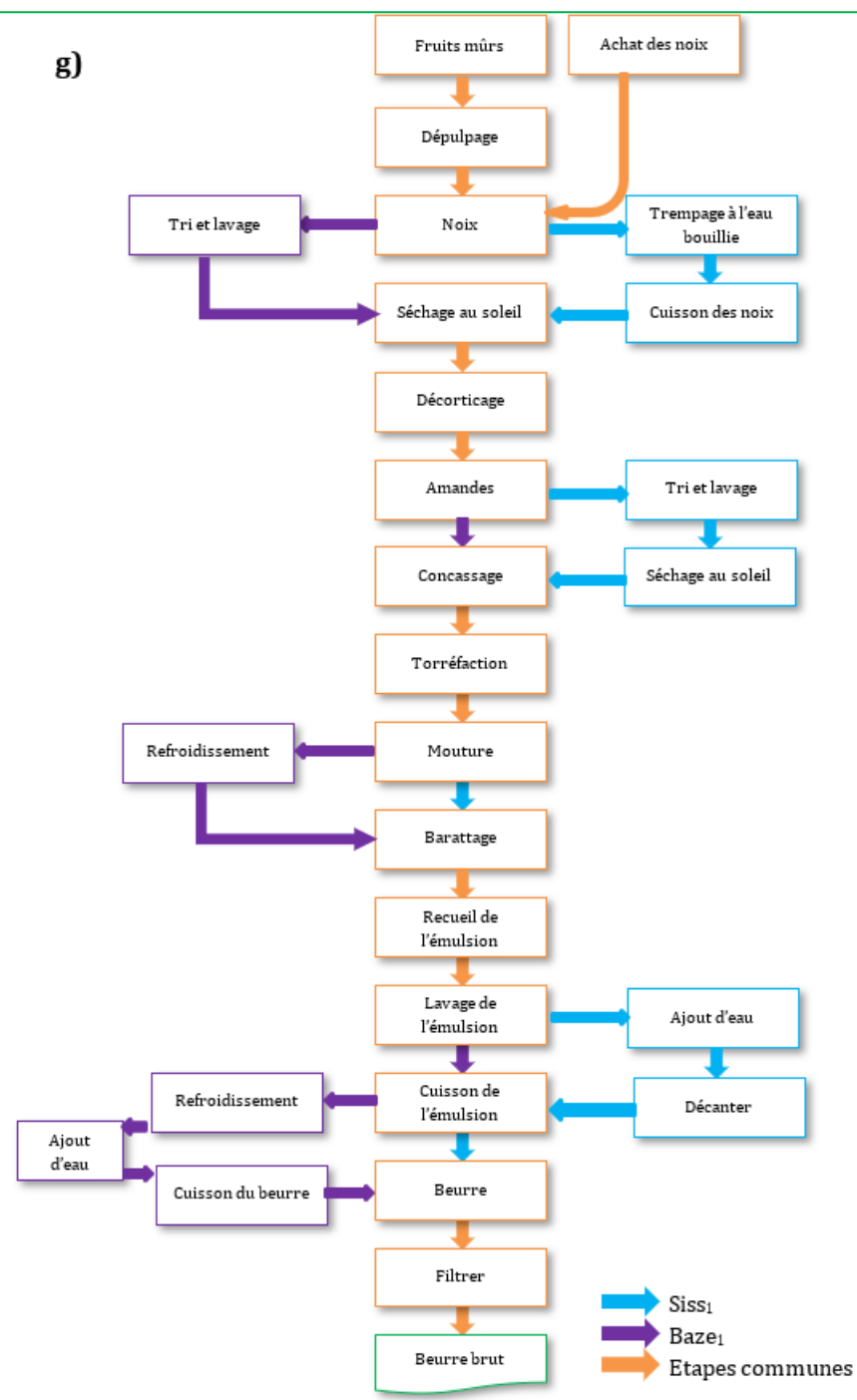
Annexe 5 : Échantillonnage - Liste non exhaustive des producteurs, projets et associations, des centres et groupements œuvrant dans la filière karité du Burkina Faso

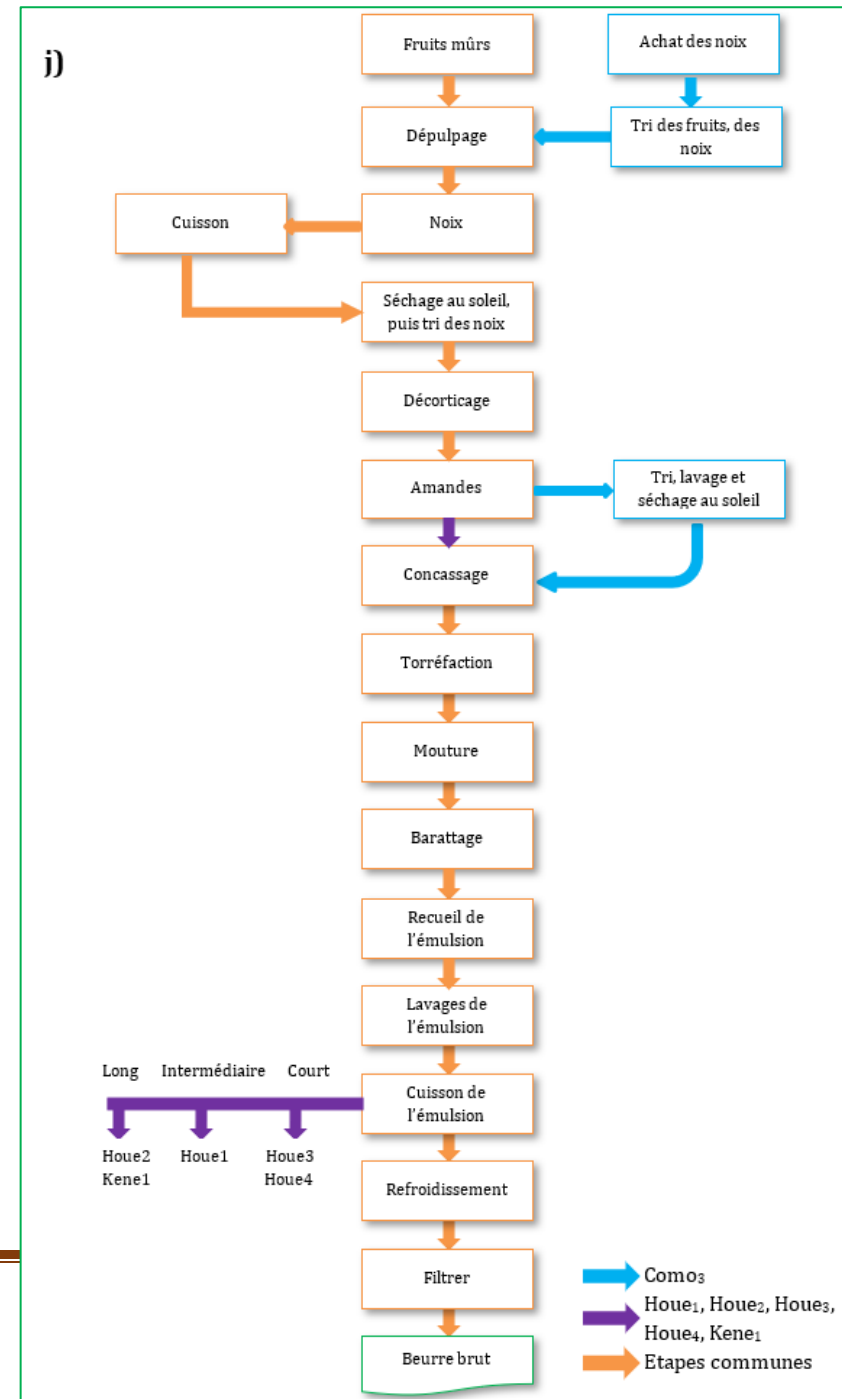
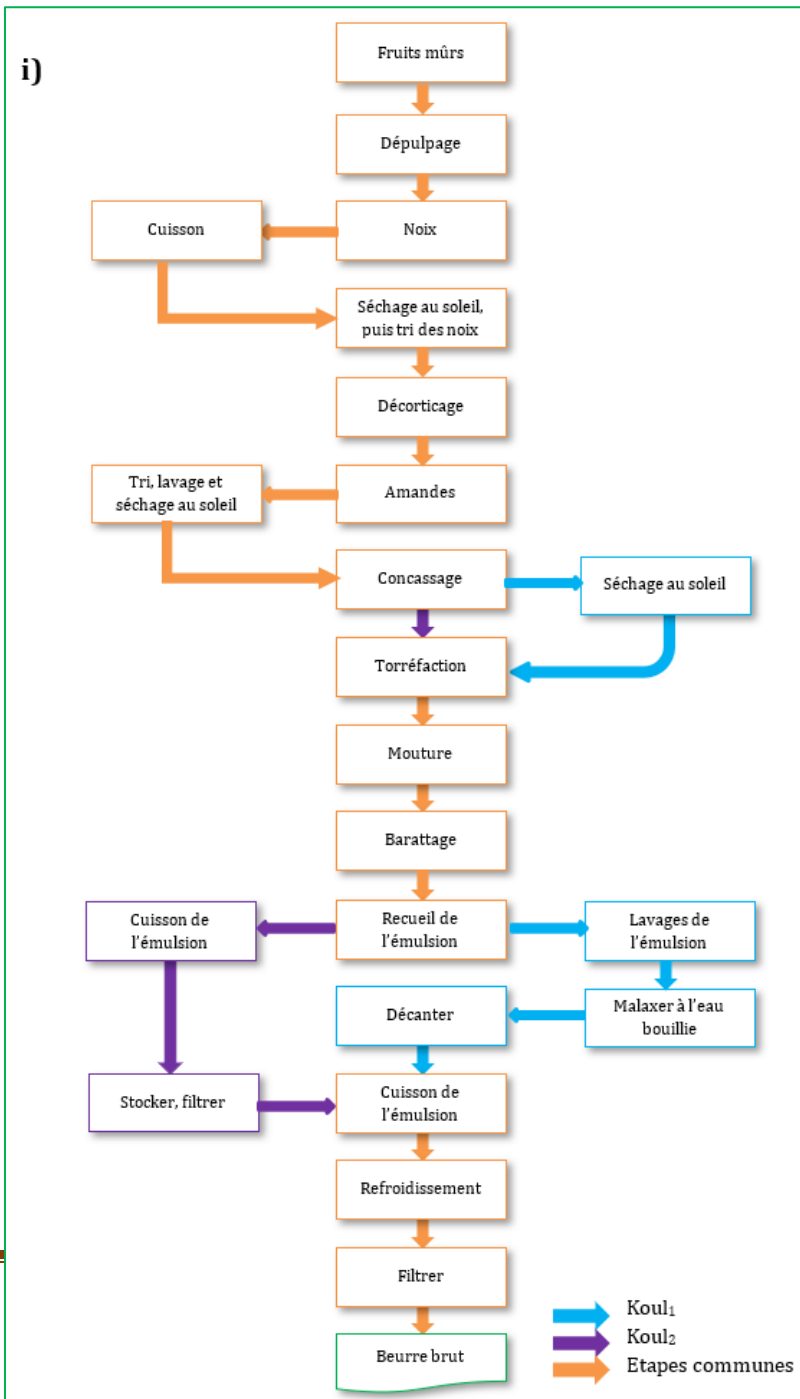
N°	Dénomination	Raison sociale	Localité	Observation
1	Association féminine pour le développement (AFD-BUAYABA)	Association	Fada N’Gourma (Gourma)	dont 46 groupements
2			Pama (Kompienga)	
3			Gayéri (Komondjari)	
4			Bogandé (Gnagna)	
5			Ouargaye (Koulpélogo)	
6	WEMATOU	Association	Nahouri	
7	Union des productrices de karité (UPROKA)	Union de productrices	Ouagadougou (Kadiogo)	
8	DOLEBOU	Association	Bagré (Boulgou)	
9	Bao taab soom	Association	Manga	
Club des productrices de beurre de karité biologique (CPBKB) ou CLUB BIO				
10	Association burkinabè pour la promotion de la jeune fille (ABPJF)	Association	Ouagadougou (Kadiogo)	
11	Union des groupements féminines/Ce dwane nyee (UGF/CDN)	Union	Réo (Sanguié)	dont 10 groupements
Fédération NUNUNA : ex Union des groupements de productrices des produits karité de la Sissili et du Ziro				
12	4 Groupements villageois de femmes (GVF)	Groupement	Boura (Sissili)	
13	15 GVF	Groupement	Léo (Sissili)	
14	5 GVF	Groupement	Bieha (Sissili)	
15	4 GVF	Groupement	Sapouy (Ziro)	
16	Centre de production et de commercialisation de karité (CPCCK)	Centre de production	Léo (Sissili)	
17	NOONG TAABA	Groupement	Département de Lan	
18	1 productrice	Individuelle	Département de Gaoussa	
Union générale des productrices et producteurs de karité du Houet (UGPPK-HOUE) dont 16 groupements				
19	BENKADI	Association	Koundougou (Houet)	
Fédération des associations de développement économique des femmes du Djôrô (FADEFSO)				
20	1 productrice	Individuelle	Diébougou (Bougouriba)	
21	1 groupement de production	Groupement	Sorghon/Yinghan (Ioba)	
22	Groupement de production	Groupement	Dissin (Ioba)	
23	Groupement de production	Groupement	Gaoua (Poni)	
24	Groupement de production	Groupement	Batié (Noumbiel)	
Fédération Lougou Zena dont 44 groupements, Nahouri (Région du Nazinon)				
25	LAAGMTAAB	Unité de production	Nahouri (Région du Nazinon)	
26	LAOUGOUBE			
27	SONG TAABA			
28	AZARA			
Projet BurkiNature				
29	Association SONGTAAB-YALGRE (ASY)	Association	Province du Kadiogo	
30			Province du Bazèga	
31	Projet d’appui technique à la filière karité (ProKarité)	Projet de recherche	IRSAT-Ouaga	
32	Projet femmes et filière karité (PFFK)	Projet	Koudougou	
33			Province du Ziro	
34	Fédération nationale des industries agroalimentaire s et de transformation du Burkina (FIAB)	Fédération	Productrices de Tanghin-Dassouri	
35	Projet d’appui aux micro-entreprises rurales (PAMER)	Projet	Provinces : Tuy, Comoé, Houet. Léraba, KénéDougou	
36	OLVEA Burkina Faso : usine de transformation agro-industrielle		Bobo-Dioulasso	
37	Centre Ecologique ALBERT SCHWEITZER (CEAS-BF)	Centre d’étude	Ouagadougou (Pissy)	

Annexes 6 : Diagrammes récapitulatifs des différentes étapes d'extraction du beurre de karité au Burkina Faso, cas des 32 procédés

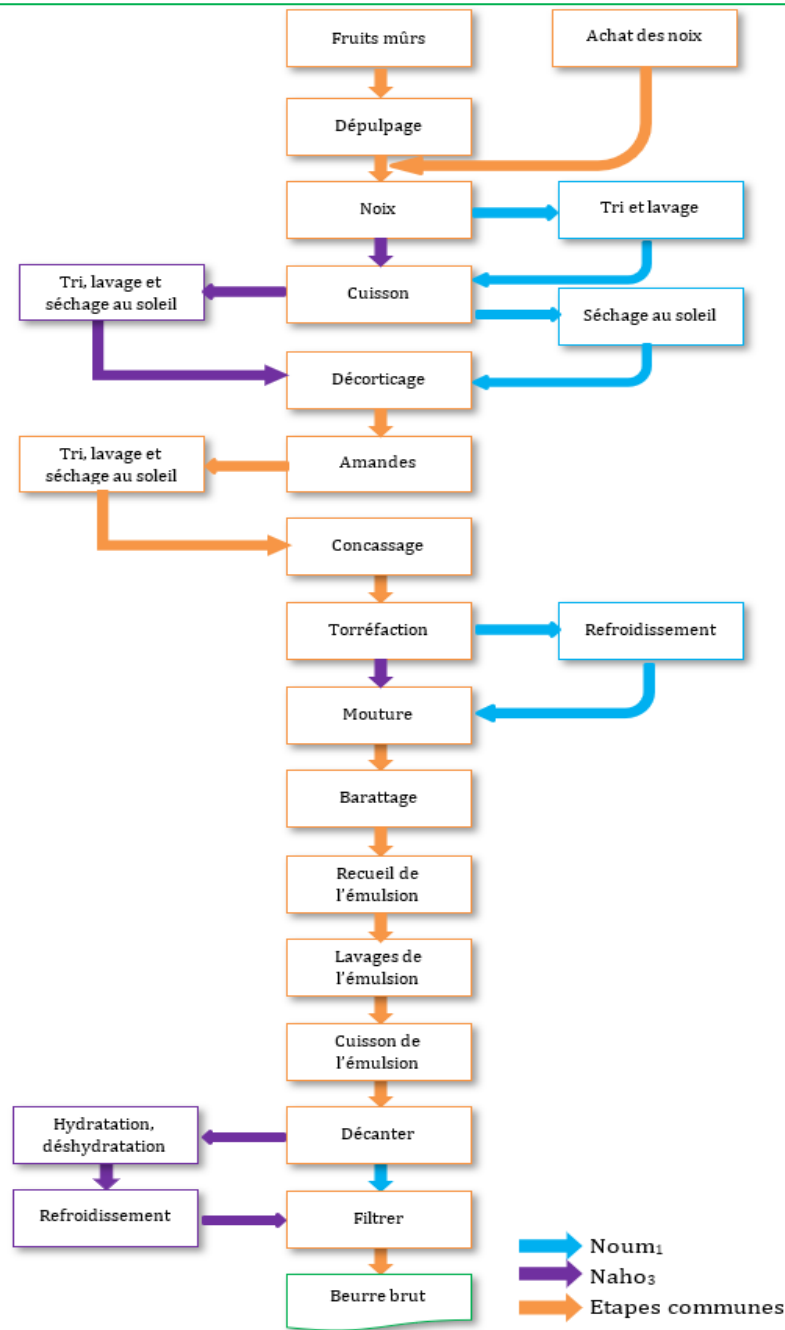




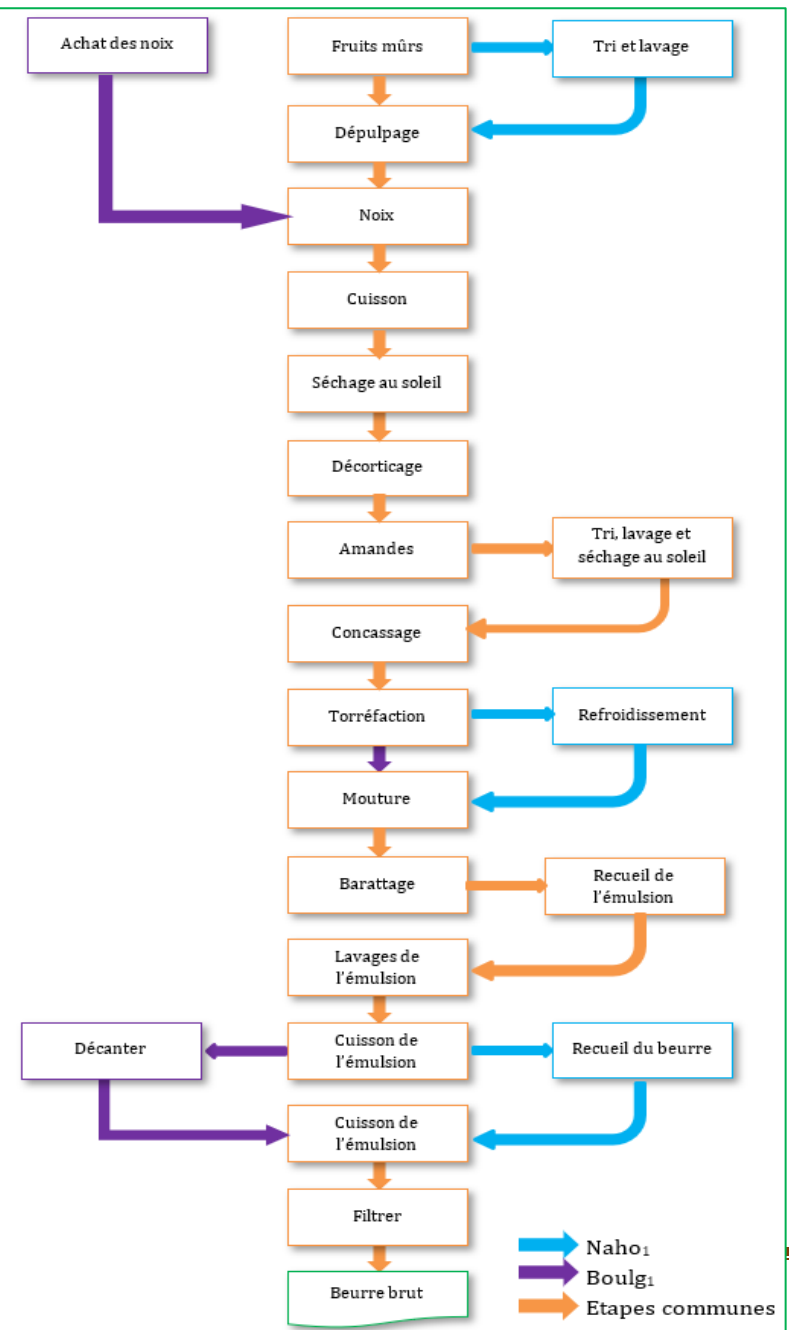


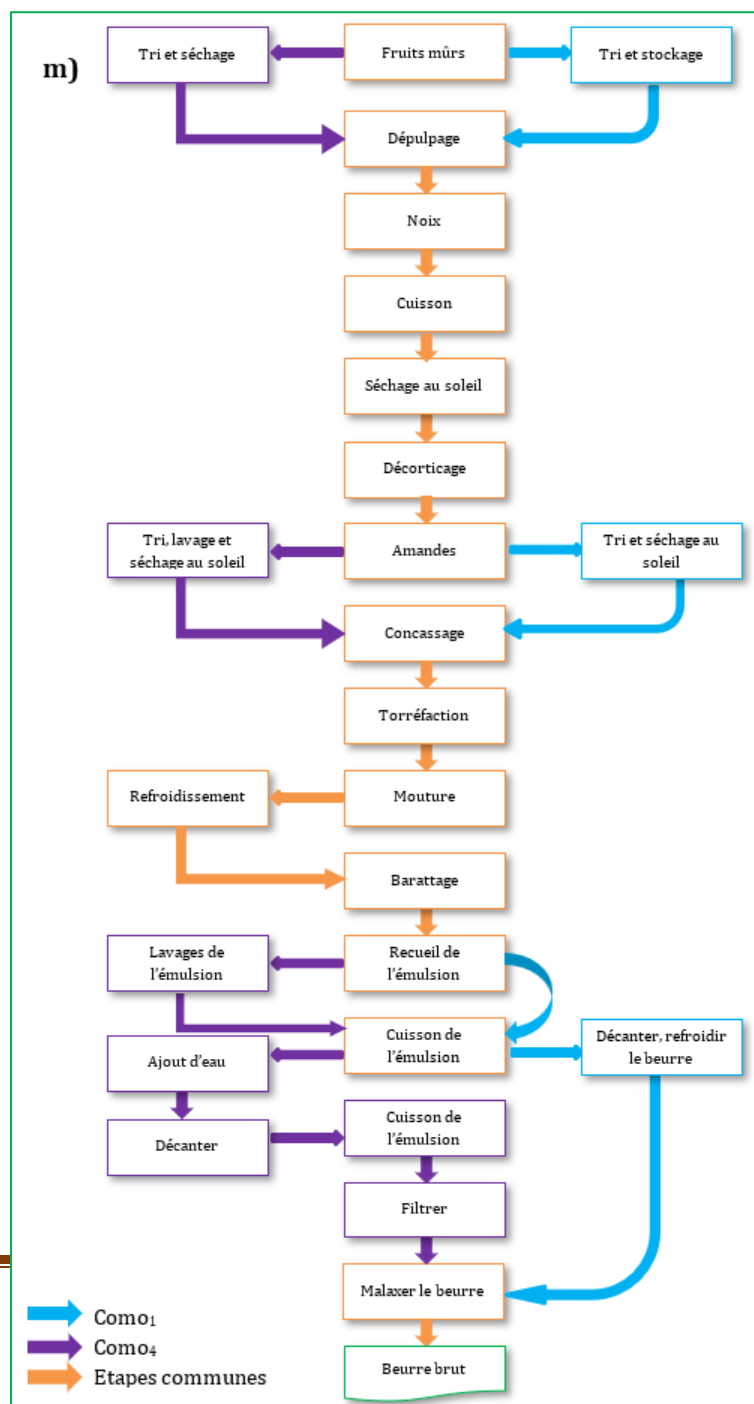


k)

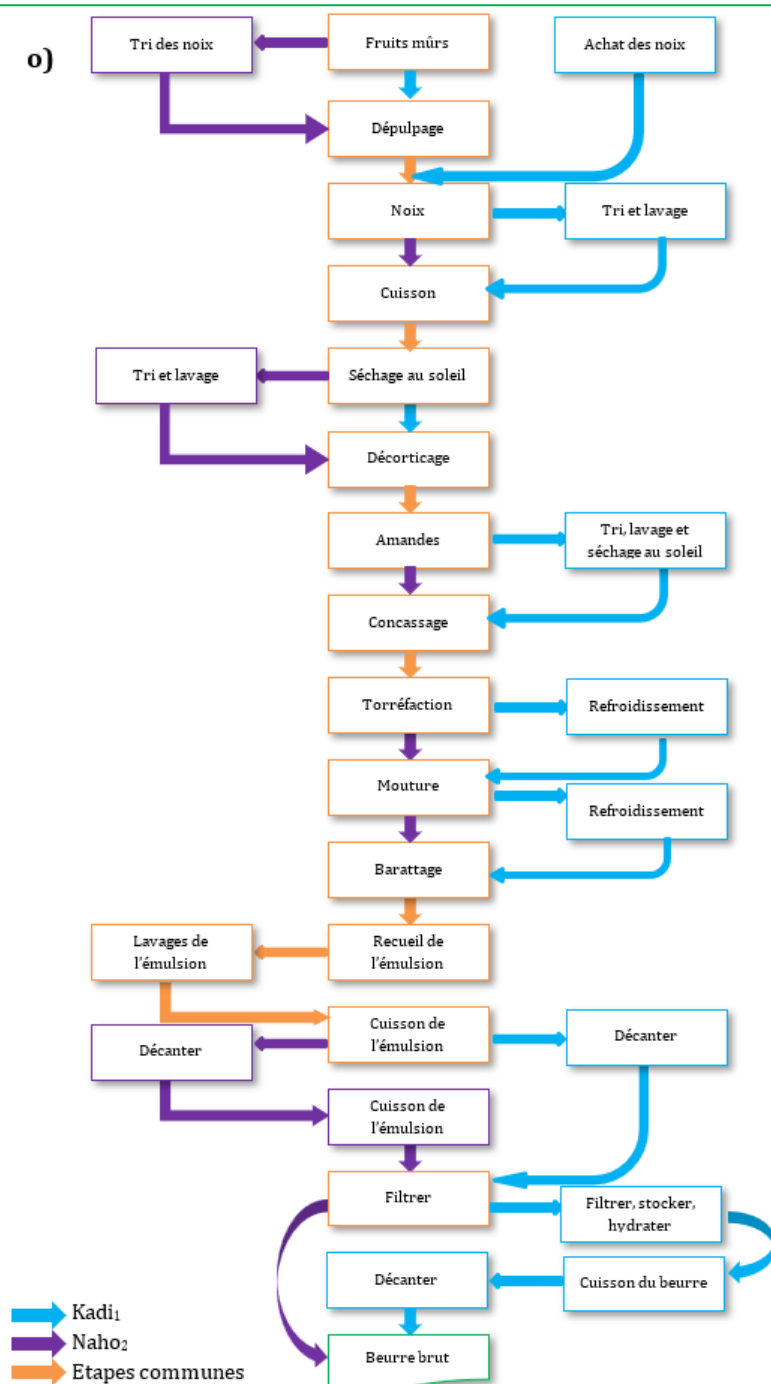


l)

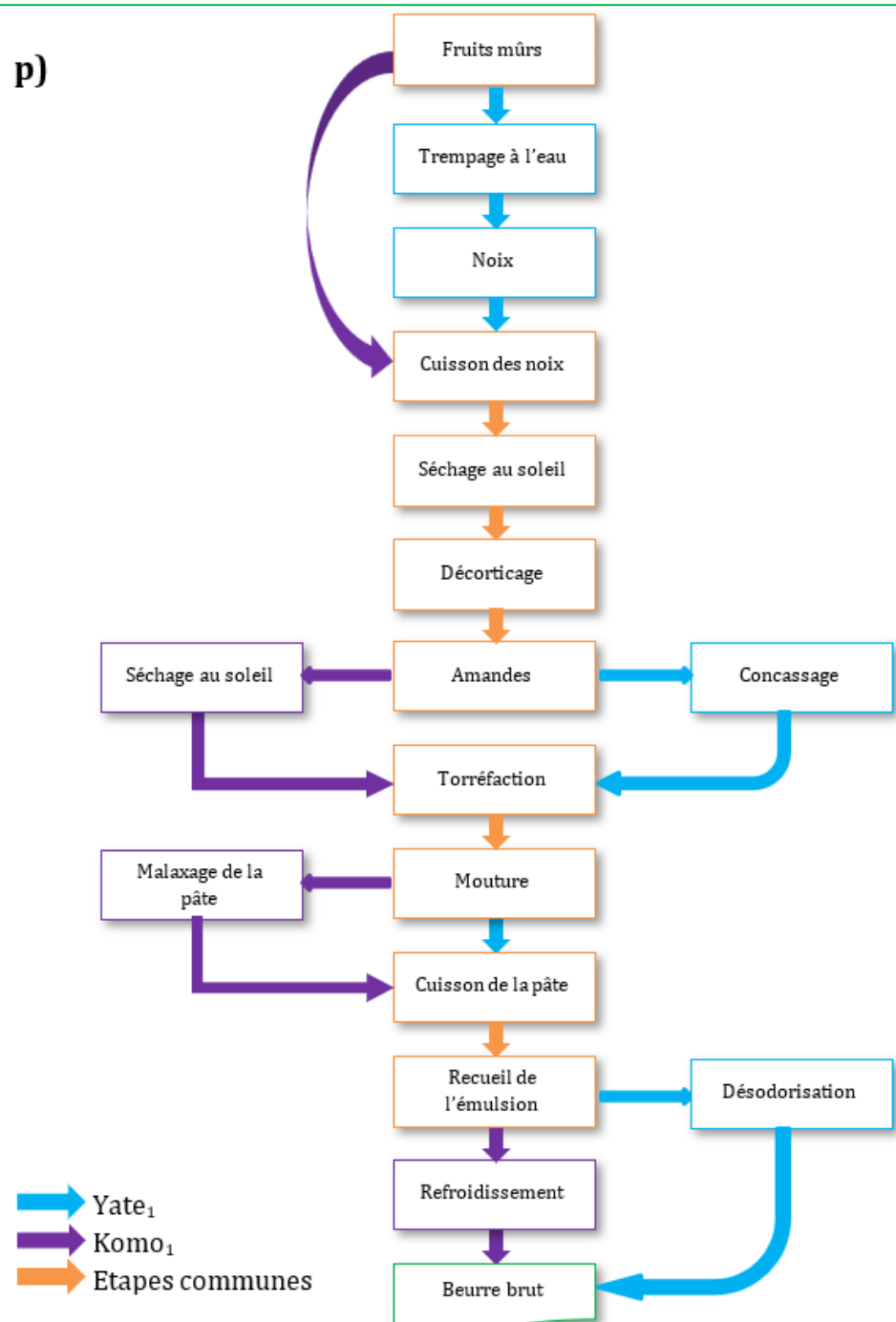




o)



p)



Annexe 7 : Travaux préliminaires

1. Essai de développement d'un modèle de prédiction de la qualité du beurre de karité par spectroscopie proche infrarouge couplé à la chimiométrie

Il s'agissait pour cette étude de mettre au point une méthode indirecte de dosage des paramètres physicochimiques du beurre de karité brut.

1.1. Objectif

L'objectif consistait à développer un modèle de prédiction par la régression PLS (Chimiométrie) des paramètres physicochimiques, thermiques et biochimiques du beurre de karité à partir de l'analyse spectrale (proche infra-rouge).

1.2. Matériel utilisé

- 37 échantillons de beurre brut de karité ;
- Spectrophotomètre proche infrarouge : NIRs BRUKER MPA ($12\,500\text{ cm}^{-1}$ - 3500 cm^{-1}) du Laboratoire de Chimie Analytique et Pharmaceutique de ULiège ;
- Spectrophotomètre UV visible Agilent 8453, équipé d'une cellule de quartz de 1 cm.

1.3. Méthode

- Prise d'essai de 5,0 g/échantillon dans des flacons en verre ;
- 5 aliquots/échantillon ;
- 1 acquisition spectrale/aliquot ;
- Traitement chimiométrique à l'aide du logiciel MATLAB/PLS ToolBox.

1.4. Synthèse des résultats

1.4.1. Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales (ACP ou PCA) a été faite afin d'extraire les variables qui apportent des informations, de visualiser les variables extrêmes et les outliers.

Mais avant, un prétraitement par multiplicative scatter correction (MSC) a été réalisé afin de sélectionner la gamme spectrale qui donne le plus d'information. Ainsi, la gamme spectrale de $8580 - 4200 \text{ cm}^{-1}$ a été sélectionnée et servira pour la suite des traitements chimiométriques. Il s'agit d'une technique de normalisation, permettant de corriger la ligne de base.

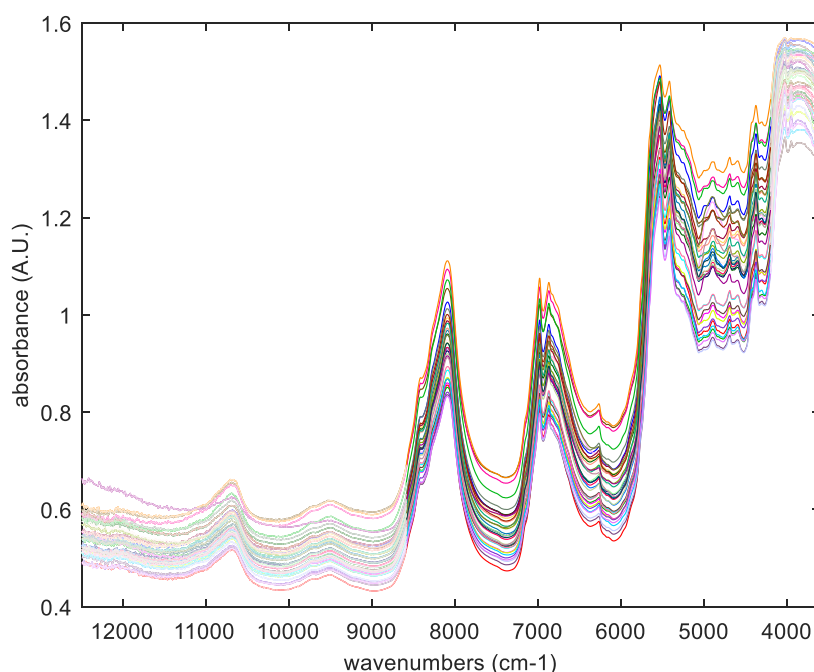


Figure P1 : Profil spectral dans le proche infrarouge ($12\,500 \text{ cm}^{-1}$ - $3\,500 \text{ cm}^{-1}$) des 37 échantillons de beurre de karité brut originaire du Burkina Faso

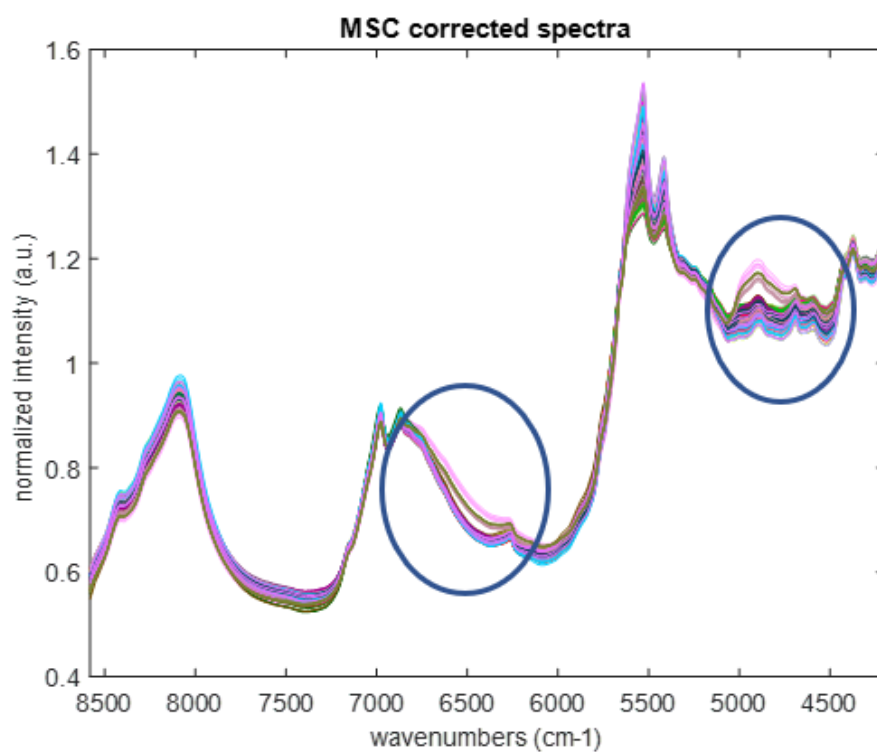


Figure P2 : Spectres d'origine avec sélection de la gamme spectrale de travail

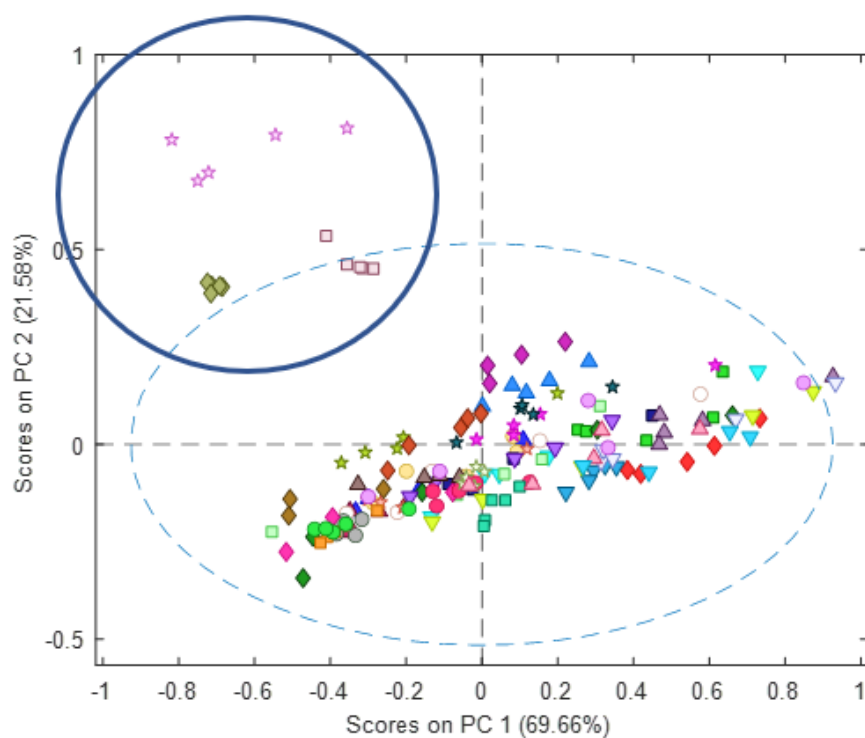


Figure P3 : Résultats de l'analyse en composantes principales mettant en évidence les outliers

Les résultats de l'analyse en composante principale ont permis d'identifier trois outliers : les échantillons Como₁, Yate₁ et Noum₁, comme illustré dans les figures P2 et P3. Les outliers ont

été exclus pour la suite des analyses. Ils différaient des autres échantillons par leur forte absorption dans la gamme spectrale mise en évidence dans la figure P2. Cette gamme spectrale correspond aux zones d'absorption de l'eau dans le NIR, ce qui signifiait que ces échantillons avaient une teneur en eau plus élevée que celle des autres échantillons. Ces résultats nécessitaient donc une mesure de la teneur en eau de l'ensemble des échantillons par Karl-Fisher.

1.4.1. Partial least squares regression (PLS model)

Validation du modèle : Algorithme « Kennard-Stone » (basé sur la distance de Mahalanobis) : sélection des échantillons uniformément distribués dans chaque dimension, en y attribuant des scores.

Calibration du modèle (80 %) : $n = 27$; et validation externe (20 %) : $n = 7$;

Variables explicatives (x) = données NIR ;

Variables à prédire (y) : Elles étaient constituées de tous les paramètres physicochimiques, thermiques et biochimiques ayant fait l'objet d'étude dans la présente thèse. À ceux-ci, il a été déterminé un paramètre complémentaire, la valeur de l'absorbance à la longueur d'onde de 280 nm, comme établi dans les résultats de la *Partie 1, 3.7.2 Résultats : choix du solvant de solubilisation du beurre de karité*. Les absorbances ont été mesurées à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible, du beurre en solution dans l'éthanol, à la concentration de 5 mg/mL.

Paramètres de performance à établir par variable y : R^2 (proche de 1) ; RMSE (la plus petite possible) ; Slope ; Bias (le plus faible possible) ; RPD.

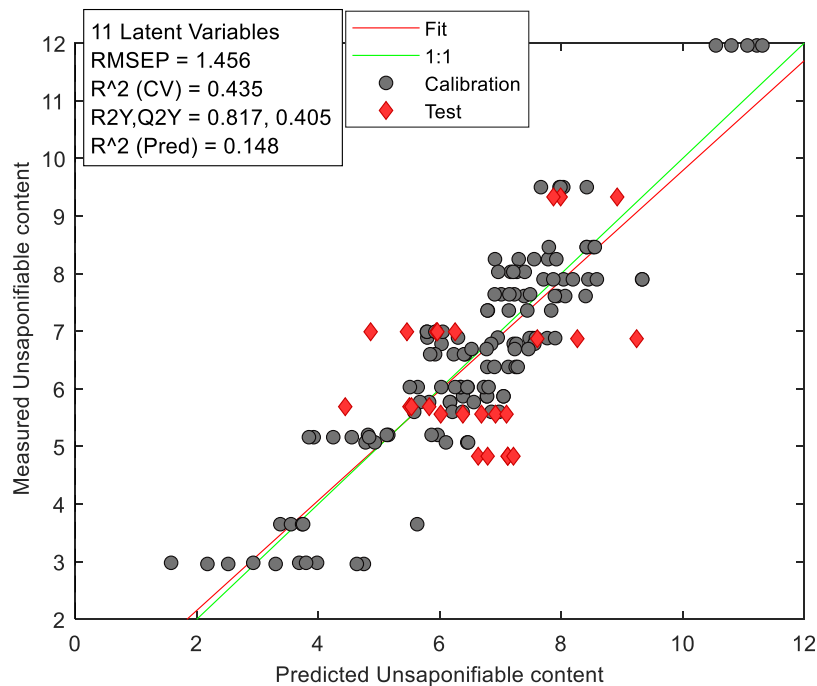


Figure P4: Modèle de prédiction de la teneur en matières insaponifiables

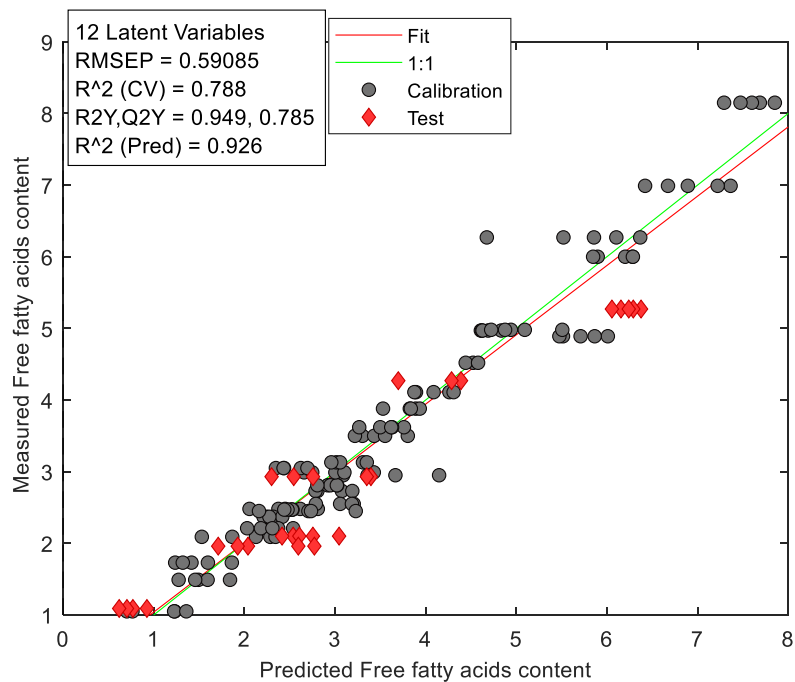


Figure P5 : Modèle de prédiction de la teneur en acides gras libres

Les résultats ont montré que les modèles de prédiction étaient dans la grande majorité peu performants, comme le montre la figure P4 pour la teneur en matières insaponifiables. Un seul modèle s'est montré performant, celui de la teneur en acides gras libres, figure P5.

1.5. Contraintes et pistes d'amélioration

- Taille d'échantillon limitée ;
- Qualité du matériel d'investigation : matières premières naturelles dont le procédé d'extraction est non maîtrisé et très variable ;
- Limite liée au plateau technique : Karl-Fisher pour la mesure de la teneur en eau ;
- Choix du matériel biologique de meilleure qualité ;
- Augmenter le nombre d'échantillons par type de procédé d'extraction, en utilisant les données spectrales pour les identifier ;
- Facteurs intrinsèques de la matière première, c'est-à-dire des amandes : origine, variété et qualité ;
- Représentativité des échantillons par procédés (échantillons du même procédé mais issus de saisons de production différentes, homogénéité de la taille des échantillons par procédé).

2. Essai d'évaluation du potentiel photoprotecteur sur modèle UVB

Il s'agissait pour cette étude de mettre au point un modèle expérimental d'évaluation du pouvoir de photoprotection UVA et UVB du beurre de karité sur des cellules humaines kératinocytes HaCaT.

2.1. Objectif

L'objectif était double :

- Induire une phototoxicité cellulaire expérimentale, mais réversible ;
- Appliquer le modèle expérimental au beurre de karité afin d'évaluer son effet de photoprotection.

2.2. Matériel utilisé

- Échantillon test de beurre brut de karité ;
- Lignées HaCaT ;
- Réactifs et consommables de laboratoire : MTS, tampon HBSS, plaques 96 puits, éthanol ;

- Dispositif d'irradiation expérimentale : Une seule Lampe UVB Broadband TL, TL 20W/12 RS SLV/25 de marque PHILIPS, émettant dans le domaine de l'UV B (290 à 315 nm).

2.3. Méthodologie

Distance microplaque - source lumineuse : entre 7 cm et 30 cm ;

Irradiation : 30 min et 60 min.

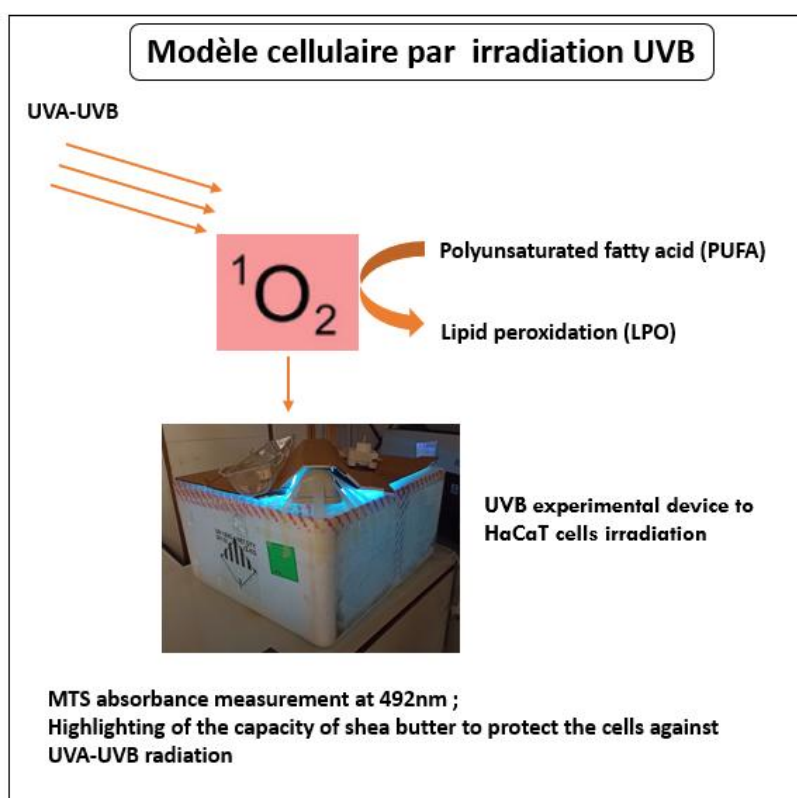


Figure P6 : Dispositif expérimental d'investigation cellulaire de la photoprotection directe sur modèle UVB

2.4. Synthèse des résultats

- Phototoxicité induite :

Les investigations réalisées n'ont pas permis d'atteindre l'objectif idéal de 30 – 40 % de mortalité cellulaire, mais une mortalité réversible. La répétabilité n'était pas non plus assurée d'un essai à l'autre. La figure P7 illustre un résultat obtenu lors des différents essais.

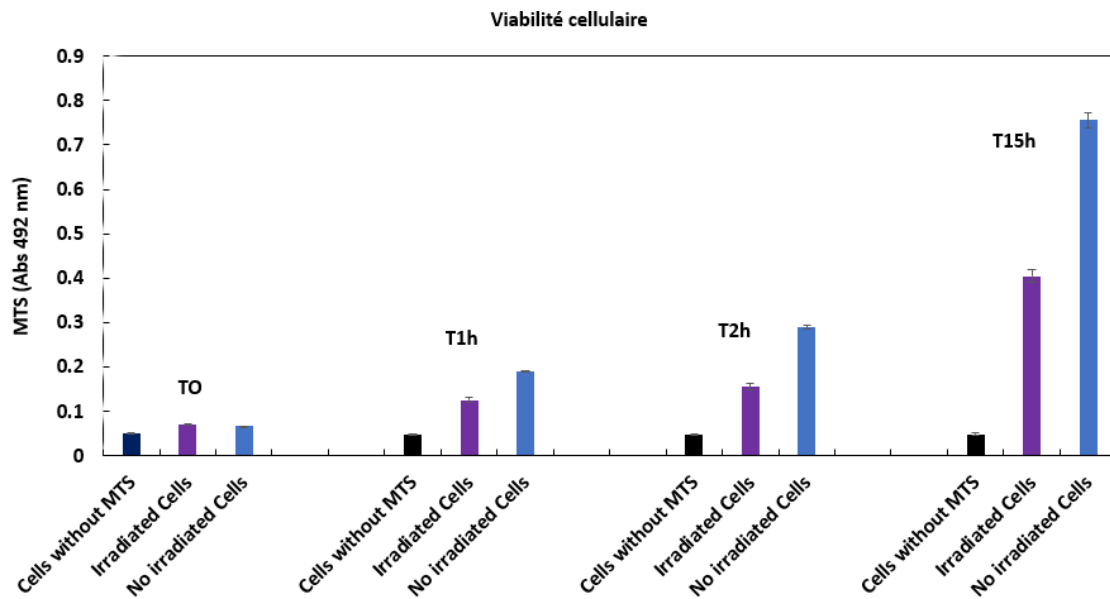


Figure P7 : Illustration de la viabilité cellulaire après irradiation cellulaire par la lampe UVB

- **2 constats :**

- Cellules contrôles non irradiées : Viabilité maximale, transformation du MTS en formazon, en fonction du temps ;
- Cellules contrôles irradiées : Mortalité cellulaire, en fonction du temps.

- **Application :**

Les différents essais n'ont pas permis d'obtenir des résultats répétables, à l'image des expérimentations de phototoxicité induite.

2.5. Contraintes et pistes d'amélioration

- Limite du plateau technique : non-maîtrise de l'intensité lumineuse irradiante (absence de dosimètre) ;
- Au mieux disposer d'une enceinte spécifique UVA-UVB pouvant délivrer des puissances de l'ordre de 500 W ;
- Ou au mieux, disposer d'au moins 4 à 10 lampes UVB.

Résumé/Abstract

RÉSUMÉ

Le beurre de karité est connu pour ses propriétés agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques, dont la présente thèse vise à mettre en évidence, particulièrement le potentiel photoprotecteur.

Les propriétés physicochimiques et thermiques ont été mises en évidence selon des méthodes normalisées, les analyses biochimiques par GC/FID, GC/MS, HPLC et SPME-GC/MS et le facteur de protection solaire (FPS) *in vitro*. La capacité à piéger l'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$) après irradiation du Rose Bengal (RB) sur modèles acellulaire et cellulaire a été investiguée pour évaluer le potentiel photoprotecteur

Les 37 échantillons collectés ont mis en évidence des propriétés physicochimiques très variables, indépendamment du procédé d'extraction et de l'origine du beurre. Le comportement thermique, et la teneur en matière grasse solide étaient fonction des propriétés physicochimiques et de la teneur en acides gras. Les composés polaires avaient une activité antioxydante DPPH modérée et ABTS forte, avec une teneur en polyphénols totaux entre 14,16 et 82,99 ppm équivalent pyrogallol. Il a été démontré la capacité dose-dépendante du beurre brut et de sa fraction polaire à piéger l' $^1\text{O}_2$ en milieu acellulaire et cellulaire mettant en évidence l'effet photoprotecteur direct et indirect.

Le beurre de karité et sa fraction polaire agissent comme piègeurs des radicaux libres contre l' $^1\text{O}_2$.

Mots clés : Beurre de karité . Procédés d'extraction . Antioxydant . Oxygène singulet . Photoprotection . HaCaT. Burkina Faso.

ABSTRACT

Shea butter is known for its many properties in food, cosmetics, and pharmaceuticals, and this paper aims to highlight its photoprotective potential.

Official methods were used to perform the physicochemical and thermal characteristics, biochemical analyses by GC/FID, GC/MS, HPLC, and SPME-GC/MS, and the sun protection factor (SPF) was assessed *in vitro*. The photoprotective potential was investigated to establish the ability to quench singlet oxygen ($^1\text{O}_2$) produced by Rose Bengal (RB) photosensitization on acellular and cellular models.

The 37 samples showed great diversity of physicochemical properties, regardless of the extraction process and the origin of the butter. The thermal behavior and solid fat content are related to physicochemical characteristics and fatty acid content. Polar compounds showed moderate DPPH and strong ABTS antioxidant activities, with total polyphenol content ranging from 14.16 to 82.99 ppm pyrogallol equivalent. Results highlighted that shea butters and their polar compounds behave as $^1\text{O}_2$ quenchers in a dose-dependent manner, according to acellular and cellular media.

Shea butters and their polar extracts act as free radical scavengers against $^1\text{O}_2$, exhibiting direct and indirect photoprotective properties.

Keywords: Shea butter . Extraction process . Antioxidant . Singlet oxygen . Photoprotection . HaCaT . Burkina Faso

PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

1. Communications orales

Communication orale 1 : Études préliminaires des procédés d'extraction du beurre de karité et des propriétés physico-chimiques de sa fraction insaponifiable

B. Goumbri ; I. T. Somé ; R.D Marini ; G. Purcaro ; S. Danthine

1er Congrès International de la Société Ouest Africaine de Pharmacie Galénique et Industrielle (SOAPGI). Abidjan. Côte d'Ivoire ; 11/2019.

Communication orale 2 : Procédés d'extraction et qualité physicochimique du beurre de karité du Burkina Faso utilisé comme matière première pharmaceutique et agroalimentaire

W. B. Goumbri. I. T. Somé ; R. Semdé ; J. Yaméogo ; R.D Marini ; S. Danthine

2^{ème} Congrès SOAPGI. 11/2021. Ouagadougou. Burkina Faso.

Communication orale 3 : *In vitro* determination of the sun protection factor of crude shea butter produced by different processes in Burkina Faso

Bertrand W. F. Goumbri · Roland D. Marini · Rasmané Semdé · Touridomon Issa Somé · Sabine Danthine

In CIRM Day 02/22. ULiège. Belgium.

Communication orale 4 : Effet antioxydant et capacité quenching de l'oxygène singulet du beurre de karité et de sa fraction phénolique

Bertrand W. F. Goumbri · Olivia Jansen · Roland D. Marini · Michel Frederich · Rasmané Semdé · Touridomon Issa Somé · Sabine Danthine · Ange Mouithys-Mickalad

3^{ème} Congrès SOAPGI. 11/2023. Abidjan. Côte d'Ivoire.

2. Posters

Poster 1: Évaluation of some quality parameters of crude shea butter produced in Burkina Faso

Goumbri B., Somé I. T., Marini R.D., Purcaro G., Danthine S.

In the 25th National Symposium for Applied Biological Sciences, 01/20, Gembloux, Belgium

Poster 2: *In vitro* determination of the sun protection factor of crude shea butter obtained from different procédés in Burkina Faso

Bertrand W. F. Goumbri1 · Roland D. Marini · Rasmané Semdé · Touridomon Issa Somé · Sabine Danthine

In CIRM Day 02/22, ULiège, Belgium

Poster 3: Évaluation of some quality parameters of crude shea butter produced in Burkina Faso

Goumbri B., Somé I. T., Marini R.D., Purcaro G., Danthine S.

In CIRM Day 02/20, ULiège, Belgium

3. Articles scientifiques

Article 1: African Shea Butter Properties Related to Common Extraction Technologies: A Review

Bertrand W. F. Goumbri · Thais Lomonaco Teodoro da Silva · Roland D. Marini · Rasmané Semdé · Touridomon Issa Somé · Sabine Danthine

In **Food and Bioprocess Technology**. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02708-w>

Article 2: Quality Characteristics and Thermal Behavior Diversity of Traditional Crude Shea (*Vitellaria paradoxa* Gaertn) Butter from Burkina Faso

Bertrand W. F. Goumbri · Alfred Kouakou Kouassi · Roland Marini Djang'eing'a · Rasmané Semdé · Ange Mouithys-Mickalad · Abdoul Karim Sakira · Gérard B. Josias Yaméogo · Touridomon Issa Somé · Sabine Danthine

In **Food Biophysics**. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09865-3>

Article 3: Effects of Crude Shea Butters and Their Polar Extracts on Singlet Oxygen Quenching and Against Rose Bengal-Induced HaCaT Cell Phototoxicity

Bertrand W. F. Goumbri. Olivia Jansen. Roland Marini Djang'eing'a. Michel Frederich. Rasmané Semdé. Touridomon Issa Somé. Sabine Danthine and Ange Mouithys-Mickalad

In **Molecules**. <https://doi.org/10.3390/molecules30061360>.

Article 1: Revue scientifique

Food and Bioprocess Technology (2022) 15:231–248
https://doi.org/10.1007/s11947-021-02708-w

REVIEW



African Shea Butter Properties Related to Common Extraction Technologies: A Review

Bertrand W. F. Goumbri^{1,2,3,4} · Thais Lomonaco Teodoro da Silva¹ · Roland D. Marini² · Rasmané Semdé⁴ · Touridomon Issa Somé³ · Sabine Danthine¹

Received: 18 June 2021 / Accepted: 7 September 2021 / Published online: 22 September 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2021

Abstract

Shea butter is an important lipid material for food, cosmetic, and pharmaceutical industries. Most of the shea butter consumed in the world comes from Africa. The extraction protocol is not standardized among all regions of production. It can be done using either traditional or improved (semi-mechanical) processes. The quality of shea butter and its composition depend on multiple factors such as the edaphic parameters, morphology and harvesting method of the fruits, and treatment applied to fruits, nuts, and kernels, respectively. In this paper, all traditional and improved extraction processes reported, including the enormous possible variants, were reviewed and summarized. Several optimal conditions have been defined for both the traditional and the modern processes. Nevertheless, we are far from process harmonization, and therefore from the best conditions of shea butter processing. The screw press extraction was the most widely used among the modern processes due to its yield of butter extraction of about 82%. Microwave-assisted extraction gave the highest butter yield, 88%, and traditional shea butter extraction was about 20–35%.

Keywords Shea butter · Extraction process · Traditional extraction · Semi-mechanical extraction

Abbreviations

A	Arachidic
CB	Cocoa butter
CBE	Cocoa butter equivalent
DAG	Diacylglycerols
FA	Fatty acid
FFA	Free fatty acids
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy

ICCO Cooperation	Stichting Interkerkelijke Organisatie voor Ontwikkelingssamenwerking
IV	Iodine value
L	Linoleic
Ln	Linolenic
NBF	Norme sur le beurre de karité non raffiné
O	Oleic
P	Palmitic
PV	Peroxide value
St	Stearic
SB	Shea butter
StOst	Stearic-oleic-stearic triacylglycerols
SSS	Saturated-saturated-saturated triacylglycerols
SUS	Saturated-unsaturated-saturated triacylglycerols
SUU	Saturated-unsaturated-unsaturated triacylglycerols
TAGs	Triacylglycerols
TUTM	Testometric Universal Testing Machine
UTM	Universal testing machine
UV	Ultra-violet

Bertrand W.F. Goumbri and Thais Lomonaco Teodoro da Silva contributed equally to this paper.

✉ Bertrand W. F. Goumbri
bertrand.bribera@gmail.combertrand.bribera

- ¹ Science des Aliments et Formulation, Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège, 5030 Gembloux, Belgium
- ² Laboratoire de Chimie Analytique Pharmaceutique, CIRM, ULiège, 4000 Liège, Belgium
- ³ Laboratoire de Toxicologie Environnement Et Santé, Université Joseph Ki-Zerbo, 7021 Ouagadougou, Burkina Faso
- ⁴ Centre d'Excellence Africain de Formation, de Recherche et d'Expertises en Sciences du Médicament (CEA-CFOREM), Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou, Burkina Faso



Quality Characteristics and Thermal Behavior Diversity of Traditional Crude Shea (*Vitellaria paradoxa Gaertn*) Butter from Burkina Faso

Bertrand W. F. Goumbri^{1,2,3,4} · Alfred Kouakou Kouassi¹ · Roland Marini Djang'eing'a² · Rasmané Semdé⁴ · Ange Mouithys-Mickalad⁵ · Abdoul Karim Sakira³ · Gérard B. Josias Yaméogo⁴ · Touridomon Issa Somé³ · Sabine Danthine¹

Received: 19 March 2024 / Accepted: 12 July 2024

© The Author(s), under exclusive licence to Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2024

Abstract

The aim of this study was to establish a comparative analysis of the physicochemical and the thermal behavior by *p*-NMR for solid fat content (SFC), and differential scanning calorimetry (DSC) of shea butter (SB) from Burkina Faso, related to different traditional extraction processes. Thirty-seven samples obtained from different localities were collected from local producers and analyzed for chemical indexes, unsaponifiable matter content (UMC), color, yellow index, fatty acids (FA) profile, and thermal behavior. Results showed that stearic acid (34%–47.2%) and oleic acid (40.8%–51%) were the most abundant FA. Chemical quality variations among those samples were observed: UMC (3.0%±1.0%–12.0%±0.1%), peroxide value (4.6±0.1 to 44.5±0.2 meqO₂/kg), iodine value by GC (50.5 to 64.2), free fatty acids (1.1%± 0.1%–9.7%±0.1%). Statistically significant relationships were observed between thermal properties and chemical parameters. The results were subjected to clustering and principal component analysis (PCA). Results showed that a great diversity exists among crude shea butter samples from Burkina Faso which is due to both regional variation and difference in extraction processes. A standardization of the process could help to improve the quality.

Keywords Shea butter · Extraction process · Solid fat content · Differential scanning calorimetry · Chemical quality · Burkina Faso

Abbreviations And Acronyms

AV Acid value

CA Clusters analysis

CBE Cocoa butter equivalent

C18 0:Stearic fatty acid

C18 1:Oleic fatty acid

DAG Diacylglycerols

DSC Differential scanning calorimetry

FA Fatty acid

FAME Fatty acids methyl ester

FFA Free fatty acid

GC Gas chromatography

Hf Enthalpy of fusion

IV Iodine value

K Specific extinction

PC Principal components

PV Peroxide value

p-NMR Pulsed nuclear magnetic resonance

SB Shea butter

SFC Solid fat content

TAG Triacylglycerols

UMC Unsaponifiable matter content

UV Ultraviolet

✉ Bertrand W. F. Goumbri
bertrand.bribera@gmail.com

¹ Science des Aliments et Formulation, Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège, Gembloux 5030, Belgium

² Laboratoire de Chimie Analytique Pharmaceutique, CIRM, ULiège, Liège 4000, Belgium

³ Laboratoire de Toxicologie Environnement et Santé, Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou 7021, Burkina Faso

⁴ Centre d'Excellence Africain de Formation, de Recherche et d'Expertises en Sciences du Médicament, Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou, Burkina Faso

⁵ Centre de l'Oxygène R&D, CO2RD, CIRM, ULiège, Liège 4000, Belgium

Article

Effects of Crude Shea Butters and Their Polar Extracts on Singlet Oxygen Quenching and Against Rose Bengal-Induced HaCaT Cell Phototoxicity

Bertrand W. F. Goumbri ^{1,†}, Olivia Jansen ^{2,†}, Roland Marini Djang'eing'a ³, Michel Frederich ², Rasmané Semdé ⁴, Touridomon Issa Somé ⁵, Sabine Danthine ⁶ and Ange Mouithys-Mickalad ^{7,*}

- ¹ Laboratoire de Recherche-Développement de Phytomédicaments et Médicaments, Institut de Recherche en Science de la Santé (IRSS/CNRST), Ouagadougou 7047, Burkina Faso; bertrand.bribera@gmail.com
- ² Laboratory of Pharmacognosy, Department of Pharmacy, Center of Interdisciplinary Research on Medicines (CIRM), University of Liege, 4000 Liege, Belgium; m.frederich@uliege.be (M.F.)
- ³ Laboratory of Pharmaceutical Analytical Chemistry (LPAC), Department of Pharmacy, Center of Interdisciplinary Research on Medicines (CIRM), University of Liege, 4000 Liege, Belgium; rmarini@uliege.be
- ⁴ Centre d'Excellence Africain de Formation, de Recherche et d'Expertises en Sciences du Médicament (CEA-CFOREM), Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou 7021, Burkina Faso; rsemde@yahoo.fr
- ⁵ Laboratoire de Toxicologie, Environnement et Santé, Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou 7021, Burkina Faso; ti_some@yahoo.fr
- ⁶ Faculty of Gembloux Agro-Bio Tech, Food Science and Formulation, University of Liege, 5030 Gembloux, Belgium; sabine.danthine@uliege.be
- ⁷ Centre for Oxygen Research and Development (CO₂RD), Center of Interdisciplinary Research on Medicines (CIRM), University of Liege, 4000 Liege, Belgium
- * Correspondence: amouithys@uliege.be
- [†] These authors contributed equally to this work.

Academic Editors: Felipe Ascencio and Norma Hernández-Saavedra

Received: 15 February 2025

Revised: 11 March 2025

Accepted: 14 March 2025

Published: 18 March 2025

Citation: Goumbri, B.W.F.; Jansen, O.; Djang'eing'a, R.M.; Frederich, M.; Semdé, R.; Somé, T.I.; Danthine, S.; Mouithys-Mickalad, A. Effects of Crude Shea Butters and Their Polar Extracts on Singlet Oxygen Quenching and Against Rose Bengal-Induced HaCaT Cell Phototoxicity. *Molecules* **2025**, *30*, 1360. <https://doi.org/10.3390/molecules30061360>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Shea butter (SB) is a raw material fat obtained from *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn kernels. We investigated the direct and indirect protective effects of 10 traditional and industrial SBs and their polar extracts on cell-free systems using ABTS and DPPH radical scavenging assays as well as on singlet oxygen (¹O₂) produced by Rose Bengal (RB) photosensitization. Their effects against RB-induced HaCaT cell phototoxicity were also explored. A spectrophotometric assay and HPLC were performed to quantify and identify phenolic content, which was between 14.16 and 82.99 ppm pyrogallol equivalent. These variations could be due to the SB origin and extraction process. These polar fractions exhibited moderate DPPH and strong ABTS radical-scavenging activity. By applying the UV-visible technique, we demonstrated that SBs and their phenolic compounds behave as ¹O₂ quenchers in a dose-dependent manner. Moreover, using a UVR-like model after the irradiation of RB, both polar extracts and crude SB exhibited photoprotective effects, highlighting the indirect protective action. In acellular and cellular models, SB and its polar extracts can act as a free radical scavenger against reactive oxygen species and ¹O₂ quenchers. Due to the maximum absorbance of SB at 280 nm and the antioxidant effect of ¹O₂ quenching, SB polar extracts exhibit photoprotective properties.

Keywords: shea butter; phenol; antioxidant; singlet oxygen; photoprotection; HaCaT

1. Introduction

Solar ultraviolet radiation (UVR) induces skin damage, photoaging, and photosensitivity disorders [1]. There are three categories of UVR according to wavelength: long-